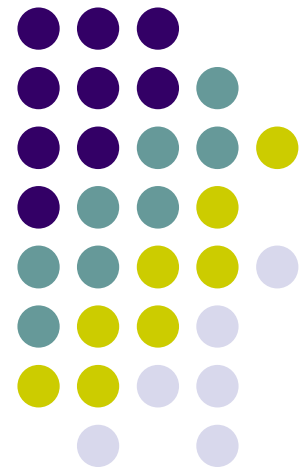
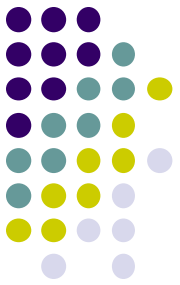


Основы проектирования и конструирования

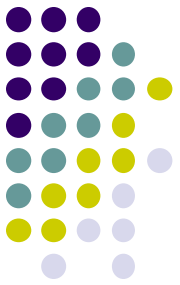


Основные понятия



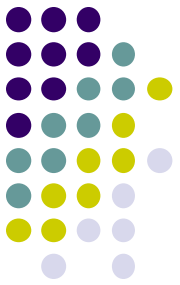
- **Общий процесс проектирования РЭС (Жизненный цикл изделия) «разработка-производство-эксплуатация» :**
системотехническое проектирование - схемотехническое проектирование - конструкторское проектирование - технологическое проектирование - производство – эксплуатация
- **Конструирование** – процесс поиска, нахождения и отражения в конструкторской документации формы, размеров и состава изделия, взаимного расположения частей и связей между ними, указаний на технологию изготовления с целью обеспечения производства изделия с заданными свойствами при наименьшей трудоемкости изготовления.
- **Технология производства**, или технологический процесс – основная часть заключающаяся в выполнении определенных действий, направленных на изменение исходных свойств объекта производства и достижение им определенного состояния, соответствующего технической (конструкторской) документации.

Основные понятия



- **РЭС** – изделия, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и радиоэлектроники.
- **Радиоаппаратура** – аппаратура, используемая для связи.
- **Радиотехническая аппаратура** – аппаратура, используемая для обнаружения целей, наведения и навигации и т.д.
- **Электронная аппаратура** – аппаратура, в которой передача и преобразование информации осуществляется методами электроники.
- **Радиоэлектронная аппаратура (РЭА)** – аппаратура в которой прием, обработка, хранение и передача информации осуществляется методами радиотехники и электроники.

Основные понятия



Конструкция – совокупность деталей с разными физическими свойствами и формами, находящихся в определённой пространственной, механической, тепловой, магнитной и энергетической взаимосвязи, обеспечивающих выполнение заданных функций с необходимой точностью и надёжностью в условиях как внешних воздействий, так и внутренних помех, создаваемых элементами РЭС и воспроизводимая в условиях производства

Конструкция определяет взаимное расположение частей в пространстве, способы их соединения, характер взаимодействия, а также материал из которого они изготовлены.

Конструкция характеризует структуру и свойства изделия, под которым понимается любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии

Виды изделий

ГОСТ 2.101-2016 (СТ СЭВ 364-76)



Изделие - любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

- **изделия основного производства** – это изделия, предназначенные для поставки (иначе говоря, для реализации)
- **изделия вспомогательного производства** - изделия, предназначенные только для собственных нужд предприятия-изготовителя.

Виды изделий:

- **деталь** - изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций;
- **сборочная единица** - изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями;
- **комплекс** - два и более изделий (состоящих, в свою очередь, из двух и более частей), не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;
- **комплект** - два и более изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.

Связи в РЭС

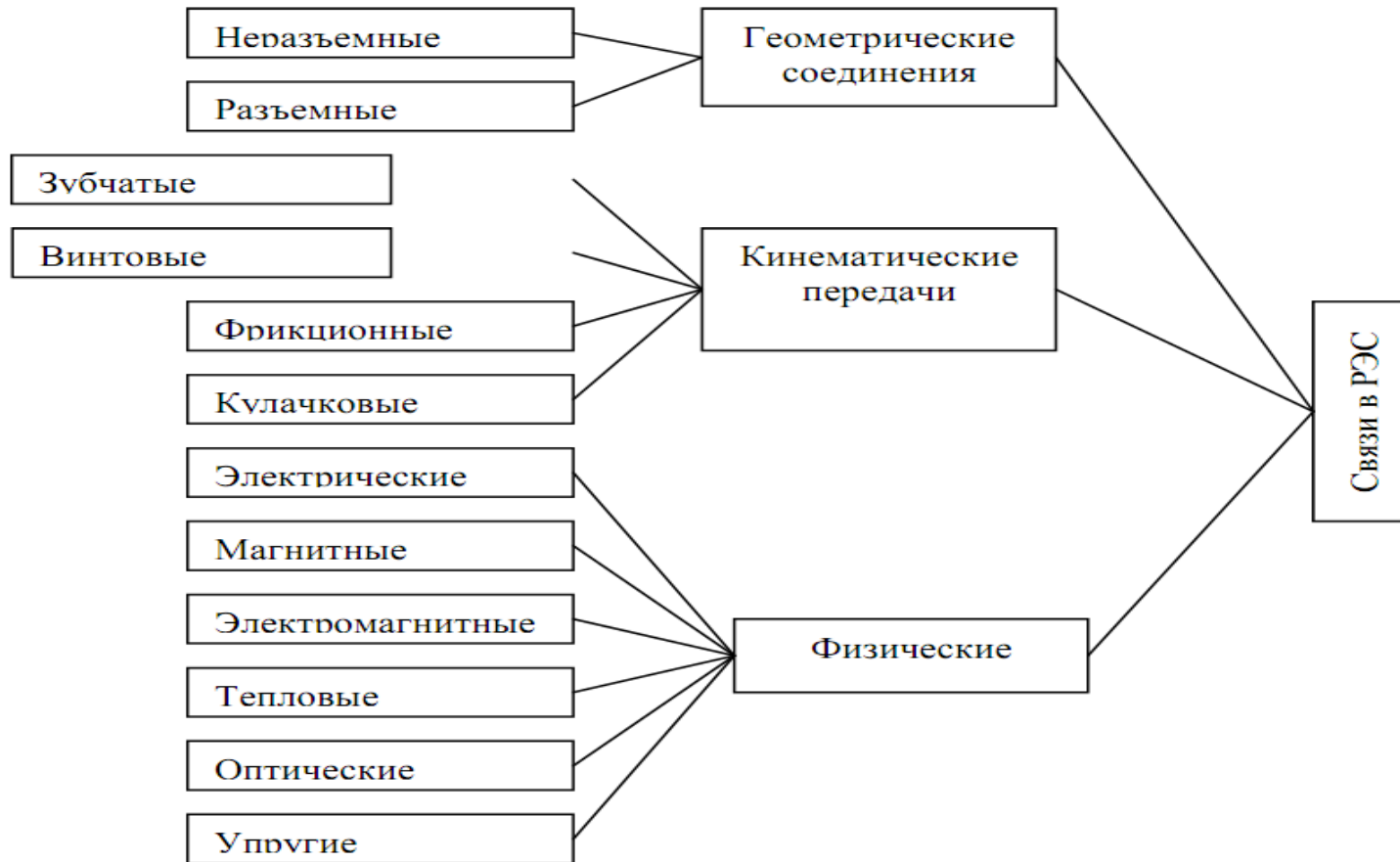
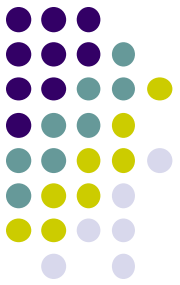
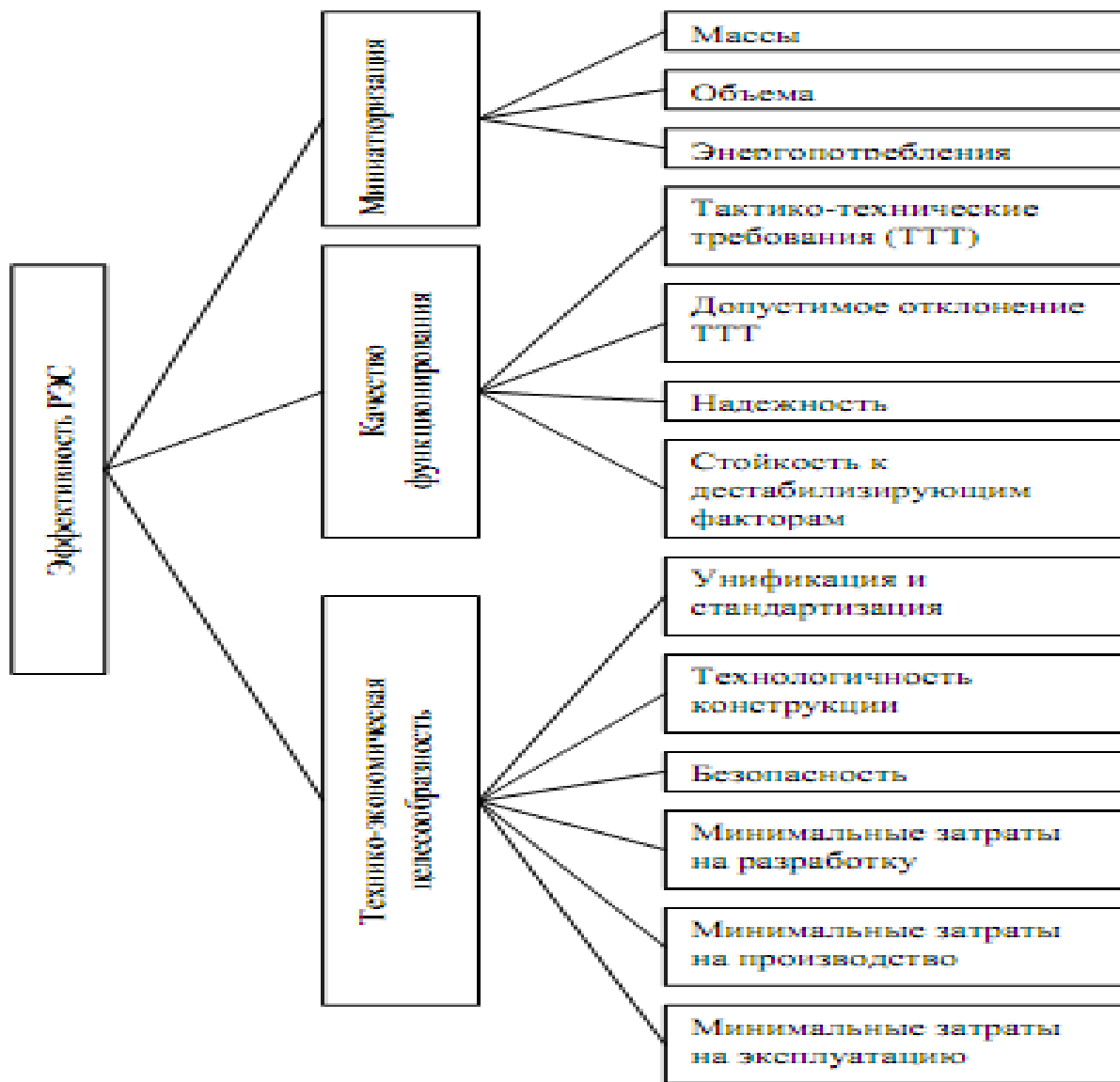


Схема разработки эффективных РЭС



Эволюция конструкций РЭС



Поколение РЭС — совокупность функциональных, конструктивных и технологических показателей определенного вида изделий, разработанных с использованием новых научно-технических достижений в течение определенного временного интервала

Конструкторско-технологические показатели РЭС II – V поколений



Показатель	Поколение РЭС				
	I	II	III	IV	V
Элементная база	Электроввакуумные лампы	Полупроводниковые приборы, миниатюрные ЭРЭ	Интегральные схемы малой степени интеграции (ИС1 и ИС2)	БИС СБИС микрополосковые линии, бескорпусные элементы	Большие гибридные микросборки, БИС, СБИС и ИФЭ
Степень интеграции изделий	Дискретные элементы	Дискретные элементы	$10^1 \dots 10^2$	$10^3 \dots 10^4$	$10^5 \dots 10^6$
Метод конструирования	Функционально-узловой			Функционально-модульный	
Монтаж	Объемный провод	Одно- и двухсторонний печатный монтаж	Многослойный печатный монтаж	Шлейфовый и многослойный печатный монтаж	Многослойный
Конструкция блока	Блочная конструкция определенного назначения	горизонтальные и вертикальные шасси, модульные конструкции	С ячейками разъёмной или книжной конструкции	С ячейками разъёмной или книжной конструкции, в том числе герметичные	

Поколение I (1920-1950г)

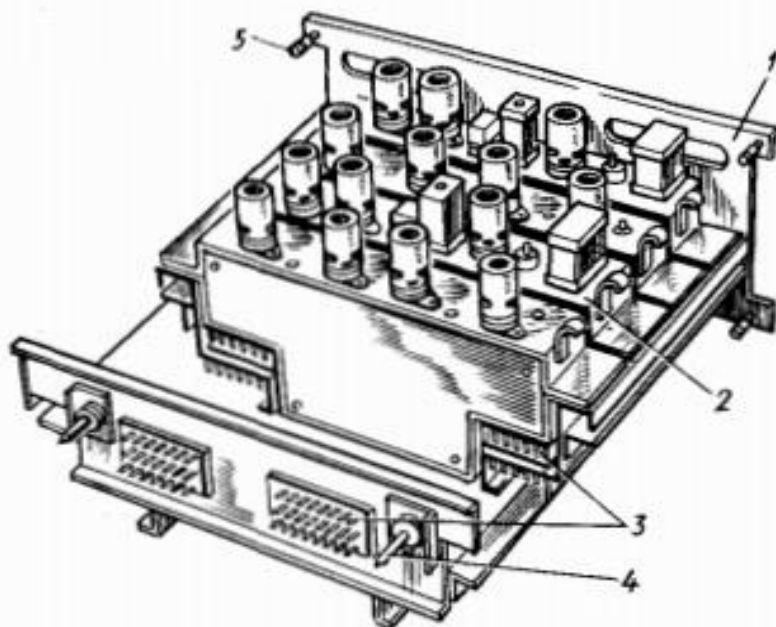
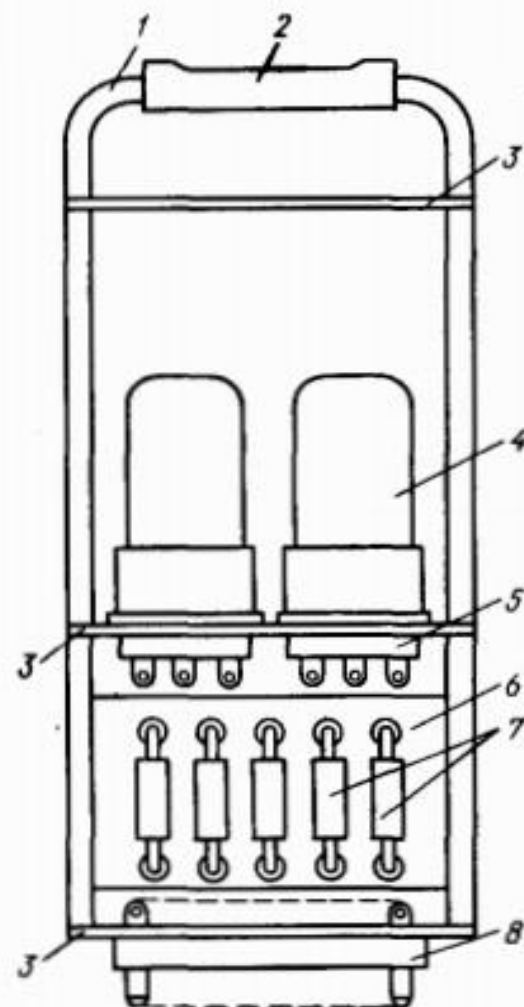


Рис. В.2. Конструкции РЭС первого поколения:

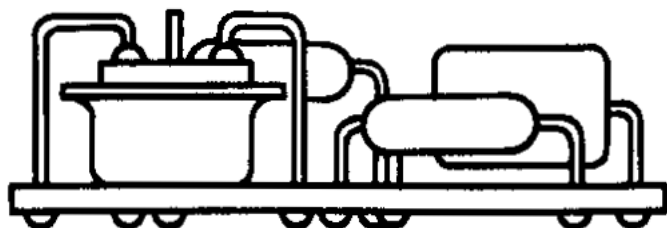
1—основание с передней и задней панелью; 2—функциональные модули с электровакуумными лампами; 3—разъемные соединители для подключения модулей и внешних связей; 4—направляющие штыри; 5—винты крепления блока в стойке

Рис. В.3. Компоновка ячейки аналоговой ЭВМ первого поколения:

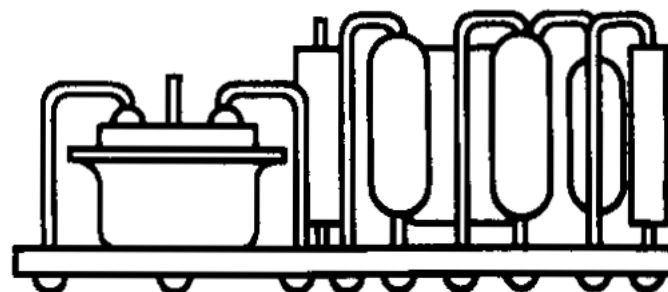
1—рамка; 2—ручка; 3—поперечины; 4—электровакуумные лампы; 5—ламповая панелька; 6—печатная плата; 7—ЭРЭ; 8—соединитель с плоскими контактами



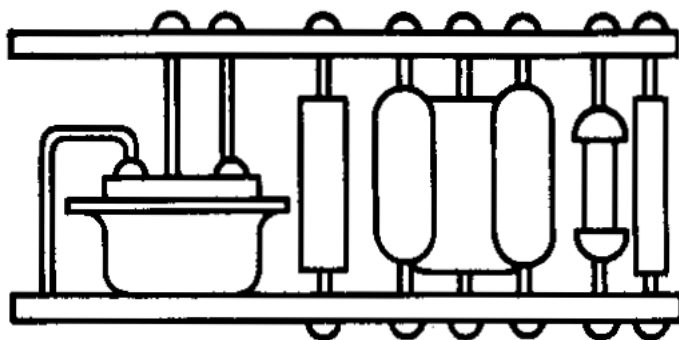
Поколение II (1950-1960г)



a)



б)



в)

Рис. В.4. Компоновочные
схемы модулей на печат-
ных платах:

a — горизонтальное, *б* — вер-
тикальное, *в* — этажерочное
расположение деталей между
платами

Поколение II (1950-1960г)

(продолжение)

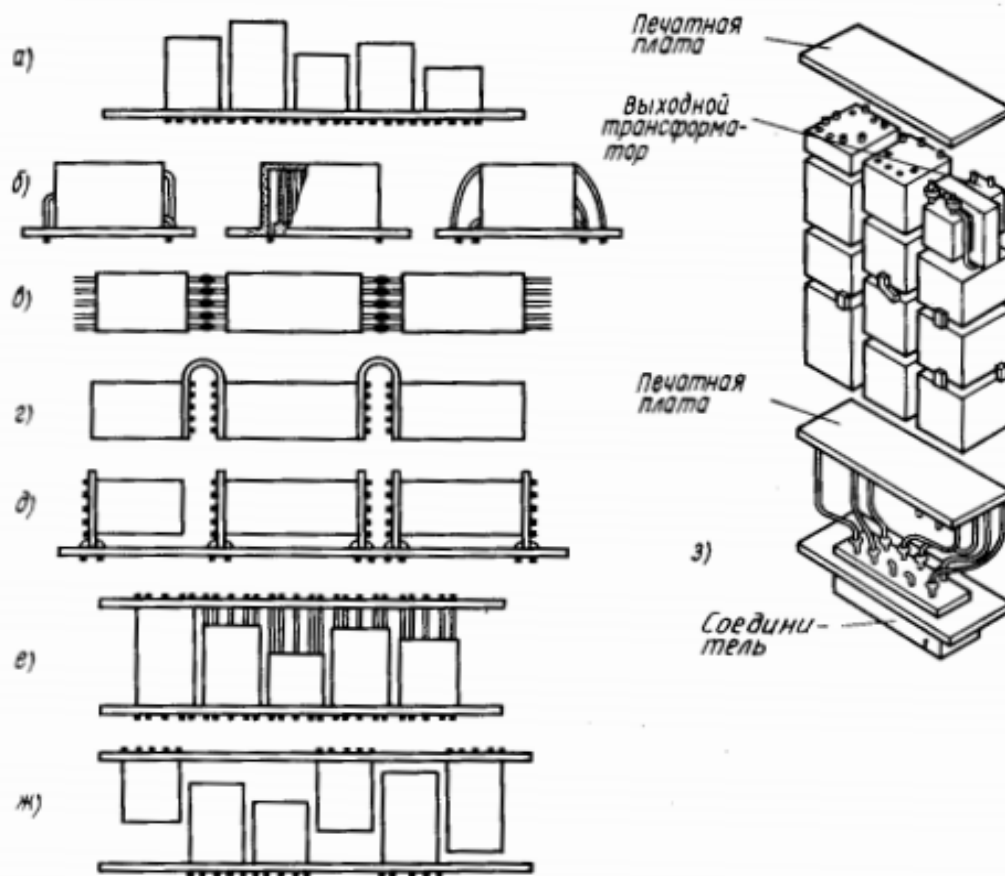
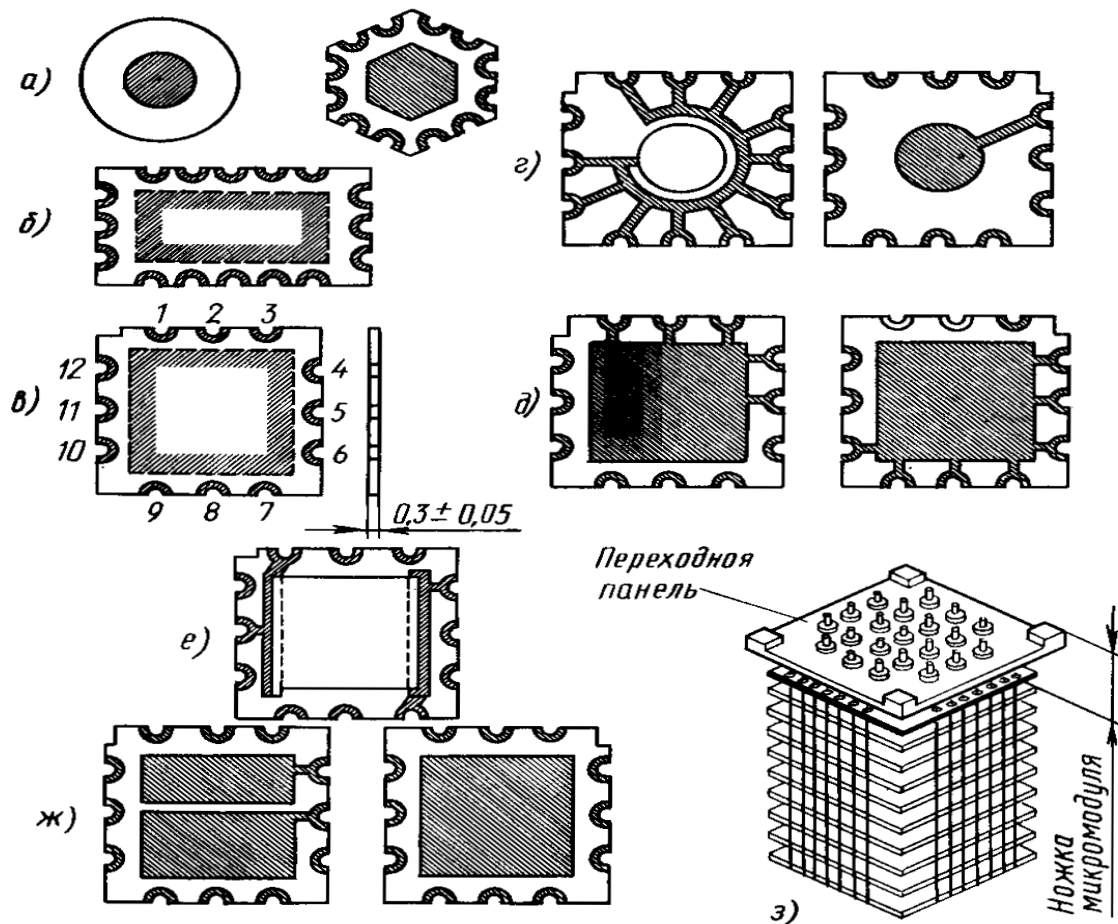


Рис. В.8. Варианты компоновки этажерочных микромодулей:

а—вертикальная; б—горизонтальная; в—«встык»; г—с использованием промежуточного монтажа; д—с торцовыми переходными печатными платами; е—двухплатная; ж—двухплатная с односторонним подключением модулей; з—компоновка приемника на этажерочных микромодулях

Поколение II (1950-1960г) (продолжение)



5. Характерная форма микроплат (а—в), примеры плат-полуфабрикатов —ж), этажерочный микро модуль с 28 ленточными соединениями (з)

Поколение II (1950-1960г)

(продолжение)

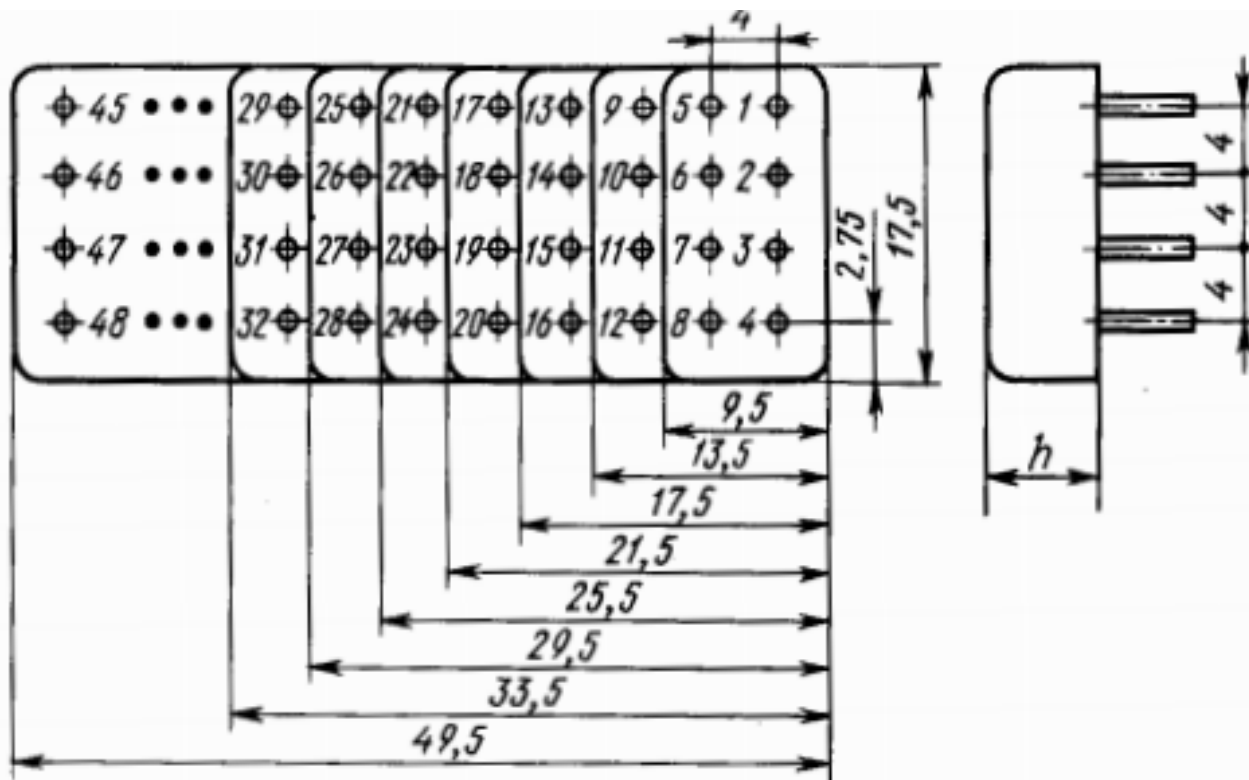
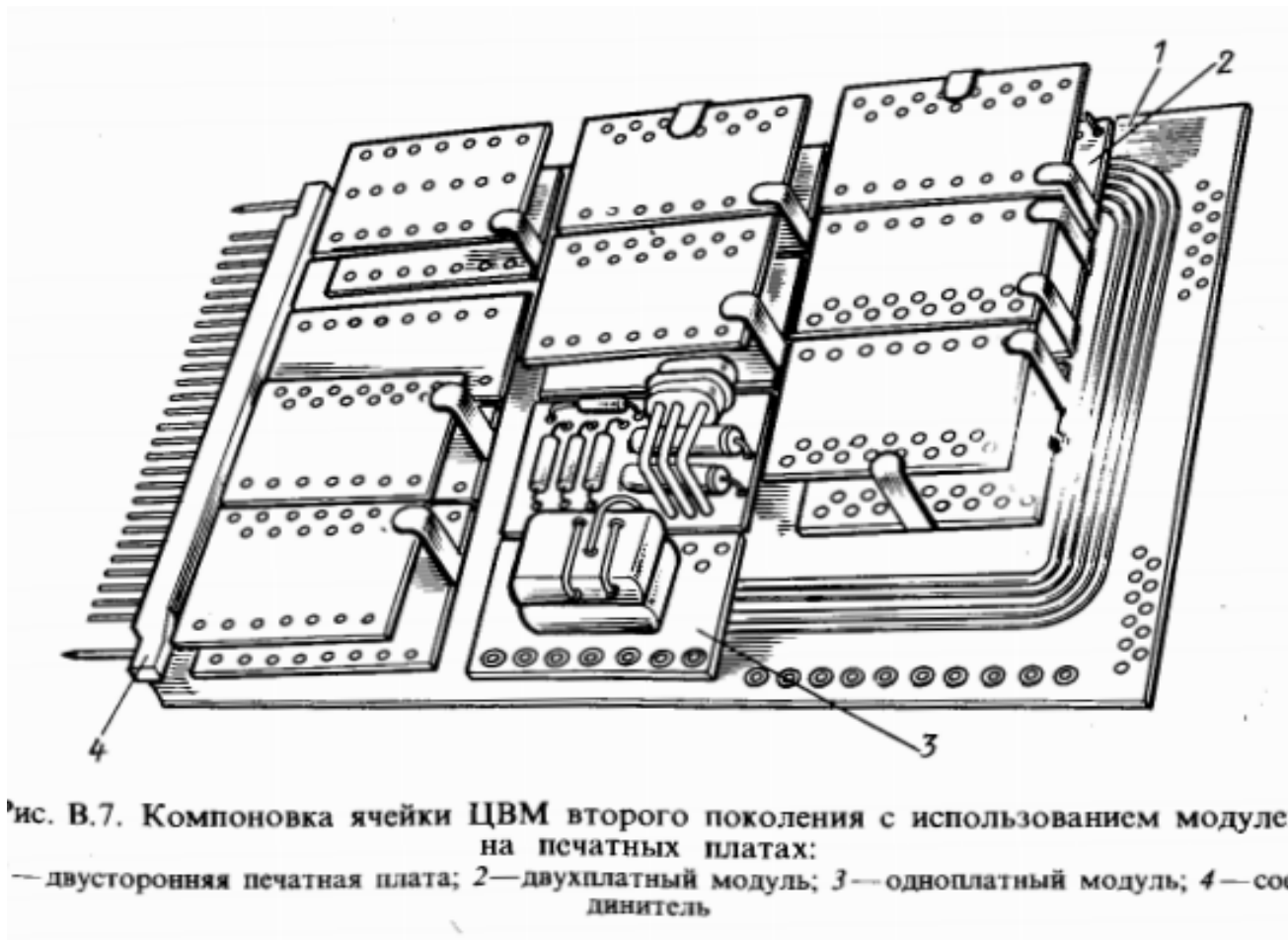


Рис. В.6. Унификация размеров плоских модулей ($h=3,5...10,5$ мм)

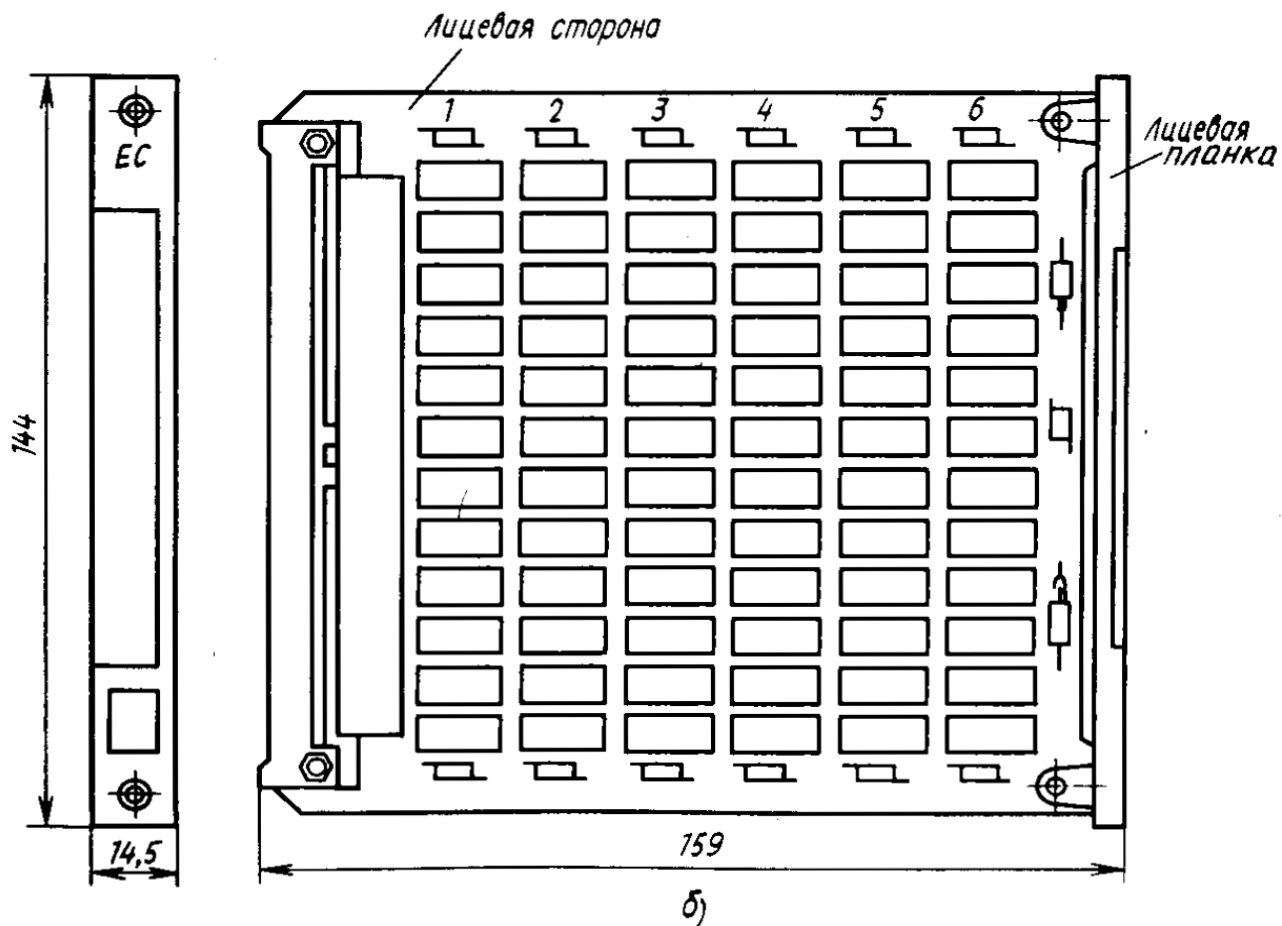


40

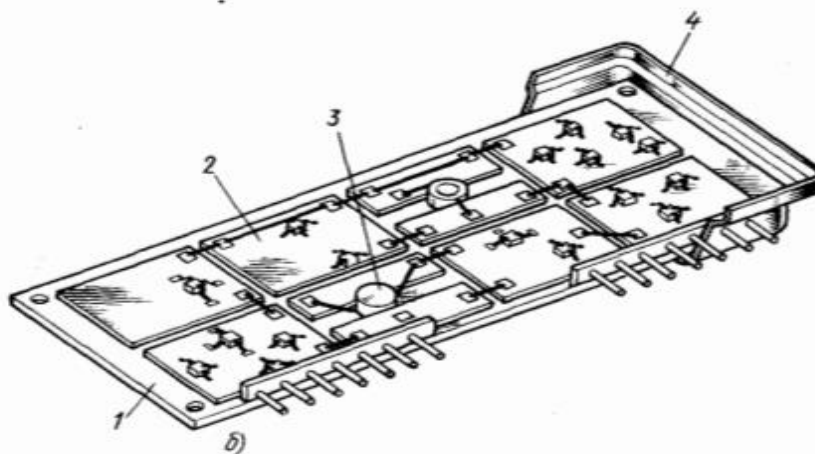
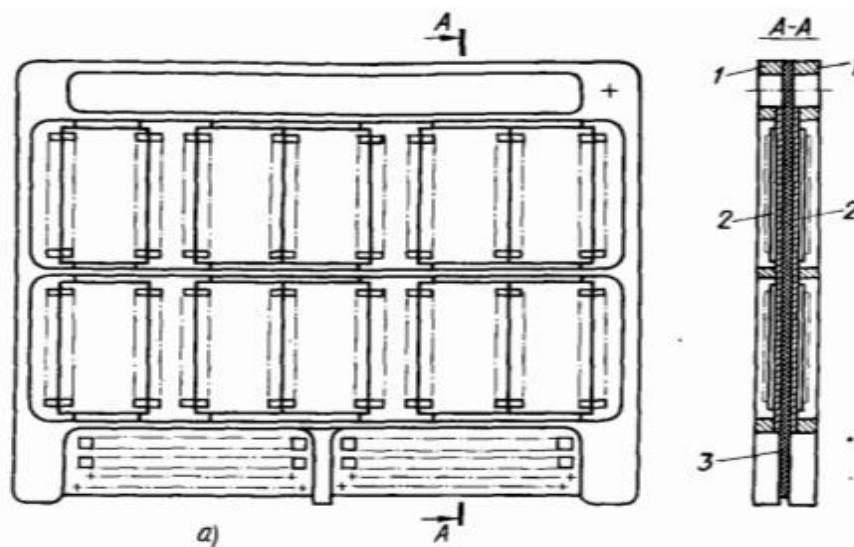
Поколение II (1950-1960г) (продолжение)



Поколение III (1960-1970г)



Поколение IV (1970 – 1980...)



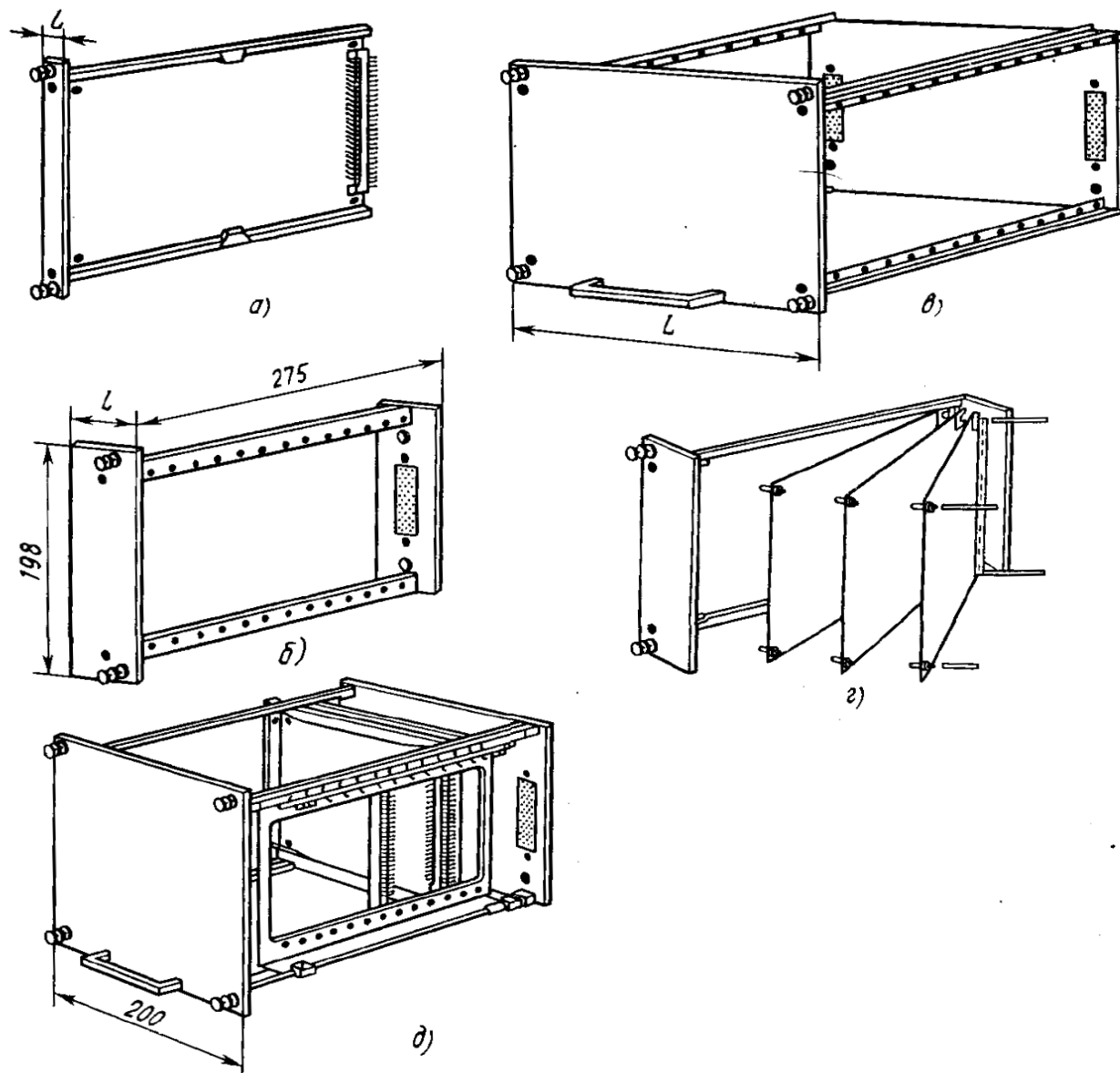
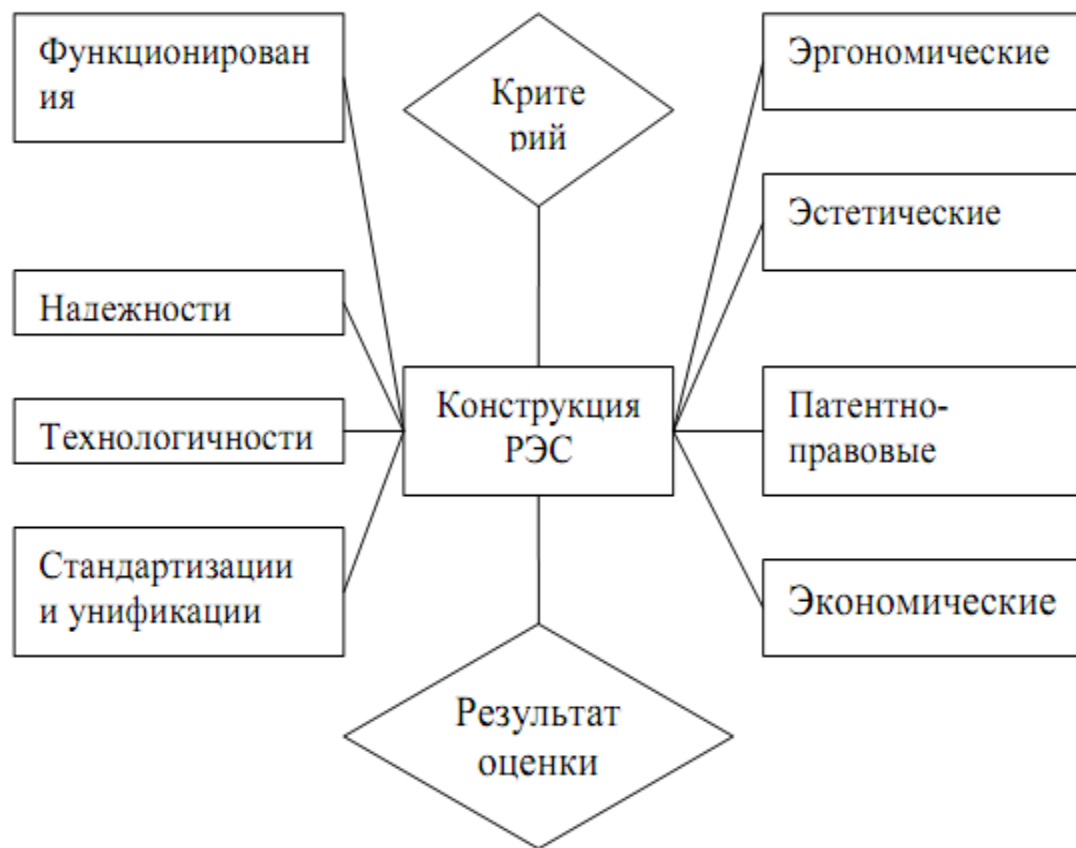


Рис. 1.12. Схема конструкций частичных корпусов:
 а — для размещения одной платы; б, в — для крупногабаритных ЭРЭ и источников питания;
 г — для «книжной компоновки»; д — для «разъемной» компоновки (платы вставляются сбоку)

Связь конструкции РЭС с показателями качества



Показатели качества РЭС



Функционирование, характеризующее полезный эффект от использования РЭС по назначению и область их применения

Надёжность, определяющая свойство РЭС сохранять свою работоспособность во времени

Технологичность, характеризующая эффективность конструкторско-технологических решений для обеспечения минимальных затрат при проектировании, производстве, эксплуатации и ремонте

Стандартизация и унификация, характеризующие степень использования в РЭС стандартизованных изделий и уровень унификации их составных частей



Эргономические, характеризующие систему «человек-изделие-среда» и учитывающие комплекс антропологических, физиологических, психофизиологических, психологических и гигиенических свойств человека в производственных и бытовых условиях

Эстетические, характеризующие внешние свойства РЭС: выразительность, оригинальность, гармоничность, целостность, соответствующие среде и стилю и т.д.

Патентно-правовые, отражают степень патентной защиты конструкторских решений в нашей стране и за рубежом, а также патентную чистоту

Экономические, характеризующие затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию РЭС, а также экономическую эффективность эксплуатации РЭС

Системный подход



Система – это совокупность взаимосвязанных разнородных устройств (частей, подсистем), совместно решающих общую задачу в условиях взаимодействия с окружающей средой с учетом развития и противоречий.

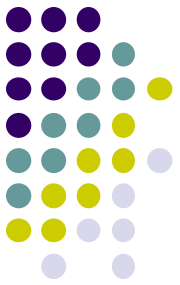
Факторы, определяющие качество РЭС:

- элементная база (электрорадиоэлементы (ЭРЭ) и радиокомпоненты);
- конструкционные материалы;
- виды электрических соединений;
- способы достижения механической прочности;
- обеспечение теплового режима, герметичности и т.п.

Ограничения на конструкцию РЭС, обусловленные:

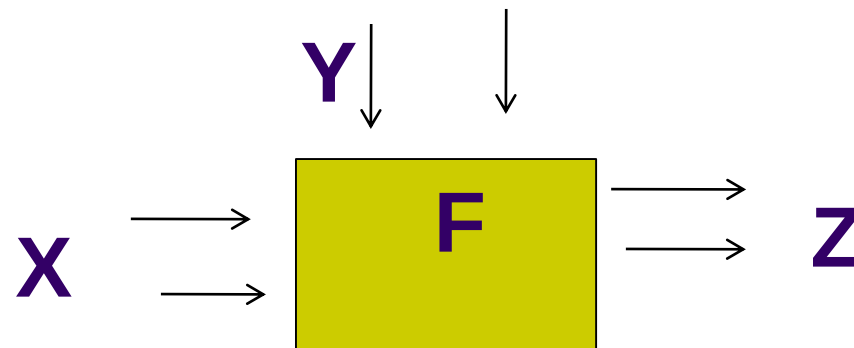
- условиями эксплуатации;
- технологичностью схемы и конструкции;
- надежностью;
- объектом установки и пр.

Обобщенная системная модель конструкции РЭС



Система, изменяемых X и неизменяемых Y факторов (ограничений), показателей качества Z и связей F между факторами и показателями качества

Система показателей качества Z определяет пригодность конструкции для использованию её по назначению согласно ТЗ

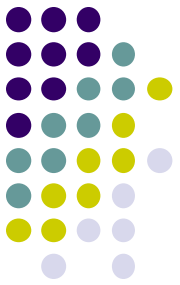


$$Z = f(F, X, Y)$$

Сущность системного подхода при конструировании современных РЭС заключается в том, что отыскивается оптимальное (наилучшее) решение при одновременном учете нескольких различных групп факторов и ограничений.

Структура РЭС, его конструкция и технология изготовления рассматриваются с точки зрения оптимальности всей структуры

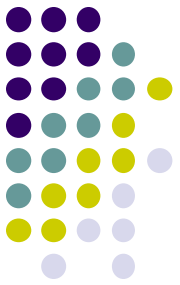
Основные положения системного подхода



Задачи системного подхода – исследование специфических связей, установление закономерностей, присущих отдельным типам систем, разработка на этой основе определенных методов их описания и изучения.

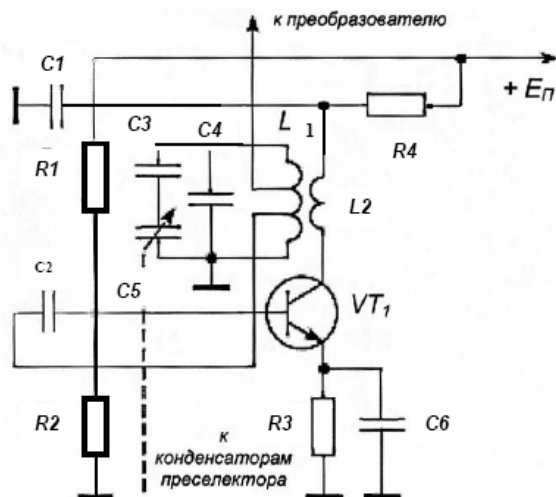
Основные положения:

1. *Параметрическое описание*, которое базируется на эмпирических наблюдениях, описании свойств, признаков и отношений исследуемого объекта к другим.
2. *Структурное описание* исследуемого объекта, которое предусматривает переход к определению поэлементного строения исследуемого объекта для установления взаимосвязи свойств, признаков, выявленных при параметрическом описании исследуемого объекта.
3. *Функциональное описание* исследуемого объекта, которое может быть выполнено исходя из функциональных зависимостей между параметрами (функционально-параметрическое описание) или частями объекта (функционально-структурное описание). Функция части объекта задается на основе характеристики всего объекта.



Принципы системного подхода

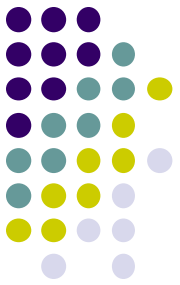
1. При исследовании объекта как системы, описание его частей не имеет самостоятельного значения, так как каждая часть объекта описывается не отдельно, а с учетом ее роли во всем объекте.
2. Специфика системного объекта не исчерпывается особенностями составляющих его частей, а связана с характером взаимосвязей между отдельными частями.
3. Один и тот же исследуемый объект выступает как обладающий одновременно разными характеристиками, параметрами, функциями, структурой. Проявлением этого является иерархичность строения систем.
4. Исследование системы, как правило, неотделимо от исследования условий ее функционирования.
5. При исследовании сложного объекта учитывается зависимость состояния частей от состояния всей системы.
6. Анализ функциональной характеристики исследуемого объекта может оказаться недостаточным, так как весьма важно установить целесообразность функционирования системы.



					РСПО.434855.002 ЭЗ				
					Гетеродин Схема электрическая принципиальная	Лит.		Масса	Масштаб
Изм	Лист	№ докум.	По-	Да-				1	1 : 1
Разраб.	Ф.И.О.								
Провер.	Ф.И.О.								
Т. Контр.	Ф.И.О.								
Реценз.	Ф.И.О.								
Н. Контр.	Ф.И.О.								
Утверд	Ф.И.О.					Лис	1	Листов	1
						ТУСУР			

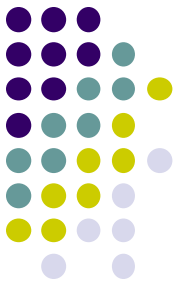
[illegible]

Методы проектирования РЭС

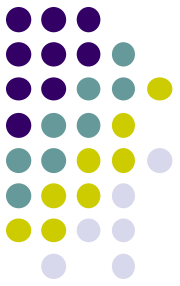


- **Анализ** – метод познания при помощи декомпозиции или разложения предметов исследования (объектов, свойств и т. д.) на составные части. Основа аналитического метода исследований.
- **Синтез** – соединение отдельных сторон предмета в единое целое.

Виды анализа и синтеза



- *Прямой или эмпирический метод* – выделение отдельных частей объекта, обнаружения его свойств, простейших измерений и т.п.).
- *Возвратный или элементарно теоретический метод* – использование причинно-следственных связей различных явлений.
- *Структурно-генетический метод* – вычленение в сложном явлении таких элементов, которые оказывают решающее влияние на все остальные сторонние объекты.



Основные этапы разработки РЭС

- Научно-исследовательская работа (НИР)
- Опытно-конструкторская работа (ОКР)
- Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа (НИОКР)

Формируется научно-технический отчет, в котором содержатся выводы и рекомендации о принципах построения РЭС, требования к Техническому заданию на ОКР. НИР может иметь

Результатом выполнения работы являются опытные образцы изделия, прошедшие заводские и государственные испытания.



Стадии работ (ГОСТ 2.103-68)

№	Стадии разработки	Литера
	Эскизный проект ГОСТ 2.119-73 Содержит принципиальные и конструктивные решения, общие представления об устройстве и принципах работы РЭС, данные по назначению, по основным параметрам и массогабаритным	
	Рабочий проект ГОСТ 2.102-68 Создание и отработка полного комплекта КД. Разработка технологии изготовления составных частей и РЭС в целом. В первую очередь -- схемной части устройства. На базе принципиальных схем разрабатываются чертежи устройств, узлов и деталей.	П
3	натурные испытания.	
4	Проводится технико-экономическое обоснование целесообразности проведения разработки.	О, А, Б

Виды изделий

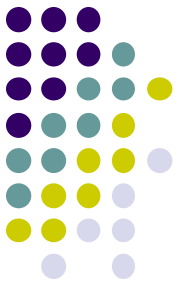
ГОСТ 2.101-68 (СТ СЭВ 364-76)



Изделие - любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

Виды изделий:

- *деталь* - изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций;
- *сборочная единица* - изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями;
- *комплекс* - два и более изделий (состоящих, в свою очередь, из двух и более частей), не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;
- *комплект* - два и более изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.



Комплектность КД

Комплектность КД устанавливают ГОСТ 2.102-68, 2.118-73 ...2.120-73, ГОСТ 2.601-68 и ТЗ на разрабатываемое изделие. На стадии разработки рабочей документации обязательными являются:

- *чертеж детали*, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля;
- *сборочный чертеж (СБ)*, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для ее сборки и контроля;
- *спецификация* - документ, определяющий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта.

Проектная документация



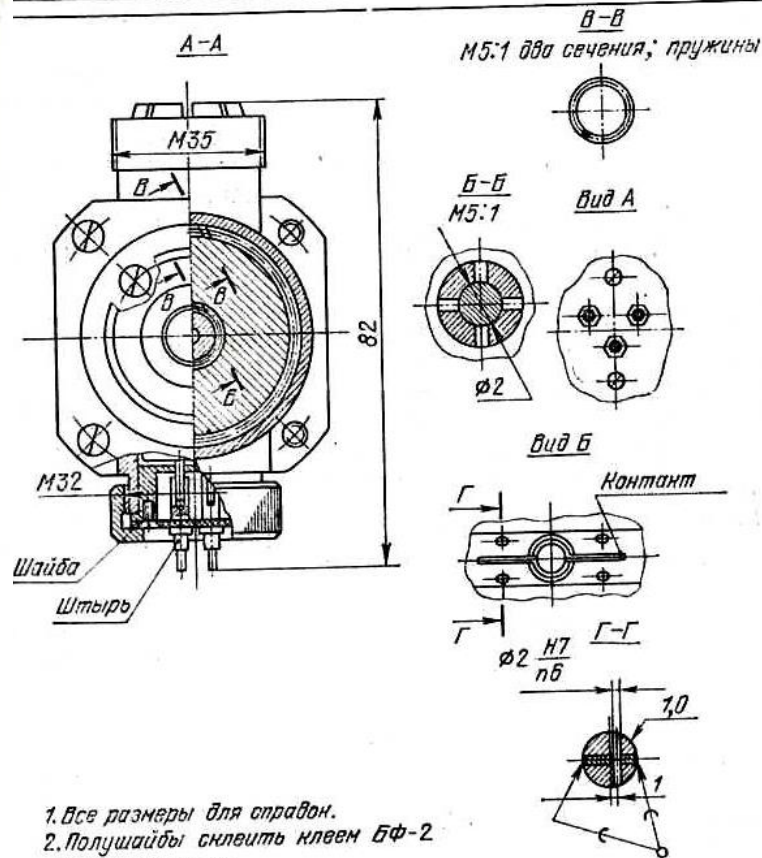
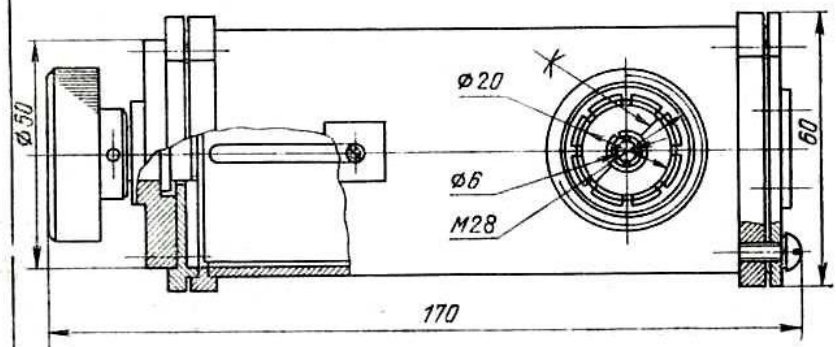
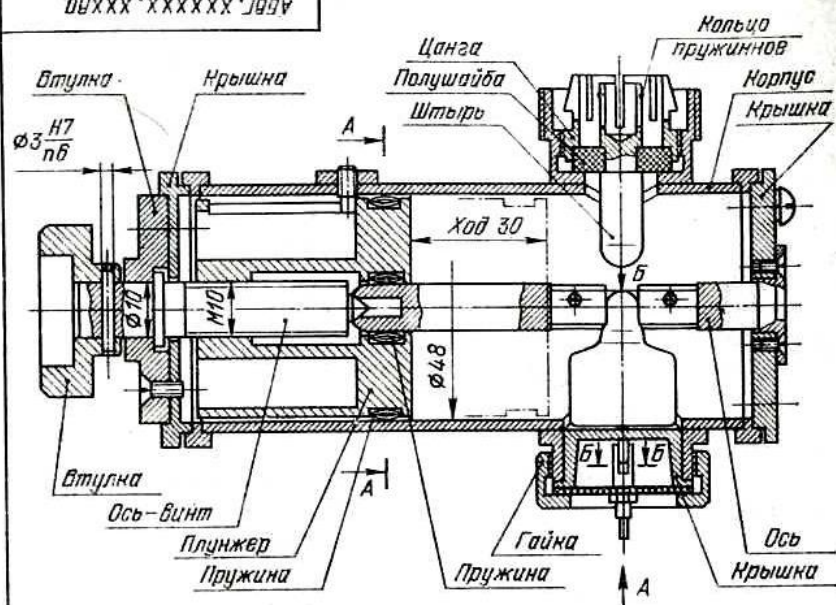
Обязательная:

- ведомости технического предложения (ПТ), эскизного проекта (ЭП), технического проекта (ТП) - перечни соответствующих документов;
- пояснительная записка (ПЗ);
- чертеж общего вида (ВО).

По усмотрению заказчика:

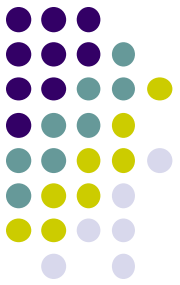
- графические конструкторские документы и схемы (преимущественно на рабочей стадии и не обязательно на проектной);
- габаритный чертеж (ГЧ) - контурное (упрощенное) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами;
- электромонтажный чертеж (МЭ) - документ, содержащий данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделий;
- монтажный чертеж (МЧ) - контурное (упрощенное) изображение изделия с данными для его установки (монтажа) на месте применения;
- упаковочный чертеж (УЧ) - документ, содержащий данные, необходимые для выполнения упаковки изделия;
- схемы - документы, на которых показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними.

00XXXX*XXXXXX*J000



1. Все размеры для справок.
2. Полушайбы склеить клеем БФ-2 ГОСТ 12172-74.

				АБВГ. XXXXXX. XX XX		
Изм. Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Резонатор коаксиальный объемный	Лит.	Масса
Разраб.						1:1
Проверит				Чертеж общего вида	Лист	Листов 1
Т. контр.						
Контр.						
Утверд.						

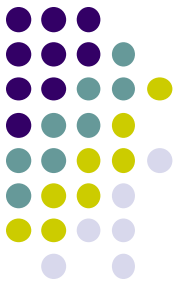


Пояснительная записка (ПЗ)

Пояснительная записка составляется по окончании работ на всех стадиях проектирования и включает в себя следующие разделы:

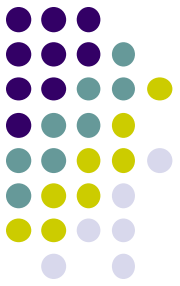
- **Введение** содержит наименование, номер и дату утверждения ТЗ.
- **Назначение и область применения** содержит: сведения из ТЗ, а также конкретизирующие и дополняющие их сведения по области и условиям применения изделия, основные данные по обеспечению стабильности показателей качества в условиях эксплуатации.
- **Технические характеристики** содержат: основные (из ТЗ) и дополнительные к ТЗ тактико-технические характеристики, сведения о соответствии или обоснованных отклонениях от требований ТЗ, данные сравнения характеристик отечественных и зарубежных аналогов, результаты анализа технического уровня и качества.

Пояснительная записка (ПЗ) (продолжение)



- **Описание и обоснование выбора конструкции** содержит: описания и анализ рассмотренных вариантов конструктивных и научно-технических решений, в том числе, на патентную чистоту и конкурентоспособность изделия, сведения об использованных изобретениях и заявках, справочные сведения по основным КД, результатам испытаний, требованиям ТБ и ПС. В ПЗ эскизного проекта рассматривается дополнительно соответствие макетов требованиям эргономики.
- **Расчеты** содержат: ориентировочные (на стадиях ПТ и ЭП) и окончательные (на стадии ТП) расчеты (кинематические, электрические, тепловые, компоновочные, надежности, ремонтпригодности и пр.).
- **Выводы** содержат краткий перечень основных результатов работ и рекомендаций о дальнейших действиях по проектированию или выпуску изделия.

Классификация РЭС



Классификационный признак – комплексный: **по назначению, тактике использования и объекту установки**

- **Категория** – характеризует РЭС по продолжительности работы

Четыре категории: многократного применения, однократного, непрерывного и смешанного применения

- **Классы** - характеризуют РЭС по глобальным зонам использования (*суша, вода, воздушное и космическое пространство*)

- **В зависимости от объекта установки внутри классов различаются – Группы**

Классообразующий признак группы - комплексный

Группы по объектам установки



ГОСТ 16019–2001 устанавливает требования к ЭС по стойкости к воздействию механических и климатических факторов и определяет семь групп аппаратуры в зависимости от объекта установки:

- С1 – стационарная, эксплуатируемая в отапливаемых наземных и подземных сооружениях;
- С2 – стационарная, размещаемая под навесом на открытом воздухе, а также в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях;
- В3 – возимая во внутренних помещениях на речных судах;
- В4 – возимая на автомобилях, мотоциклах, сельскохозяйственной, дорожной и строительной технике;
- В5 – возимая на железнодорожном транспорте;
- Р6 – носимая в одежде или под одеждой оператора, а также в отапливаемых наземных и подземных сооружениях;
- Н7 – носимая на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях.

Например, персональный компьютер относится к группе С1, автомагнитола – к группе В4, а сотовый телефон – к группе Р6.

Климатическое исполнение РЭС (ГОСТ 15150-69)

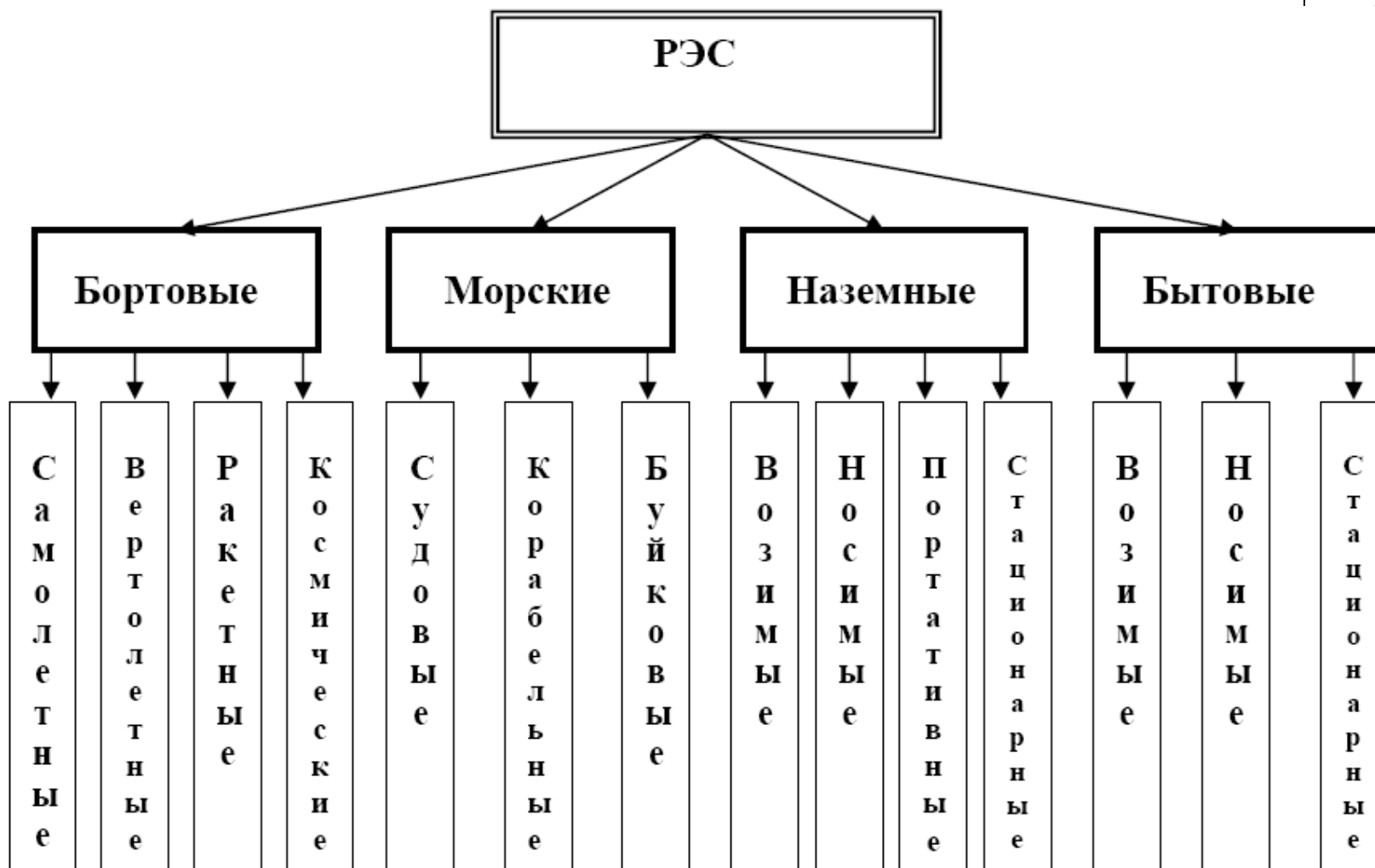


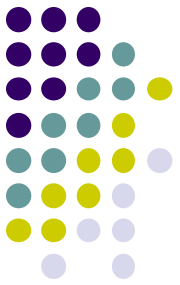
В зависимости от климатического района, суши и моря, различают
11 основных климатических исполнений РЭС

Исполнение У	Для умеренного климата с температурой $-40...+45\text{ }^{\circ}\text{C}$
Исполнение УХЛ	Для умеренного и холодного климата с температурой $-60...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Исполнение ТВ	Для влажного тропического климата с температурой более $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сочетании с относительной влажностью более 80% , действующие на изделие в течение более 12 часов в сутки в течение более 2 месяцев
Исполнение ТС	Для сухого тропического климата с температурой $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (предельные температуры $-10...+45^{\circ}\text{C}$)
Исполнение М	Для умеренного морского климата с расположением севернее 30° с.ш. или южнее 30° ю.ш.
Исполнение ТМ	Для тропического морского климата с расположением между 30° с.ш. и 30° ю.ш.
Исполнение О	Общеклиматическое исполнение для суши $-60...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Исполнение ОМ	Для кораблей и судов с неограниченным районом плавания $-40...+45^{\circ}\text{C}$
Исполнение В	Всеклиматическое исполнение для суши и моря (кроме Антарктиды) $-40...+45^{\circ}\text{C}$
Исполнение ХЛ	Для холодного климата с температурой $-60...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$
Исполнение Т	Для макроклиматического района как с тропическим влажным, так и с



Классификация РЭС





Бортовые РЭС

Самолетные и вертолетные РЭС характеризуются относительно кратковременным непрерывным временем работы (как правило, несколько часов). Все остальное время РЭС находится под контролем и обслуживанием.

Особенности конструкции:

- Свободный доступ к внутренним частям изделия.
- Выполняется в виде блоков, которые имеют законченное конструктивное оформление с элементами быстросъемного механического крепления.
- Монтируются либо на групповой раме, либо на стеллажах, снабженных амортизаторами.
- Разъемы и распределительные коробки для межблочного монтажа находятся на тыльной стороне блоков.
- Форма блоков - прямоугольная, за исключением тех, которые устанавливаются в специальных отсеках (хвостовое оперение, концы крыльев).



Параметры	Для самолетов и вертолетов		Ракетная	Космическая
	Штатная	Аварийная		
1. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	5...2000 0,1...10 -	10...70 19,6...34,3 1	0...500 до 196,2 -	1.5-2500 4,9...58,9 0.5
2. Устойчивость к механическим ударам: t_n , м/с a , м/с ² N_{Σ} , ударов	15 58,8...117,7 18	- 736 500	10...12 490...981	
3. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta \theta$, К		223...333		
4. Воздействие повышенной влажности: Вл, % $\Delta \theta$, К $t_{\text{выд}}$, СУТ	93...100 321...330 4...7	98 313	100	
5. Воздействие термоударов: $\Delta \theta$, К/мин $\Delta \theta_{\text{пред}}$, К	2...10 213...588	221...326	208...437	
6. Воздействие пониженного атмосферного давления: p , Па	(2...101)•10 ³	(2...101)•10 ³	(0,13-101)•10 ³	(0...101)•10 ⁸
7. Воздействие тумана с дисперсной водностью A и водностью B : $\Delta \theta$, К	306±5			

Параметры	Для самолетов и вертолетов		Ракетная	Космическая
	Штатная	Аварийная		
A , мкм B , г/м ³ $t_{\text{выд}}$, СУТ	≤20 2...3 -	до 5		
8. Прочность при падении с высоты h : h , мм N_{Σ} , ударов			750 10	
Примечание. Воздействие повышенной влажности (п.4) проверяется при конденсации водяных паров в процессе эксплуатации и в заданном по ТУ диапазоне температур.				

вибрационных нагрузках и

3.

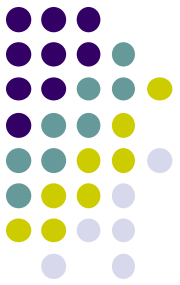
1.

э.

навливаются на несущие рамы, емными. Сама рама крепится к

ользуют двойное

вание, хранение в специальных ом и т.д.



Морские РЭС

Для *малых кораблей* (катера, суда на подводных крыльях и т.п.) по своему исполнению аппарата напоминает самолетную, но отличается наличием уплотняющего кожуха высокой прочности.

РЭС для малых кораблей должны выдерживать:

- вибрации;
- линейные ускорения;
- ударную нагрузку;
- ботовую и килевую качку;
- высокую влажность.

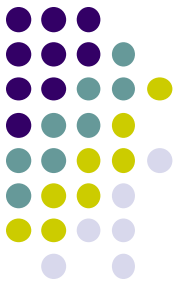


Морские ВЭС

Параметры	4 группа	Параметры	4 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	20 19,6 ≥ 0.5	9. Воздействие повышенной температуры: $\Theta_{\text{пред}}$, К $\Theta_{\text{раб}}$, К $t_{\text{выд}}$, ч	333 323 2...6
2. Обнаружение резонансов в конструкции: Δv , Гц ξ , мм $t_{\text{выд}}$, мин	10...30 0,5...0.8 ≥ 4	10. Воздействие пониженного атмосферного давления: p , Па Θ , К $t_{\text{выд}}$, ч	263 61 2...6
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд}}$, ч	10...30 2,4...10,7 ≥ 4	11 Прочность при транспортировании: $t_{\text{н}}$, мс v , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 49...245 $\geq 13\ 000$
4. Устойчивость к механическим ударам: $t_{\text{н}}$, м/с a , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147 ≥ 60	12. Прочность при воздействии синусоидальной вибрации: Δv , Гц $t_{\text{выд}}$, ч a , м/с ²	10...30 2 9,8...89.2
5. Устойчивость к циклическим изменениям температуры: $\Delta \theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	223... 333 2...6	13. Прочность при воздействии многократных ударов: $t_{\text{н}}$, мс v , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов	5...10 40...80 147 $\geq 12\ 000$
6. Воздействие повышенной влажности: Вл, % $\Delta \theta_1$ ($\Delta \theta_2$), К $t_{\text{выд}}$, ч	93 298 (313) 72	14. Воздействие дождя с интенсивностью А: А, мм/мин $t_{\text{выд}}$, мин	3 ≥ 20
7. Воздействие пониженной температуры: $\Theta_{\text{пред}}^1$ ($\Theta_{\text{пред}}^2$), К $\Theta_{\text{раб}}^1$ ($\Theta_{\text{раб}}^2$), К $t_{\text{выд}}$, ч	233 (223) 263 2...6	15. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсной водностью (95% капель) А и водностью В: $\Delta \theta$, К А, мкм В, г/м ³ $t_{\text{выд}}$, СУТ	300 1...10 2...3 ≥ 48
8. Воздействие инея и росы: $\Delta \theta$, К $t_{\text{выд}}$, ч	263 2...6		

Морские РЭС

(продолжение)



Буйковые РЭС служит навигационным и другим целям и характеризуется:

- особой продолжительностью необслуживаемой эксплуатации;
- работой в морской воде в плавающем и подводном состоянии;
- воздействием сильных ударов (волнение моря и при установке буя);
- высокой прочностью, герметичностью и коррозионной стойкостью.



Параметры		6 группа	7 группа	Параметры		6 группа	7 группа
1. Прочность при синусоидальных вибрациях: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд.}}$, ч		20 19,6 ≥0,5	20 19,6 ≥0,5	10. Воздействие пониженного атмосферного давления: p , Па Θ , К $t_{\text{выд.}}$, ч		263 61 2...6	263 61 2...6
2. Обнаружение резонансов в конструкции: Δv , Гц ξ , мм $t_{\text{выд.}}$, мин		10...30 0,5...0,8 ≥4	10...30 0,5...0,8 ≥4	11. Прочность при транспортировании: $t_{\text{н.}}$, мс v , мин ⁻¹ a_{max} , м/с ² N_{Σ} , ударов		5... 10 40...80 49...245 ≥13 000	5... 10 40...80 49...245 ≥13 000
3. Устойчивость к синусоидальным вибрациям: Δv , Гц a , м/с ² $t_{\text{выд.}}$, мин		10...70 7,8...37 ≥12	10...30 2,4...10,7 ≥4	12. Прочность при воздействии синусоидальной вибрации:		10...70 1,5...7,5 9,8...39,2	10...30 2 9,8...39,2
4. Устойчивость к механическим удар $t_{\text{н.}}$, м/с v , мин ⁻¹ a , м/с ² N_{Σ} , ударов	Параметры			6 группа	7 группа	ократных	
	18. Воздействие соляного (морского) тумана с дисперсной водностью (95% капель) A и водностью B :						
	$\Delta\theta$, К			300	300		
	A , мкм			1...10	1...10		
5. Устойчивость к циклическим измен температуры: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд.}}$, ч	B , г/м ³			2...3	2...3	5...10 40...80 98 ≥6000	5...10 40...80 98 ≥6000
	$t_{\text{выд.}}$, СУТ			≥48	≥48		
	Примечание: индексы 1 и 2 относятся к первой и второй степени жесткости при эксплуатации.						
6. Воздействие повышенной влажност Вл, % $\Delta\theta_1$ ($\Delta\theta_2$), К $t_{\text{выд.}}$, ч		298 (313) 72	298 48	$m>5$ кг N_{Σ} , ударов		750 500 11	500 - 11
7. Воздействие пониженной температуры: $\Theta^1_{\text{пред}}$ ($\Theta^2_{\text{пред}}$), К $\Theta^1_{\text{раб}}$ ($\Theta^2_{\text{раб}}$), К $t_{\text{выд.}}$, ч		233 (223) 263 (248) 2...6	233 (223) 278 (263), 2...6	15. Герметичность при погружении в воду на глубину h : h , м $t_{\text{выд.}}$, мин		≥0,5 ≥60	
8. Воздействие инея и росы: $\Delta\theta$, К $t_{\text{выд.}}$, ч		263 2...6		16. Воздействие дождя с интенсивностью A : A , мм/мин $t_{\text{выд.}}$, мин		3 ≥20	3 ≥20
9. Воздействие повышенной температуры: $\Theta_{\text{пред.}}$, К $\Theta_{\text{раб.}}$, К $t_{\text{выд.}}$, ч		333 232 2...6	328 313 2...6	17. Воздействие воздушно-пылевого потока: v , м/с $t_{\text{выд.}}$, мин при эксплуатации.		≥10 ≥60	

транспортных средствах.

СТРУКТУРА КОНСТРУКЦИИ РЭС



Каждая конструкция РЭС в зависимости от назначения имеет свою, присущую ей конкретную структуру. Однако требования стандартизации налагают ограничительные рамки на это многообразие.

Типовая структура конструкции современной РЭС состоит из элементной базы как исходного функционального материала и четырёх уровней, от нулевого до третьего.

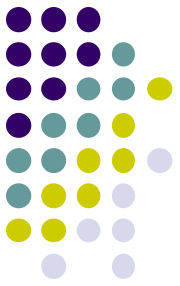
Из них: нулевой и первый - низшими уровнями, второй и третий – высшими уровнями.

Элементная база - это не конструкция РЭС.

Конструкция начинается с функционального узла, который представляет собой первичное структурное образование и относится к нулевому структурному уровню.

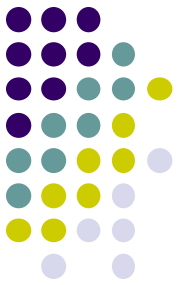
*Разновидности функциональных узлов:
микросборка; печатные узлы; гибридно-интегральные узлы*

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ КОНСТРУКЦИЙ РЭС



Преимущества структурного дробления (при разработке, производстве и эксплуатации)

1. Параллельное конструирование частей
(выполнение условий размерной совместимости ГОСТы, международные стандарты, система допусков и посадок, совмещение электрических параметров)
2. Параллельное изготовление частей
(производство идёт по независимым производственным циклам, соприкасающимся только в процессе сборки)
3. Повышение ремонтпригодности



ГОСТ 26632-85 Уровни разукрупнения (структурные уровни)

Уровни разукрупнения РЭС определяет функциональная или конструктивная сложность.

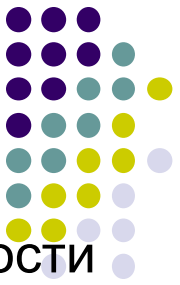
По функциональной сложности различают четыре уровня разукрупнения:

радиоэлектронная система, радиоэлектронный комплекс, радиоэлектронное устройство, радиоэлектронный функциональный узел.

По конструктивной сложности различают три уровня разукрупнения:

шкаф (стойка), блок, ячейка

ГОСТ 26632-85 (продолжение)



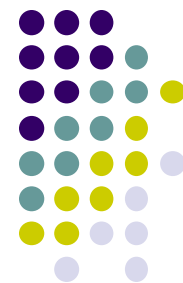
В качестве основы разукрупнения по конструктивной сложности в ГОСТ 26632-85 приняты **несущие конструкции** (НК)

***Несущая конструкция** – элемент конструкции или совокупность элементов конструкции, предназначенных для размещения технических средств и обеспечения их устойчивости и прочности в заданных условиях эксплуатации.*

По сложности несущие конструкции разделены на три уровня:

- НК1** – несущие конструкции, предназначенные для размещения изделий электронной техники и входящие в несущие конструкции более высоких уровней;
- НК2** - несущие конструкции, предназначены для размещения РЭС, выполненных на основе НК1;
- НК3** – несущие конструкции, предназначенные для размещения РЭС, выполненных на основе НК2 и (или) НК1

ГОСТ 26632-85 (продолжение)



По конструктивной сложности РЭС разделены на три уровня,однозначно связанных с уровнями НК:

Радиоэлектронная ячейка (ячейка) – РЭС, выполненная на основе НК1;

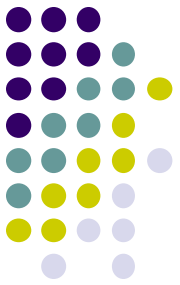
Радиоэлектронный блок (блок) - РЭС, представляющая собой совокупность ячеек и выполненное на основе НК2;

Радиоэлектронный шкаф (стойка,пульт) – РЭС, представляющая собой совокупность блоков и (или) ячеек и выполненное на основе НК3.

Разукрупнение РЭС по конструктивной сложности в модульном исполнении связано с базовыми несущими конструкциями (БНК)

Базовая несущая конструкция – несущая конструкция, предназначенная для размещения РЭС различного функционального назначения, габаритные размеры которой стандартизованы.

Базовые несущие конструкции – изделия в которых определенные конструкторские решения сохранены неизменными (унификация,типизация) ряда изделий.



Определения

Модуль – составная часть аппаратуры, выполняющая в конструкции подчиненные функции, имеющая законченное функциональное и конструктивное оформление и снабженная элементами коммутации и механического соединения с подобными модулями и с модулями низшего уровня в изделии.

Модульный принцип конструирования – проектирование изделий на основе конструктивной и функциональной взаимозаменяемости составных частей конструкции. Предполагает разукрупнение электронной схемы на функционально законченные подсхемы.

Конструкция современных РЭС представляет собой иерархическую структуру, состоящую из нескольких уровней модульности.

Типизация модулей – сокращение типов модулей и установление конструкций, которые выполняли бы самые широкие функции в изделиях определенного функционального назначения.

Определения (продолжение)



Для РЭС в модульном исполнении введены четыре, а не три, как в общем случае, уровня разукрупнения: нулевой, первый, второй, третий.

Радиоэлектронный модуль (РЭМ) – функционально законченное РЭС, выполненное на основе базовой несущей конструкции того или иного уровня разукрупнения и обладающее свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости.

РЭМ1 - функционально законченная ячейка или кассета, выполненная на основе БНК1, обладающая свойствами функциональной и конструктивной взаимозаменяемости;

РЭМ2 – блок на основе БНК2;

РЭМ3 - шкаф (стойка, пульт) на основе БНК3;

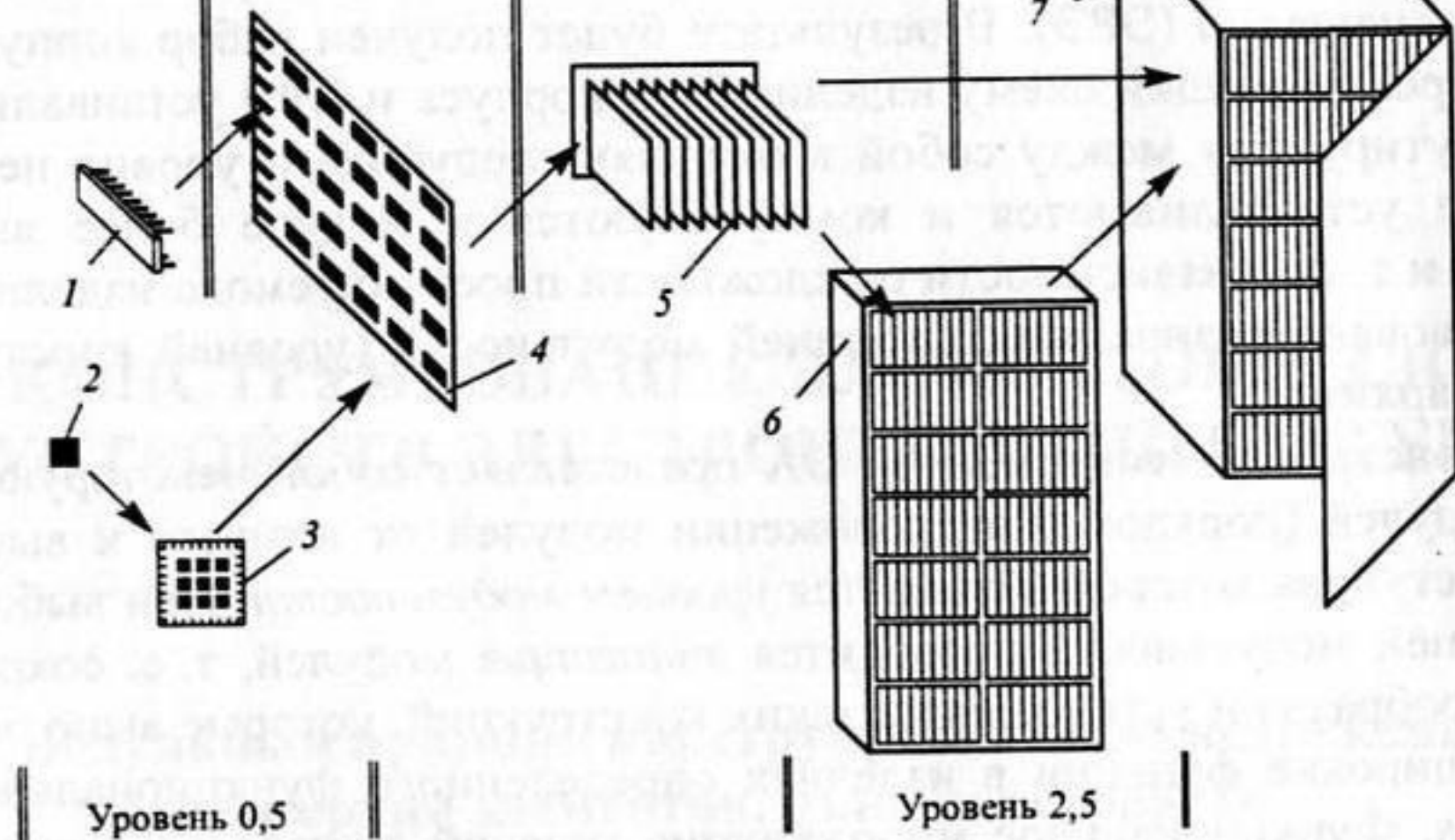
РЭМ0 - РЭС, предназначенное для реализации функции преобразования информации или преобразования сигналов и выполненное на конструктивной основе, размерно координируемой с БНК1 и обладающее свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости. Фактически РЭМ0 –это РЭФУ на печатных платах.

Нулевой

Первый

Второй

Третий



Конструктивная иерархия и входимость модулей:

1 — микросхема; 2 — бескорпусная микросхема; 3 — микросборка; 4 — типовой элемент замены (ТЭЗ), ячейка; 5 — блок; 6 — рама; 7 — стойка

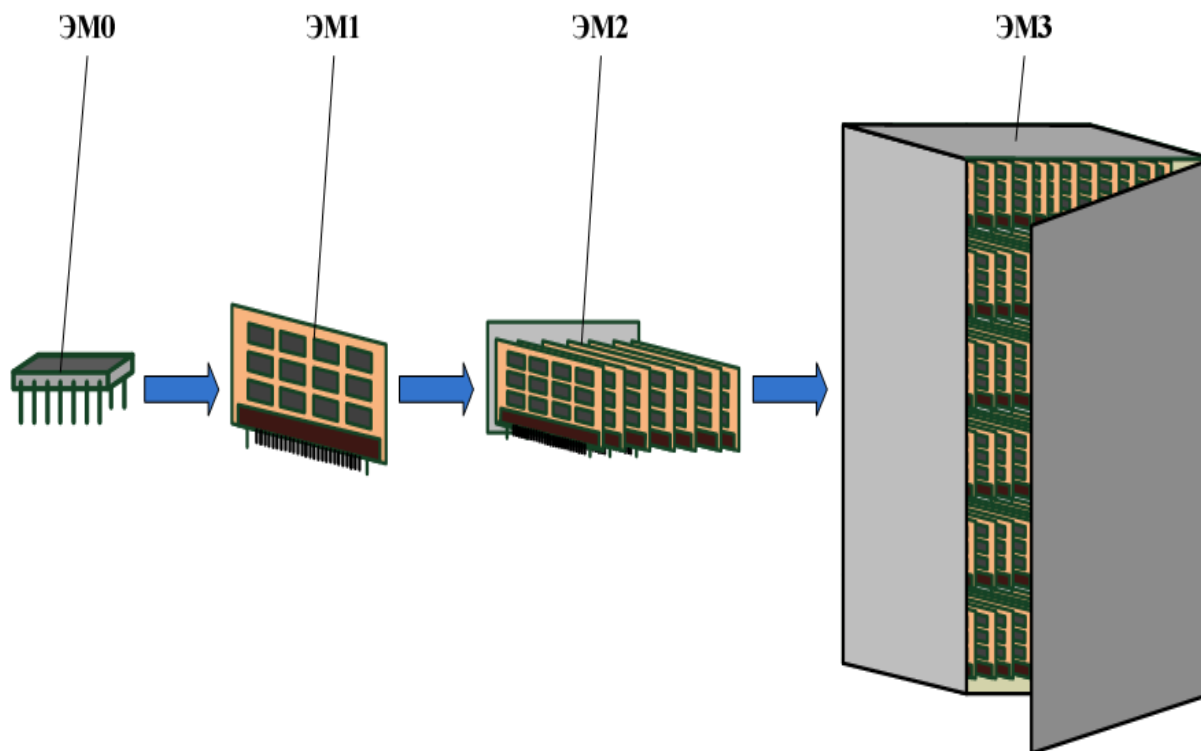
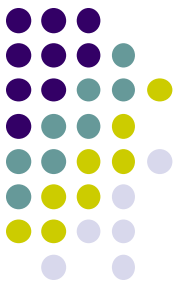
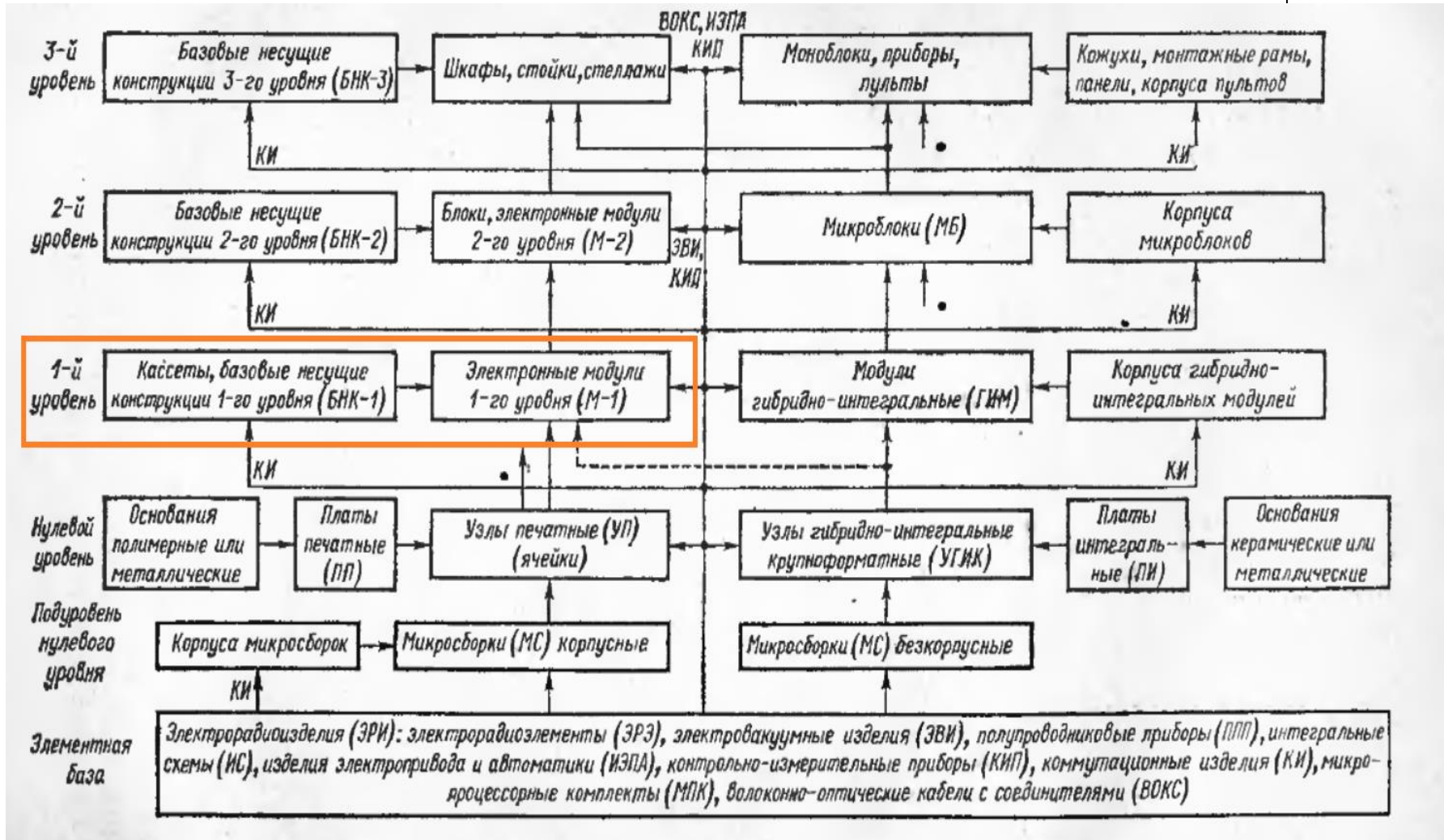


Рис. 1.1. Уровни разукрупнения электронных средств



Структурные уровни конструкций РЭС

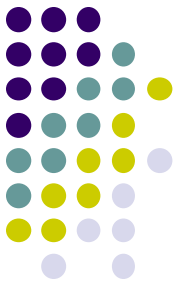


Модули нулевого уровня



Тип	Под-тип	Расположение выводов относительно установочной плоскости	Внешний вид корпуса	Форма проекции тела корпуса на установочную плоскость
1	11	Перпендикулярное в один ряд		Прямоугольная
	12	Перпендикулярное в два ряда		
	13	Перпендикулярное в три ряда		
	14	Перпендикулярное по контуру прямоугольника		
	15	Перпендикулярное, в один ряд или отформованные в два ряда		
2	21	Перпендикулярное в два ряда		Прямоугольная
	22	Перпендикулярное в четыре ряда в шахматном порядке		
3	31	Перпендикулярное по окружности		Круглая
	32	Перпендикулярное по окружности		Овальная

Тип	Под-тип	Расположение выводов относительно установочной плоскости	Внешний вид корпуса	Форма проекции тела корпуса на установочную плоскость
4	41	Параллельное по двум противоположным сторонам		Прямоугольная
	42	Параллельное по четырем сторонам		
	43	Параллельное, отформованное по двум сторонам		
	44	Параллельное, отформованное по четырем сторонам		
	45	Параллельное, отформованное под корпус по четырем сторонам		
5	51	Перпендикулярное для боковых площадок выводов по четырем сторонам		Прямоугольная
	52	Перпендикулярное для боковых площадок выводов по двум сторонам		Квадратная
6	61	Перпендикулярное в несколько рядов		Квадратная
	62	Перпендикулярное в несколько рядов со стороны крышки корпуса		



Модули уровня 0,5

Модули уровня 0,5 – микросборки – подложки с размещенными на ней бескорпусными элементами и проводящим рисунком, выполненным по тонко- или толсто пленочной технологиям.

Материалы подложек:

- *Ситалл* (на основе стекла) – максимальный размер 48х60 мм.
- *Поликор* (керамика на основе окиси алюминия) – максимальный размер 24х30 мм.
- Гибкие *полиамидные пленки*, для обеспечения механической жесткости размещают на пластинах из алюминиевого сплава – максимальный размер 100х100 мм.

Конструкционные системы



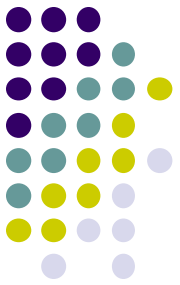
Совокупность уровней разукрупнения РЭС определенного назначения образуют конструкционную систему.

Конструкционная система (КС) – представляет собой совокупность БНК разных уровней разукрупнения, обеспечивающую создание требуемого множества РЭС и организованную на основе определенных размерных соотношений с учетом условий эксплуатации, инженерной психологии, технологии производства.

Разработка КС предполагает: комплексную унификацию размеров, сортамента, конструкторско-технологических решений, создание типовых элементов конструкций, узлов и НК модулей различных уровней разукрупнения.

По способу построения КС – это система универсально-сборочных каркасных конструкций, основу построения которых составляют сборные каркасы различных уровней, видов и типоразмеров.

Конструкционные системы (продолжение)



Наиболее распространенные КС:

- Система унифицированных типовых конструкций – УТК20 ГОСТ 20504-81 (конструирование средств автоматизации и приборостроения для различных областей науки и техники)
- КС унифицированных базовых несущих конструкций – УБНК
- КС- унифицированные типовые конструкции, входящих в единую систему средств приборостроения (ЕССП)
- КС электронных измерительных приборов

Известны конструкционные системы РЭС измерительных приборов, электронной вычислительной аппаратуры, телевизионной, связной аппаратуры

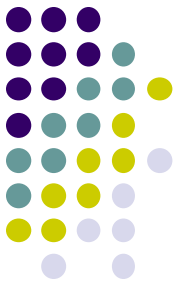
Несущие конструкции радиоэлектронных средств



Несущей конструкцией (НК) - элемент конструкции или совокупность элементов, предназначенную для размещения составных частей радиоэлектронных средств (РЭС) и обеспечения их устойчивости и прочности в заданных условиях эксплуатации .

Электронный блок – конструкция второго уровня – представляет собой радиоэлектронное средство или его часть, имеющее определённую функциональную, схемную и конструктивную завершенность, имеющее своё чёткое назначение и состав выполняемых задач, органов управления и информации и, как правило, свою лицевую панель.

НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ (продолжение)



По исполнению - блок может быть рассчитан на автономное использование. (Тогда у него имеются кожух, футляр, крышки, приспособление для переноски)

Для обозначения такой конструкции используется термин "моноблок".

Исполнение также может быть **носимое** (в руках, сумках, ранцах), **настольное** и **напольное** (в том числе и в подвижных средствах).

В других случаях **блок** заранее рассчитывается на **использование в составе конструкции следующего (высшего) уровня**. Он может входить в стойку (шкаф) и быть подвижным, "**врубным**" (рис. 1.1), **откидным** (рис. 1.2).

Может крепиться на какой-то общей раме с другими блоками, может входить в общий контейнер.

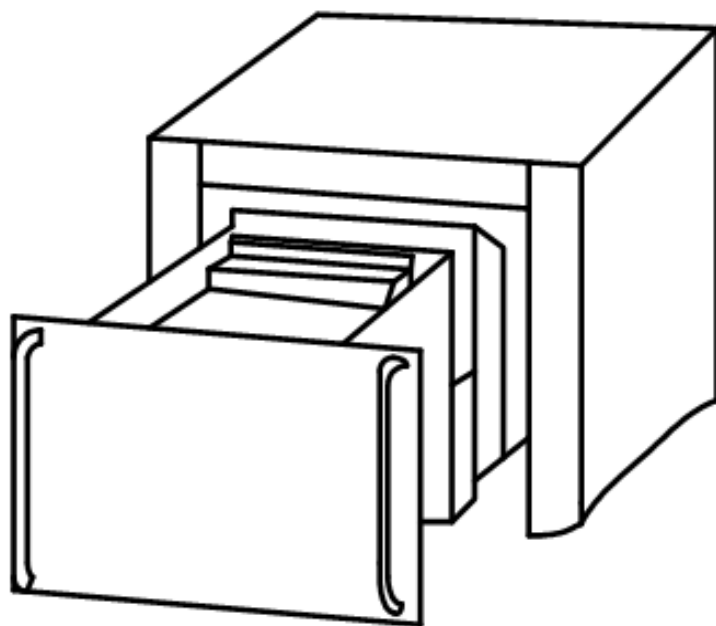


Рис. 1.1. Пример "рубного" блока
(т.е. врубающегося своими ловителями и соединителями в соответствующие гнезда шкафа, стойки)

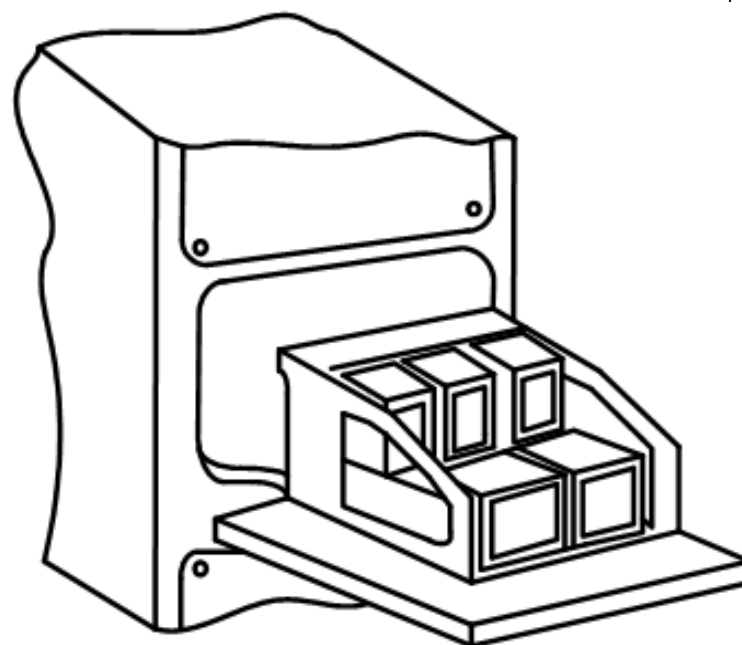


Рис. 1.2. Пример "откидного" блока
(открывающегося в шкафу, стойке на шарнирах)

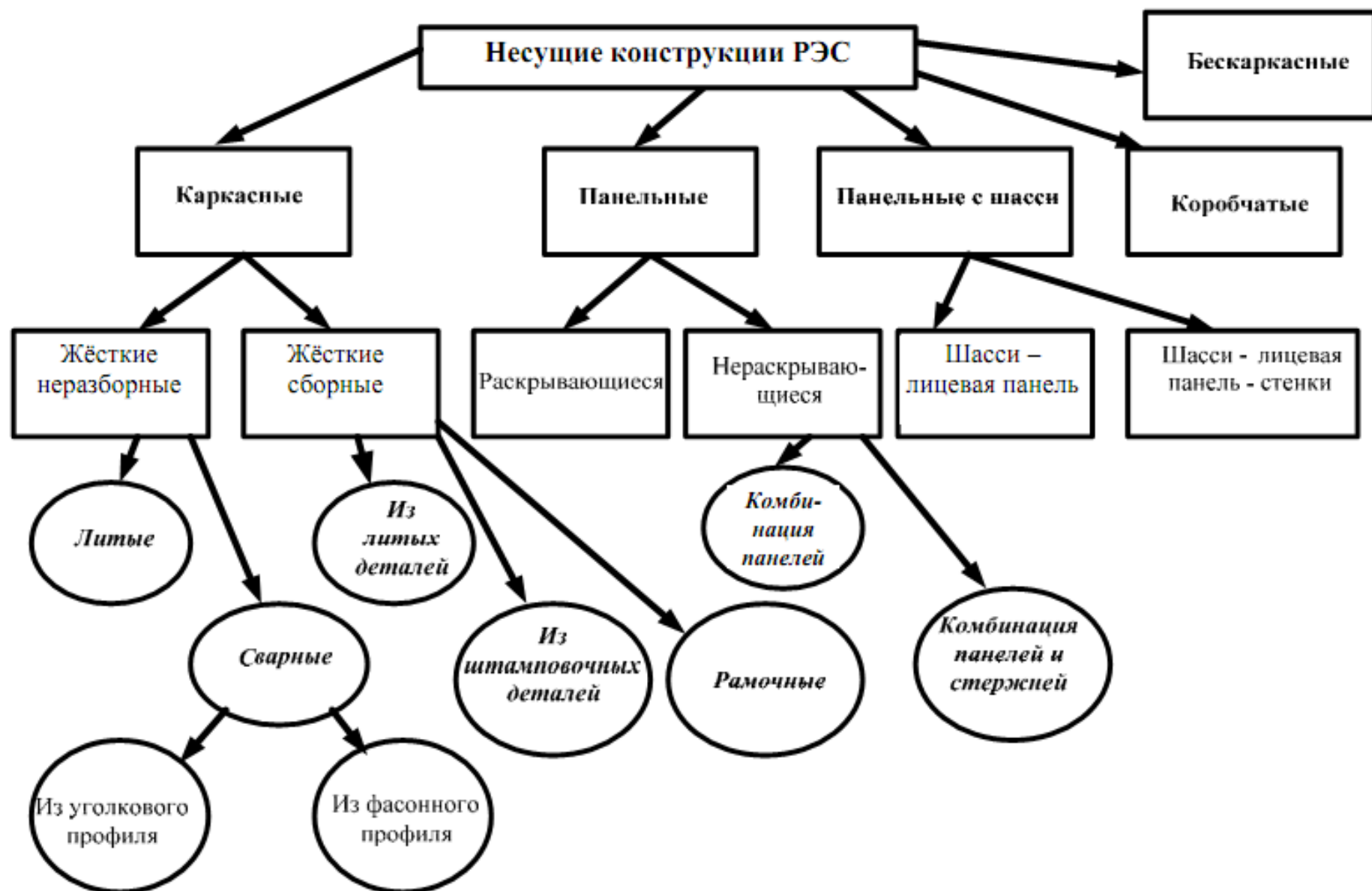


Рис. 1.4. Разновидности несущих конструкций РЭС

Общие сведения о несущих конструкциях



Разновидности НК

Всё разнообразие НК целесообразно подразделять с двух точек зрения:

- ***отношением конструкции к месту и способу установки блока.***

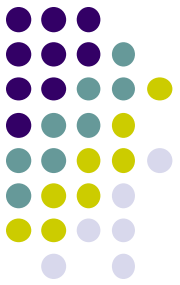
НК моноблоков, т.е. изделий, применяемых отдельно и выполняемых, в переносном, настольном и напольном исполнениях с креплением к месту установки или без него.

Такие НК предусматривают всегда индивидуальную защиту блока от внешней среды крышками, съёмными панелями, амортизаторами и т.п. Свои характерные особенности имеют и НК блоков для стоек и шкафов (ловители, приспособления сопряжения разъёмов, поворотные кронштейны, направляющие и т.п.).

- ***НК характеризуются способом образования пространственно-ограниченного рабочего объёма блока или способом взаимного расположения своих деталей.***

С этой точки зрения можно выделить несколько наиболее употребительных типов НК: 1) **каркасный**; 2) **панельный**; 3) **коробчатый**; 4) **типа "шасси-панель"**; 5) **бескаркасный**.

Каждый из них имеет свою преимущественную сферу применения и соответствующую конструкции преимущественную технологию изготовления и сборки.



1. Каркасная НК.

Преимущественная область применения – блоки для шкафов и стоек врубные, подвижные, иногда откидные.

Основа такой конструкции – жёсткий каркас , крепящийся к лицевой панели. Элементарная защита конструктивов от внешних воздействий образуется рёбрами каркаса.

Способы выполнения различны:

- *цельнолитая конструкция из алюминиевых сплавов с последующей фрезерной обработкой* (применяется для тяжёлых блоков мощных устройств с массой 10...20 кг).
- *это каркас из стальных или алюминиевых профилей на сварке, заклёпках или винтах.* (для менее массивных блоков).

Для облегчения в качестве образующих каркаса применяют нередко и гнутые из листового материала уголки с узкими полками.

Иногда каркас выполняют из штампованных или литых (прессованных) деталей. Особенно это характерно для блоков, укомплектованных полностью модулями (ячейками на печатных платах).

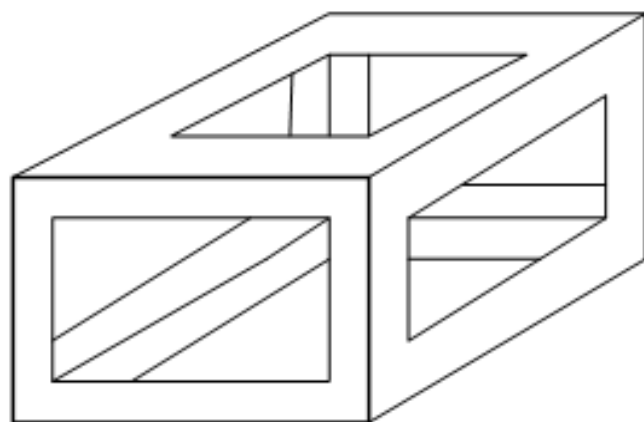


Рис. 2.1. Каркасная НК

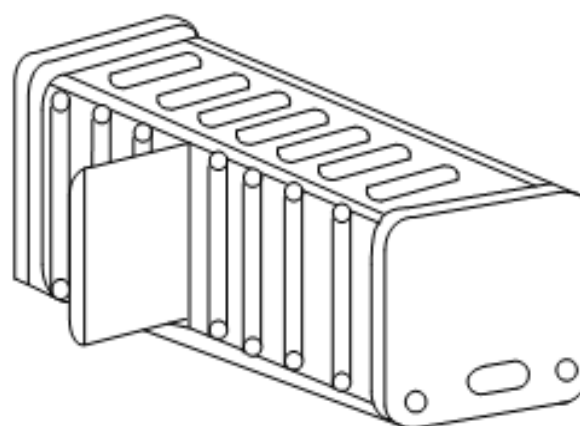


Рис. 2.2. Каркас с направляющими планками для печатных узлов

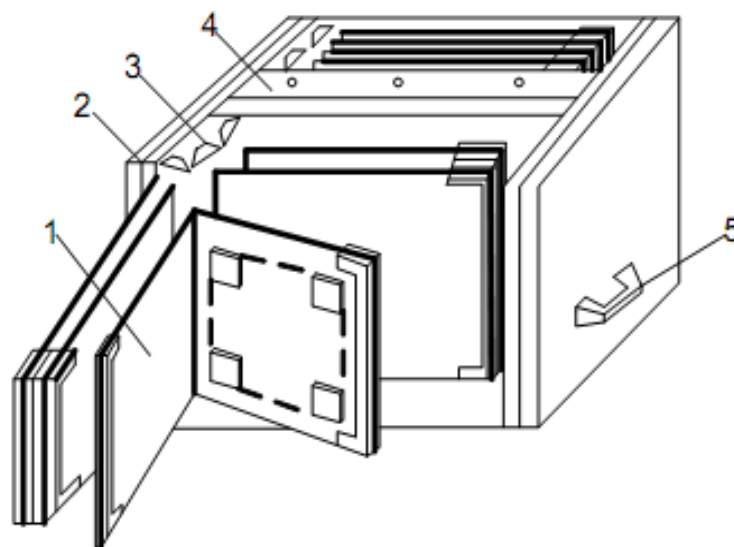


Рис. 2.3. Крепление печатных узлов (модулей) на поворотных шарнирах:
1 – модуль; 2 – задняя панель; 3 – двойной шарнир; 4 – корпус; 5 – ручка

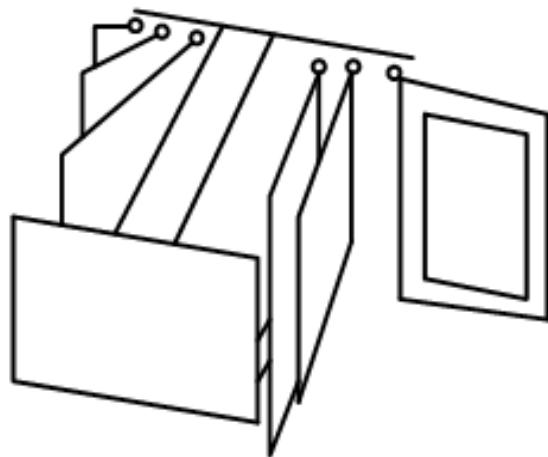


Рис. 2.4. "Книжная" НК

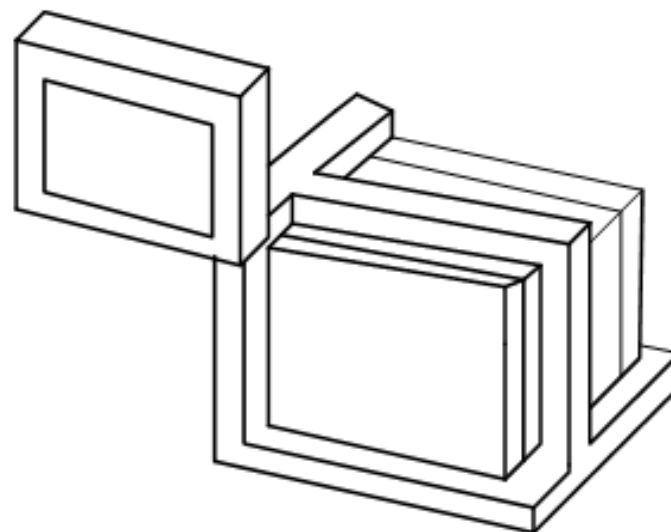


Рис. 2.5. "Веерная" НК

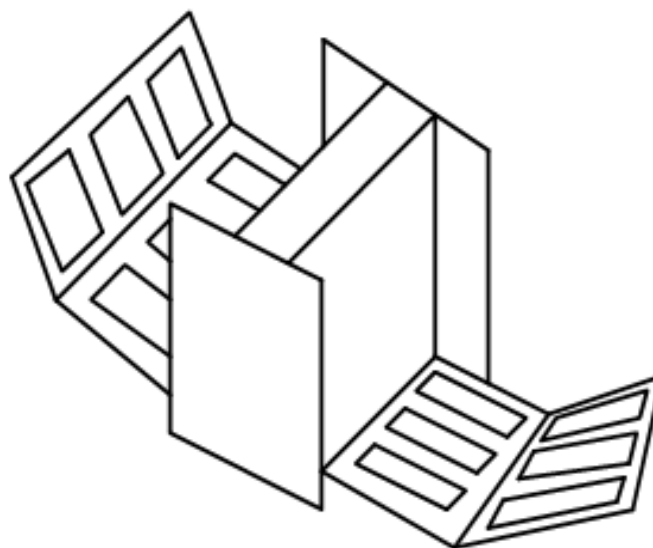
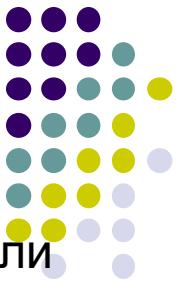


Рис. 2.6. "Раскладная" НК



2. Панельная НК.

Панельная НК - представляет собой чаще всего сборку из литых или штампованных панелей-плоскостей, на которые опираются печатные узлы и другие конструктивы блока.

Не исключается в отдельных случаях не сборка, а сочетание панелей гнутых из общего листа или сваренных.

При конструировании сборных каркасов следует обращать внимание на достаточность в креплении панелей площадей, прилегающих друг к другу мест, для обеспечения элементарной жёсткости.

При весьма плотном заполнении объёма блока - конструкции выполняются **раскрывающимися**.

Менее заполненные блоки допускают **открытые нераскрывающиеся НК**, жёсткость которых обеспечивается *угловыми косынками или стяжными стержнями*. Не исключается также применение боковых стенок и рамок .

Литьё применяется в основном тонкостенное из легких алюминиевых сплавов с большим числом облегчающих отверстий и рёбрами жёсткости. При мелкосерийном или опытном производстве панели изготавливаются из листовых материалов слесарным путём. НК панельного типа применяются для моноблоков, в частности, для измерительной аппаратуры.

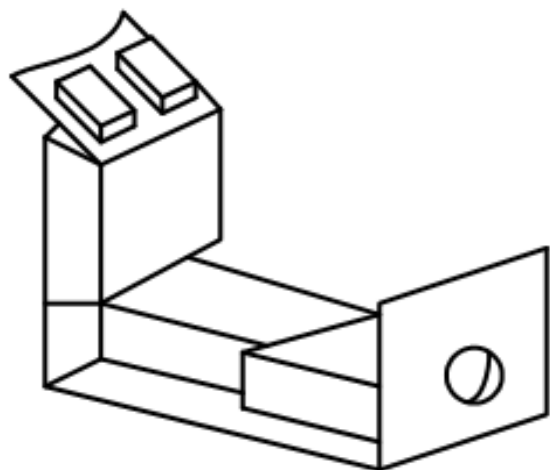


Рис. 2.7. Раскрывающаяся НК

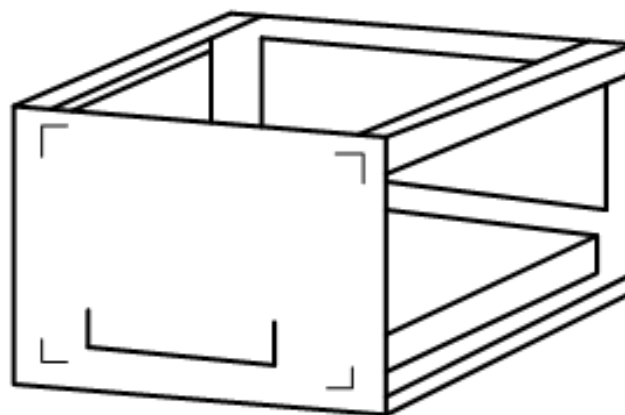


Рис. 2.8. НК со стяжными стержнями

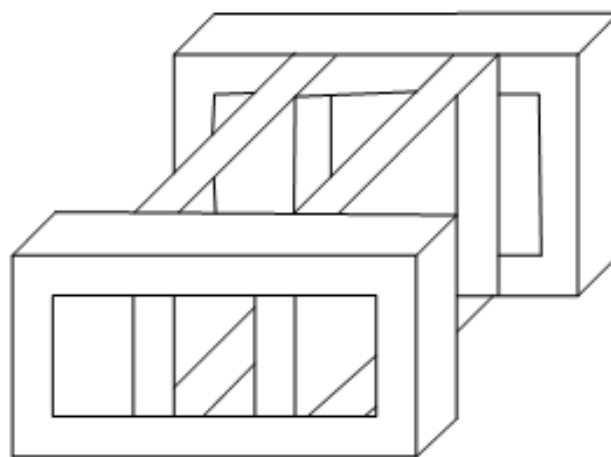
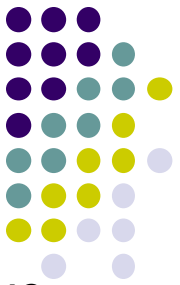


Рис. 2.9. Рамочная НК

3. Коробчатая НК

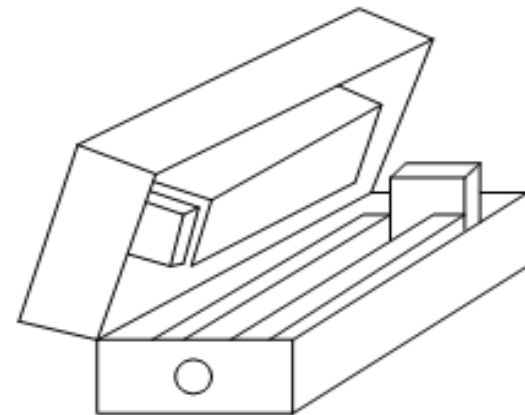


Коробчатая НК представляет собой подобие "чемодана" или "кейса-дипломата", внутри которого располагаются конструктивы блока (рис. 2.10).

Форма такого "коробка" может быть, конечно, усложнена.

Возможно широкое варьирование применяемых материалов (листовые стали и листовые алюминиевые сплавы, литьевые сплавы, пластмассы), а также способов изготовления; штамповка, прессование, слесарное изготовление.

Область применения — переносная РЭС



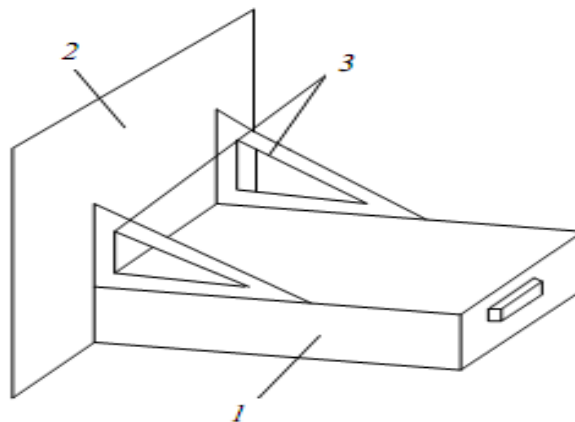
**Рис. 2.10. Пример
коробчатой НК**

4. НК типа "шасси-панель"

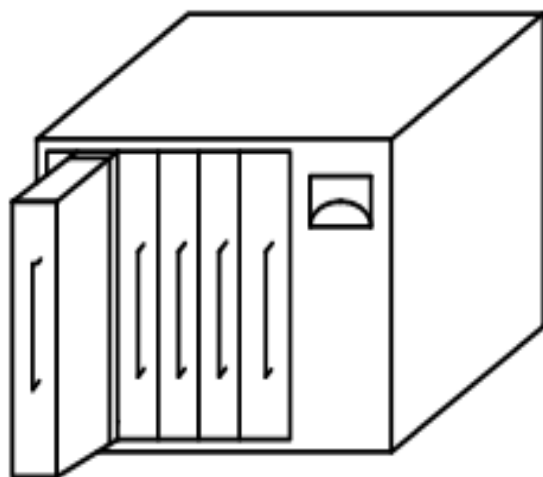
- отличается наличием в составе деталей, так называемого шасси, представляющего собой коробок без дна.

Внутренность такого короба – "подвала шасси" – используется для объёмного монтажа, деталей крепления, выхода выводов конструктивов и их разъёмов.

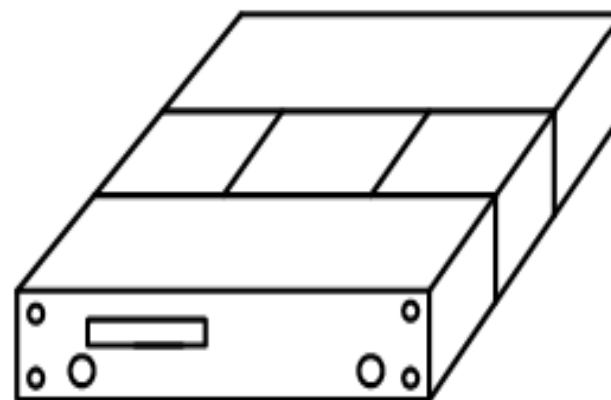
Жёсткое сопряжение шасси с лицевой панелью идёт с помощью косынок (рис. 2.11), могут применяться и боковые стенки. Глубина шасси, а также его расположение относительно панели могут варьироваться в зависимости от требований компоновки.



**Рис. 2.11. НК комбинированного типа
"шасси-панель":**
1 – шасси; *2* – панель лицевая; *3* – косынки



**Рис. 2.12. НК с выемными моду-
лями**



**Рис. 2.13. Бескаркасная конструк-
ция**

5. Бескаркасные НК



Бескаркасные НК ориентированы на соединение друг с другом конструктивно законченных модулей

(т.е. несущая конструкция у них, как таковая, отсутствует). Модули стягиваются общими винтами или защёлками, закрываются общим кожухом. Модули должны быть так подогнаны друг к другу, чтобы получилась жёсткая единая конструкция (рис. 2.13). Область применения – измерительная бытовая аппаратура.

Бескаркасные комбинации печатных узлов могут быть также использованы в рамках какой-либо панельной конструкции.

Лицевая панель как конструктив здесь, как правило, отсутствует. Она входит либо в состав одного из конструктивов, либо заменяется "фальш-панелью", т.е. планкой с надписями, поясняющими название органов управления, закреплённых в разных конструктивах, но при сборке оказывающихся в одной передней плоскости.

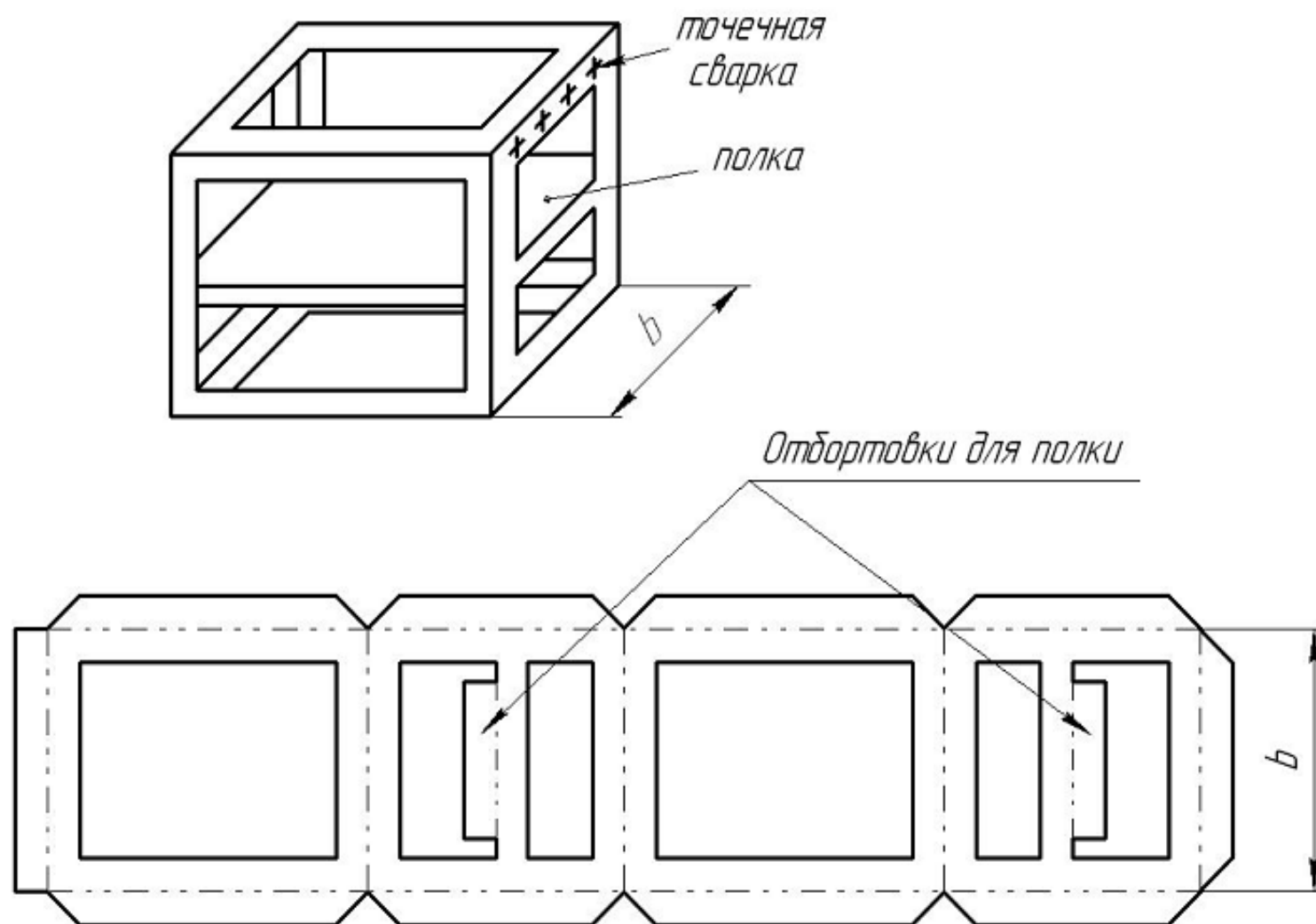
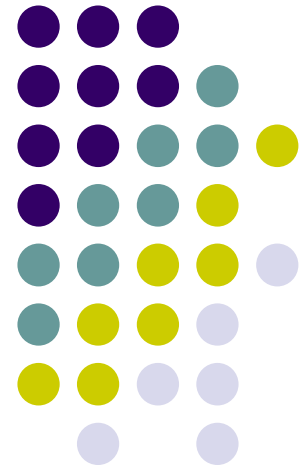
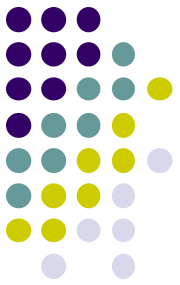


Рис. 5.3. Штампованный каркас и его развертка

**Проектирование и конструирование
телекоммуникационных систем и устройств**

Тепломассообмен в РЭА



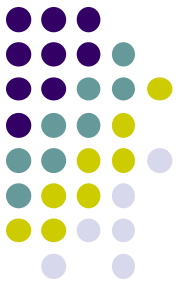


Влияние температуры на ЭРЭ

С ростом температуры:

- увеличивается удельное сопротивление металлов. Углеродистые резисторы при повышении температуры уменьшают свое сопротивление, а композиционные резисторы увеличивают.
- У диэлектриков уменьшается сопротивление и пробивное напряжение, возрастает $\text{tg}\delta$ и уменьшается диэлектрическая проницаемость.
- Полупроводники значительно увеличивают свою проводимость.
- У конденсаторов растет $\text{tg}\delta$, уменьшается пробивное напряжение, изменяется величина емкости. При отрицательных температурах плохо работают электролитические конденсаторы.
- Моточные изделия изменяют свою индуктивность и добротность за счет изменения магнитной проницаемости сердечника, геометрических размеров обмотки и их сопротивления.

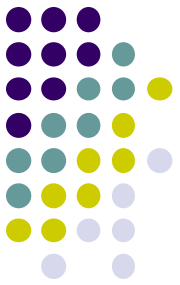
Влияние температуры на надежность ЭРЭ



При повышении температуры с 20°C до 80°C интенсивность отказов возрастает у:

- электронно-выпрямительных приборов в 1,5 – 2 раза;
- резисторов в 2 – 3 раза;
- полупроводников в 3 – 4 раза;
- конденсаторов в 6 – 8 раз;
- микросхем в 6 – 10 раз.

Определения



Тепломассообмен – раздел физики, в котором рассматриваются процессы переноса тепла (энергии) и массы (вещества).

Различают три вида переноса энергии:

- **Теплопроводность** – молекулярный перенос теплоты в сплошной среде за счет разности температур.
- **Конвекция** – процесс переноса теплоты при перемещении макроскопических объемов жидкости или газа из области повышенной температуры в область с пониженной температурой. Процесс конвекции связан с переносом вещества и сопровождается теплопроводностью.
- **Тепловое излучение** – процесс переноса тепла за счет энергии электромагнитного излучения.

Определения (продолжение)



Совокупность тел с различными теплофизическими параметрами и явно выраженными границами раздела называются системой тел или неоднородным телом, а каждая часть такой системы – однородным телом. Однородные тела могут быть *изотропными* и *анизотропными*.

Температурное поле – совокупность числовых значений температур в различных точках системы в данный момент времени, характеризует количественно тепловое состояние тела.

Тепловой поток P – количество тепла, переносимое в единицу времени через какую-либо поверхность, направлен в сторону убывания температуры.

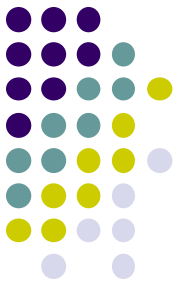
Удельный тепловой поток q – плотность теплового потока:

$$q = \frac{P}{S}.$$

где S – площадь поверхности.

Теплопроводность

Закон Фурье

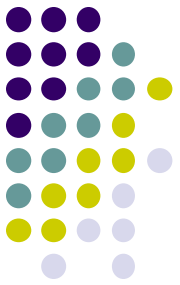


$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(t) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial t}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial t}{\partial z} \vec{k} \right),$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м К,

x, y, z – координаты,

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы.



Теплопроводность

Значения коэффициента теплопроводности для веществ

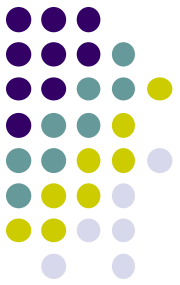
Вещество	λ, Вт/мК
Газы	0,05 – 0,5
Жидкости	0,07 – 0,7
Диэлектрики	0,02 – 3
Металлы	20 - 430

Теплопроводность

Значения коэффициента теплопроводности для материалов

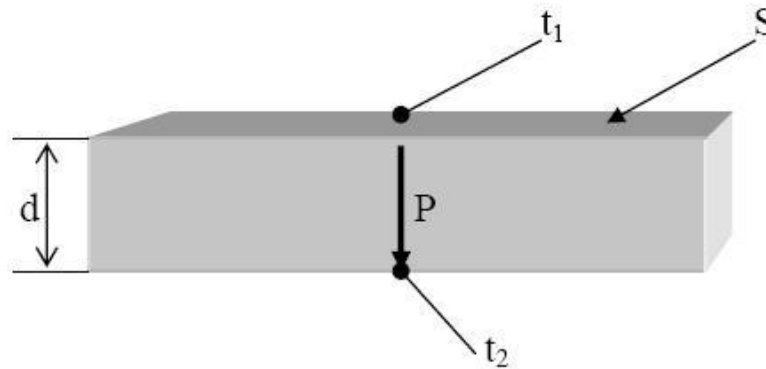


Материал	λ , Вт/мК	Материал	λ , Вт/мК
Медь	390	Асбест	0,11
Алюминий	210	Оргстекло	0,19
Латунь	105	Слюда	0,45
Серебро	420	Резина	0,15
Железо	74	Стеклотекстолит	0,37 – 0,74
Сталь 20	50	Гетинакс	0,17
Кремний	23,3	Поликор	35



Теплопроводность

Тепловой режим плоской пластины

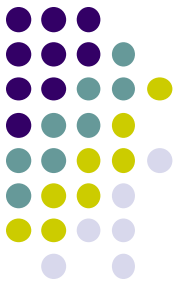


$$P_t = \frac{\lambda \cdot S}{d} (t_2 - t_1),$$

где t_1 и t_2 – температура на поверхности стенки, град. С;
 d – толщина стенки в направлении, перпендикулярном потоку P , м;
 S - площадь стенки в направлении, параллельном потоку P , м².

Теплопроводность

Электротепловая аналогия



Уравнения теплопроводности и электропроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \nabla^2 \theta,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{r \cdot C} \nabla^2 \varphi,$$

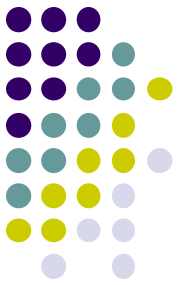
где θ и φ – обобщенные силы тепловой (температура) и электрической (потенциал) природы,

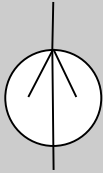
a – температуропроводность,

$1/rC$ – потенциалопроводность (постоянная времени).

Теплопроводность

Элементы теории тепловых цепей

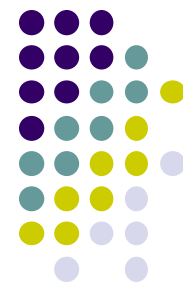


Электрические схемы	Обозначение	Тепловые схемы
Источник тока, I , А		Источник потока, P , Вт
Источник напряжения, U , В		Источник температуры, Θ , К
Электрическое сопротивление, R , Ом		Тепловое сопротивление, R , К/Вт

Электрические схемы	Обозначение	Тепловые схемы
Идеальный проводник		Идеальная теплопроводность
Электрическая емкость, C , Ф		Теплоемкость, c , Дж/К
Точка с напряжением U_i , В		Точка с температурой Θ_i , К
Заземление		Окружающая среда

Теплопроводность

Законы



- Тепловой закон Ома.
- Первый закон Кирхгофа:

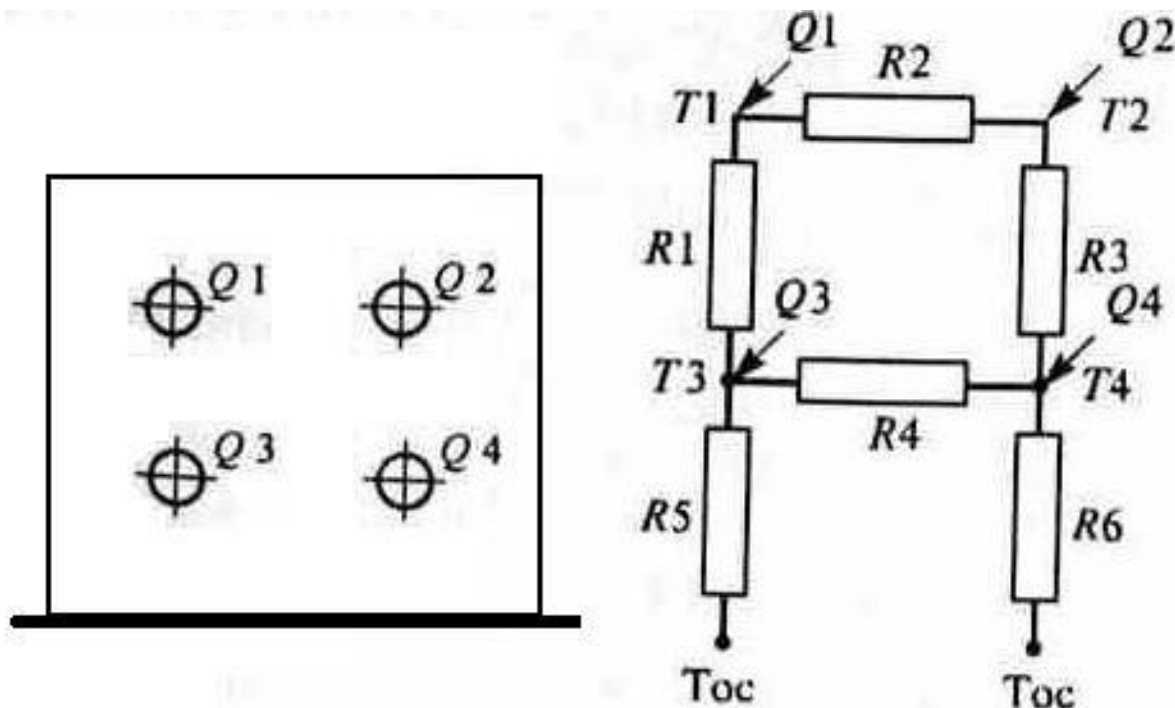
Алгебраическая сумма тепловых потоков P_i в узле тепловой цепи равна 0.

- Второй закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма разностей температур в любом замкнутом контуре тепловой цепи равна 0.

Теплопроводность

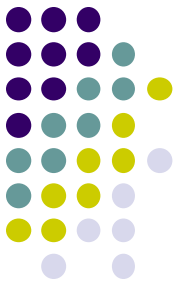
Пример расчета



$$\begin{cases} Q1 = (T1 - T3)/R + (T1 - T2)/R; \\ Q2 = (T2 - T1)/R + (T2 - T4)/R; \\ Q3 = (T3 - T1)/R + (T3 - T4)/R + (T3 - T_{oc})/R; \\ Q4 = (T4 - T2)/R + (T4 - T3)/R + (T4 - T_{oc})/R; \end{cases}$$

Теплопроводность

Решение



$$\begin{cases} R \cdot Q_1 = (T_1 - T_3) + (T_1 - T_2); \\ R \cdot Q_2 = (T_2 - T_1) + (T_2 - T_4); \\ R \cdot Q_3 = (T_3 - T_1) + (T_3 - T_4) + (T_3 - T_{\infty}); \\ R \cdot Q_4 = (T_4 - T_2) + (T_4 - T_3) + (T_4 - T_{\infty}); \end{cases}$$

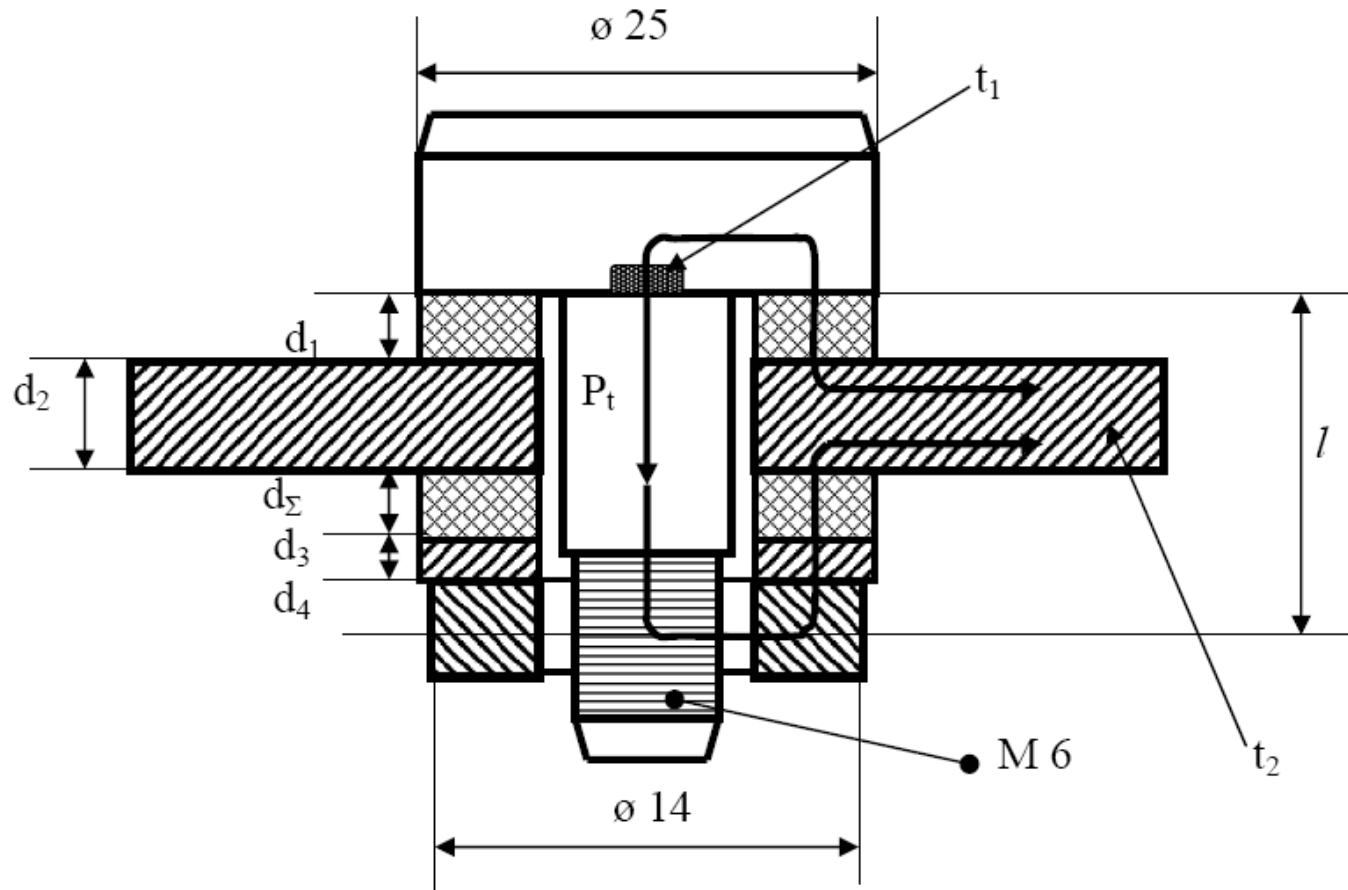
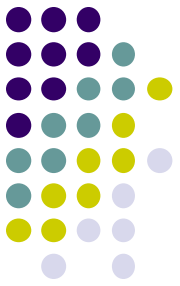
$$\begin{cases} R \cdot Q_1 = 2T_1 - T_3 - T_2; \\ R \cdot Q_2 = 2T_2 - T_1 - T_4; \\ R \cdot Q_3 + T_{\infty} = 3T_3 - T_1 - T_4; \\ R \cdot Q_4 + T_{\infty} = 3T_4 - T_2 - T_3. \end{cases}$$

$$\begin{cases} R \cdot Q_1 = 2T_1 - T_3 - T_2; \\ R \cdot Q_2 = 2T_2 - T_1 - T_4; \\ R \cdot Q_3 = 3T_3 - T_1 - T_4 - T_{\infty}; \\ R \cdot Q_4 = 3T_4 - T_2 - T_3 - T_{\infty}; \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} R \cdot Q_1 \\ R \cdot Q_2 \\ R \cdot Q_3 + T_{\infty} \\ R \cdot Q_4 + T_{\infty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +2 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & +2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & +3 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & +3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix}$$

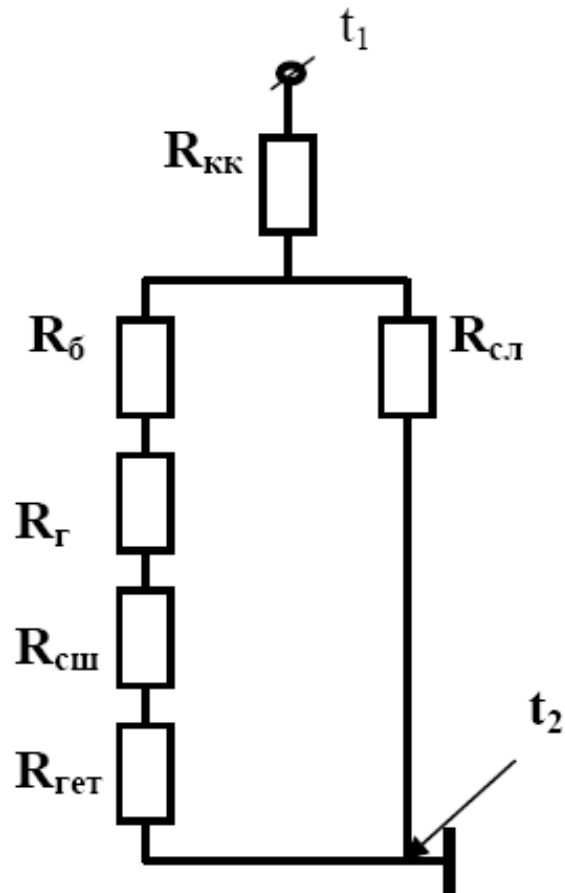
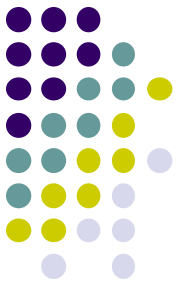
Теплопроводность

Расчет теплового режима мощного транзистора



Теплопроводность

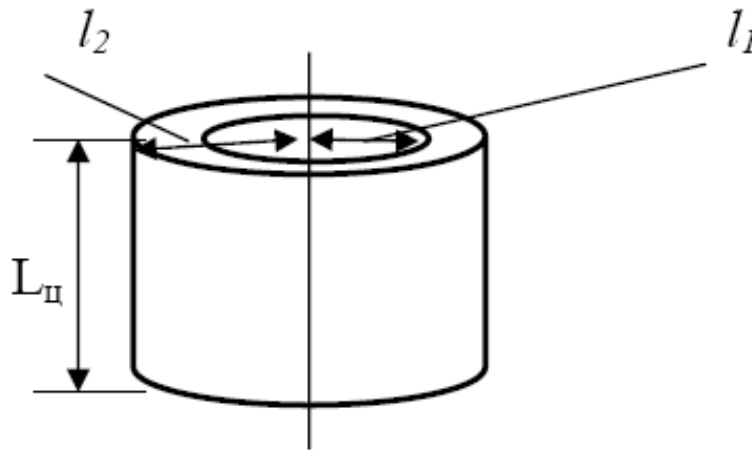
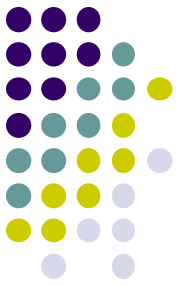
Расчеты



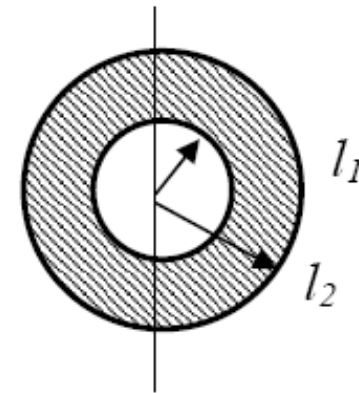
$$R_{\Sigma} = R_{кк} + R_{об},$$

Теплопроводность

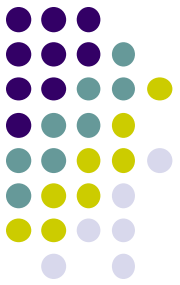
Тепловое сопротивление цилиндра и шара



$$R_y = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot L_y} \ln \frac{l_2}{l_1}$$



$$R_{\text{ш}} = \frac{1}{4\pi \cdot \lambda} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right)$$



Конвекция

Конвективный теплообмен

Конвективный теплообмен возникает как в жидкостях, так и в газах за счет неоднородности веса различных нагретых зон. Различают передачу тепла естественным или вынужденным путем.

Формула Ньютона:

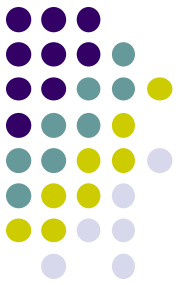
$$P_{\kappa} = \alpha_{\kappa} S (t_1 - t_2),$$

где P_{κ} – тепловой поток, переносимый через площадь S твердого тела с температурой t_1 окружающей среде с температурой t_2 ,

α_{κ} – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²К.

Конвекция

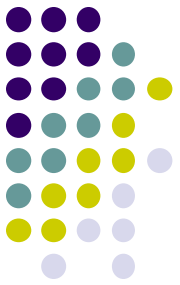
Коэффициент теплоотдачи конвекцией



Среда	$\alpha_k, \text{Вт/м}^2\text{К}$	
	Свободная конвекция	Вынужденная конвекция
Газы	2 - 10	10 - 100
Вязкие жидкости (масла)	200 - 300	300 - 1000
Вода	200 - 600	1000 - 3000
Кипение воды	500 - 45 000	
Конденсация капле водяного пара	1000 - 100 000	
Конденсация органических паров	500 - 2000	

Конвекция

Критерии



- Критерий Нуссельта (Nu) характеризует соотношение интенсивностей конвективного теплообмена и теплопроводности в пристеночном слое жидкости или газовой среды:

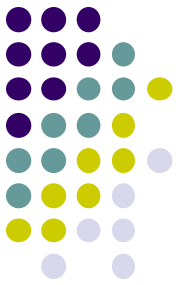
$$Nu = \frac{\alpha_{\kappa} L}{\lambda}.$$

- Критерий Грасгофа (Gr) характеризует соотношение подъемной и вязкой сил в потоке жидкости или газа:

$$Gr = \frac{\beta g L^3 (t_1 - t_2)}{\nu^2}.$$

- Критерий Прандтля (Pr) характеризует физические свойства среды:

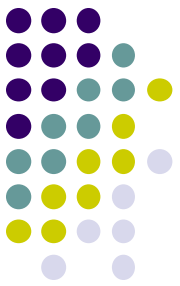
$$Pr = \frac{\nu}{a}.$$



Конвекция

Взаимосвязь критериев

$(Gr \cdot Pr)$	C	n	Режим движения
$1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0	Пленочный
$1 \cdot 10^{-3} - 500$	1,18	1/8	Переход к ламинарному
$500 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Ламинарный
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	1/3	Турбулентный

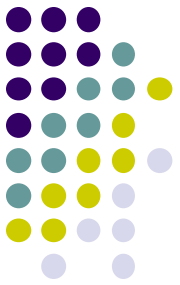


Конвекция

Упрощенные формулы расчета

Поверхность	Определяющий размер, L	Ориентация, N
Шары, горизонтальные цилиндры	Диаметр	1
Вертикальные пластины и цилиндры	Высота	1
Горизонтальные пластины с нагретой поверхностью вверху внизу	Максимальный размер пластины	1,3 0,7

Естественная конвекция в неограниченном пространстве



Рабочие формулы, удобные для расчетов конвективных коэффициентов тел различной конфигурации в условиях естественной конвекции и неограниченного пространства.

1. При анализе **теплового режима радиодеталей** необходимо знать конвективные коэффициенты теплоотдачи различных проводников и с удовлетворительной точностью такие расчёты можно проводить по формуле для неограниченного цилиндра. Определяющий размер – диаметр.

$$\alpha_k = A_1 \cdot \left(\frac{t - t_c}{d^5} \right)^{1/8}$$

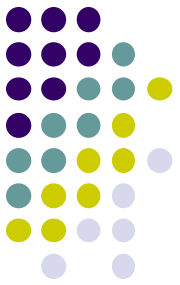
где d – диаметр проводника, мм.

В коэффициент вошли все физические параметры среды.

$$A_1 = 1,18 (\beta \cdot g \cdot \text{Pr})_m^{1/8} \cdot \frac{\lambda_m}{\nu_m^{1/4}}$$

Конвекция

Естественная конвекция в неограниченном пространстве



2. Теплоотдача плоской и цилиндрической поверхностей – это плоские и цилиндрические поверхности стенок кожуха аппаратуры, шасси вне кожуха, плоские поверхности ребер и т.д.

Вначале определяют неравенство, позволяющее оценить закон движения около нагретой поверхности:

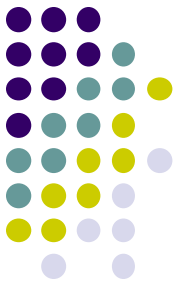
$$(t - t_c) \leq \left(\frac{840}{L} \right)^3$$

где L - определяющий размер поверхности.

Если неравенство выполняется, то движение среды подчиняется закону 1/4 степени, в противном случае имеет место закон 1/3 степени

Конвекция

Естественная конвекция в неограниченном пространстве



- Теплообмен по закону 1/4 степени.

Для вертикально ориентированной поверхности высотой L или цилиндр диаметром L

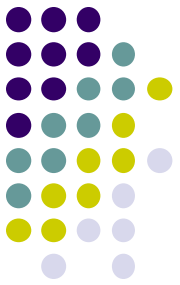
$$\alpha_k = A_2 \cdot \left(\frac{t - t_c}{L} \right)^{1/4}$$

Для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх. Определяющий размер L – наименьшая сторона поверхности.

$$\alpha_k = 1,3 \cdot A_2 \cdot \left(\frac{t - t_c}{L} \right)^{1/4}$$

Конвекция

Порядок расчета

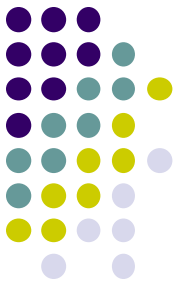


Порядок расчета теплообмена свободной конвекцией с помощью критериев:

1. Необходимо определить усредненную температуру t_m .
2. Найти из справочной литературы значения α , β , λ , ν , ρ , c_p .
3. По значениям коэффициентов найти величину произведения $(Gr \cdot Pr)$, по которому из таблицы найти значения C и n .
4. Рассчитать критерий Нуссельта и α_k .
5. По формуле Ньютона найти P_k .

Конвекция

Теплообмен при вынужденной конвекции



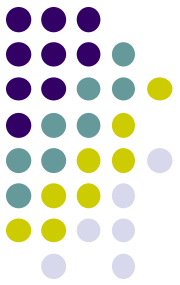
При вынужденной конвекции вид формул для расчета критерия Нуссельта зависит от числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu}.$$

где w – скорость обдува, м/с; L – размер тела в направлении обдува, м.

Конвекция

Продольный обдув



При продольном обдуве и при ламинарном движении жидкости или газа ($Re < 5 \cdot 10^5$) в диапазоне температур $0 \div 1000^\circ \text{C}$ критерий Нуссельта определяется выражением:

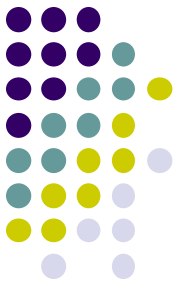
$$Nu = 0,57Re^{0,5}.$$

При значении $Re > 5 \cdot 10^5$ критерий Нуссельта рассчитывается по выражению:

$$Nu = 0,032Re^{0,8}.$$

Конвекция

Поперечный обдув

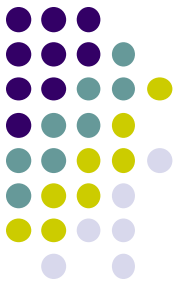


При поперечном обдуве в теплоотдаче важную роль играет форма тела. Определяющим размером L является длина обтекания:

- Для шара и цилиндра $L = 0,5\pi d$,
- Для пластины $L = l$.
- Для пластины размером $(a \times b)$, ориентированной под углом к потоку $L = a + b$.

При значении числа Рейнольдса $10 < Re < 10^5$ критерий Нуссельта с точностью до 20% можно определить по формуле:

$$Nu = 0,8Re^{0,5}.$$



Конвекция

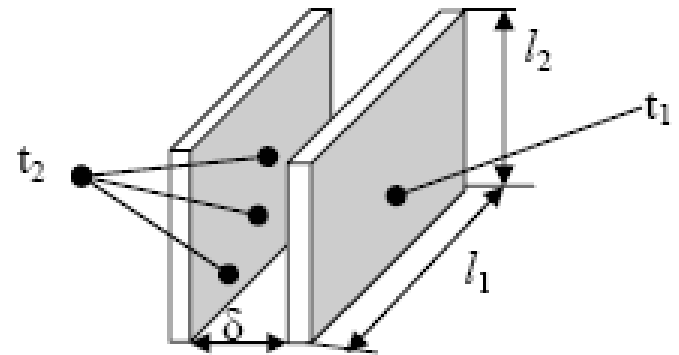
Свободная конвекция в ограниченном пространстве

При передаче тепла за счет теплопроводности и конвекции через ограниченные прослойки (толщина прослойки много меньше ее размеров) тепловой поток рассчитывается по выражению:

$$P_k' = kS(t_1 - t_2),$$

где t_1 и t_2 – температура нагретой и более холодной границ прослойки;

k – коэффициент конвективно-кондуктивной теплопередачи.



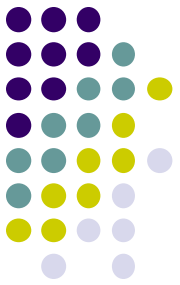
Конвекция

Коэффициент конвективно-кондуктивной теплопередачи



Зависимость значений коэффициента B от температуры воздуха

$t_m^0, ^\circ\text{C}$	0	50	100	200
B	0,63	0,58	0,56	0,44



Конвекция

Зависимость от давления

Конвекция зависит от давления газа. Связь между α_k и $\alpha_k(p)$ при $10^2 < p < 10^6$ Па имеет следующий вид:

$$\alpha_k(p) = \alpha_k \left(\frac{p}{p_0} \right)^{2n},$$

где n – значение параметра из таблицы; $n = 0,25$ для прослоек.

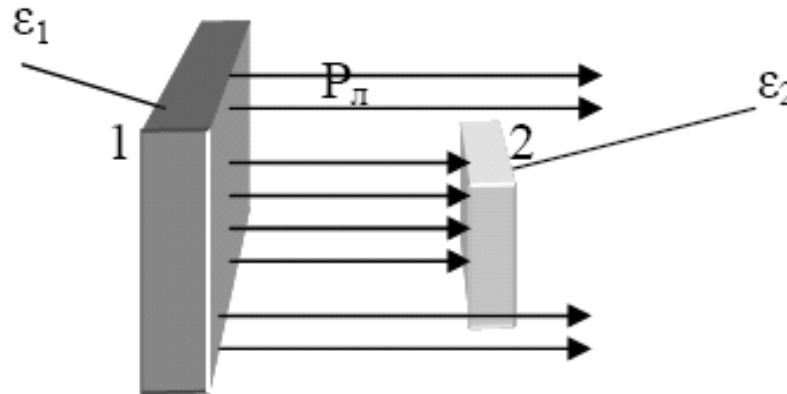
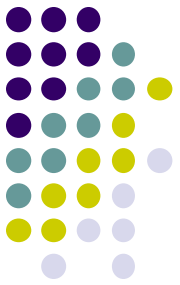
На границе раздела твердое тело – жидкость (газ) тепловое сопротивление конвективному переносу тепла имеет вид:

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k S},$$

т.е. теорией тепловых цепей можно пользоваться и для расчета конвективного тепломассообмена.

Излучение

Передача тепла излучением

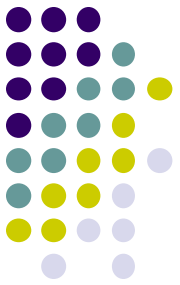


При теплообмене излучением серых тел уравнение для теплового потока принимает вид:

$$P_{\ddot{e}} = \alpha_{\ddot{e}} S (t_1 - t_2),$$

где $\alpha_{\ddot{e}}$ – коэффициент теплообмена излучением, Вт/м²К.

Тепловое сопротивление излучению: $R_{\ddot{e}} = \frac{1}{\alpha_{\ddot{e}} S}.$



Излучение

Коэффициент теплообмена излучением

$$\alpha_{\ddot{e}} = \varepsilon_{\ddot{i}\ddot{o}} \varphi_{12} \sigma_0 \frac{(t_1 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_1 - t_2};$$

$\varepsilon_{\ddot{i}\ddot{o}}$ – приведенная степень черноты пары тел;

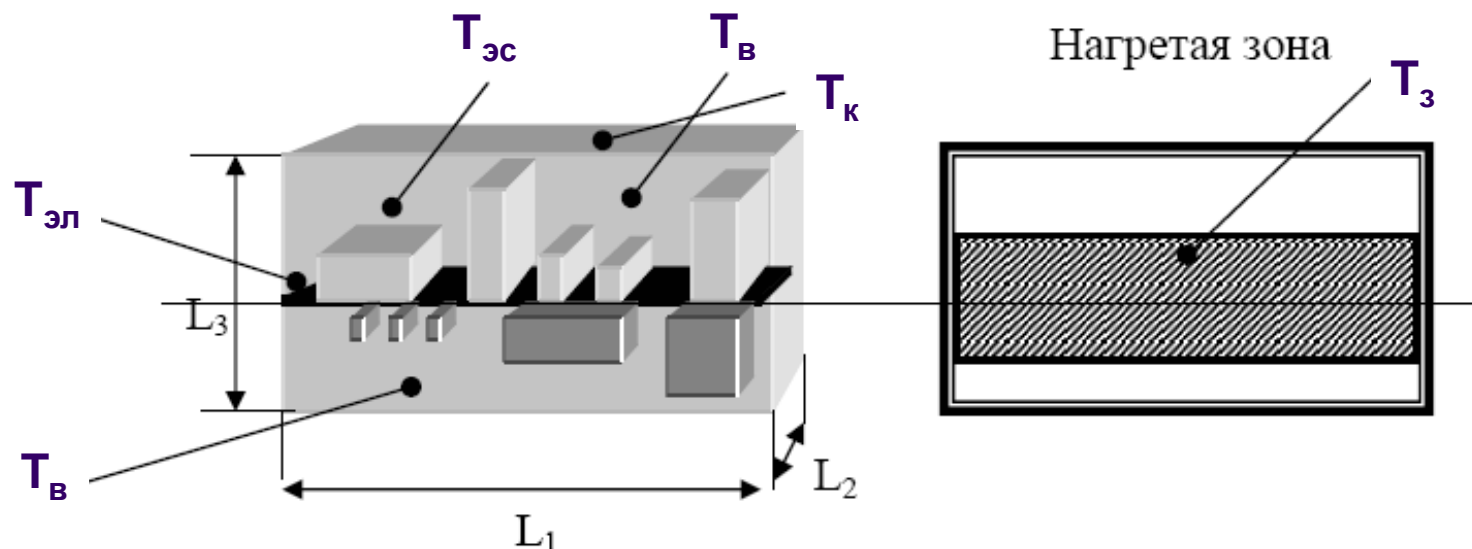
φ_{12} – коэффициент облученности второго тела первым;

$\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана.

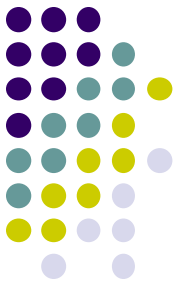


Материалы и состояние поверхности	Температура, °С	Коэффициент черноты, ε
Алюминий (тщательно полированная пластина)	200-600	0,04-0,06
Алюминий (сильно окислен)	35-500	0,20-0,31
Силуминовое литье (в песчаной форме)	100-500	0,33-0,31
Силуминовое литье (в кокильной форме)	100-500	0,16-0,23
Дюралюминий Д-16	50-350	0,37-0,41
Сталь полированная	100	0,066
Сталь листовая холоднокатаная	93	0,075-0,085
Сталь листовая сильно окисленная	25	0,80-0,82
Сталь различных сортов после окисления	300-800	0,86-0,92
Латунь прокатанная	22	0,06
Латунь прокатанная и обработанная грубым наждаком	22	0,20
Латунь тусклая	50-350	0,22
Латунь хромированная полированная	100	0,075
Латунь торговая шлифованная	20	0,030
Медь, шабренная до блеска	22	0,072
Медь (пластина после нагрева до 600° С)	200	0,57
Никель, проволока окисленная	70-200	0,44
Олово, луженое кровельное железо	100	0,07-0,08
Цинк, оцинкованное железо	25	0,23-0,27
Асбестовый картон, бумага, ткань	20-300	0,93
Бумага тонкая, наклеенная на лакированную пластинку	20	0,92
Краски эмалевые, лаки различных цветов	20-100	0,92
Краски матовые различных цветов	100	0,92-0,96
Лак черный матовый	40-100	0,96-0,98
Муар серый, черный	20	0,86-0,90
Краска защитно-зеленая	20	0,90
Краска бронзовая	100	0,51
Краска алюминиевая	100	0,28
Краски алюминиевые разной давности с переменным содержанием алюминия	100	0,28-0,67
Алюминиевая фольга без масла	100	0,09
Алюминиевая фольга, покрытая слоем масла	100	0,56
Окиси металлов	20	0,04-0,8
Никелированные поверхности		0,05- 0,07

Схема блока РЭС в герметичном исполнении

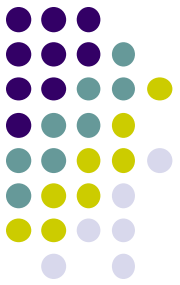


- T_k — температура корпуса блока;
- T_c — температура окружающей блок среды;
- $T_з$ — температура нагретой зоны;
- $T_{эл}$ — температура поверхности элемента;
- $T_в$ — средняя температура воздуха в блоке;
- $T_{эс}$ — температура окружающей элемент среды.



Исходные данные

1. Мощность, рассеиваемая в блоке, $P=30$ Вт;
2. мощность, рассеиваемая двумя элементами:
 - $P_{эл_1} = 2,8$ Вт;
 - $P_{эл_2} = 2,2$ Вт;
3. горизонтальные размеры корпуса блока $L_1 = 0,160$ м, $L_2 = 0,180$ м;
4. вертикальный размер корпуса блока $L_3 = 0,190$ м;
5. площадь поверхности элементов:
 - $S_{эл_1} = 8 \cdot 10^{-3}$ м²;
 - $S_{эл_2} = 118 \cdot 10^{-3}$ м²;
6. коэффициент заполнения $K_3 = 0,3$;
7. температура окружающей среды $T_c = 293$ К (+20°C);
8. давление окружающей среды $H_1 = H_2 = 0,1$ МПа.



Порядок расчета

1. Рассчитывается поверхность корпуса блока по формуле:

$$S_k = 2[L_1 L_2 + L_3(L_1 + L_2)],$$
$$S_k = 2 \cdot [0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190] = 0,187 \text{ м}^2.$$

2. Определяется условная поверхность нагретой зоны по формуле:

$$S_3 = 2[L_1 L_2 + K_3 L_3(L_1 + L_2)],$$
$$S_3 = 2 \cdot [0,160 \cdot 0,180 + (0,160 + 0,180) \cdot 0,190 \cdot 0,3] = 0,096 \text{ м}^2.$$

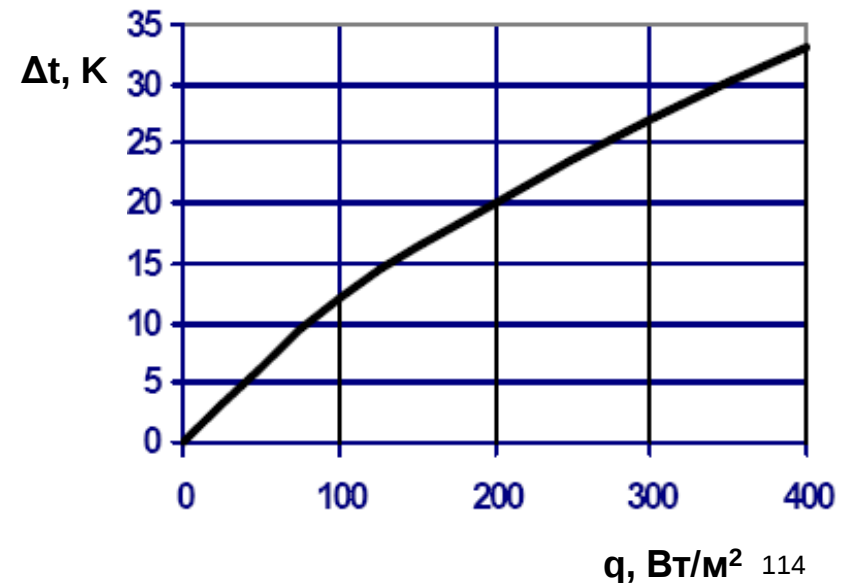
3. Определяется удельная мощность корпуса блока:

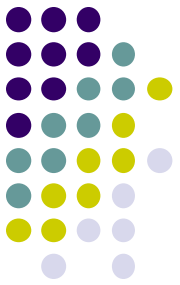
$$q_k = 30 / 0,187 = 160 \text{ Вт/м}^2.$$

4. Рассчитывается удельная мощность нагретой зоны:

$$q_3 = 30 / 0,096 = 312 \text{ Вт/м}^2.$$

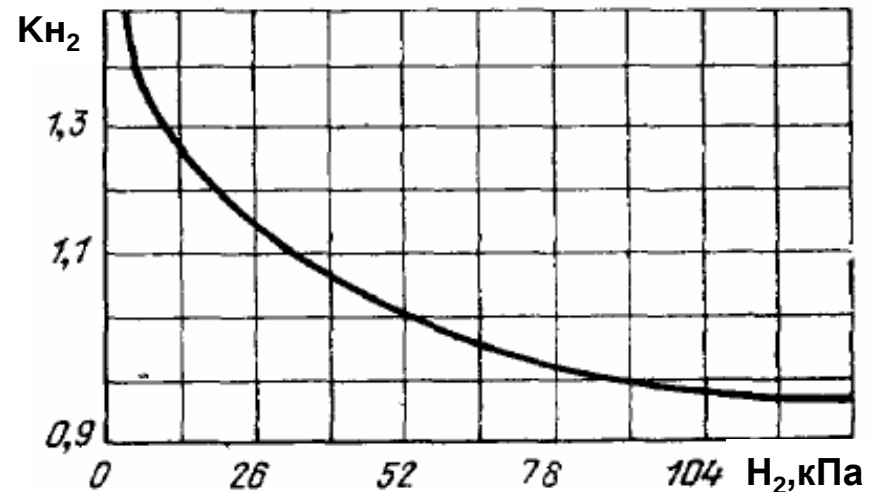
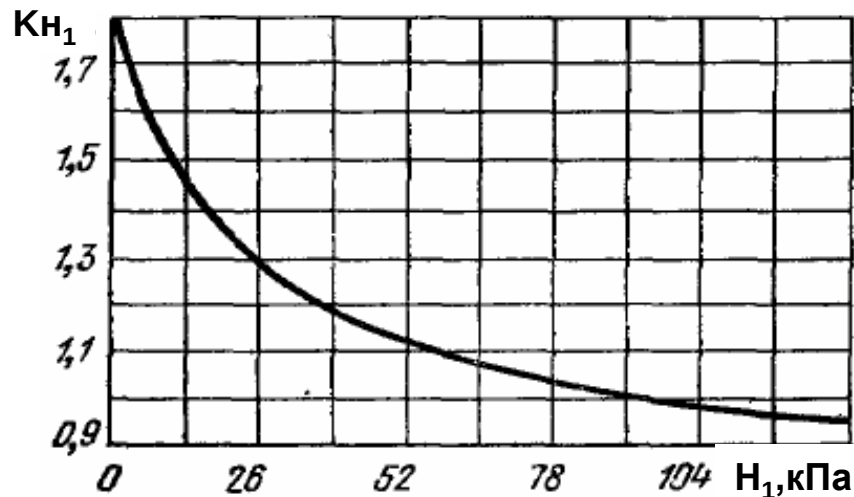
5. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности корпуса блока: $\Delta t_1 = 17,5 \text{ К}$.



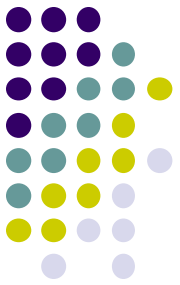


Порядок расчета

6. Находится коэффициент в зависимости от удельной мощности нагретой зоны: $\Delta t_2 = 27 \text{ K}$.



7. Находится коэффициент, зависящий от атмосферного давления H_1 вне корпуса: $K_{H1} = 1,0$.
8. Находится коэффициент, зависящий от давления внутри корпуса H_2 блока: $K_{H2} = 1,0$.



Порядок расчета

9. Определяется перегрев корпуса блока по формуле:

$$\Delta t_k = \Delta t_1 \cdot K_{H1},$$
$$\Delta t_k = 17,5 \cdot 1,0 = 17,5 \text{ K}.$$

10. Рассчитывается перегрев нагретой зоны по формуле:

$$\Delta t_3 = \Delta t_k + (\Delta t_2 - \Delta t_1) K_{H2},$$
$$\Delta t_3 = 17,5 + (27 - 17,5) \cdot 1,0 = 27 \text{ K}.$$

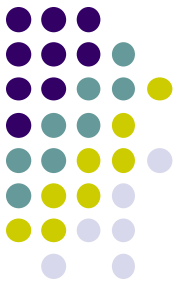
11. Определяется средний перегрев воздуха в блоке по формуле:

$$\Delta t_b = 0,5(\Delta t_k + \Delta t_3),$$
$$\Delta t_b = 0,5 \cdot (27 + 17,5) = 22,25 \text{ K}.$$

12. Определяется удельная мощность элементов по формуле:

$$q_{\text{эл}} = P_{\text{эл}} / S_{\text{эл}};$$

- a) $q_{\text{эл1}} = 2,8/8 \cdot 10^{-3} = 350 \text{ Вт/м}^2$;
- b) $q_{\text{эл2}} = 2,2/118 \cdot 10^{-3} = 18,6 \text{ Вт/м}^2$.



Порядок расчета

13. Рассчитывается перегрев поверхности элементов по формуле:

$$\Delta t_{\text{эл}} = \Delta t_3(a + b \cdot q_{\text{эл}}/q_3)$$

a) $\Delta t_{\text{эл}1} = 27 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 350/312) = 27,8 \text{ К},$

b) $\Delta t_{\text{эл}2} = 27 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 18,6/312) = 20,7 \text{ К}.$

14. Рассчитывается перегрев окружающей элементы среды по формуле:

$$\Delta t_{\text{эс}} = \Delta t_{\text{в}}(a + b \cdot q_{\text{эл}}/q_3),$$

a) $\Delta t_{\text{эс}1} = 22,25 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 350/312) = 22,9 \text{ К},$

b) $\Delta t_{\text{эс}2} = 22,25 \cdot (0,75 + 0,25 \cdot 18,6/312) = 17 \text{ К}.$

15. Определяется температура корпуса блока по формуле:

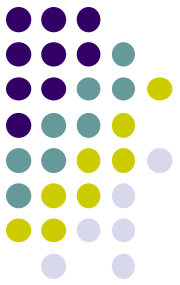
$$T_{\text{к}} = \Delta t_1 + T_{\text{с}},$$

$$T_{\text{к}} = 17,5 + 293 = 310,5 \text{ К}.$$

16. Определяется температура нагретой зоны по формуле:

$$T_3 = \Delta t_3 + T_{\text{с}},$$

$$T_3 = 27 + 293 = 320 \text{ К}.$$



Порядок расчета

17. Находится температура поверхности элементов по формуле:

$$T_{\text{эл}} = \Delta t_{\text{эл}} + T_{\text{с}},$$

a) $T_{\text{эл1}} = 27,8 + 293 = 320,8 \text{ K},$

b) $T_{\text{эл2}} = 20,7 + 293 = 313,7 \text{ K}.$

18. Находится средняя температура воздуха в блоке по формуле:

$$T_{\text{в}} = \Delta t_{\text{в}} + T_{\text{с}},$$

$$T_{\text{в}} = 25,3 + 293 = 318,2 \text{ K}.$$

19. Находится температура окружающей элементы среды по формуле:

$$T_{\text{эс}} = \Delta t_{\text{эс}} + T_{\text{с}},$$

a) $T_{\text{эс1}} = 22,9 + 293 = 315,9 \text{ K},$

b) $T_{\text{эс2}} = 17 + 293 = 310 \text{ K}.$

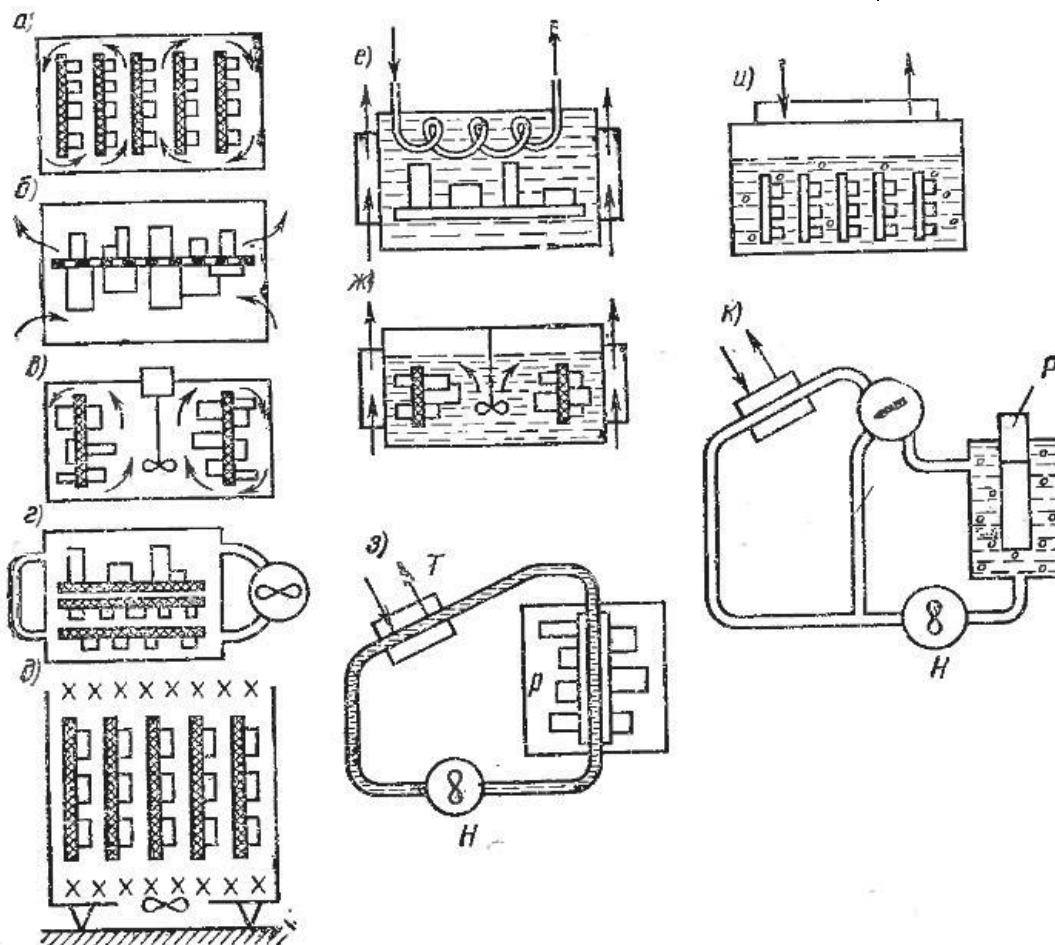
Системы охлаждения РЭС



Системой охлаждения (СО) называется совокупность устройств и элементов, предназначенных для охлаждения РЭС.

Системы охлаждения подразделяются на:

- Воздушные.
- Жидкостные.
- Испарительные.
- Кондуктивные.
- Радиационные.
- Специальные.
- Комбинированные.



Основные формулы теплопередачи

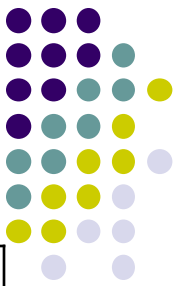


Определяемая величина	Формула	
Теплоотдача конвекцией	$P_K = \alpha_K \cdot S(t_1 - t_2)$,	Bm (1)
Теплопередача излучением	$P_L = 5,67 \varepsilon_n \varphi_{12} S \frac{\left(\frac{t_1+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2+273}{100}\right)^4}{t_1 - t_2}$,	Bm (2)
Теплопередача теплопроводностью через плоскую стенку толщиной δ	$P_T = \frac{\lambda S}{\delta} (t_1 - t_2)$	Bm (3)
Тепловое сопротивление плоской стенки толщиной δ , площадью S	$R_n = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}$,	K/Bm (4)
Тепловое сопротивление цилиндрической стенки длиной L	$R_{ц} = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{r_2}{r_1}$,	K/Bt (5)
Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена по закону степени 1/8	$\alpha_K = 1,18(\beta g P_r)_m^{1/8} \cdot \frac{\lambda_m}{v_m^{1/4}} \cdot \left(\frac{t_1 - t_{окр.ср.}}{L^5}\right)^{1/8} \cdot N$,	Bm/m^2K (6)
Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена по закону степени 1/4	$\alpha_K = 0,54(\beta g P_r)_m^{1/4} \cdot \frac{\lambda_m}{v_m^{1/2}} \cdot \left(\frac{t_1 - t_{окр.ср.}}{L}\right)^{1/4} \cdot N$,	Bm/m^2K (7)

Основные формулы теплопередачи (продолжение)



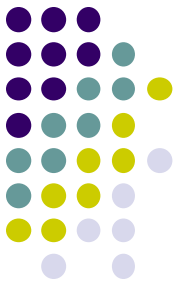
Коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена по закону степени 1/3	, $\alpha_k = 0,135(\beta g P_r)_m^{1/3} \cdot \frac{\lambda_m}{v_m^{2/3}} \cdot (t_1 - t_{\text{окр.ср}})^{1/3} \cdot N \quad \text{Вт/м}^2\text{К} \quad (8)$
Коэффициент теплообмена излучением	$\alpha_{\pi} = \varepsilon_{n1} \varphi_{12} f(t_1, t_2) \quad \text{Вт/м}^2\text{К} \quad (9)$
Конвективно-кондуктивный коэффициент для ограниченного пространства по закону степени 1/4	$K = N \cdot \left[6,25 - 5,25 \left(1 + \frac{\delta}{l} \right)^{-1,67} \right] \cdot 0,24 \lambda \frac{(\beta g P_r)^{1/4}}{v^{1/2}} \cdot \sqrt[4]{\frac{t_1 - t_2}{\delta}} \quad \text{Вт/м}^2\text{К} \quad (10)$ где $l = \sqrt{l_1 \cdot l_2}$
Критерий Нуссельта при вынужденном движении среды	$Nu_f = \frac{\alpha}{\lambda_f} l' \quad (11)$
Критерий Рейнольдса при вынужденном движении среды	$Re_f = \frac{v l'}{v_f} \quad Re < 4 \cdot 10^4 \quad (12)$
Критерий Прандтля при параметрах температуры жидкости (f) и стенки (w)	$Pr_f = \frac{v_f}{\alpha_f} \quad Pr_w = \frac{v_w}{\alpha_w} \quad (13)$
Критическое число Рейнольдса	$Re = 4 \cdot 10^4 \quad (14)$
Критериальное уравнение для ламинарного течения среды при	$Nu_f = 0,66 Re_f^{0,5} Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$



Основные формулы теплопередачи (продолжение)

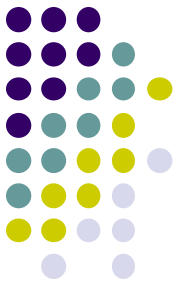
Критериальное уравнение для воздуха при $Re < 4 \cdot 10^4$	$Nu_f = 0,57 \sqrt{Re_f} \quad (16)$
Критериальное уравнение для турбулентного течения среды при $Re > 4 \cdot 10^4$	$Nu_f = 0,037 Re_f^{0,8} \cdot p_{rf}^{0,43} \left(\frac{p_{rf}}{p_{rw}} \right)^{0,25} \quad (17)$
Критериальное уравнение для воздуха при $Re > 4 \cdot 10^4$	$Nu_f = 0,032 Re_f^{0,8} \quad (18)$
Приведенная степень черноты двух плоских тел	$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (19)$
Приведенная степень черноты нагретого тела, окруженного оболочкой	$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{S_1}{S_2}} \quad (20)$
Общий случай определения приведенной степени черноты	$\varepsilon_n = \frac{1}{1 + \varphi_{12} \left[\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]} \quad (21)$
Функция температуры	$f(t_1, t_2) = 5,67 \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4}{t_1 - t_2} \quad (22)$

Основные формулы теплопередачи (продолжение)

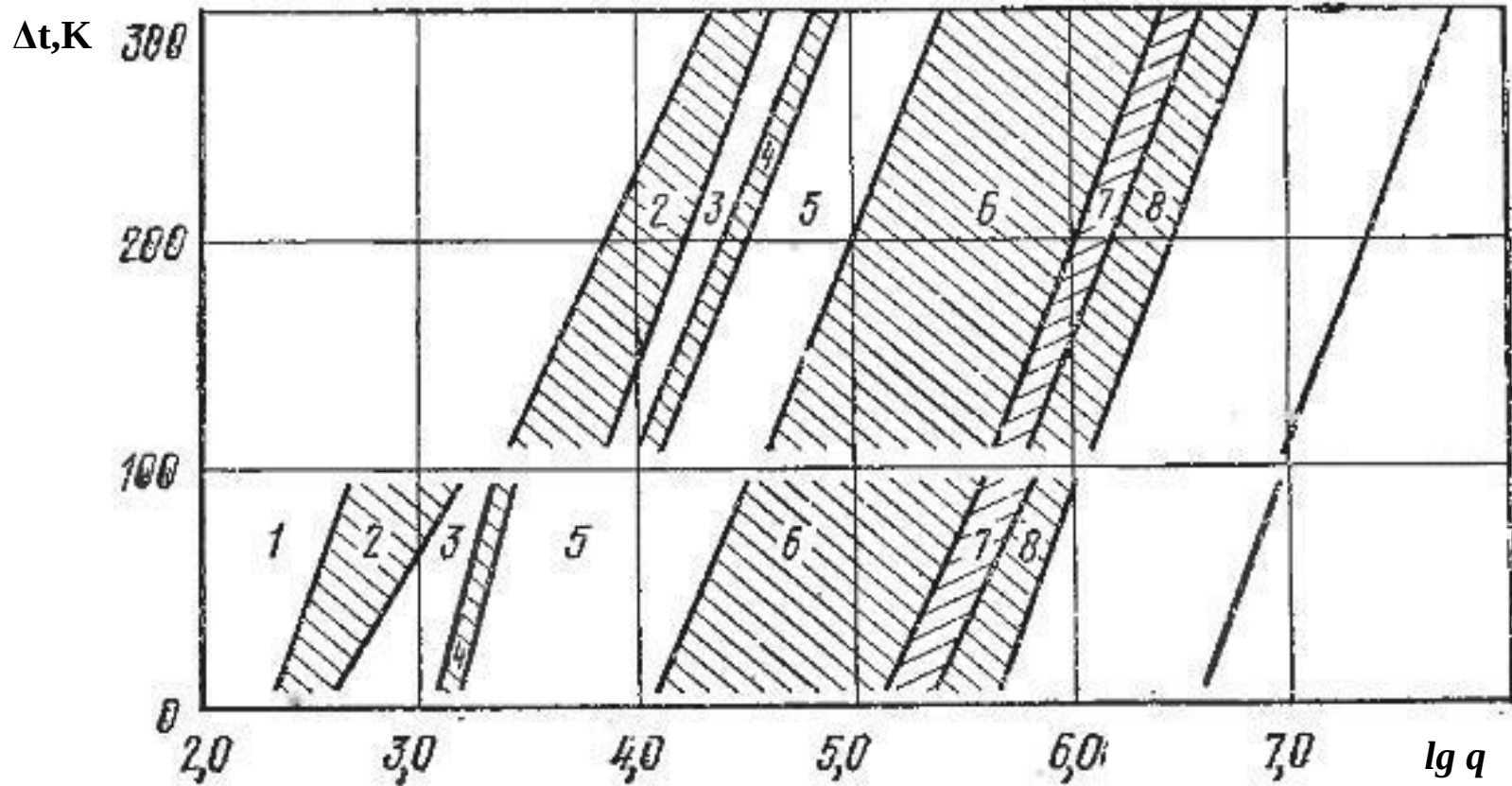


Принятые обозначения

- P – тепловой поток, $Вт$
- α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $Вт/м^2 \cdot K$
- t_1, t_2 – температура нагретой и холодной поверхностей, $^{\circ}C$
- S – площадь поверхности, $м^2$
- S_1, S_2 – площади поверхностей нагретого и холодного тел, $м^2$
- ε_n – приведенная степень черноты
- φ_{12} – коэффициент взаимной облученности 1 и 2 тел
- λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/м \cdot K$
- δ – толщина стенки, $м$
- L – определяющий размер, $м$
- r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы цилиндра, $м$
- β – коэффициент объемного расширения, K^{-1}
- g – ускорение свободного падения, $м/сек^2$
- ν – коэффициент кинематической вязкости, $м^2/сек$

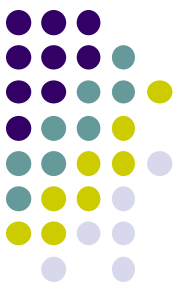


Выбор системы охлаждения РЭС



$$\Delta t = T_{imin} - T_c,$$

$$q = P/k_p S, \text{ где } S = 2(L_1 L_2 + (L_1 + L_2)L_3 K_3).$$



Интенсивность теплопередачи различных способов охлаждения

Способ теплопередачи	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² К)
Естественная 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
Принудительная конвекция в воде	1000 - 3000
Кипение воды	500 - 45000
Капельная конденсация водяных паров	40000 - 120000

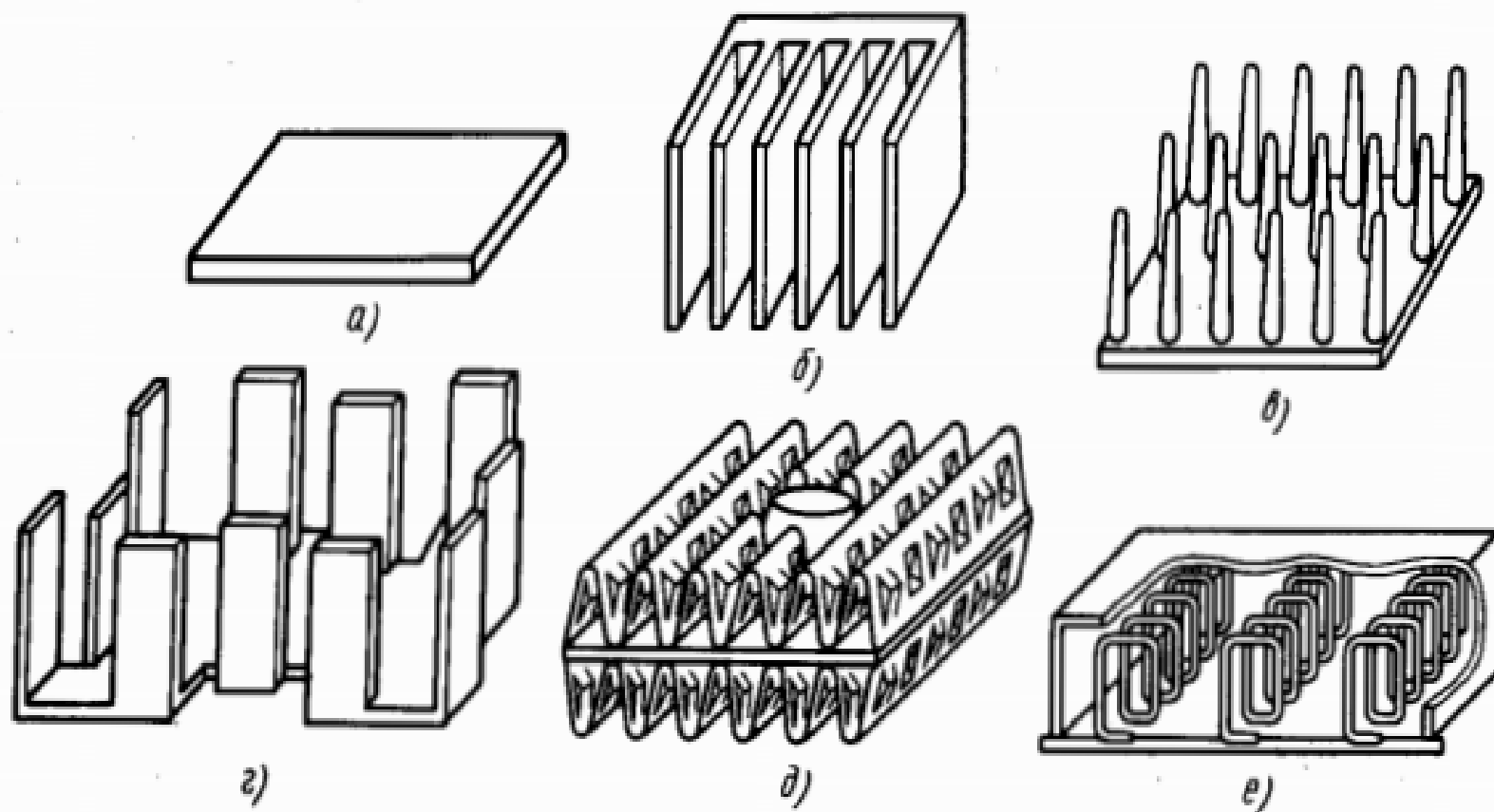


Рис. 3.8. Радиаторы воздушного охлаждения:

a — в виде пластины; *б* — в виде группы пластин; *в* — игольчатый; *г* — с пластинами по периферии; *д* — с перфорированными пластинами; *е* — спиральный

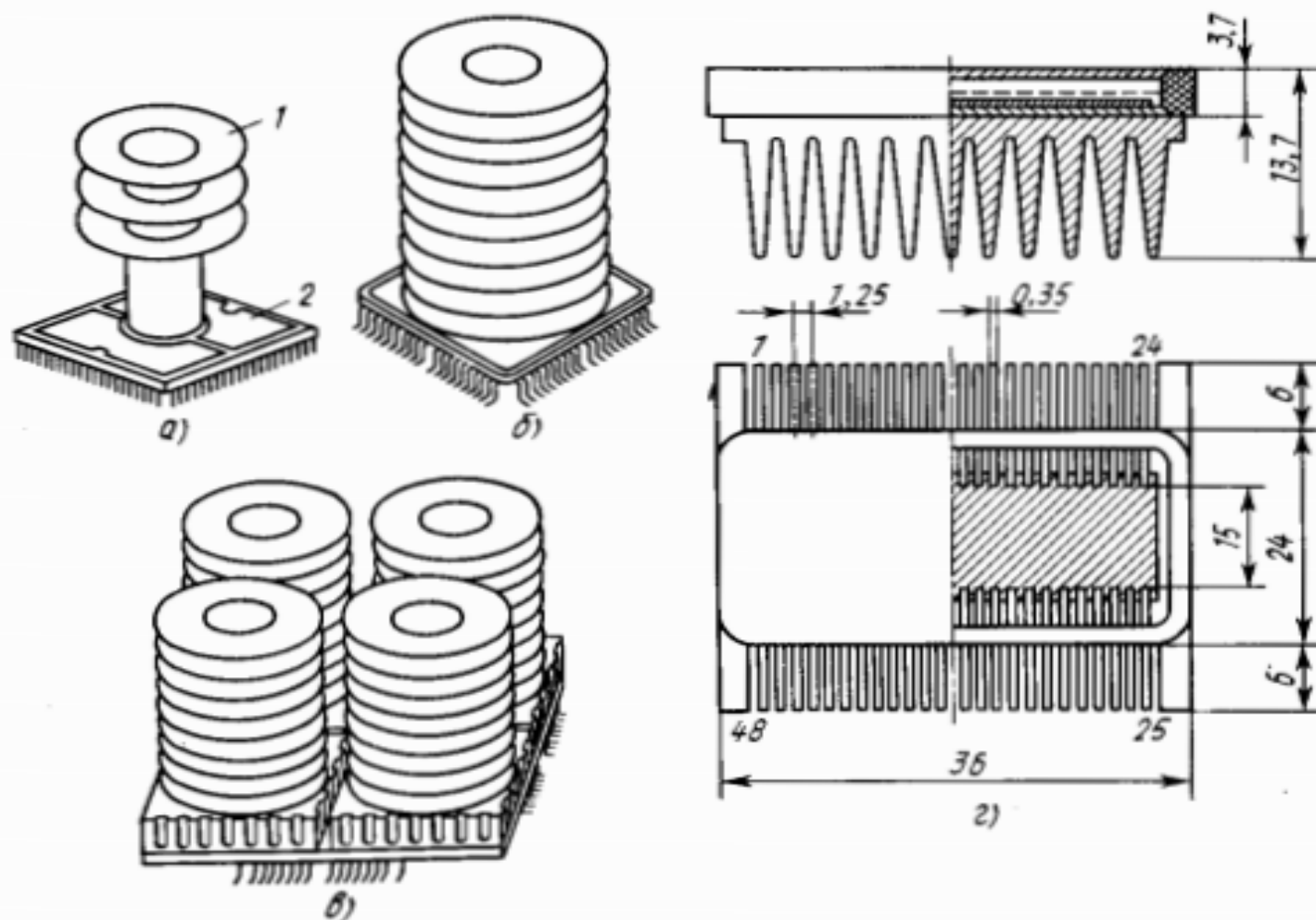


Рис. 3.9. Радиаторы воздушного охлаждения для БИС:

a — 3-реберный радиатор; *1* — дисковые ребра радиатора, *2* — БИС; $P=3$ Вт; *б* — 10-реберный радиатор; $P=10$ Вт; *в* — микросборка с четырьмя 10-реберными радиаторами; $P=40$ Вт; *г* — корпус типа 421.48-3

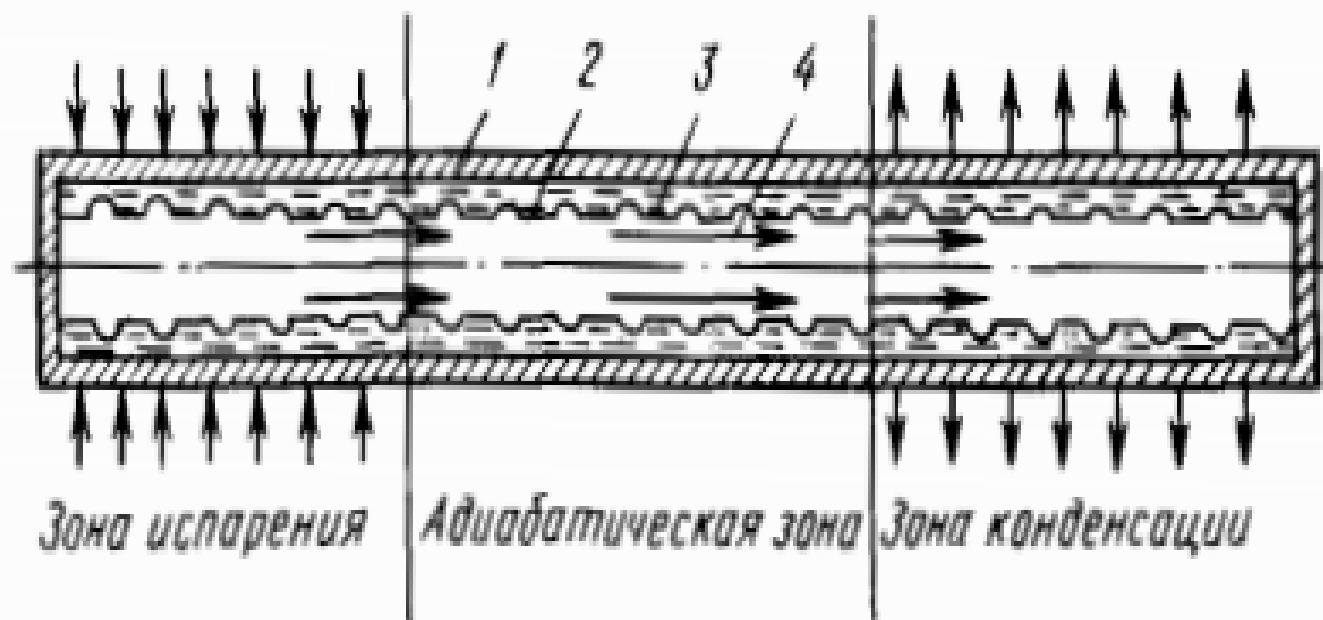


Рис. 3.15. Схема цилиндрической тепловой трубы:
1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — жидкость в фитиле; 4 — поток пара

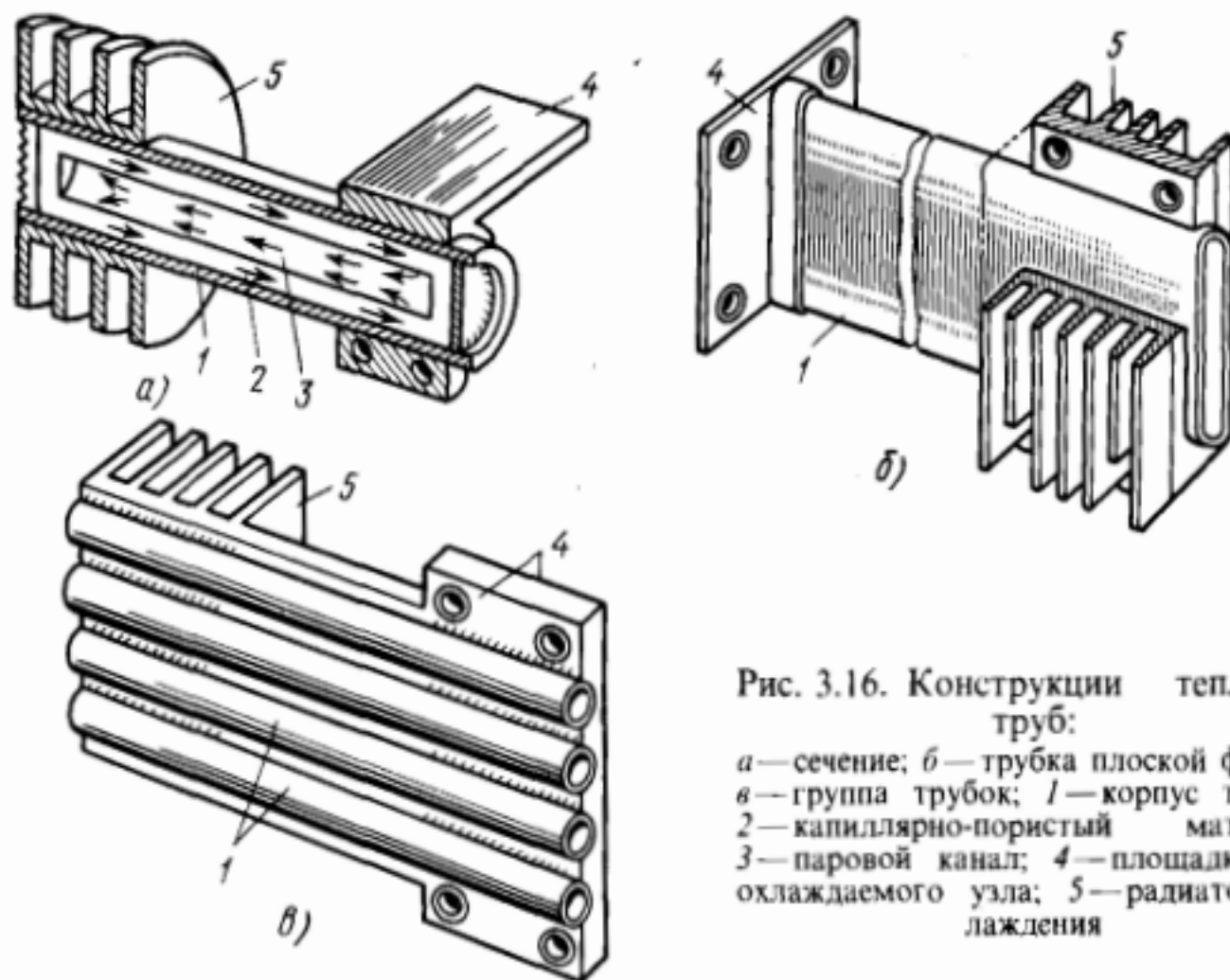


Рис. 3.16. Конструкции тепловых труб:

а—сечение; *б*—трубка плоской формы; *в*—группа трубок; 1—корпус трубки; 2—капиллярно-пористый материал; 3—паровой канал; 4—площадка для охлаждаемого узла; 5—радиатор охлаждения

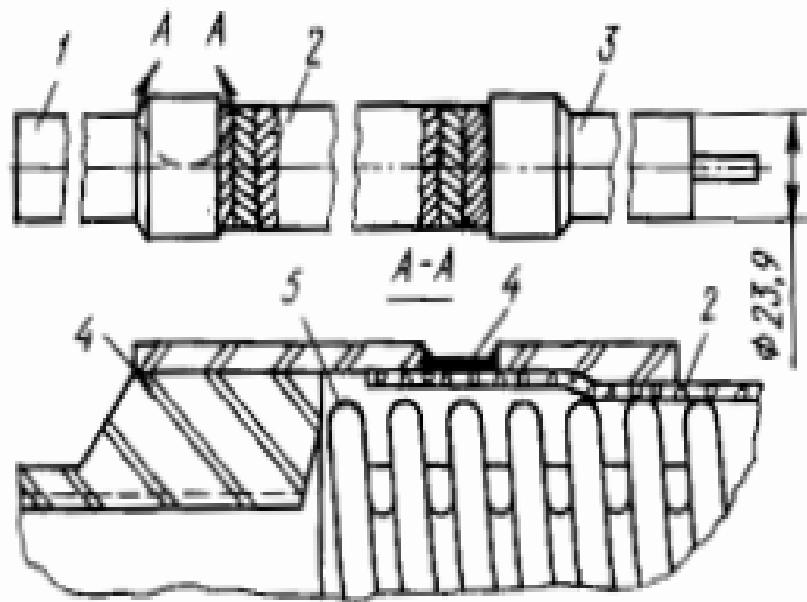


Рис. 3.17. Гибкая криогенная тепловая труба для ИСЗ:

1 — конденсатор (16 см); 2 — гибкая секция (92,4 см); 3 — испаритель (16 см); 4 — пайка; 5 — сифон

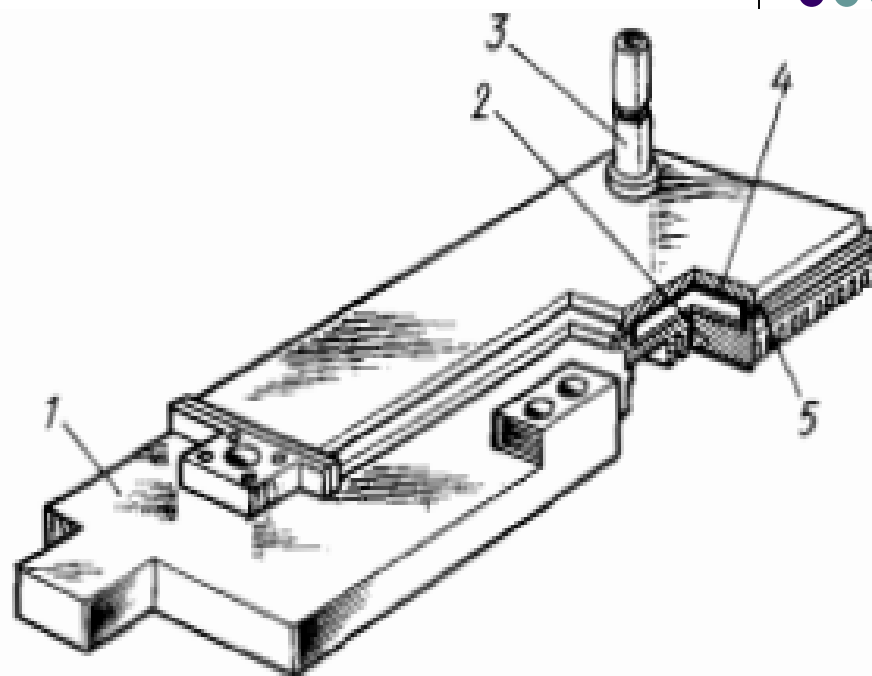


Рис. 3.18. Корпус узла РЭС с тепловой трубой:

1 — корпус РЭС; 2 — радиатор; 3 — откачной штифтель; 4 — фитиль; 5 — место пайки двух половин корпуса тепловой трубы

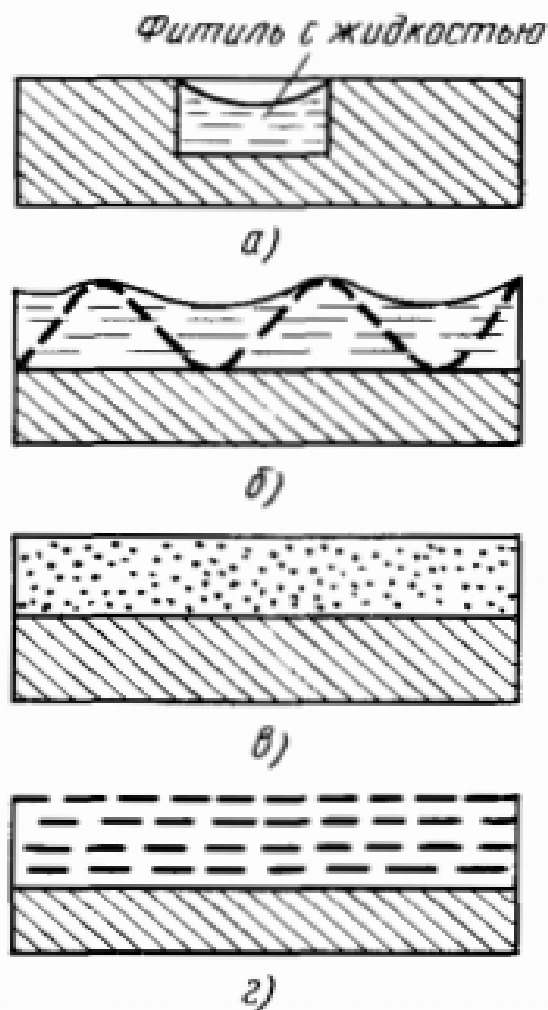


Рис. 3.19. Структура простых фитилей тепловых труб:

а — стенка с продольными канавками;
 б — уложенная вдоль стенки гофрированная сетка; в — пористая структура;
 г — многослойная сеточная структура

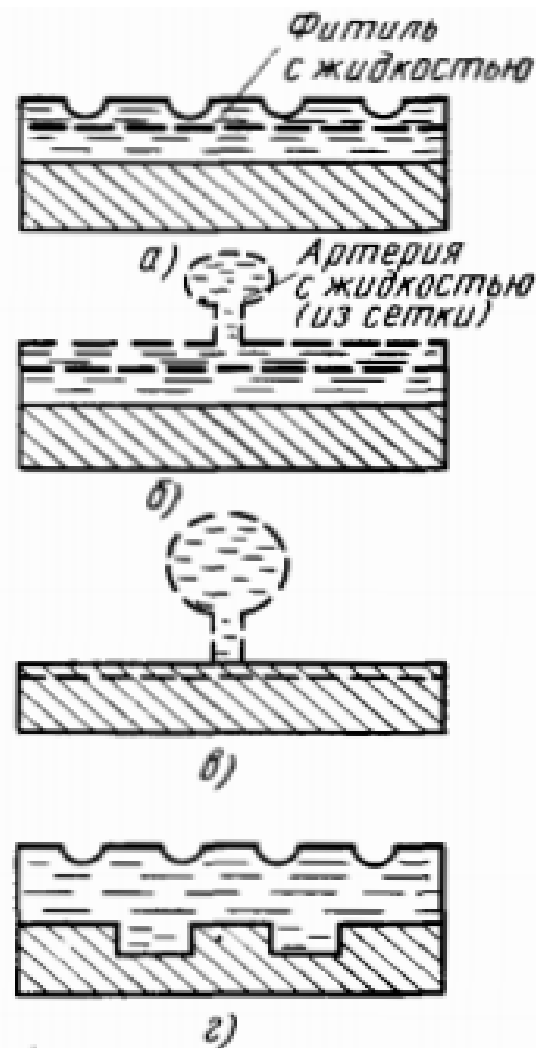
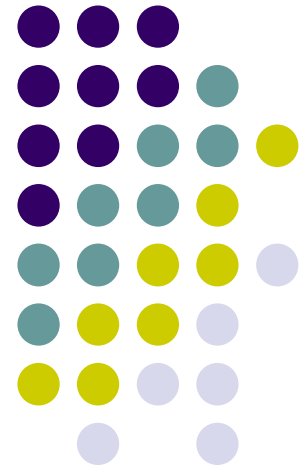


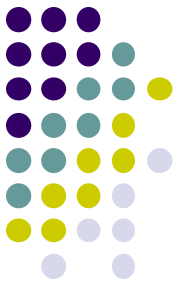
Рис. 3.20. Составные фитили тепловых труб:

а — перфорированный экран и сетка; б — многослойная сетка с подпитывающей артерией; в — резьба на стенке трубки и подпитывающая артерия; г — канавки на стенке трубки и сетка

Основы конструирования электронных средств

Защита РЭС от влаги





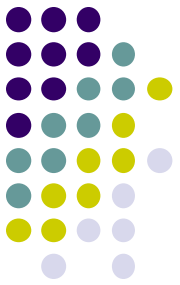
Внешние воздействия

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС подвергаются воздействию различных факторов (пыли, грибков, агрессивных сред и т.д.).

Защита от влаги является защитой и от этих факторов.

Влага обладает:

- высокой проникающей способностью (размер молекулы воды 25 нм);
- высокой химической активностью;
- диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 81$);
- электропроводностью (при наличии ионизированных примесей).



Определения

Абсолютная влажность – объемная концентрация водяных паров в воздухе, г/м³.

Критическая абсолютная влажность ($C_{кр}$) -- максимально возможная абсолютная влажность, при которой происходит конденсация водяного пара, зависит от температуры воздуха и его давления. Мерой абсолютной влажности является точка росы.

Относительная влажность воздуха – отношение:

$$C/C_{кр} = \varphi [\%],$$

при одной и той же температуре.

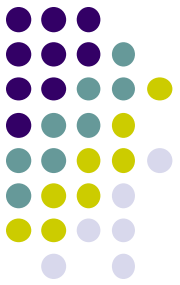
Нормальной считается $\varphi = 45-80\%$ при $t \leq 30^\circ \text{C}$.

Адсорбция – поглощение влаги поверхностью вещества.

Абсорбция – поглощение влаги объемом вещества.

Сорбция – одновременное поглощение влаги объемом и поверхностью вещества.

Десорбция – обратный процесс сорбции.



Влияние влаги на надежность РЭС

Воздействие влаги приводит к:

- параметрическим отказам;
- внезапным отказам.

Уменьшение параметрической надежности обусловлено искажением сигналов до уровня, при котором нормальное функционирование РЭС становится невозможным.

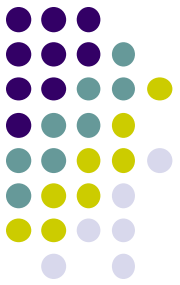
Увеличение интенсивности внезапных отказов уменьшает среднее время наработки аппаратуры на отказ и увеличивает стоимость ее эксплуатации.

Воздействие влаги на органические материалы



Органические материалы склонны к поглощению влаги через капилляры или путем диффузии и сопровождается явлениями:

- увеличением диэлектрической проницаемости ϵ ;
- увеличением потерь $\operatorname{tg}\delta$;
- уменьшением объемного сопротивления;
- уменьшением электрической и механической прочности;
- изменением геометрических размеров вследствие набухания.



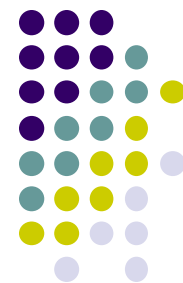
Воздействие влаги на неорганические материалы

Неорганические материалы взаимодействуют с влагой, конденсирующейся или адсорбируемой на поверхности.

Воздействие влаги на металлы сопровождается явлениями, связанными с коррозией:

- разрушение паяных и сварных швов, что нарушает герметизацию и снижает механическую прочность;
- обрыв электромонтажных связей;
- увеличение сопротивления контактных пар, что ведет к увеличению шумов неразъемных и обгоранию разъемных контактов;
- уменьшение прочности и затруднение разборки крепежа, потускнением отражающих и разрушением защитных покрытий.

Воздействие влаги на гибридные и интегральные элементы РЭС



Влияние влаги на тонкопленочные пассивные элементы приводит к электролитической или химической коррозии; образованию закорачивающих перемычек; увеличению диэлектрической проницаемости; потерь и утечек в диэлектриках.

Влияние влаги на полупроводниковые бескорпусные компоненты ИС (транзисторы, диоды, "чипы") приводит к:

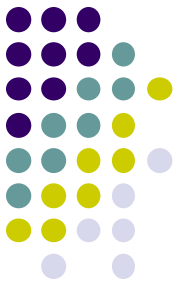
1. сорбции влаги поверхностью;
2. скоплению положительных зарядов (Na^+ и др.) на границе Si-SiO_2 ;
3. образованию слоя накопления зарядов в полупроводнике под влиянием поверхностных ионов.



Воздействие влаги на дискретные элементы РЭС

- Резисторы – постепенное увеличение или уменьшение номинального значения вплоть до обрыва или короткого замыкания, увеличение уровня шумов.
- Конденсаторы – увеличение сопротивления в цепи обкладок или обрыв; рост емкости, потерь, утечек; появление коротких замыканий обкладок; уменьшение пробивного напряжения.
- Индуктивность – уменьшение добротности вследствие увеличения собственной емкости и потерь в диэлектрике.
- Контакты и металлизация – обрыв, короткое замыкание, увеличение паразитных связей.

Законы проникновения влаги



Пути проникновения влаги: макроскопические поры, трещины или капиллярное проникновение жидкости.

Первый закон Фика описывает процесс диффузии для установившегося процесса:

$$\Gamma = -D \text{grad} C,$$

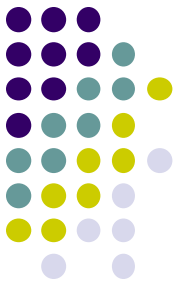
где Γ – удельный диффузный поток, равный массе водяных паров, прошедших в 1 с через поверхность равную 1 м²;
 C – концентрация водяных паров;
 D – коэффициент диффузии водяных паров.

Закон растворимости Генри позволяет связать концентрацию пара и его парциальное давление p :

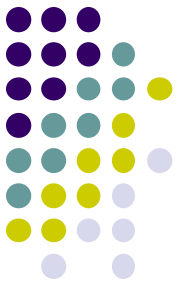
$$C = h p,$$

где h – коэффициент растворимости пара в материале.

Защита РЭС от влаги



Физический смысл защиты от влаги заключается в стабилизации процессов на поверхности и в объеме материала защищаемого изделия, т.е. в стабилизации его параметров в заданных пределах при изменении свойств окружающей среды или в период перехода ее из одного равновесного состояния в другое в процессе производства, эксплуатации и хранения в течение заданного периода времени.



Расчет толщины влагозащитного покрытия для невлагоемких изделий

Для изделий, у которых $h \ll h_s$ (материал влагозащитного покрытия), долговечность изделия τ и толщина влагозащитного покрытия Δx определяется выражением:

$$\tau = - \frac{\Delta x^2}{D} \ln \frac{P_a - P_i}{2(P_a - P_0)},$$

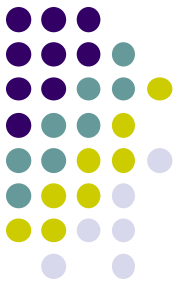
где D – коэффициент диффузии;

P_a – парциальное давление водяных паров в воздухе при эксплуатации изделия;

P_i – парциальное давление водяных паров на поверхности изделия под влагозащитной оболочкой в момент времени τ ;

P_0 – парциальное давление водяных паров в воздухе в момент герметизации изделия.

Расчет толщины влагозащитного покрытия для влагоемких изделий



Для изделий, у которых:

$$h \cdot v \gg h_s \cdot S \Delta x,$$

где v – объем защищаемого изделия;

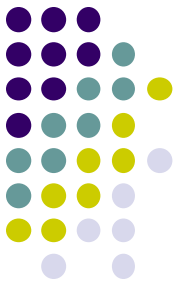
S – площадь поверхности изделия,

долговечность изделия τ и толщина влагозащитного покрытия Δx определяется выражением:

$$\tau = \frac{h \cdot v \cdot \Delta x}{h_s D \cdot S} \ln \frac{P_a - P_i}{P_a - P_0}.$$

Когда P_i достигнет критического значения в процессе эксплуатации РЭС, то изделие откажет.

Классификация конструкторско-технологических средств защиты от влаги



Средства защиты

Монолитные оболочки

Неорганические материалы:

- Пассивация SiO_2 и др.
- Различные стекла.

Органические материалы:

- Пассивация этилированием.
- Пропитка.
- Заливка.
- Обволакивание.
- Опресовка.

Полые оболочки

Неразъемные

Сочетания материалов:

- Металлополимерные.
- Металлостеклянные.
- Металлокерамические.
- Керамические, стеклянные.

Тип соединения:

- Пайка.
- Сварка.
- Клейка.

Разъемные:

- Полимерные и резиновые прокладки.
- Металлические прокладки.
- Разъемный паяный шов.

Заполнение:

- Вакуум.
- Инертные газы.
- Кремнийорганические жидкости.

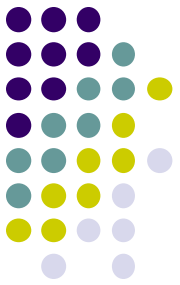
Достоинства монолитных оболочек



Пассивация – подавлении химически активных центров на поверхности полупроводниковых приборов.

Преимуществами защиты от влаги пропиткой, заливкой, обволакиванием с использованием полимерных материалов являются:

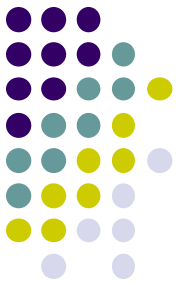
- дешевизна, обусловленная возможностью использования высокопроизводительных методов и малой стоимостью сырья;
- упрощение конструкции при одновременном увеличении ее механической прочности;
- улучшение электроизоляционных параметров конструкции.



Недостатки монолитных оболочек

К недостаткам защиты полимерными материалами относится:

- ухудшение отвода тепла по сравнению с металлическими корпусами;
- увеличение паразитных емкостей;
- возможность возникновения внутренних напряжений при отвердевании полимера и под воздействием температуры;
- сложность ремонта;
- ограниченная влагостойкость вследствие поглощения влаги полимерами;
- ухудшение защитных свойств во времени из-за старения.



Полые оболочки

Достоинства:

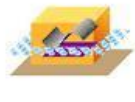
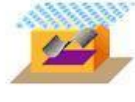
- наиболее высокое качество герметизации;
- обеспечение химической и механической нейтральности оболочки по отношению к защищаемым компонентам;
- минимизация паразитных связей.

Недостатки:

- трудоемкость защиты в 2...3 раза выше трудоемкости защиты монолитными оболочками;
- стоимость защиты достигает 20... 45% стоимости всего изделия;
- плотность компоновки уменьшается в 10... 1000 раз.

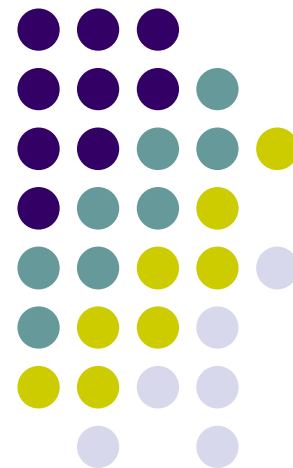


Степень защиты IP (ГОСТ 14254-96)

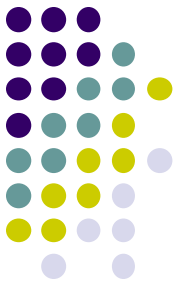
Степени защиты от посторонних веществ и предотвращения контактов			Степени защиты от воды		
1-я цифра IP	Расширенная защита		2-я цифра IP	Расширенная защита	
	Защита	Описание		Защита	Описание
5		Полная защита человека от соприкосновения с тонкосекующими и внутренними движущимися частями. Защита объекта от вредного отложения пыли. Попадание пыли полностью не исключается, но предотвращается проникновение пыли в таком количестве, которое может привести к ухудшению функционирования.	5		Струя воды, направленная на объект с любой стороны, не должна давать нежелательных эффектов.
6		Полная защита человека от соприкосновения с тонкосекующими и внутренними движущимися частями. Защита объекта от проникновения пыли.	6		Временное обливание водой не должно приводить к нежелательным последствиям.
			7		Если объект погружен в воду (на глубину 0,15 – 1 м) при определенных условиях давления и времени, вода не должна оказывать вредного влияния.
			8		Если объект погружен в воду при известных крайне тяжелых условиях, вода не должна оказывать вредного влияния.

Основы конструирования электронных средств

Защита РЭС от механических воздействий



Внешние механические воздействия

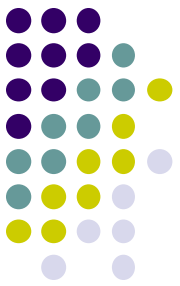


В процессе эксплуатации, транспортировки и хранения изделия могут испытывать механические воздействия, характеризующиеся:

- диапазоном частот колебаний,
- амплитудой,
- ускорением,
- временем действия.

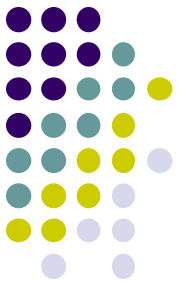
Причинами механических воздействий могут быть:

- вибрации движущихся частей двигателя,
- перегрузки при маневрировании,
- стартовые перегрузки,
- воздействие окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы и т. д.),
- взрывные воздействия (в том числе, атомные),
- небрежность обслуживающего персонала (падение аппаратуры) и т.д.



Виды механических воздействий

Воздействия	Уровень требований			
	1960 г.	1965 г.	1970 г.	1995 г.
Вибрации:				
частота, Гц	5...60	5...1000	5...2500	5...5000
ускорение, g	7,5	10	15	40
Линейное ускорение, g	25	75	150	500
Одиночные удары, g	75	150	500	1000
Многократные удары, g	40	75	150	150
Акустические шумы, дБ	—	—	—	165



Перегрузки

- При вибрации:

$$n_{вибр} = 4\pi^2 f^2 A / g ,$$

где A — амплитуда вибраций, м; f — частота вибраций, Гц; $n_{вибр}$ — перегрузка при вибрации, g .

- При ударе:

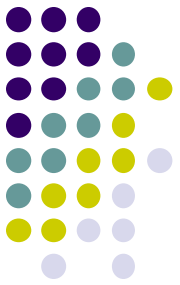
$$n_{y\partial} = 0.5 \cdot 10^{-3} v_{y\partial}^2 / S ,$$

где S — перемещение соударяющихся тел с учетом амортизации, см; $v_{y\partial}$ — МГНОВЕННАЯ скорость в момент удара, см/с.

- При вращении:

$$n_{вр} = 4\pi^2 f_{вр}^2 R / g ,$$

- где R - радиус вращения, м; $f_{вр}$ - частота вращения, Гц.



Свойства конструкций

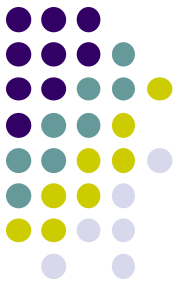
Вибропрочность – свойство конструкции противостоять разрушающему действию вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений и продолжать выполнять свои функции после окончания воздействия вибрации. Для этого не должно происходить силовых и усталостных разрушений, соударений частей конструкции.

Виброустойчивость – свойство конструкции выполнять функции при воздействии вибрации и ударов в заданных диапазонах частот и ускорений.

Ударостойкость – способность противостоять возникающим при ударах силам и после их многократного воздействия сохранять тактико-технические характеристики в пределах нормы.

Удар – кратковременный процесс воздействия, длительность которого равна двойному времени распространения ударной волны через объект.

Как правило, обеспечение вибростойкости, виброустойчивости и ударостойкости связано с отсутствием резонанса и люфтов.



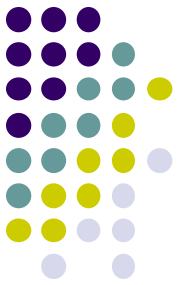
Методы защиты

Методы защиты от внешних механических воздействий:

- виброизоляция аппаратуры с помощью амортизаторов;
- обеспечение механической жесткости и прочности конструкции.

При виброизоляции на пути распространения волновой энергии механических колебаний располагается дополнительное приспособление, отражающее или поглощающее определенную часть этой энергии. Возникают ограничения по массе, размерам, прочности и т.д.

При воздействии на амортизированный объект вибраций (ударов), спектр частот которых лежит выше частоты собственных колебаний системы, амортизатор работает как линейный фильтр нижних частот.

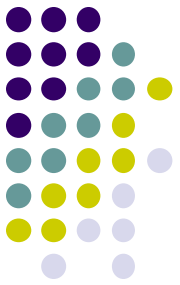


Амортизация

Амортизация - система упругих опор, на которые устанавливается объект с целью защиты его от внешних динамических воздействий.

Основное свойство таких опор (амортизаторов) – колебания несущей конструкции, возникающие в результате действия внешних вибраций и ударов, передаются аппаратуре через упругий элемент.

Демпфирование – поглощение энергии, обусловленное рассеянием энергии в результате трения в материале амортизатора (резина), в сочленениях (сухой демпфер), в среде (воздушный или жидкостный демпфер).



Жесткость конструкции

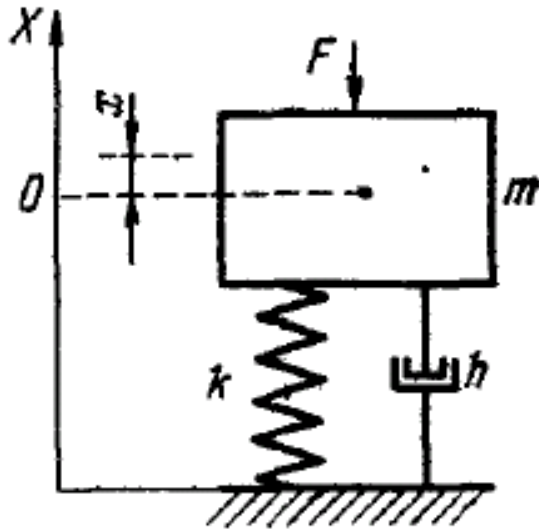
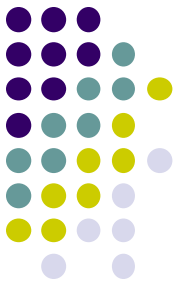
Жесткость конструкций – отношение силы к деформации, вызванной этой силой.

Критерий высокой жесткости – обеспечение собственной резонансной частоты конструкции в три раза большей частоты воздействующих колебаний.

Пример:

Резонансная частота отрезка многожильного провода длиной 10 мм составляет 1000-2000 Гц, а элементов диаметром 0,6...1 мм (масса 0,3...12 г) и общей длиной с учетом проволочных выводов, равной 30 мм – 200-450 Гц, то воздействующая частота не должна превышать 70 Гц.

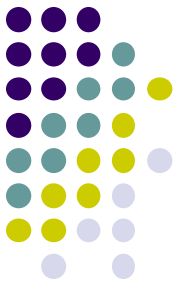
Линейная система с одной степенью свободы



Допущения:

- динамическое воздействие на амортизируемый объект совершается только прямолинейно и вдоль одной из осей координат;
 - масса основания существенно больше массы амортизируемого объекта;
 - массой упругого элемента пренебрегаем;
 - пренебрегаем деформациями основания и амортизируемого объекта;
-
- масса амортизируемого объекта, коэффициент жесткости и коэффициент демпфирования упругого элемента являются постоянными величинами;
 - сила упругости пропорциональна деформации амортизатора;
 - сила сопротивления амортизатора пропорциональна первой степени скорости смещения амортизируемого объекта.

Свободные колебания без демпфирования



Уравнение состояния:

$$m\ddot{x} = -kx,$$

Решение уравнения:

$$x = C_1 \sin(\omega_0 t) + C_2 \cos(\omega_0 t),$$

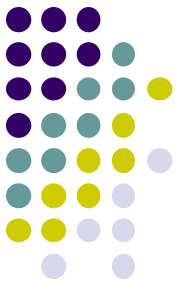
где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий; ω_0 – угловая частота свободных колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}, \text{ или:}$$

$$x = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$A_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \sqrt{v^2/\omega_0^2 + x_0^2},$$

$$\varphi_0 = \arctg(C_1/C_2) = \arctg(x_0\omega_0/v_0).$$



Свободные колебания с демпфированием

Уравнение состояния:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx = 0,$$

Решение уравнения зависит от h и $h_{кр}$, $h_{\text{крит}} = 2\sqrt{km} = 2m\omega_0$,
или относительного коэффициента затухания $\xi = h/h_{\text{крит}}$,
в случае $\xi < 1$:

$$x = e^{-ht/2m} \left(C_1 \sin(\omega_h t) + C_2 \cos(\omega_h t) \right),$$

где

$$C_1 = \left(v_0 + \frac{h}{2m} x_0 \right) / \omega_h, \quad C_2 = x_0,$$

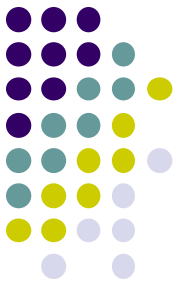
или:

$$x = A_0 e^{-ht/2m} \sin(\omega_h t + \varphi_0).$$

Частота собственных колебаний системы:

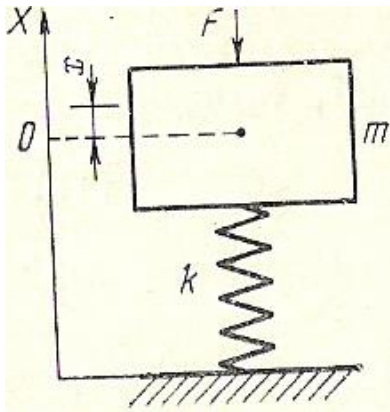
$$\omega_h = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} = \sqrt{\omega_0^2 - h^2/4m^2}.$$

В случае $h = h_{кр}$ колебания не возникают.

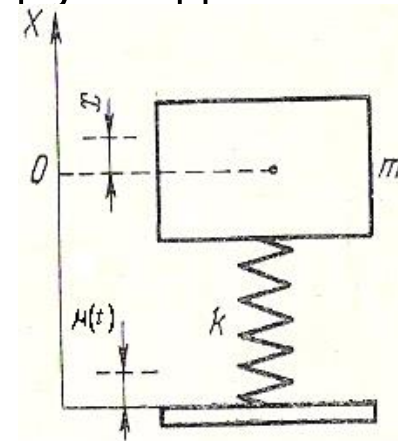


Вынужденные колебания

Вынужденные колебания в системе возникают в результате внешних механических воздействий двух видов:



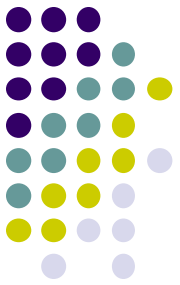
Силовое возмущение – возникает при воздействии внешней силы.



Кинематическое возмущение – задано движение отдельных точек системы.

При совпадении частоты внешнего воздействия и собственной частоты системы возникает явление **резонанса** – существенное увеличение амплитуды колебаний при незначительном внешнем воздействии.

Вынужденные колебания без демпфирования. Силовое возмущение



Уравнение состояния:

$$m\ddot{x} + kx = F \sin(\Omega t),$$

Решение уравнения в общем виде:

$$x = C_1 \sin(\omega_0 t) + C_2 \cos(\omega_0 t) + A \sin(\Omega t),$$

В реальных системах собственные колебания быстро затухают, а установившиеся вынужденные примут вид:

$$x = A \sin(\Omega t),$$

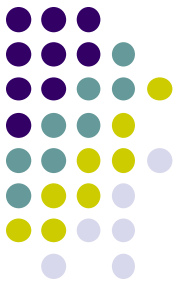
где $A = F/k|1-\eta^2|$, $\eta = \Omega/\omega_0$ – коэффициент расстройки.

Коэффициент динамичности системы – отношение статической упругой силы к амплитуде силы вызывающих колебаний:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{F_{\text{ст}}}{F} = |1-\eta^2|^{-1}.$$

В случае $\Omega \rightarrow \omega_0$, $1/\gamma \rightarrow \infty$.

Вынужденные колебания без демпфирования. Кинематическое возмущение



Установившееся движение основания: $\mu(t) = \mu \sin(\Omega t)$.

Уравнение состояния:

$$m\ddot{x} = -k[x - \mu(t)].$$

Решение уравнения в общем виде:

$$x = C_1 \sin(\omega_0 t) + C_2 \cos(\omega_0 t) + A \sin(\Omega t),$$

Амплитуда вынужденных колебаний:

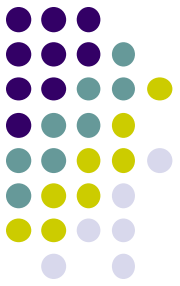
$$A = \mu / |1 - \eta^2|.$$

Коэффициент динамичности системы :

$$1/\gamma = A/\mu = |1 - \eta^2|^{-1}.$$

Вывод: коэффициенты динамичности системы с одной степенью свободы без демпфирования по силе и перемещению численно равны.

Вынужденные колебания с вязким демпфированием. Силовое возмущение



Уравнение состояния:

$$m\ddot{x} + h\dot{x} + kx = F \sin(\Omega t).$$

Решение уравнения в общем виде:

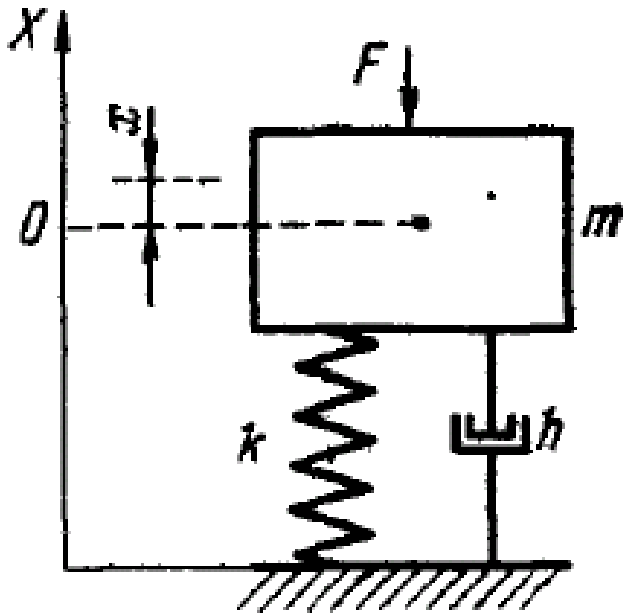
$$x = A_0 e^{-ht/2m} \sin(\omega_h t + \varphi_0) + A \sin(\Omega t - \psi).$$

Амплитуда установившегося колебания:

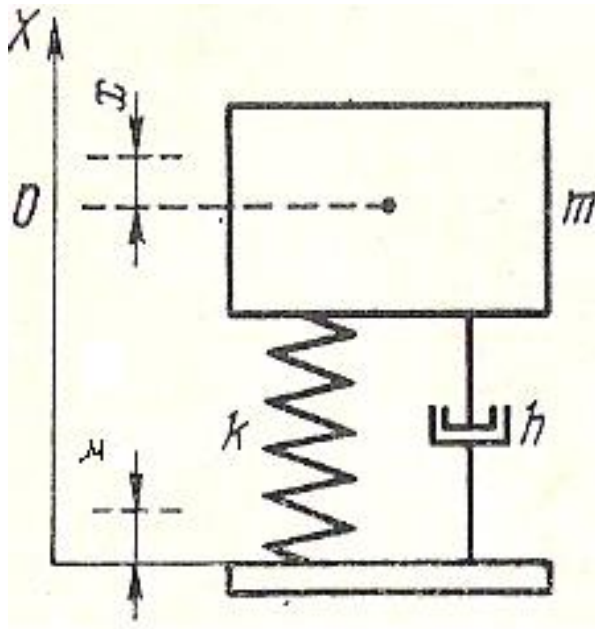
$$A = \frac{F}{k \sqrt{(1 - \eta^2) + (2\xi\eta)^2}}.$$

Фазовый угол:

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{2\xi\eta}{1 - \eta^2}.$$



Вынужденные колебания с вязким демпфированием. Кинематическое возмущение



Уравнение состояния:

$$m\ddot{x} + h[\dot{x} - \dot{\mu}(t)] + k[x - \mu(t)] = 0.$$

Решение уравнения в общем виде:

$$x = (1/\gamma)\xi \sin(\Omega t - \psi).$$

Коэффициент динамичности:

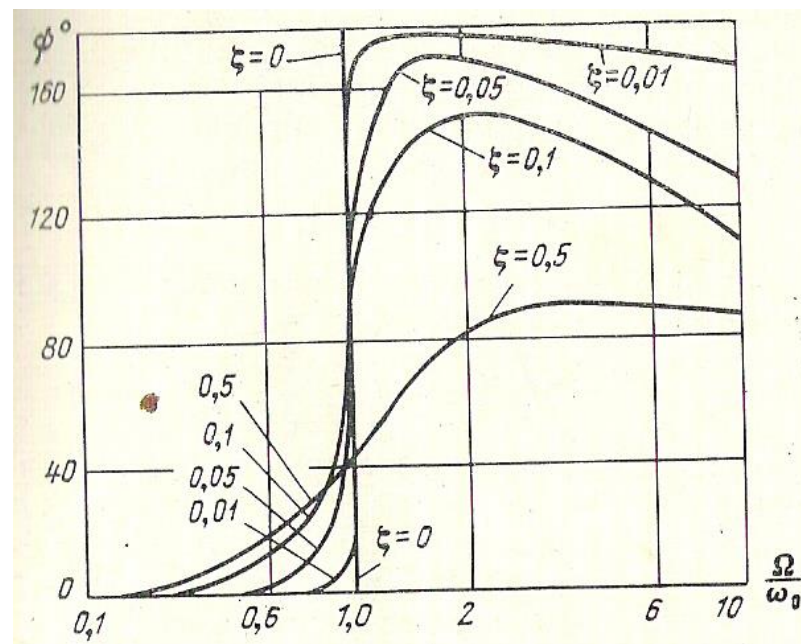
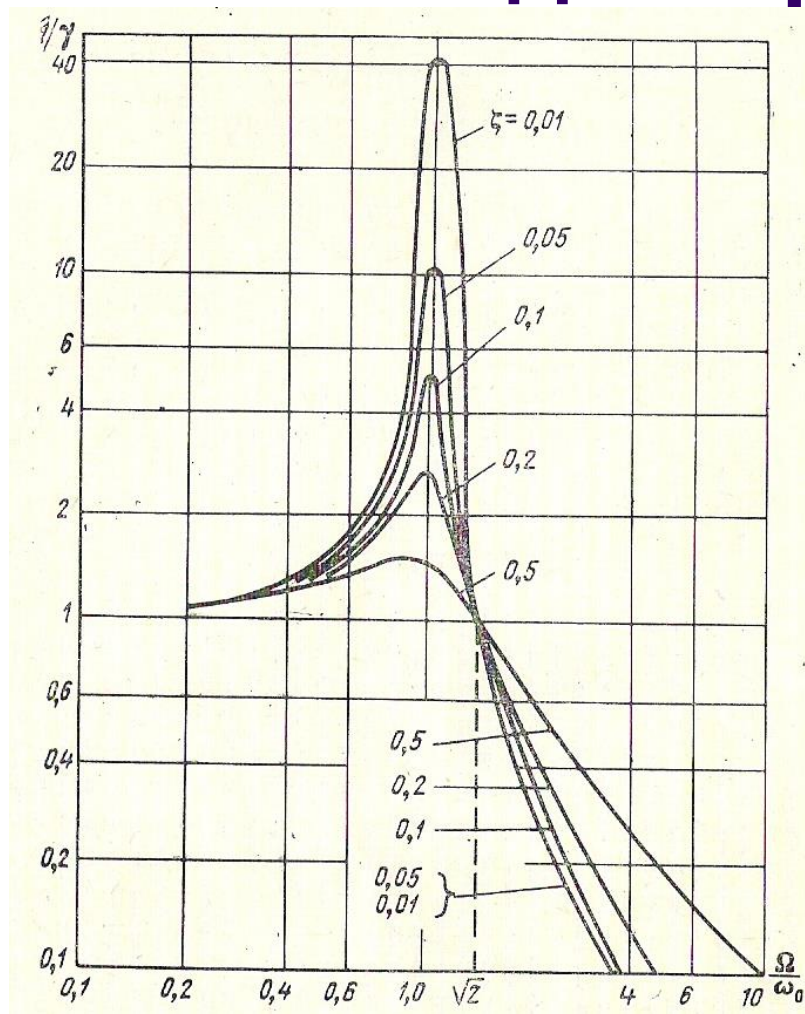
$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{\frac{1 + \varepsilon^2 \eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \eta^2}},$$

где $\varepsilon = h/\sqrt{km} = 2\vartheta_0/\omega_0 = 2h/h_{\text{ед}} = 2\xi$ – показатель затухания.

Фазовый угол:

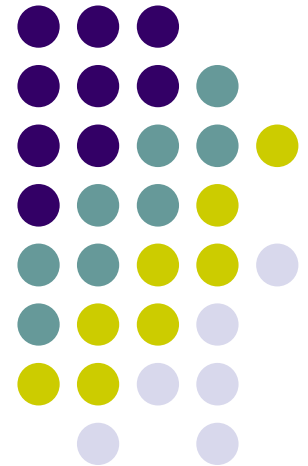
$$\psi = \text{arctg} \frac{2\xi\eta^2}{1 - \eta^2 + 4\xi^2\eta^2}.$$

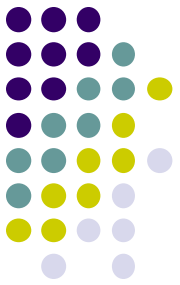
Амплитудно- и фазо-частотные характеристики системы с вязким демпфированием



Проектирование и конструирование телекоммуникационных систем и устройств (ПКТКСУ)

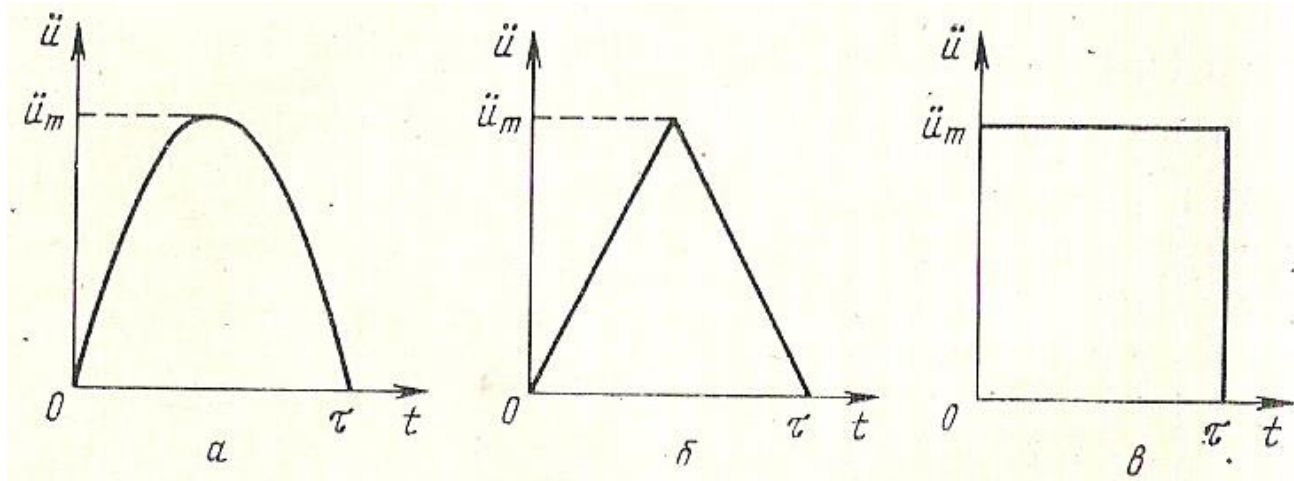
Расчет системы амортизации



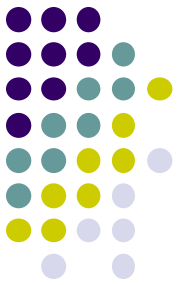


Ударные воздействия

Удар – мгновенное изменение скорости движения тела на конечную величину за короткий промежуток времени. Удар является нестационарным процессом с широким спектром. Удар вызывает возникновение собственных и вынужденных затухающих колебаний.



Ударные импульсы: полусинусоидальный, треугольный и прямоугольный



Расчет ударного воздействия

Уравнение движения:

$$m\ddot{\delta} + F(\dot{\delta}, \delta) = -m\ddot{u},$$

где m – масса тела; $\delta = x - u$ – прогиб упругой системы;

$F(\dot{\delta}, \delta)$ – силы упругости и сопротивления, приложенные к телу;
 u – абсолютное перемещение основания.

Уравнение движения без учета сил сопротивления:

$$m\ddot{\delta} + F(\delta) = -m\ddot{u}.$$

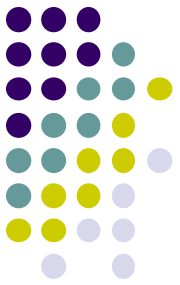
При начальных условиях $t=0$, $\delta=0$, $\dot{\delta} = \dot{u}_{\max}$:

$$\dot{\delta}^2 = \dot{u}_{\max}^2 - \frac{2}{m} \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta.$$

В момент максимального прогиба:

$$\int_0^{\delta} F(\delta) d\delta = \frac{m\dot{u}_{\max}^2}{2}.$$

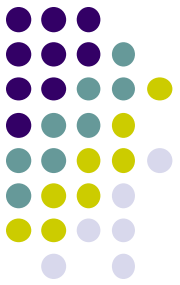
Исходные данные для проектирования



При проектировании системы амортизации определяют количество и тип амортизаторов, а также способ их расположения.

В качестве исходных служат параметры:

- внешних динамических воздействий;
- окружающей среды;
- кинетические параметры и габариты амортизируемой аппаратуры;
- допустимые значения динамических воздействий на амортизируемую аппаратуру;
- статические и динамические характеристики амортизаторов.

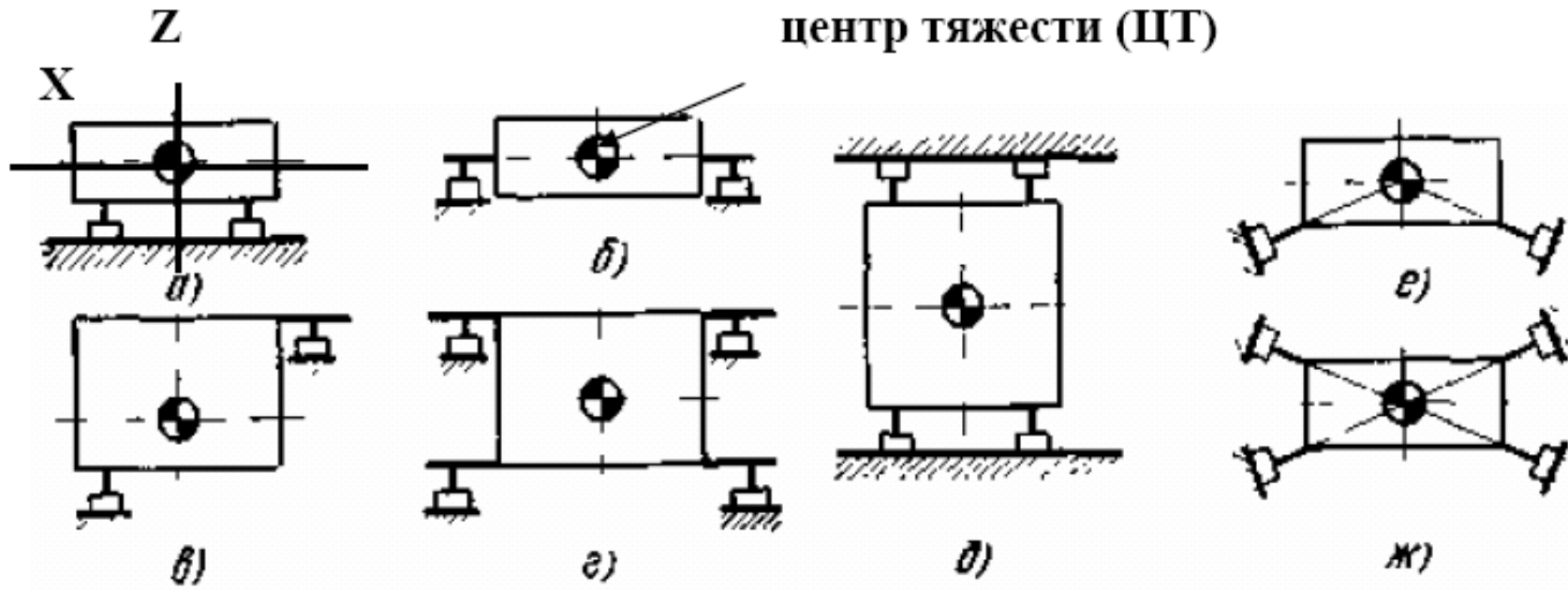
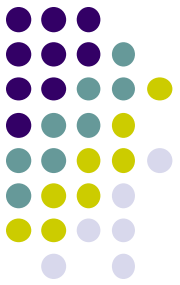


Этапы расчета

Расчет системы амортизации проводят в три этапа:

1. Статический расчет – определяют статическую нагрузку на каждый амортизатор и выбирают тип амортизатора.
2. Расчет на вибрационную нагрузку – определяют частоты собственных колебаний блока РЭС и коэффициент динамичности.
3. Расчет на ударную нагрузку – вычисляют максимальное ускорение при ударе и оценивают эффективность защиты РЭС от вибраций и ударов.

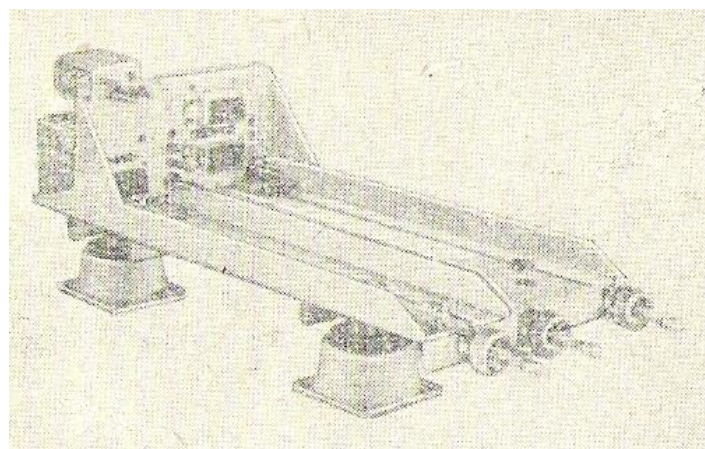
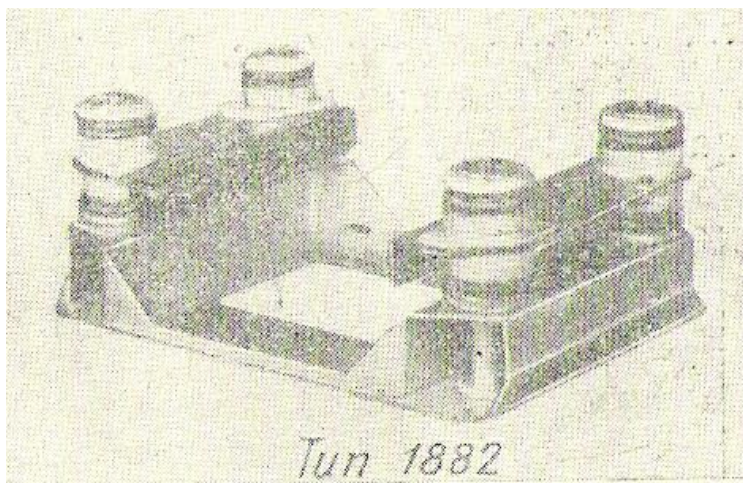
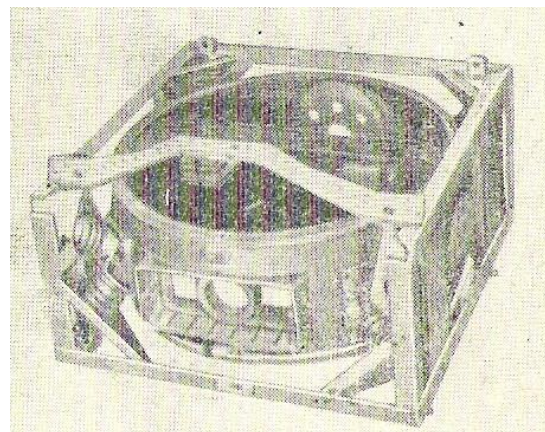
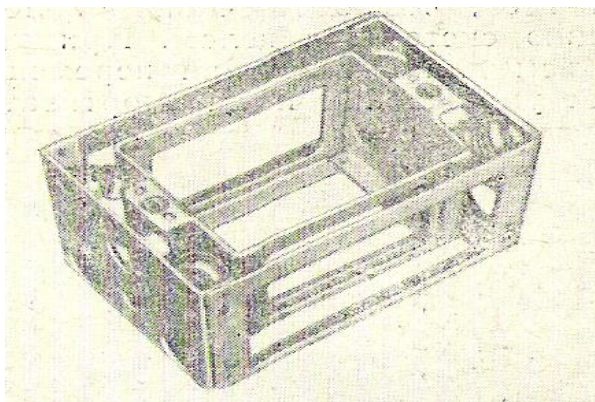
Схема расположения амортизаторов



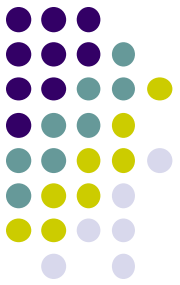
Схемы монтажа:

- a* - нижний монтаж; *б* - монтаж в плоскости центра тяжести;
в - монтаж в диагональной плоскости, проходящей через центр тяжести; *г* - монтаж в двух горизонтальных плоскостях;
д - двусторонний монтаж; *е* - монтаж под углом, односторонний;
ж - монтаж под углом, двусторонний

Амортизационные основания



Рациональное размещение амортизаторов



При проектировании системы амортизации должны выполняться условия:

1. Общая грузоподъемность всех амортизаторов должна быть равна весу амортизированной аппаратуры.
2. Центр жесткости системы должен совпадать с центром тяжести аппаратуры.

Центр жесткости – точка приложения равнодействующей сил реакции амортизаторов на внешнюю нагрузку.

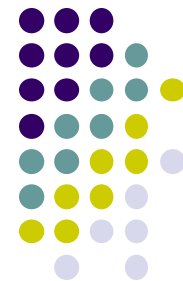
Координаты центра жесткости:

$$x_h = \sum k_{x_i} x_i / \sum k_{x_i} ;$$

$$y_h = \sum k_{y_i} y_i / \sum k_{y_i} ;$$

$$z_h = \sum k_{z_i} z_i / \sum k_{z_i} .$$

Статический расчет системы амортизации



Условие равновесного состояния системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum P_i = mg; \\ \sum P_i x_i = 0; \\ \sum P_i y_i = 0; \\ \sum P_i z_i = 0; \\ \sum P_i x_i y_i = 0; \\ \sum P_i y_i z_i = 0; \\ \sum P_i x_i z_i = 0. \end{array} \right.$$

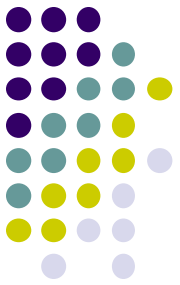
За начало прямоугольной системы координат принимается *центр тяжести* объекта.

Если число неизвестных в системе не превышает трех, система является статически определимой.

Если система состоит из n амортизаторов, то для рационального монтажа заданными должны быть $(4n-7)$ величин.

Пример: при $n=3$ (три амортизатора) необходимо задать пять величин, а при $n=4$ (четыре амортизатора) – девять величин.

Выбор типоразмера амортизатора



Типоразмер амортизатора определяем по рассчитанным значениям:

$$P_i = (0,7-1,3)P_{ном}.$$

Величины статических прогибов амортизаторов можно определить либо по их силовым (статическим) характеристикам, либо приближенно по формуле:

$$\xi_{cmi} = P_i / k_i.$$

Для выравнивания системы до положения статического равновесия используют прокладки толщиной:

$$\Delta_i = \xi_{cmi} - \xi_{cmmin},$$

где ξ_{cmmin} – статический прогиб наименее деформированного амортизатора системы.

Динамический расчет системы амортизации

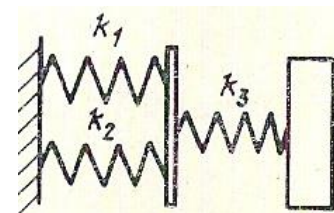
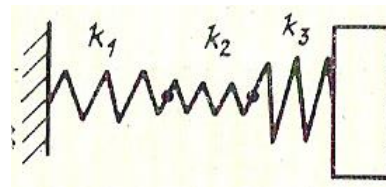
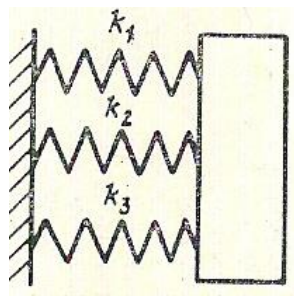
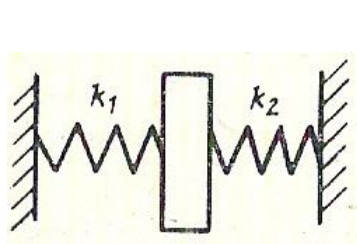


Расчет жесткости системы амортизаторов:

Параллельное

Последовательное

Смешанное



$$k_{\Sigma} = k_1 + k_2 \quad k_{\Sigma} = k_1 + k_2 + k_3$$

$$k_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}}$$

$$k_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{k_1 + k_2} + \frac{1}{k_3}}$$

Собственная частота амортизаторов берется из справочников или определяется:

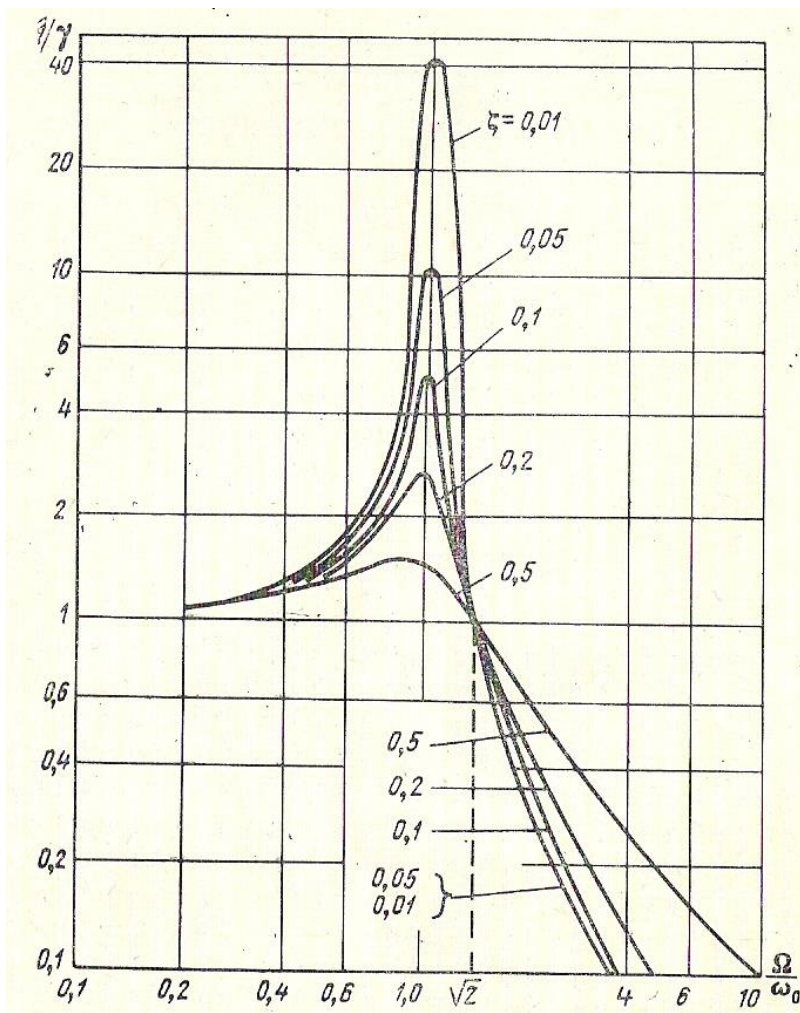
$$\omega_0 = \sqrt{k_{\Sigma}/m}$$

*для системы
без демпфирования*

$$\omega_h = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} = \sqrt{\omega_0^2 - h^2/4m^2}$$

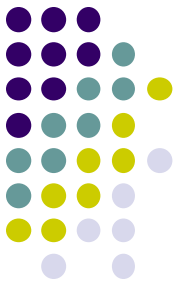
*для системы
с демпфированием*

Определение коэффициента динамичности



Если для выбранных амортизаторов известен коэффициент демпфирования h или коэффициент динамичности при резонансе, то по графику определяем значение коэффициента динамичности, а затем амплитуду колебаний блока при заданной частоте и амплитуде возбуждающих колебаний.

Расчет системы амортизации на воздействие удара



Пример: определить максимальное ускорение блока при воздействии прямоугольного импульса амплитудой $10g$ и длительностью $t_u=0,01c$, если система амортизации блока имеет собственную частоту в направлении удара $f_0=10Гц$. Коэффициент затухания $h=0,5$.

Решение: определяем коэффициент расстройки:

$$\eta = \frac{1}{2t_{\epsilon} f_0} = 5.$$

Определяем по графику коэффициент динамичности системы:

$$1/\gamma = 0,2.$$

И перегрузку, действующую на блок:

$$n = 1/\gamma \cdot \ddot{u}_{\max} = 0,2 \cdot 10g = 2g.$$

Расчет системы амортизации на воздействие удара при известных ударных характеристиках



1. Формируем суммарную силовую ударную характеристику и суммарную энергоемкость в направлении удара (обычно для главной (вертикальной) оси Z амортизаторов):

$$F(z) = \sum_{i=1}^n F_i(z), \quad \ddot{I}(z) = \sum_{i=1}^n \ddot{I}_i(z).$$

2. Определяем приращение скорости основания:

$$\Delta \dot{u} = \int_0^{t_u} \ddot{u}(t) dt.$$

3. Определяем приращение кинетической энергии системы:

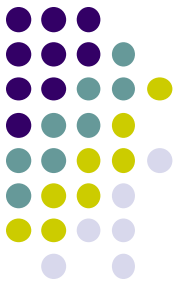
$$\Delta E = m \Delta \dot{u}^2 / 2 \dot{u}.$$

4. Определяем максимальное перемещение из условия:

$$\Delta E = \ddot{I}(z_{\max}).$$

5. Определяем максимальное ускорение блока:

$$\ddot{z}_{\max} = F(z_{\max}) / m.$$



Классификация амортизаторов

Технические требования подразделяются на группы:

1. динамических параметров;
2. климатических условий эксплуатации;
3. конструктивных параметров.

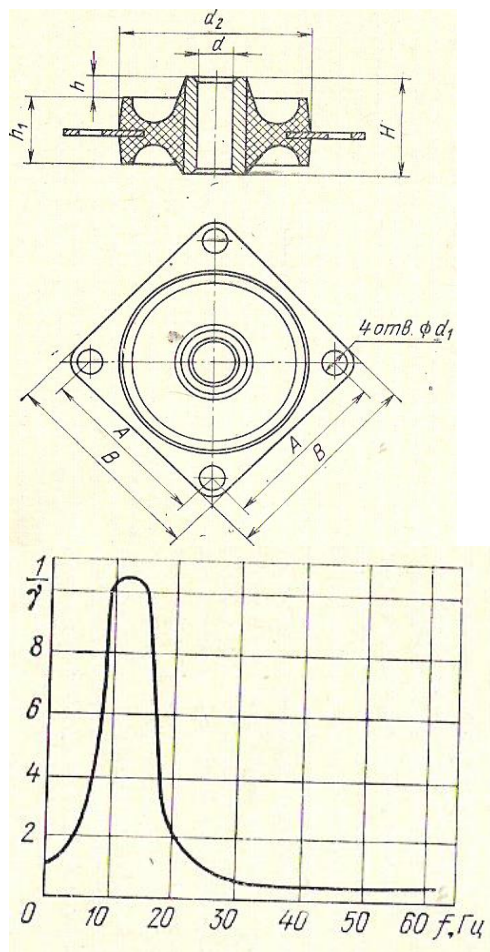
По конструктивному признаку амортизаторы подразделяются на:

1. резинометаллические;
2. пружинные с воздушным демпфированием;
3. пружинные с фрикционным демпфированием;
4. цельнометаллические со структурным демпфированием.

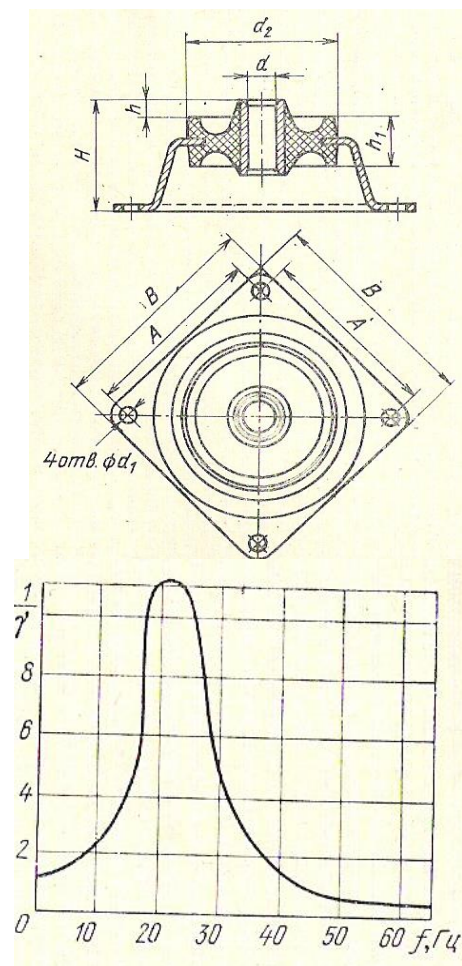
Амортизаторы резинометаллические



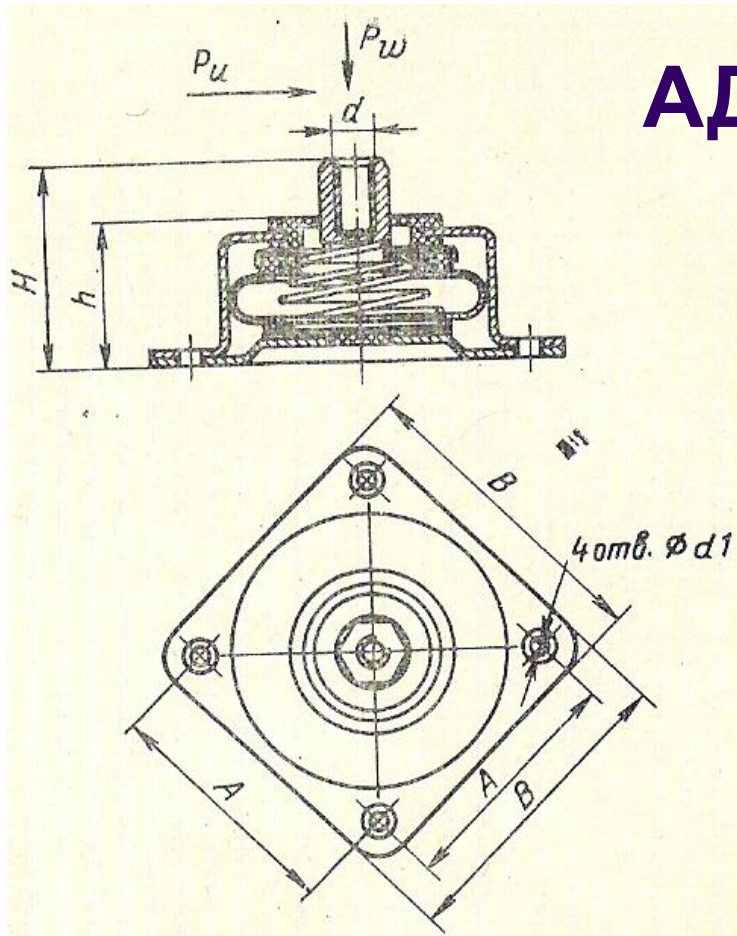
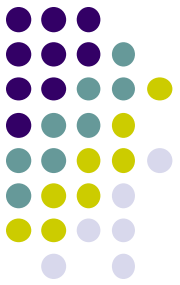
АП



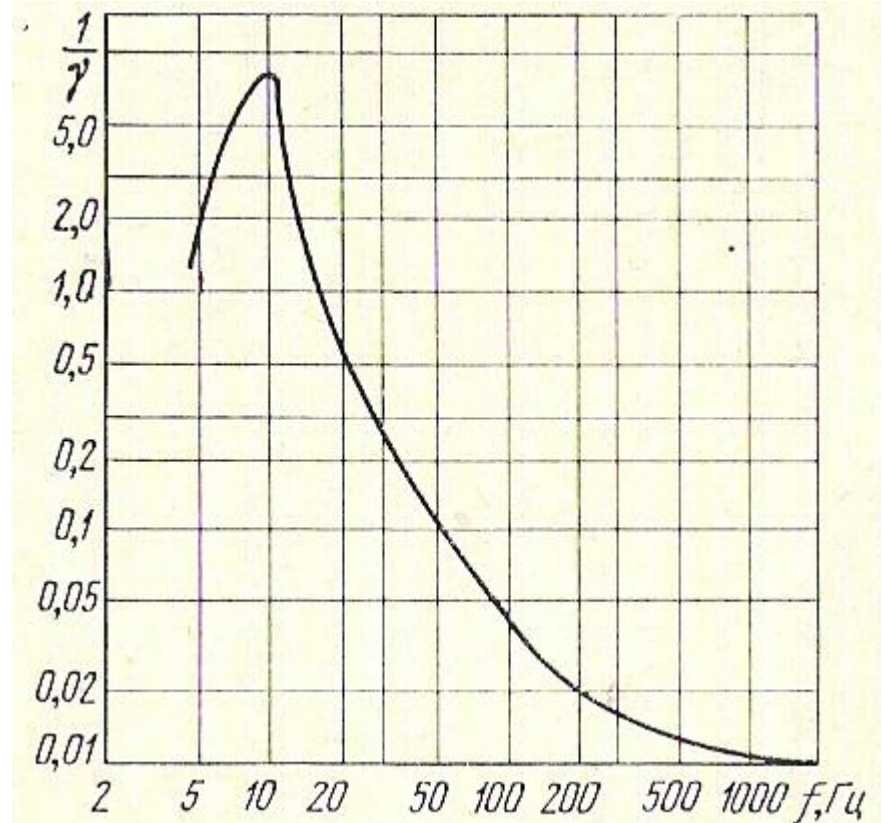
АЧ



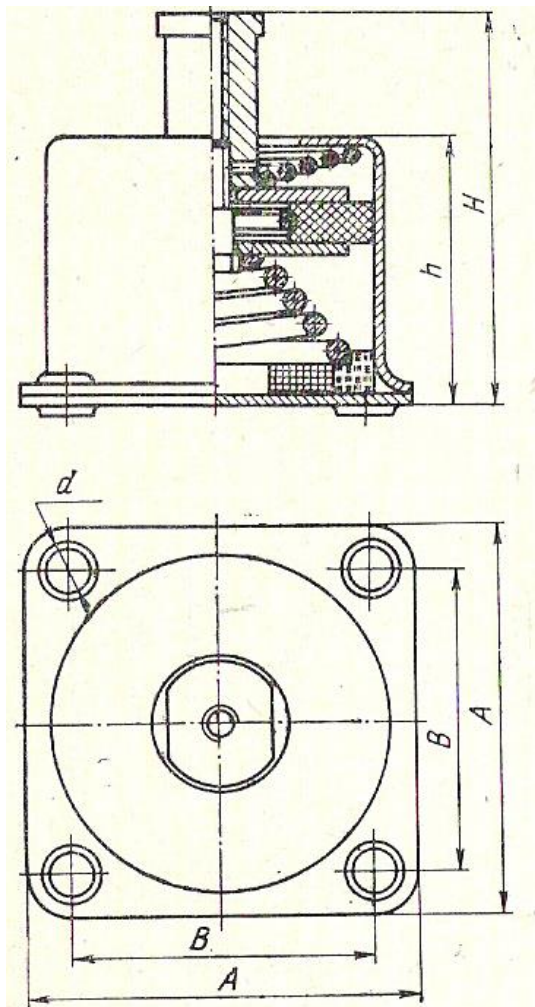
Амортизаторы пружинные с воздушным демпфированием



АД



Амортизаторы пружинные с фрикционным демпфированием



АФД

в вертикальном направлении



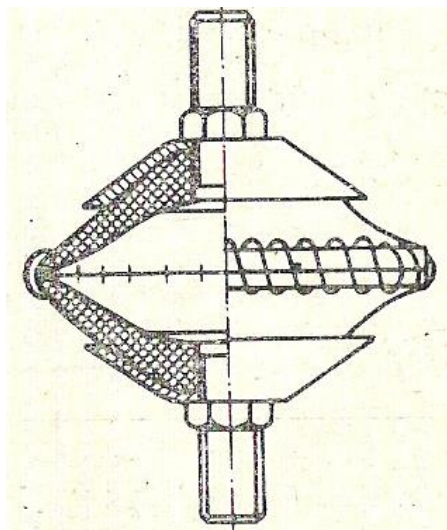
в горизонтальном направлении



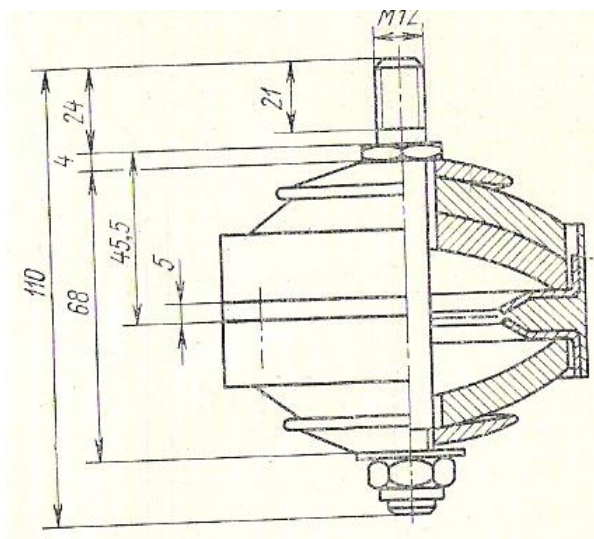
Амортизаторы цельнометаллические со структурным демпфированием



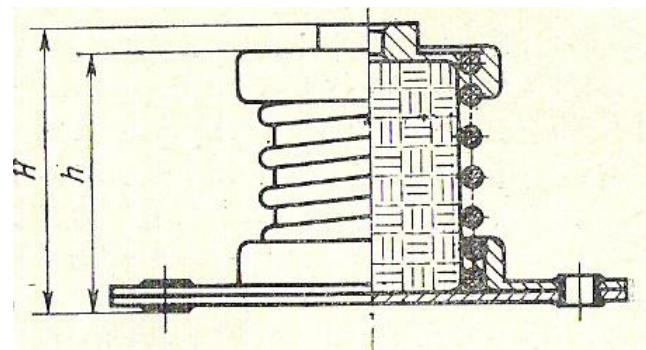
ДК



АРМ

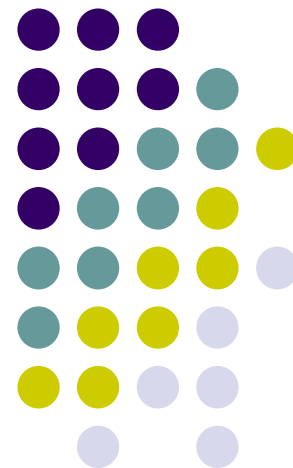


АЦП



Проектирование и конструирование телекоммуникационных систем и устройств (ПКТКСУ)

Вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС





Сущность обеспечения ЭМС

Электромагнитная совместимость РЭС – способность этих средств функционировать одновременно в реальных условиях эксплуатации при воздействии непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП) и не создавать недопустимых электромагнитных помех (ЭМП) другим средствам.

Области рассмотрения вопросов ЭМС:

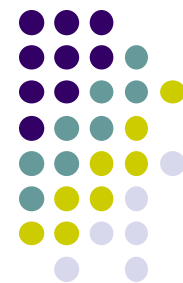
1. Радиочастотный ресурс (РЧР)

Изучение условий пользования радиоканалами различными радиослужбами и разработка принципов управления, прогнозирования ресурсов, нормирования его параметров, совершенствование нормативно-технической документации (НТД).

В соответствии с нормами Международного консультативного комитета по радио (МККР) весь нормируемый от ЭМП диапазон частот разбит на полосы:

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| ● 9 - 535 кГц; | ● 100 - 470 МГц; |
| ● 535 - 1605 кГц; | ● 470 - 2450 МГц; |
| ● 1605 - 4000 кГц; | ● 2450 - 10500 МГц; |
| ● 4 - 29,7 МГц; | ● 10500 - 40000 МГц; |
| ● 29,7 - 100 МГц; | ● 40000 - 275000 МГц. |

Сущность обеспечения ЭМС



2. Непреднамеренные электромагнитные помехи (НЭМП)

Выявление источников и определение энергетических, частотных и временных характеристик НЭМП, статистический анализ, моделирование и изучение влияния среды на их распространение. Изучение влияния НЭМП на работу различных приемников (рецепторов) помех, создание научно-технической документации на допустимые уровни помех и т.п.

3. Характеристики ЭМС

Технические характеристики любой РЭС можно разделить на группы:

- **функциональные**, например, мощность радиопередатчика и чувствительность приемника;
- **влияющие** на ЭМС. Например, мощность побочного излучения и восприимчивость приёмника на боковом канале.

Уровни ЭМС:

- внутриаппаратная (в блоке, узле и т.п.);
- внутрисистемная ЭМС (внутри радиоэлектронного комплекса);
- межсистемная ЭМС (между различными системами и комплексами).

Сущность обеспечения ЭМС



4. Электромагнитная обстановка (ЭМО)

Определение реальных условий, в которых работает или будет работать конкретное изделие при наличии или отсутствии полезного сигнала на входе в случае действия НЭМП через этот вход или помимо него. В соответствии с тремя уровнями ЭМС определяют аналогично и три вида ЭМО.

5. Методы и способы обеспечения ЭМС:

- **Организационные** мероприятия относятся в основном к уровню межсистемной ЭМС и заключаются в рациональном выборе частот радиоканалов для различных радиослужб, определяют места размещения средств и т.д.
- **Технические** мероприятия делятся на конструкторско-технологические и схемотехнические. Конструкторско-технологические реализуются в основном на внутрисистемном и внутриаппаратном уровнях обеспечения ЭМС. Требования обеспечения ЭМС должны быть составной частью технического задания (ТЗ) на разработку и в последующем техническими условиями (ТУ) на изделие в производстве и эксплуатации.

Основные понятия ЭМС



Электромагнитная помеха – электромагнитный, электрический или магнитный процесс, созданный любым источником в пространстве или проводящей среде и влияющий на операции с полезным сигналом в РЭА.

ЭМП, созданная в пространстве, называется **излучаемой** помехой, а созданная в проводящей среде – **кондуктивной** помехой.

НЭМП возникают вследствие случайных процессов, протекающих в источниках помех, и потому они носят вероятностный характер и описываются статистическим аппаратом.

Рецептор – любое техническое устройство, реагирующее на электромагнитный полезный сигнал или на ЭМП.

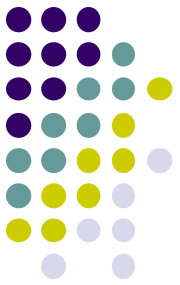
Электромагнитная обстановка (ЭМО) - совокупность электромагнитных, электрических, магнитных полей, токов и напряжений помех и сигналов в заданной области пространства, которая влияет или может влиять на работу рецептора.

Количественно ЭМО определяется характеристиками ЭМС рецептора.

Основные понятия ЭМС



- Радиочастотный ресурс** - совокупность возможных для использования радиочастотных электромагнитных полей для передачи и приема информации или энергии.
- Восприимчивость рецептора** - мера реакции на внешнюю ЭМП как при наличии, так и при отсутствии полезного сигнала.
- Порог восприимчивости** - максимально допустимый уровень НЭМП, при котором рецептор работает с приемлемым качеством.
- Помехоустойчивость рецептора** - свойство противостоять внешним и внутренним ЭМП за счет выбора структуры полезного сигнала и принципа построения рецептора.
- Помехозащищенность рецептора** - свойство противостоять внешним и внутренним ЭМП за счет схемных и конструкторских способов, не нарушающих выбранную структуру полезного сигнала и принципа построения рецептора.



Основные понятия ЭМС

Экран – элемент конструкции РЭА в виде металлической заземленной оболочкой с высокой электрической или магнитной проводимостью, служащий для ослабления ЭМП в определенной области пространства в широком диапазоне частот.

Экранирование – способ ослабления ЭМП с помощью металлической оболочки (экрана), обладающей высокой электрической или магнитной проводимостью.

Фильтрация – ослабление напряжения и токов помехи с помощью электрической цепи (фильтра), вносящей затухание в заданных пределах и в заданных полосах частот.

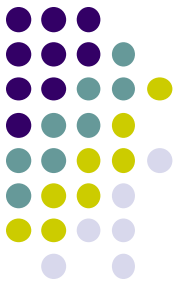
Заземление – электрическая цепь, обладающая свойством сохранять минимальный (нулевой) потенциал.

Классификация ЭМП по классу и типу



Классификация ЭМП по виду





Помехи. Определения

Станционные – помехи от антенны радиопередающего центра.

Индустриальные – помехи от электротехнических, электронных и радиоэлектронных бытовых, промышленных, медицинских и научных устройств и установок и т.п.

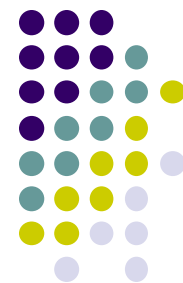
Ввиду разнообразия источников помех индустриальные помехи – наиболее распространенный вид, и он занимает широкий диапазон частот (от десятков герц до нескольких гигагерц).

Естественные – помехи, вызванные природными физическими процессами в виде электромагнитного излучения (космические и атмосферные шумы, реликтовое излучение, радиоизлучение Солнца, атмосферерики, электростатические поля различных атмосферных образований и летательных аппаратов и т.п.).

Контактные – помехи, возникающие при переизлучении от токопроводящих механических контактов с нелинейной токовой проводимостью при облучении последних достаточно мощным радиопередающим устройством.

Эти помехи характерны для движущихся объектов (корабли, танки, самолеты, автомобили и т.п.), и уровень таких помех возрастает с увеличением скорости движения объекта.

Нормативно-техническая документация по ЭМС



Международные документы в области ЭМС:

1. “Регламент радиосвязи”;
2. “Публикации” Международного специального комитета по радиопомехам (СИСПР).

К международной НТД по ЭМС относятся требования к характеристикам ЭМС радиоэлектронной и электротехнической аппаратуры летательных аппаратов, разработанные Международной организацией гражданской авиации (ИКАО), членом которой является Россия.

Аналогичная НТД существует на морскую и автомобильную аппаратуру. Основная отечественная НТД по ЭМС - это Государственные стандарты (ГОСТ) и общегосударственные нормы Госкомитета по радиочастотам (ГКРЧ) России.

Нормативно-техническая документация по ЭМС



- ГОСТ 11001-80 (СТ СЭВ 502-77). Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы измерения.
- ГОСТ 16842-82 (СТ СЭВ 784-77). Радиопомехи промышленные. Методы испытаний источников радиопомех.
- ГОСТ 13661-72. Электрические фильтры для подавления радиопомех. Методы измерения вносимого затухания.
- ГОСТ 14777-76. Радиопомехи промышленные. Термины и определения.
- ГОСТ 23611-79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения.
- ГОСТ 23872-79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Номенклатура параметров и классификация технических характеристик.

Нормативно-техническая документация по ЭМС



ГОСТ 23450-79. Радиопомехи промышленные от

промышленных, научных и медицинских высокочастотных установок. Нормы и методы измерения.

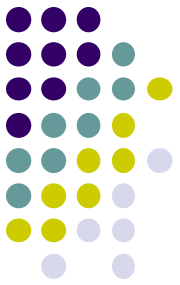
Межведомственные требования “Нормы летной годности самолетов”. НГЛС-2 “Оборудование самолетов”. Издание МВК НГЛ СССР, 1974 г.

Общесоюзные нормы на уровни побочных излучений радиопередатчиков всех категорий и назначений (гражданских образцов).- М.: Связь, 1972 г.

Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех (нормы 1-72-9-72).- М.: Связь, 1973 г.

Общесоюзные нормы допускаемых промышленных радиопомех.

Промышленные, научные, медицинские и бытовые высокочастотные установки. Допускаемые величины и методы испытаний (нормы 5Б-80). - М.: Радио и связь, 1981 г.



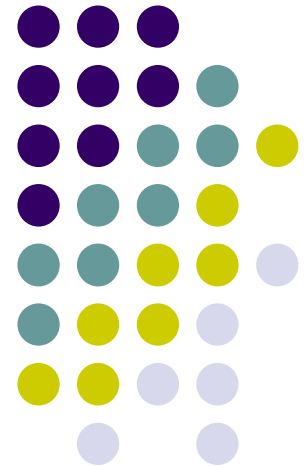
Методы обеспечения ЭМС

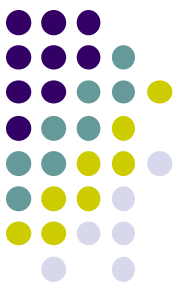
1. Экранирование.
2. Фильтрация помех.
3. Заземление.
4. Монтажные соединения.
5. Элементная база.
6. Защита от молний (мощный электромагнитный импульс).

Проектирование и конструирование телекоммуникационных систем и устройств (ПКТКСУ)

Обеспечение ЭМС РЭС.

Экранирование

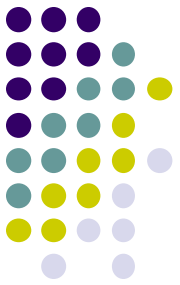




Сущность метода экранирования

- Анализируется структура помехонесущего поля в ближней и дальней зонах распространения;
- на основе структуры ЭМП выбирается тип и материал экрана, определяются требования к конструкции экрана;
- анализируется принцип действия экрана на основе теории поля и радиотехнических цепей, рассчитывается эффективность экранирования с учетом конструктивных особенностей экрана;
- определяется эффективность экранирования функциональных узлов, в т.ч., микросборок;
- определяется эффективность экранирования проводов, витых пар проводов, кабелей всех видов на основе теории емкостных и индуктивных связей;
- реализуются практические рекомендации по конструированию экранов, способам их заземления, применения уплотняющих прокладок, методам и материалам соединений и пр.;
- реализуются технологические мероприятия, обеспечивающие надежность и стабильность экранирования при длительной эксплуатации и воздействии вредных факторов окружающей среды;
- составляются методики контроля качества и надежности экранов при оценке эффективности экранирования.

Взаимодействие электромагнитного поля с зарядами и токами



- Воздействие поля на электрический заряд (сила Лоренца):

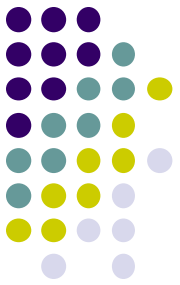
$$\vec{F}_{\vec{e}} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}],$$

где q – заряд, $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, $\vec{v}$ – скорость перемещения заряда, $\vec{B}$ – индукция магнитного поля.

- Воздействие поля на электрический ток (сила Ампера):

$$\vec{F}_{\vec{a}} = l[\vec{I}, \vec{B}],$$

где $\vec{I}$ – вектор тока в проводнике.



Расчёт эффективности экранирования

Расчёт эффективности экранирования некоторой области внутри структурного образования РЭС зависит от характера электромагнитного поля.

В ближней зоне (вблизи источника излучения при расстояниях менее 5λ) поле не сформировано и может преобладать либо магнитная, либо электрическая составляющие поля. В этом случае расчёт экранирования сводится к определению ослабления электрической либо магнитной составляющей поля.

В дальней зоне (при расстояниях более 5λ) поле сформировано и задача экранирования решается относительно электромагнитного поля

Расчёт эффективности экранирования (продолжение)

В общем случае ослабление поля вносимое металлическим экраном определяется выражением

$$A_{\omega} = \ln |ch(k_{\omega} t)| + \ln \left| 1 + 0,5 \left(\frac{Z_n}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_n} \right) \cdot th(K_{\omega} \cdot t) \right|, \quad (\text{нп})$$

где K_{ω} - коэффициент вихревых токов, $K_{\omega} = \sqrt{j\omega\mu_a\sigma}$;

Z_n - волновое сопротивление среды,

для электрического поля $Z_n^E = \frac{1}{j\omega\epsilon_a r_{\omega}}$,

для магнитного поля $Z_n^H = j\omega\mu_a r_{\omega}$,

Z_M - волновое сопротивление материала экрана,

$$Z_M = \frac{j\omega\mu_a}{K_{\omega}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu_a}{\sigma}}$$

ω - частота поля (рад/сек);

μ_a - абсолютная магнитная проницаемость среды или материала экрана, $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$

μ - относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$ - магнитная постоянная свободного пространства;

σ - электрическая проводимость экрана (1/ом);

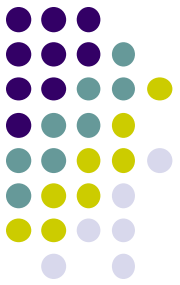
ϵ_0 - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды или материала;

$$\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = 10^7 / (4\pi c^2) \epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2},$$



Расчёт эффективности экранирования (продолжение)



c – скорость света в вакууме ($c=2,997925$ м/сек)

$\varepsilon_o=8,85416$ (пф/м).

$r_{\circ}$ - радиус экрана, м

t - толщина экрана, м.

В области низких частот (до 10^4 Гц) в ближней зоне для расчёта ослабления можно воспользоваться выражением

$$A_{\circ}^E = \ln \left| 1 + \frac{1}{2} Z_n^E \cdot \sigma \cdot t \right|, \text{ нп}$$

Для расчёта ослабления магнитного поля

$$A_{\circ}^H = \ln \left| 1 + \frac{Z_M}{2Z_{II}^H} \cdot K_M t \right| = \ln \left| 1 + \frac{\mu \cdot t}{2 \cdot r_{\circ}} \right|, \text{ нп}$$

В области низких частот для дальней зоны (при $l > 5\lambda$) ослабление плоской волны магнитным экраном будет

$$A_{\circ}^{EH} = \ln \left| 1 + \frac{1}{2} Z_o \sigma \cdot t \right|, \text{ нп}$$

Для расчёта ослабления полей в области частот более 10^4 Гц необходимо воспользоваться общим выражением ослабления полей ($A_{\circ}$).

Ослабление экраном постоянного магнитного поля можно определить по выражению:

$$S = \frac{H_{БЭ}}{H_{\circ}} = 0,22 \mu_o \left[1 - \left(1 - \frac{t}{r_o} \right)^3 \right]$$

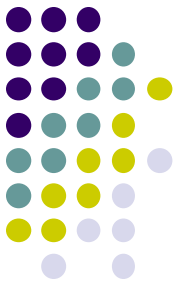
где $H_{БЭ}$ - напряженность поля без экрана;

$H_{\circ}$ - напряженность поля при наличии экрана;

μ_o - относительная магнитная проницаемость экрана;

t - толщина экрана;

r_o - радиус эквивалентной сферы, объём которой равновелик объёму экрана.



Уменьшение помех в электрических соединениях цифровых узлов РЭС достигается схемотехническими, конструктивными и технологическими методами.

К схемотехническим методам относятся:

1. использование элементной базы с максимальной помехоустойчивостью;
2. применение LC-фильтров в цепях питания;
3. компенсация помех (например, использование скрученных пар проводов);
4. применение амплитудного и временного стробирования и т.д.

(продолжение)



К конструктивным методам относятся:

1. уменьшение числа конструкторско-технологических типов линий связи в одной цепи;
2. ослабление паразитной связи путем разнесения источников и приемников помех либо ортогонального расположения проводников в соседних слоях печатной платы, уменьшения длины взаимодействующих участков линий, использования материалов с малой диэлектрической проницаемостью;
3. увеличение числа точек заземления и сечения шин питания;
4. частичное экранирование печатных плат или введение межобмоточных экранов в трансформаторы;
5. уменьшение размеров контактных соединений, например путем замены разъемных соединений на неразъемные, в частности эластомерные.



К *технологическим методам* относятся:

1. увеличение однородности линий одного технологического исполнения (печатный проводник, коаксиальный кабель и т.д.);
2. уменьшение разброса параметров элементов схемы благодаря изготовлению их в едином технологическом цикле (например, пар транзисторов схем ЭЛС);
3. освоение производства изделий с улучшенными свойствами (кабельных изделий с экраном, эластомерных контактов).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ АНАЛОГОВЫХ УЗЛОВ



Электромагнитная совместимость аналоговых узлов обеспечивается системотехническими, схемотехническими и конструкторско-технологическими методами.

К *системотехническим методам* относятся передача аналоговой информации в цифровой форме и кодирование её с помощью помехозащищенных кодов.

К *схемотехническим методам* относятся:

1. увеличение помехозащищенности схем (исключение необоснованного использования элементов с завышенной рабочей частотой, применение схем на основе дифференциальных усилителей);
2. гальваническая развязка цепей с помощью трансформаторов или оптронов;
3. подавление помех с помощью режекторных фильтров;
4. использование амплитудного и временного стробирования;
5. использование искрогасящих цепей у разрывных контактов;
6. применение прецизионных (например, малошумящих) элементов и т.д.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ АНАЛОГОВЫХ УЗЛОВ



К конструкторско-технологическим методам относятся:

1. В усилительных схемах каскады располагать один за другим на одной линии. Такая конструкция называется линейкой.
2. При автоматическом размещении элементов на плате аналогового узла запрещается улучшать размещение элементов путем перестановки их местами, допускаемой для элементов цифровых узлов.
3. Для уменьшения переходного сопротивления контакта заземления и повышения его стабильности целесообразно выполнять его в виде монолитного (паянного или сварного), а не прижимного или разъемного соединения.
4. Эффективным путем уменьшения длины общих участков является использование отдельной шины с нулевым потенциалом для каждой группы цепей: малосигнальных, с сигналами средней и большой мощности. Так, в радиотехническом устройстве шины с нулевым потенциалом (земляные шины) должны выполняться отдельно для входных цепей приемника, исполнительных цепей автоматики и выходных каскадов передатчиков.
5. Кондуктивная помеха может возникнуть, если земляная шина выполнена в виде замкнутого контура, следовательно, для исключения подобной помехи необходимо разомкнуть контур.
6. Индуктивную связь можно ослабить, уменьшая площадь взаимосвязанных контуров в результате использования скрученных и бифилярных пар проводников, расположения объемных и печатных проводников вблизи плоскости с нулевым потенциалом. Обычно скрученные пары и бифиляры используют до частоты 100 кГц, коаксиальные кабели – до 100 МГц, полые волноводы – на более высоких частотах.
7. Применение экранирования.

Защита ЭС от атмосферных (климатических) воздействий



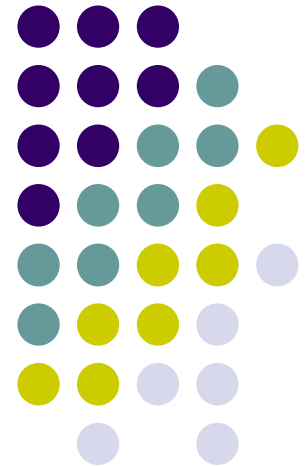
Атмосферная коррозия характерна для металлических деталей и протекает под тонкой плёнкой влаги на поверхности изделия в присутствии кислорода воздуха.

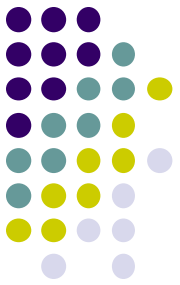
- На деталях из алюминиевых сплавов возникает окисная плёнка, существенно замедляющая коррозию.
- На малоуглеродистой стали окисная плёнка образуется медленнее и будучи рыхлой и гигроскопичной облегчает процесс коррозии.
- Медь и медные сплавы корродируют под действием аммиака в условиях влажного теплого климата
- Окисный слой на магниевых сплавах создает удовлетворительную защиту от коррозии в условиях морского климата и промышленной атмосферы



Основы конструирования электронных средств

Электрические соединения





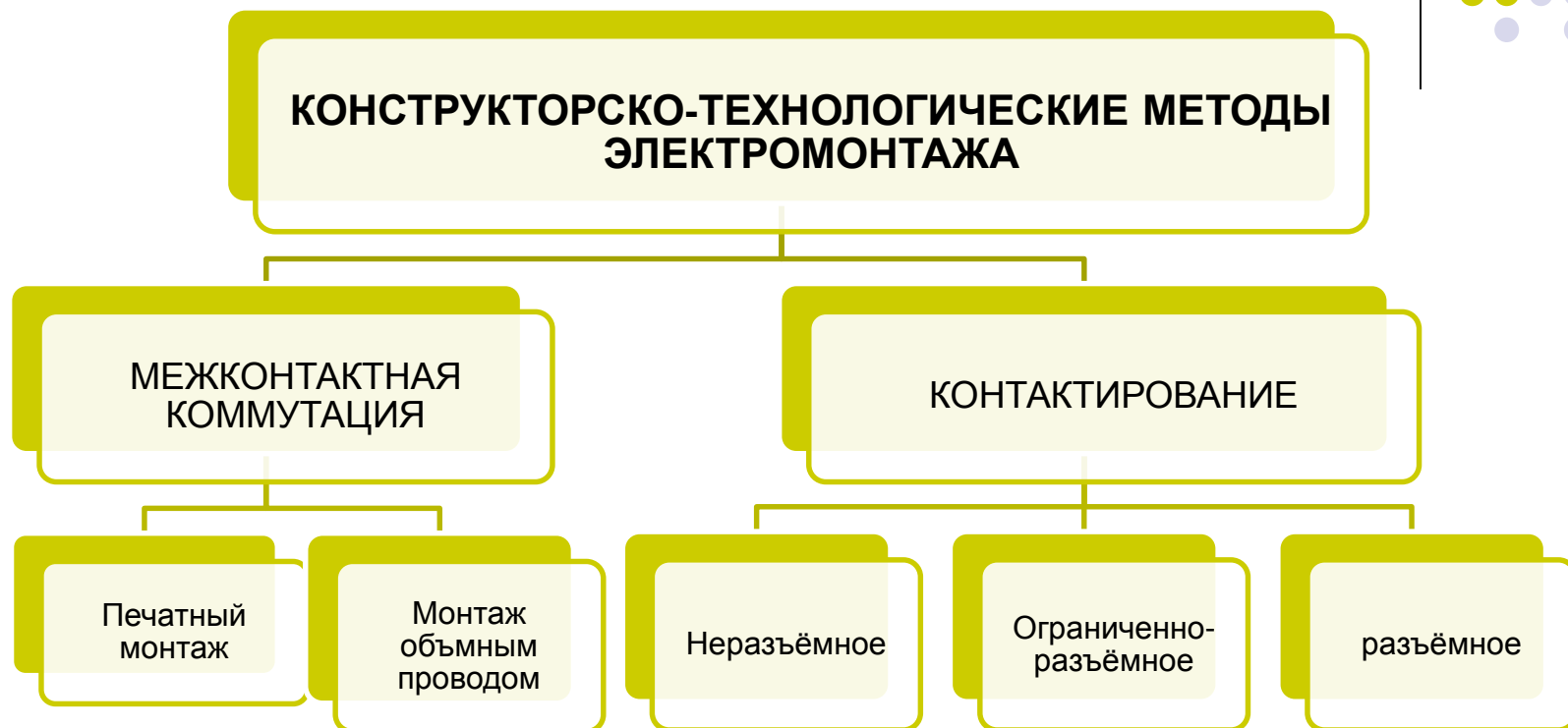
Определения

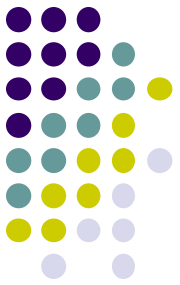
Технологический процесс выполнения электрических соединений называется **электромонтажом** (монтаж)

Электрические соединения рассматриваются в двух аспектах:
межконтактное соединение и *контактирование*

Объём электрических соединений составляет (3-15)% всего физического объёма блока РЭС:

- (3 – 5)% при реализации электрических соединений печатными шлейфами;
- (10 – 15)% при реализации электрических соединений объёмным проводом





Монтаж объёмным проводом

Одиночным проводом

Без
изоляции

С
изоляцией

Экранирова
нный

Коаксиальн
ый

Сборка проводов

Перевитая
пара

Жгут
круглого
сечения

Плоский
кабель

Тканевый
Плетеный
Клееный
*Опресован
ный*
На гибкой
матрице

Печатный монтаж

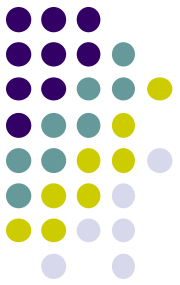


Под печатным монтажом понимается такой способ межэлементных и межблочных соединений, при котором плоские проводники имеют прочное сцепление с изоляционным основанием по всей длине

- Печатный проводник – отдельная проводящая полоска в проводящем рисунке (ГОСТ 20406-75)

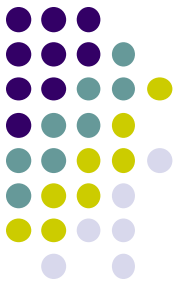
Проводящий рисунок образует проводниковый материал, полученный избирательным травлением металлической фольги, осаждением металла или нанесением и последующей обработкой специальных паст

- Конфигурацию проводящего рисунка определяют электрическая принципиальная схема и конструкторско-технологические ограничения



Основные определения

- **Основание** – элемент конструкции, на поверхности или в объёме которого выполнен проводящий рисунок
- **Печатная плата** – листовой материал основания, вырезанный по заданному размеру, содержащий необходимые отверстия и, по меньшей мере, один проводящий рисунок, обеспечивающий в дальнейшем электрическое и механическое соединение навесных элементов
- **Печатный узел** – печатная плата со всеми электрически и механически присоединенными к ней навесными элементами и всеми выполненными операциями обработки (пайки, покрытия и т.д.)



Печатный монтаж

Основание

Металлическое

Низкоуглеродистая
сталь
Алюминий (сплав)
Железо-никелевый
сплав
Титан (сплав)

Диэлектрическое

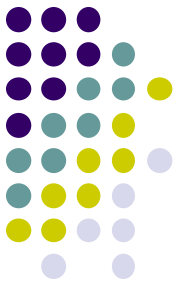
- Стеклопластик
-полиимидная плёнка
-фторопласт
-керамика
-картон

Число слоев

Односторонний
Двусторонний
Многослойный

Технологический способ получения проводников





Виды плат

В зависимости от назначения изделия с печатным монтажом разделяются:

- платы для ячеек и РЭМО
- объединительные платы для межмодульного монтажа
- гибкие печатные кабели
- платы микросборок

В зависимости от материала основания изделия с печатным монтажом разделяются:

- платы на диэлектрическом основании (слоистые диэлектрики) - **ПП**
- платы на керамическом основании - **КП**
- платы на металлическом основании (металлический лист покрытые тонким слоем диэлектрика) - **ИП-интегральные платы**

Печатные платы

платы на диэлектрическом основании



В качестве материала основания - Фольгированный диэлектрик

Медная фольга – толщина 35 – 50 мкм

Никелевая фольга – толщина 5 – 10 мкм

Достоинства

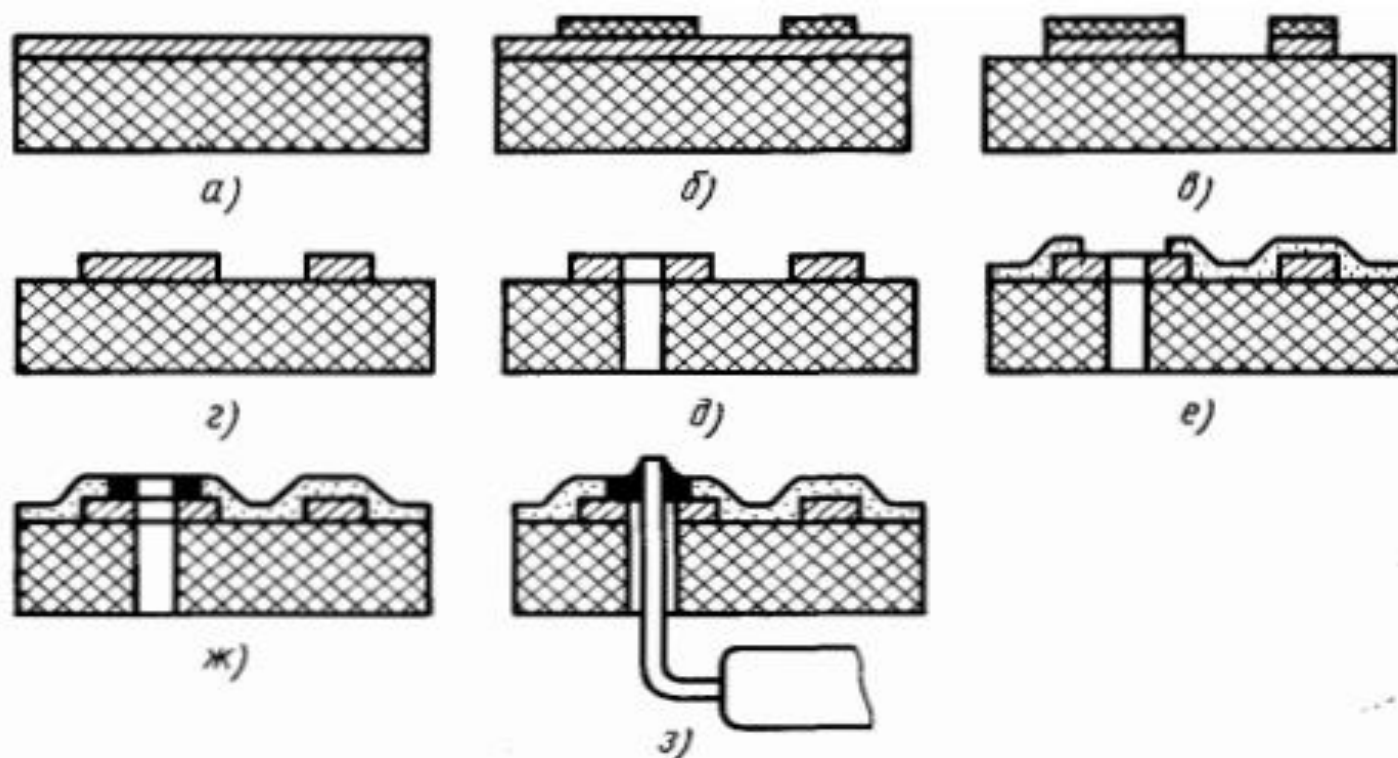
- Низкая стоимость
- широкая номенклатура фольгированных материалов выпускаемых промышленностью в виде заготовок больших размеров
- Лёгкость механической обработки штамповкой, сверлением и резанием

Недостатки

- Низкая теплопроводность
- В ряде случаев недостаточная устойчивость к внешним воздействиям

Субтрактивные методы

Химический негативный метод

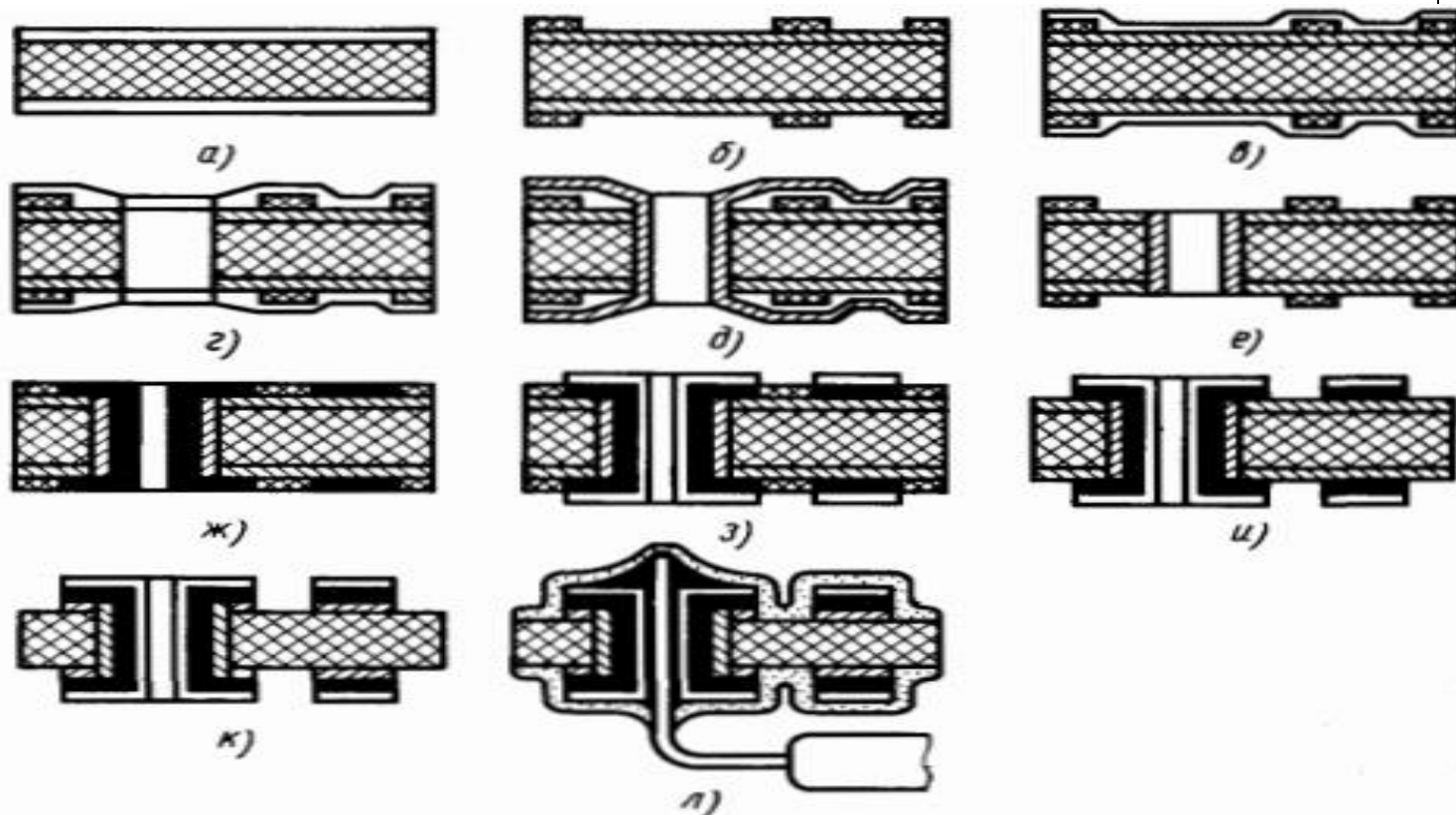


Последовательность основных операций изготовления печатных плат химическим негативным методом:

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

Субтрактивные методы

Комбинированный позитивный метод



Последовательность основных операций изготовления печатных плат комбинированным позитивным методом:

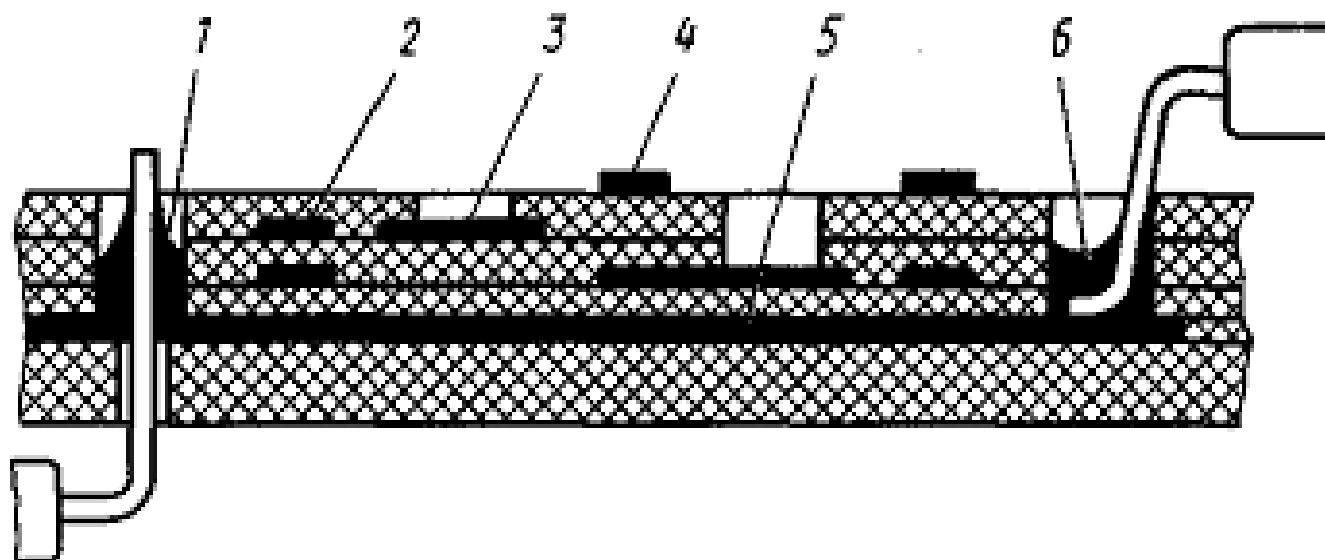
а — заготовка из фольгированного диэлектрика; *б* — нанесение фоторезистивного печатного рисунка; *в* — нанесение лаковой рубашки; *г* — сверление монтажных и переходных отверстий; *д* — химическое меднение; *е* — удаление лаковой рубашки; *ж* — гальваническое меднение; *з* — нанесение защитного покрытия; *и* — удаление фоторезиста; *к* — травление печатного рисунка; *л* — пайка выводов ЭРЭ и лакировка платы

Аддитивные методы



Полуаддитивный метод	Аддитивный метод
Подготовка поверхности для обеспечения адгезии (травление поверхности)	Подготовка поверхности для обеспечения адгезии (покрытие слоем адгезива толщиной 50 мкм)
Формирование отверстий	Формирование отверстий
Активация поверхности	Нанесение рисунка проводников с помощью каталитических частиц активатора (PdCl, SnCl)
Химическое тонкостенное меднение толщиной около 5 мкм	Химическое меднение
Формирование рисунка проводников	Нанесение защитного покрытия
Наращивание меди гальваническим способом	Окончательная обработка
Стравливание химической меди в местах, где нет проводников	
Нанесение защитного покрытия	

Многослойные печатные платы

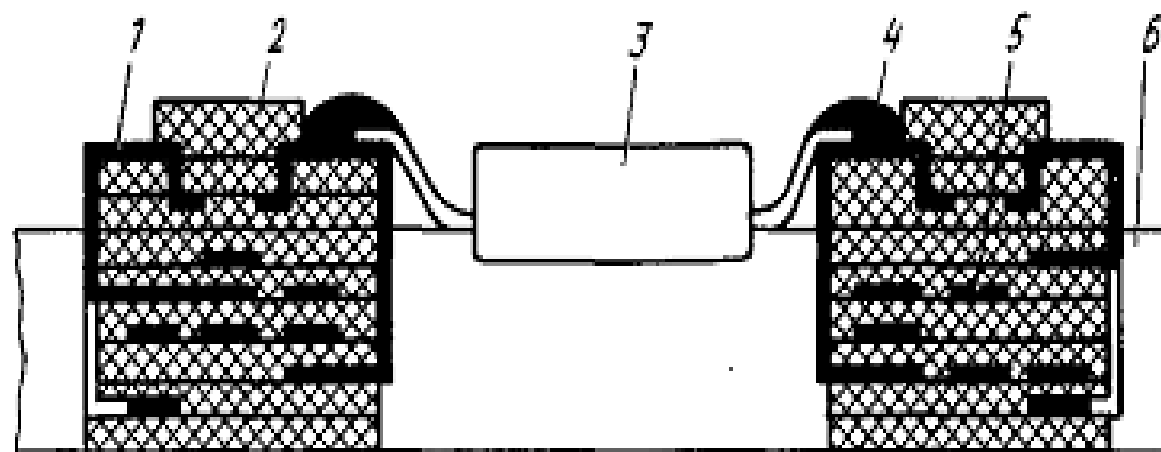


Структура МПП, изготовленной методом открытых контактных площадок:

1—пайка в «колодец» штыревого вывода; 2—печатный проводник внутреннего слоя; 3—монтажная площадка; 4—печатный проводник внешнего слоя; 5—соединение монтажных площадок в одном слое; 6—пайка в «колодец» планарного вывода

Многослойные печатные платы

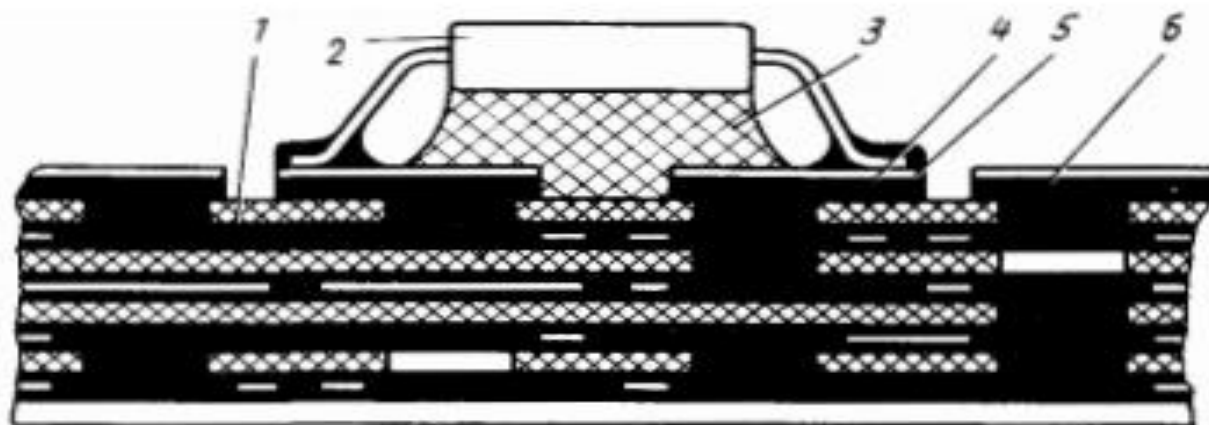
(продолжение)



Структура МПП, изготовленной методом выступающих выводов:

1—переход печатного проводника в монтажную площадку; 2—крепящая колодка; 3—радио-элемент с планарными выводами; 4—пайка выводов ЭРЭ; 5—печатный проводник внутреннего слоя; 6—окно платы

Многослойные печатные платы (продолжение)

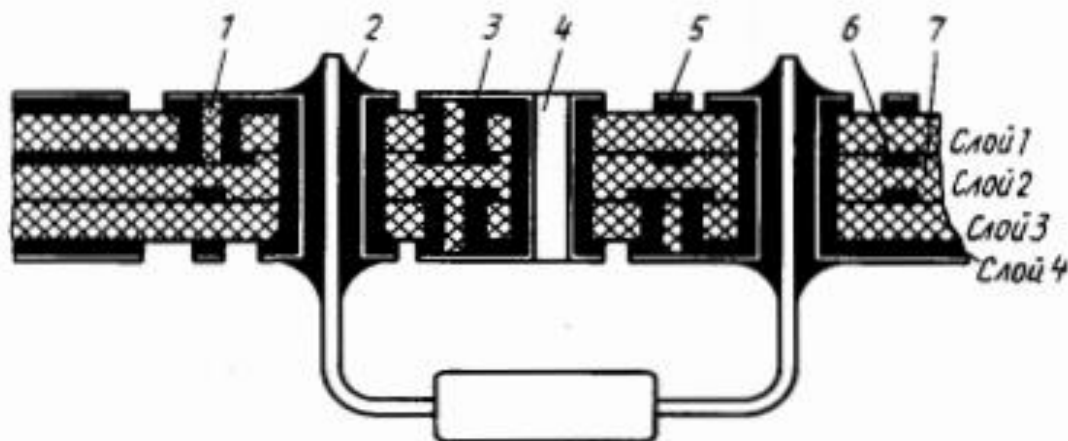


Структура МПП послойного наращивания:

1—печатный проводник внутреннего слоя; 2—ЭРЭ с планарными выводами; 3—клеящая мастика; 4—защитное покрытие наружного слоя; 5—монтажная контактная площадка; 6—межслойный переход («столбик» меди)

Многослойные печатные платы

(продолжение)

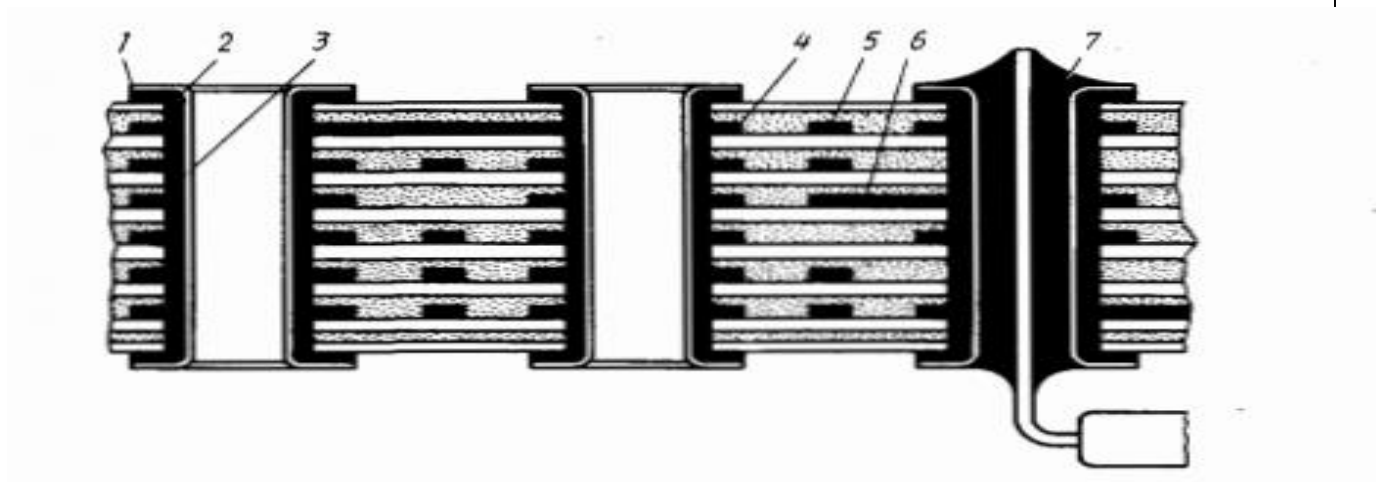


Структура МПП попарного прессования:

1 — переходное отверстие между внутренними и наружными слоями, заполненное связующим межслойной изоляции; 2 — монтажное отверстие; 3 — защитное покрытие; 4 — переходное отверстие между наружными слоями; 5 — печатный проводник наружного слоя; 6 — печатный проводник внутреннего слоя; 7 — межслойная изоляция

Многослойные печатные платы

(продолжение)

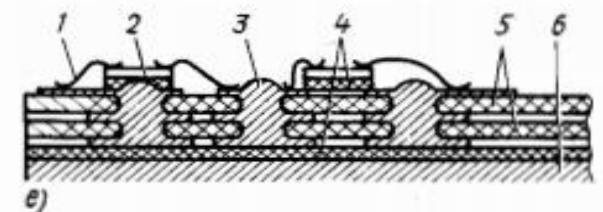
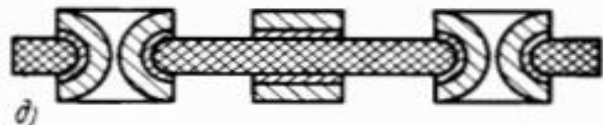
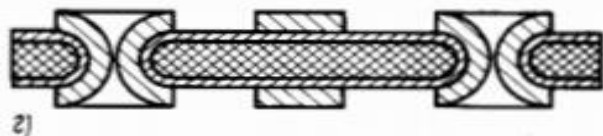
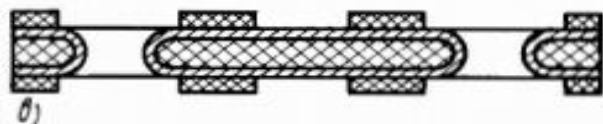


Структура МПП, изготовленной методом металлизации сквозных отверстий:

1 — контактная площадка наружного слоя; 2 — защитное покрытие; 3 — металлизация сквозного отверстия; 4 — контактная площадка внутреннего слоя; 5, 6 — проводники; 7 — припой

Многослойные печатные платы

(продолжение)



Последовательность основных операций изготовления МПП на полиимидной пленке:

а—пленка с протравленными отверстиями; *б*—пленка с нанесенным подслоем Cr—Cu—Cr; *в*—нанесение защитного слоя фоторезиста; *г*—наращивание слоя меди 15...20 мкм и защитного слоя Sn—Bi; *д*—стравливание подслоя Cr—Cu—Cr; *е*—структура из спаянных слоев; *1*—внешние выводы бескорпусной ИС; *2*—кристалл бескорпусной ИС; *3*—вакуумный спай через металлизированные отверстия; *4*—клей (для крепления кристалла ИС к плате и платы к основанию); *5*—двусторонние полиимидные платы; *6*—алюминиевое основание

Материалы для изготовления печатных плат



	Гетинакс	Текстолит	Стеклотекстолит	Полиимид	Керамика	Фторопласт
Диэл. прониц. ϵ	4,5...6	4,5...6	5...6	3,5...4	10	2
$\text{tg}\delta$	0,008...0,02	0,03...0,04	0,005...0,02	0,002...0,05	0,0005...0,0006	$(2...3)10^{-9}$
Объёмное удельное сопротивление	$10^{12}-10^{14}$	$10^{12}-10^{14}$	$10^{14}-10^{15}$	$10^{16}-10^{17}$	$10^{14}-10^{15}$	$10^{18}-10^{19}$
Интервал рабочих температур	-60..+80	-60..+70	-60..+100	-260..+250	-260..+400	-100..+200
ТКЛР, $\cdot 10^{-6}$	22	22	8...9	22....26	3.....6	80....250



Точность производства и плотность монтажа ПП зависят от технологии производства.

Существует 5 классов точности и плотности ПП

Минимальные размеры печатного монтажа

Элементы печатного монтажа	Размеры печатного монтажа, мм В зависимости от классов точности				
	1	2	3	4	5
1.Ширина проводников	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
2. Расстояние между проводниками, контактными площадками	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
3. Расстояние от края отверстия до края контактной площадки	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025

