

**Обеспечение
электромагнитной
совместимости**

Основные термины и определения

- **Электромагнитная обстановка (ЭМО)** - совокупность реальных электромагнитных явлений, существующих в данном месте, в частотном и временном диапазонах.
- **Электромагнитная совместимость (ЭМС)** - это способность технического средства (ТС) эффективно функционировать с заданным качеством в определенной ЭМО, не создавая при этом недопустимых электромагнитных помех другим ТС.
- **Электромагнитная помеха (ЭМП)** - электромагнитные явления, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования ТС (электрической сети, приборов и устройств потребителей). Уровень ЭМП - значение величины помехи, измеренное в регламентированных условиях.
- **Влияние помехи** - снижение показателей качества функционирования ТС при воздействии помехи.
- **Устойчивость к ЭМП, помехоустойчивость** - способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии помех.

Критерии качества функционирования технических средств при воздействии помех

Критерий А - воздействие ЭМП никак не отражается на функциональных характеристиках аппаратуры, работа которой до, во время и после воздействия помехи происходит в полном соответствии с техническими условиями или стандартами.

Критерий В - допускается временное ухудшение функциональных характеристик аппаратуры в момент воздействия помехи. После прекращения воздействия ЭМП функционирование полностью восстанавливается без вмешательства обслуживающего персонала.

Критерий С - аналогичен В, но, в отличие от него, допускает вмешательство персонала для восстановления работоспособности аппаратуры (например, перезагрузки «зависшей» цифровой системы, повторного набора номера и т.п.).

Критерий D- физическое повреждение аппаратуры под действием помехи. Восстановление работоспособности возможно только путем ремонта.

Обеспечение электромагнитной совместимости

Организационное обеспечение ЭМС: организационные решения, постановления, нормативно-технические документы, направленные на исключение или снижение до приемлемого уровня электромагнитных помех между техническими средствами.

Экспертиза ЭМС: экспериментальное и (или) теоретическое исследование состояния обеспечения ЭМС технического средства в заданной электромагнитной обстановке.

Техническое обеспечение ЭМС: Технические решения, направленные на улучшение характеристик их ЭМС.

Сертификация ТС на соответствие требованиям ЭМС: мероприятия, в результате которых удостоверяется соответствие определенного типа технического средства требованиям государственных, международных или иных нормативно-технических документов, регламентирующих характеристики ЭМС, посредством выдачи предприятию изготовителю сертификата.

Сертификат выдается на основе протокола испытаний, проведенных в аккредитованной лаборатории. Испытания включают проверку устойчивости ТС к помехам со стандартными параметрами и проверку на допустимые уровни создаваемых помех.

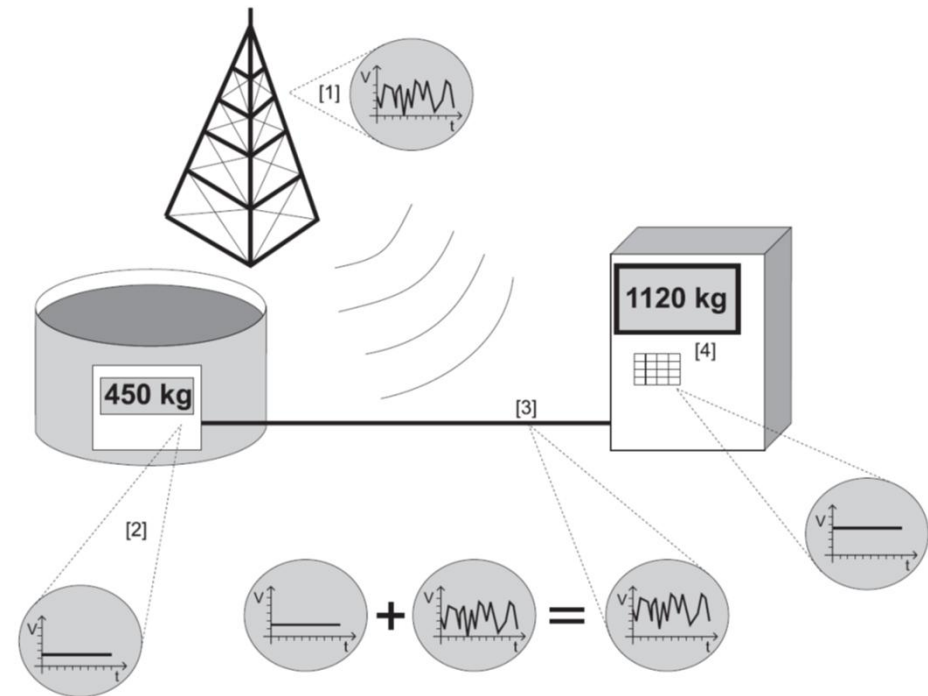
Механизмы помех

Электромагнитная совместимость приобретает все большее значение для измерительной техники. Технический прогресс приводит все к большей и большей концентрации электрических и электронных компонентов на все меньшей площади. Одновременно увеличиваются тактовые частоты устройств обработки информации и приводной электроники. Вследствие этого все больше увеличивается опасность взаимного воздействия и связанного с этим нарушения функционирования. На рисунке показан пример воздействия на измерительную линию.

Для возникновения помехи принципиально должны быть выполнены три условия:

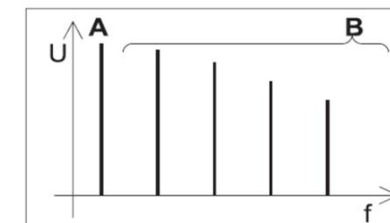
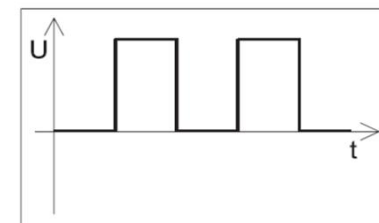
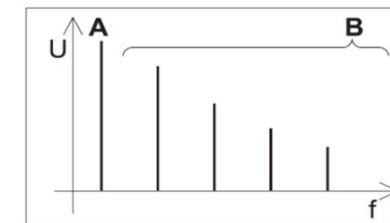
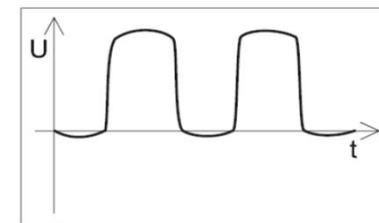
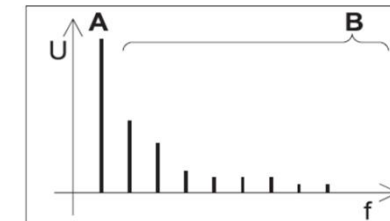
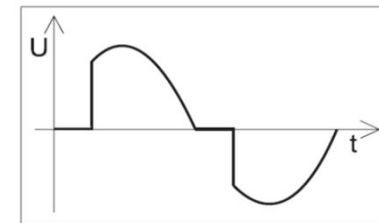
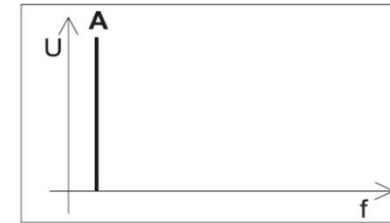
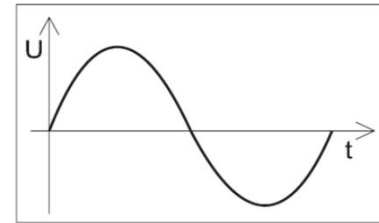
- должен существовать источник помех
- должен существовать приемник помех
- должна быть возможность взаимодействия между ними

Даже если все приведенные выше условия выполнены, помеха возникнет только тогда, когда воздействие превысит допустимую величину.



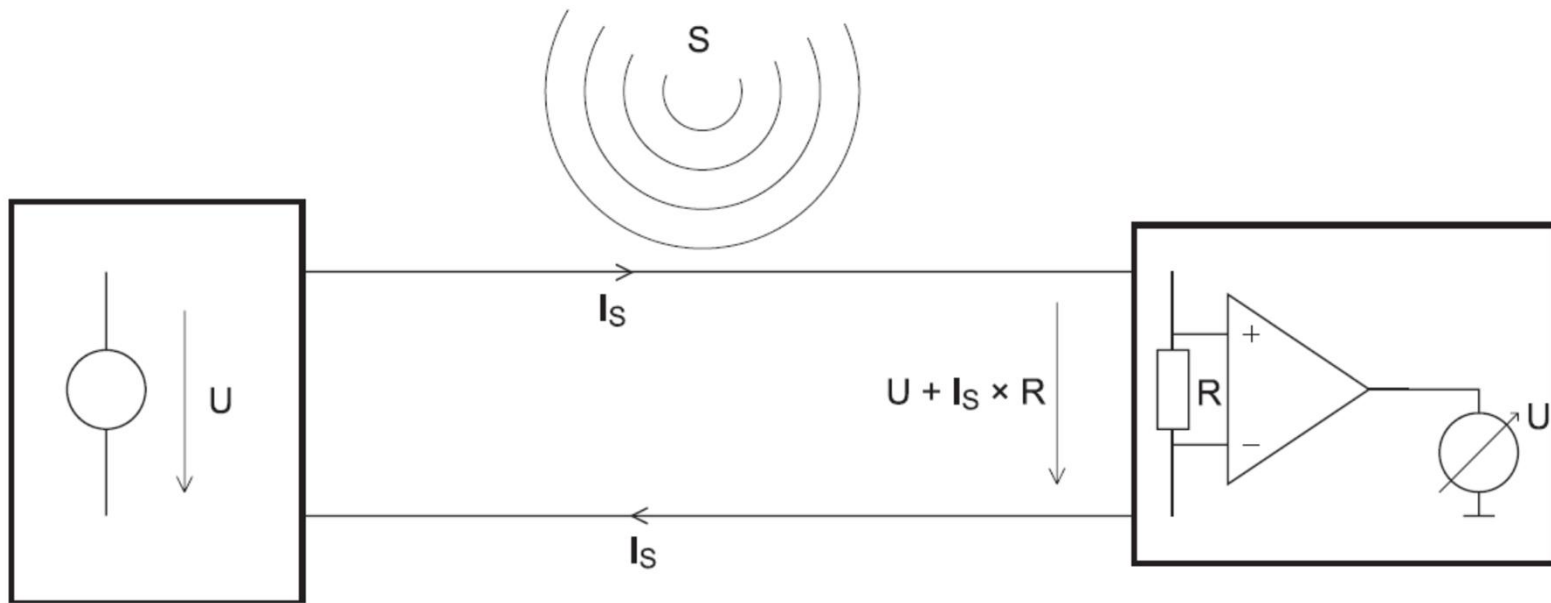
Причины высокочастотных помех

Откуда возникают высокочастотные помехи в установке, которая, собственно говоря, работает только с постоянным напряжением или с переменным напряжением сети? На рисунке показаны частотные спектры различных форм сигнала. Каждый не синусоидальный сигнал содержит, кроме своей основной частоты, еще и кратные производные основной частоты, так называемые гармоники.



Противофазные помехи

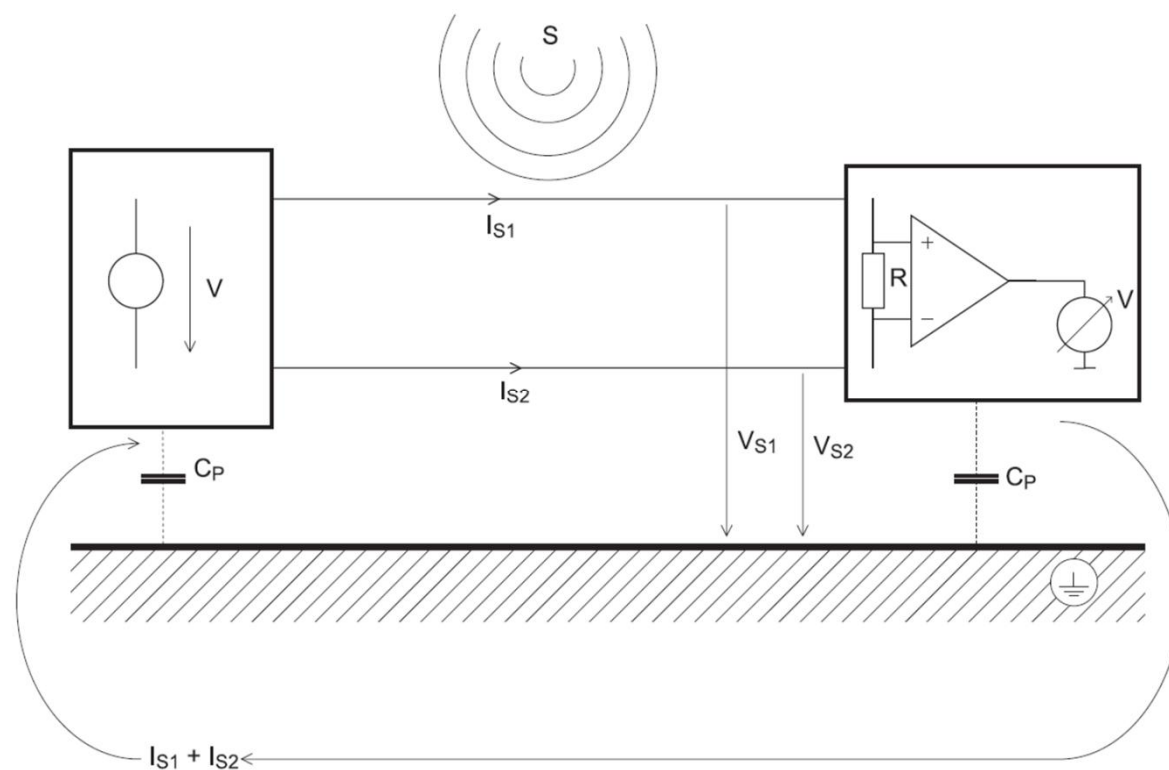
Противофазные помехи также называются симметричными помехами: Они преобладают при низких частотах; цепь тока помехи замыкается имеющимися линиями. Ток помехи I_S здесь непосредственно вызывает падение напряжения помехи на измерительном сопротивлении R .



Синфазные помехи

Синфазные помехи также называются асимметричными помехами: Цепь тока помехи здесь замыкается паразитными емкостями C_p . Так как они при низких частотах обладают высоким полным сопротивлением, то синфазными помехами в НЧ диапазоне можно пренебречь. Значимые токи помех I_{S1} и I_{S2} протекают только при высоких частотах. На измерительном сопротивлении R при этом сказываются различные падения напряжения на выходящем и входящем проводах $V_{S1} - V_{S2}$.

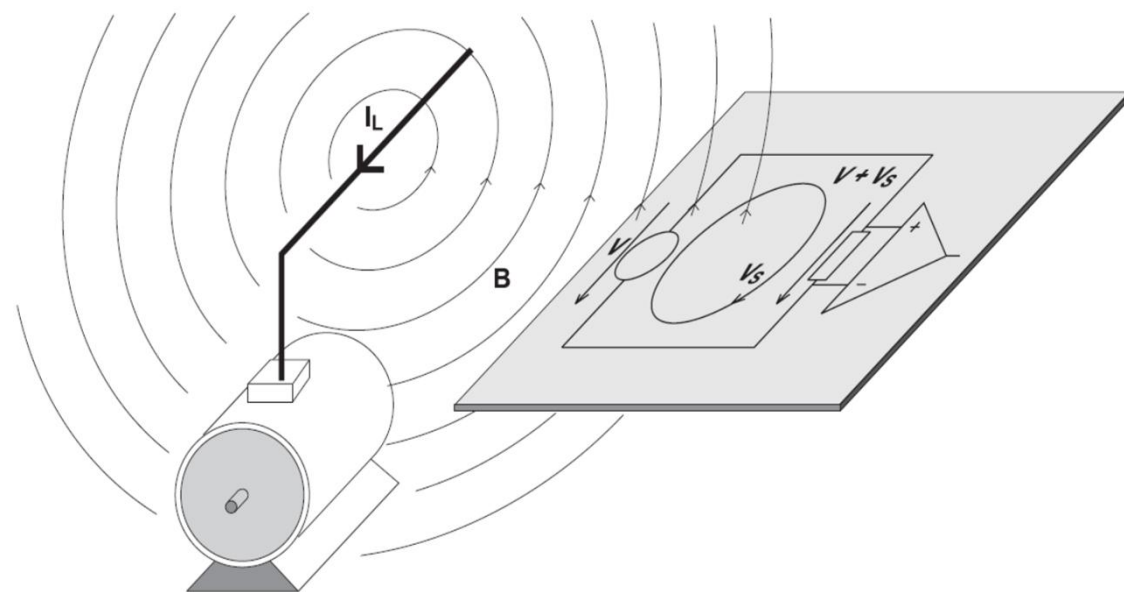
В ВЧ диапазоне синфазные помехи являются главной проблемой. Их часто очень трудно обнаружить, так как не всегда очевидно, где цепь тока помехи замыкается паразитными емкостями.



Индуктивное воздействие

Вокруг каждого проводника с током создается магнитное поле B , которое пропорционально току в проводнике I_L . Если это магнитное поле пронизывает перпендикулярно к нему расположенный проводящий контур, то при изменении напряженности магнитного поля там индуцируется напряжение (принцип трансформатора). Напряжение пропорционально площади проводящего контура и изменению напряженности магнитного поля. Это означает, что напряжение помехи индуцируется, только если изменяется сила тока в цепи нагрузки (переменный ток или подключенный постоянный ток).

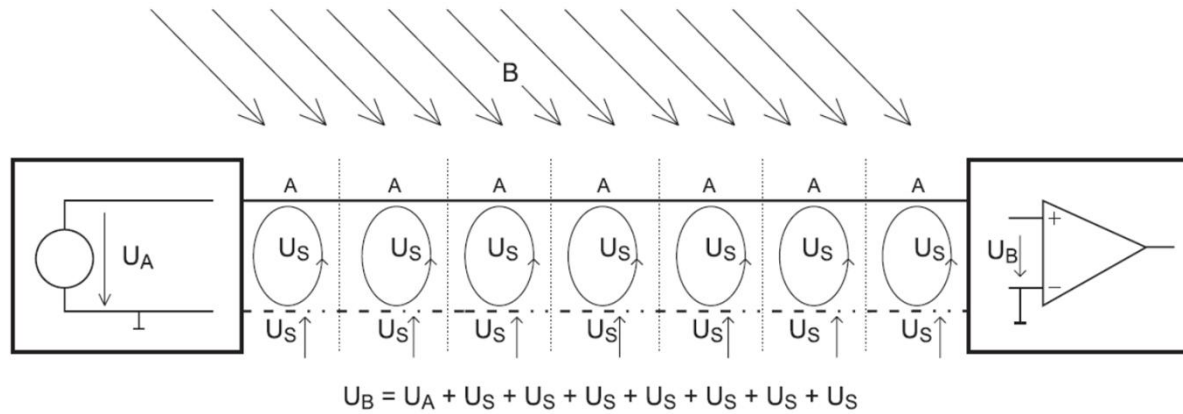
Фиксированный постоянный ток при данных условиях напряжение помехи не вызывает.



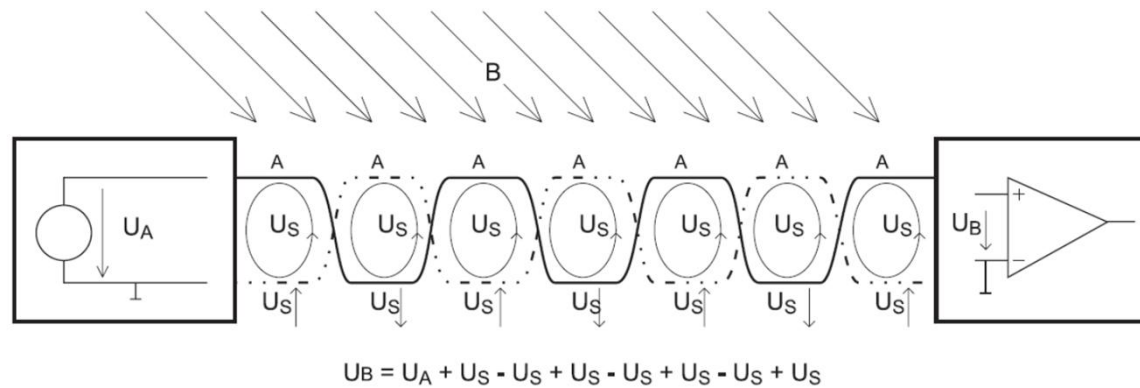
Меры против индуктивного воздействия

Скручивание выходящих и входящих проводов особенно эффективно для снижения индуктивного воздействия. При этом образуется много маленьких поверхностей A , на которых индуцируются частичные напряжения помехи с чередующимися знаками. На измерительном сопротивлении присутствует только незначительное напряжение помехи. Общее напряжение помехи не равно нулю, так как поверхности петель A не равны и так как магнитное поле B в петлях различно (например, из-за различного расстояния от источника помехи). Скручивание тем эффективнее, чем меньше поверхность петель. Это достигается за счет увеличения количества витков.

Скручивание



Нескрученный подводящий кабель с магнитным полем B , поверхностью петель A и частичными напряжениями помехи U_s



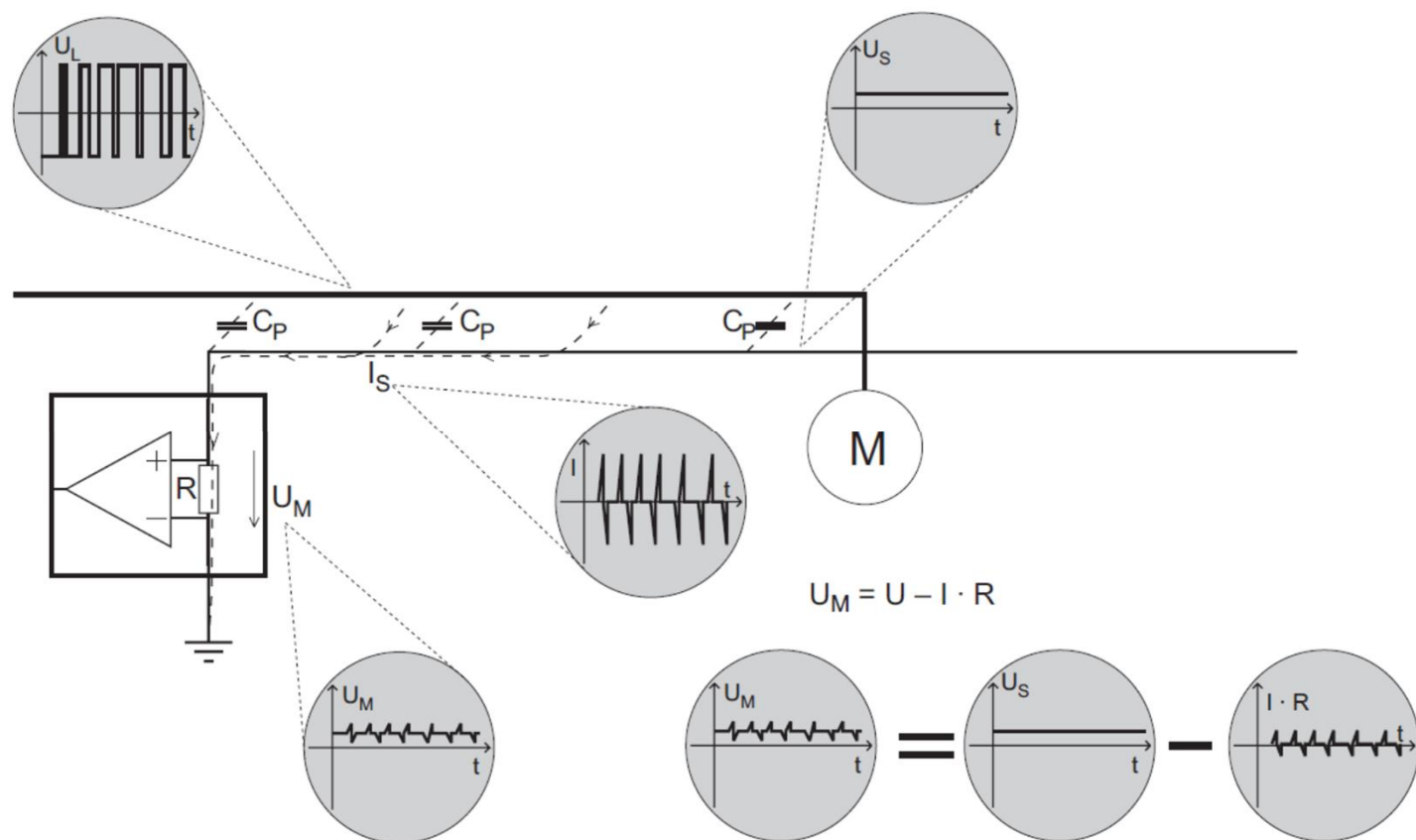
Скрученный подводящий кабель с магнитным полем B , поверхностью петель A и частичными напряжениями помехи U_s

Емкостное воздействие

Спектр частот: ВЧ-диапазон. Емкостное воздействие между силовой и сигнальной линиями

Две соседние линии обладают паразитной емкостью. Если на одной из линий происходит изменение напряжения, то через паразитную емкость C_p ток помехи I_S течет в соседнюю линию и вызывает на измерительном сопротивлении напряжение помехи. Для тока помехи действует следующая формула:

$$I_S = C_p \cdot \Delta U / \Delta t$$



Емкостное воздействие

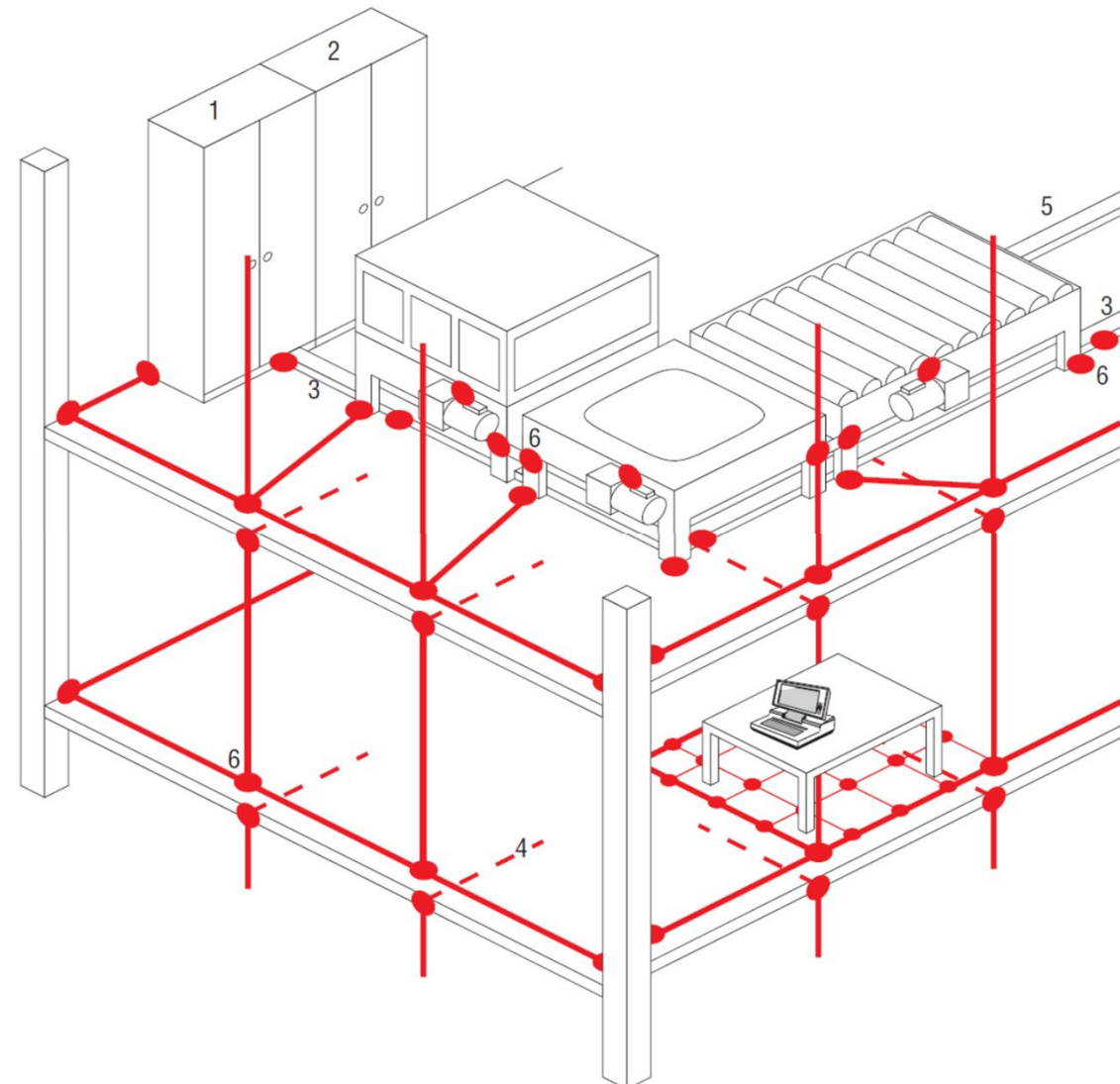
Следующие факторы имеют влияние на ток помехи:

- Входное сопротивление R : чем выше входное сопротивление, тем выше напряжение помехи, вызванное током помехи.
- Расстояние между линиями: чем больше расстояние, тем меньше паразитная емкость и тем самым меньше ток помехи. Паразитная емкость растет с уменьшением расстояния между линиями (это соответствует расстоянию между пластинами конденсатора) и с длиной, на которой провода лежат параллельно (длина, умноженная на диаметр проводника, соответствует площади пластины конденсатора).
- Амплитуда напряжения помехи: ток помехи растет с увеличением амплитуды напряжения на линии, создающей помеху.
- Крутизна фронта напряжения помехи (скорость изменения): ток помехи увеличивается с увеличением крутизны фронта силового напряжения, создающего помеху.

Меры по обеспечению электромагнитной совместимости

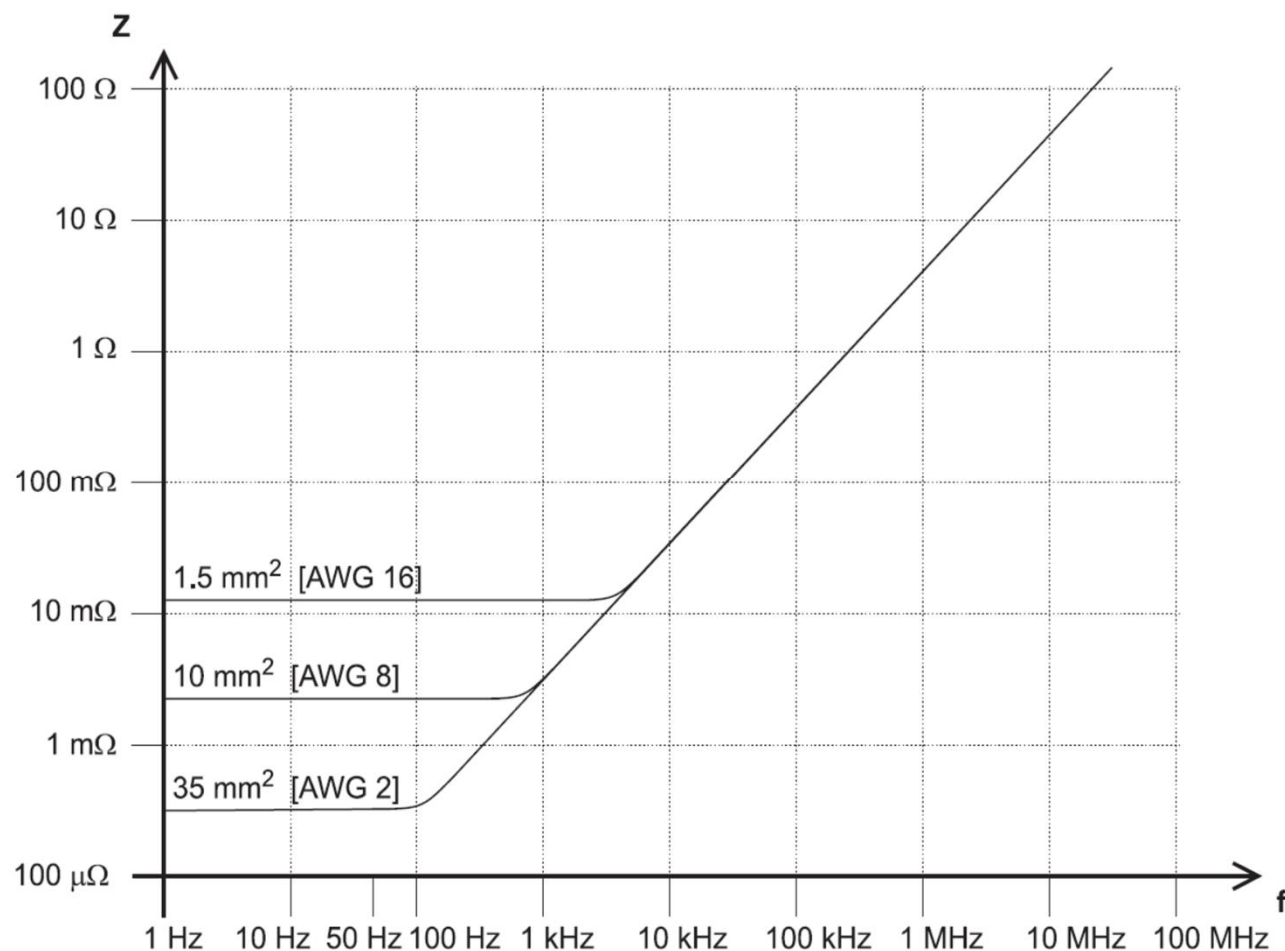
Заземление

Заземление играет особенно важную роль для бесперебойного функционирования установки. Очень важно, чтобы компоненты установки, как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне, имели одно и то же заземление. Поэтому еще при проектировании установки следует учитывать высокочастотное заземление. Все компоненты установки должны быть заземлены с низким электрическим сопротивлением (как для низких частот, так и для высоких частот). Поэтому в установке должна существовать сеть заземления, которая предоставляла бы и для высоких частот единый общий вывод. Ниже показан пример такой сети заземления.



Заземление

Для большинства видов помех защитный провод обладает очень высоким высокочастотным полным сопротивлением. Заземляющие провода эффективны только тогда, когда они объединены в сеть. На рисунке показано полное сопротивление медного провода в зависимости от частоты. При высоких частотах провод, независимо от сечения, обладает высоким полным сопротивлением. Следовательно, он не подходит и для высокочастотного заземления экрана

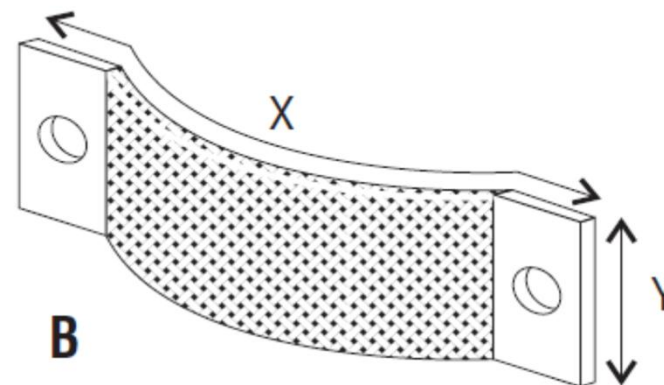
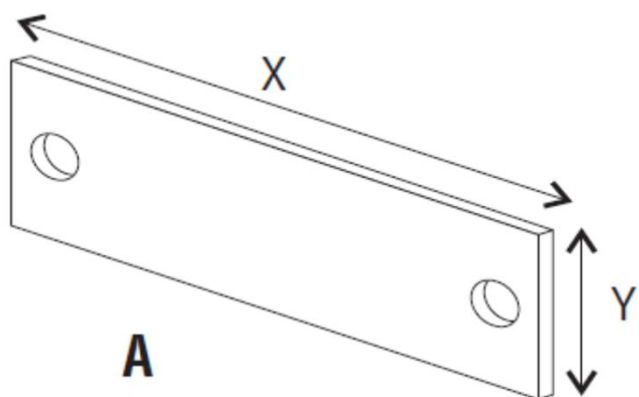


Полное сопротивление Z медного проводника длиной в 1 м в зависимости от частоты f

Заземление

Следует убедиться, что повсюду в установке как для НЧ, так и для ВЧ имеется одинаковое заземление.

Очень важно, чтобы компоненты были подключены к этой сети с низким электрическим сопротивлением.



Соединения с землей: А – листовый металл / В – литцендрат

Способы обеспечения низкоомного заземления:

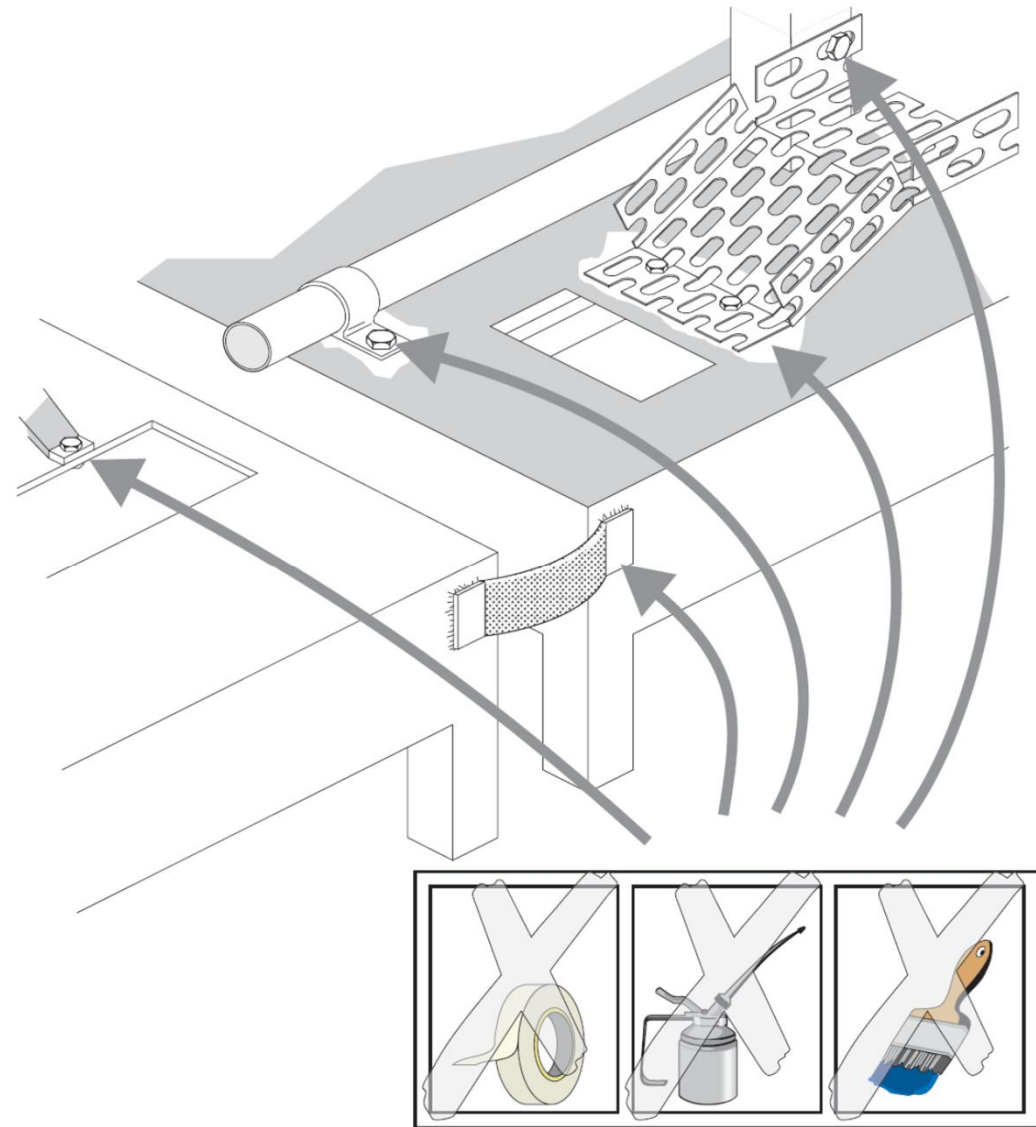
- соединение с широким поверхностным контактом ($1:3 < X:Y < 3:1$), которое с двух концов имеет достаточный поверхностный контакт с общим выводом;
- соединение из большого количества отдельных, изолированных друг от друга проводов;
- экранированный провод: экран является для НЧ очень низкоомным соединением.

Все эти варианты имеют малую индуктивность и, следовательно, обладают малым высокочастотным сопротивлением.

Заземление

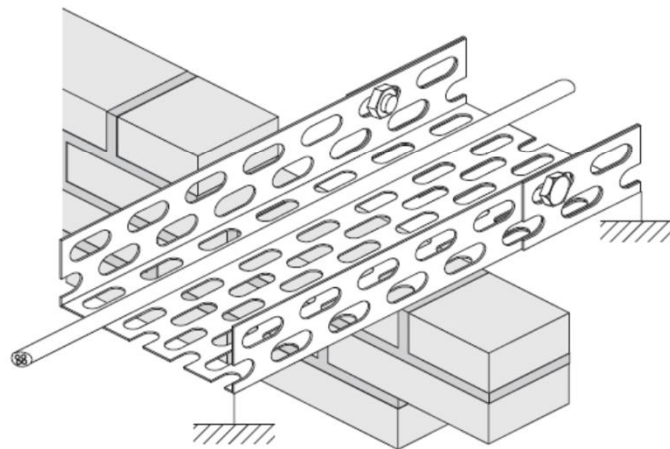
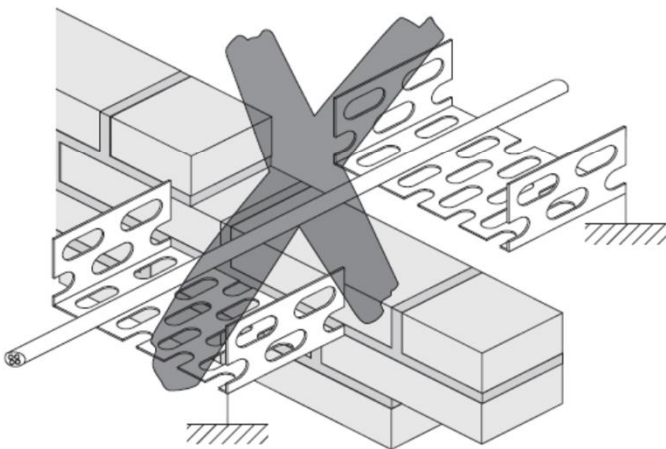
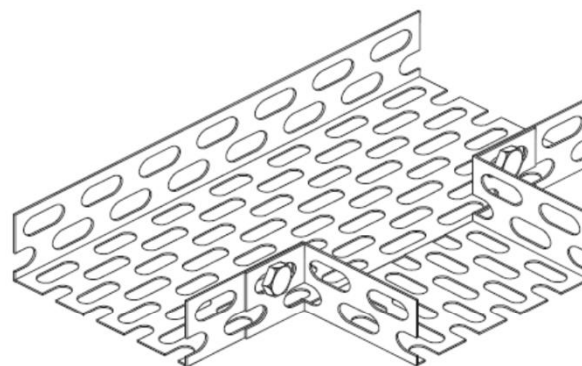
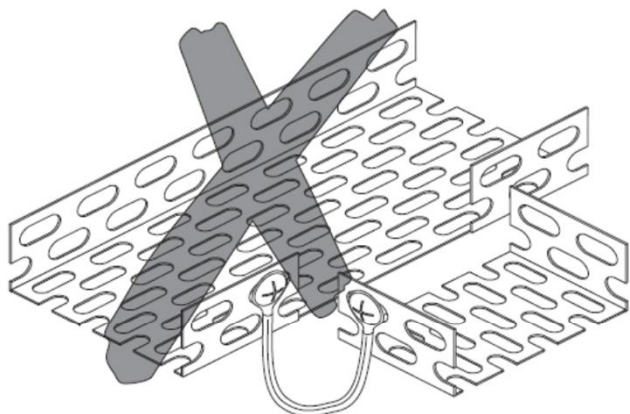
Важное влияние на добротность соединения с землей имеет качество контактов.

Эффект лучших заземляющих проводов может быть сведен на нет при ненадлежащем или нерациональном подсоединении контактов



Заземление

Соединение кабельных каналов

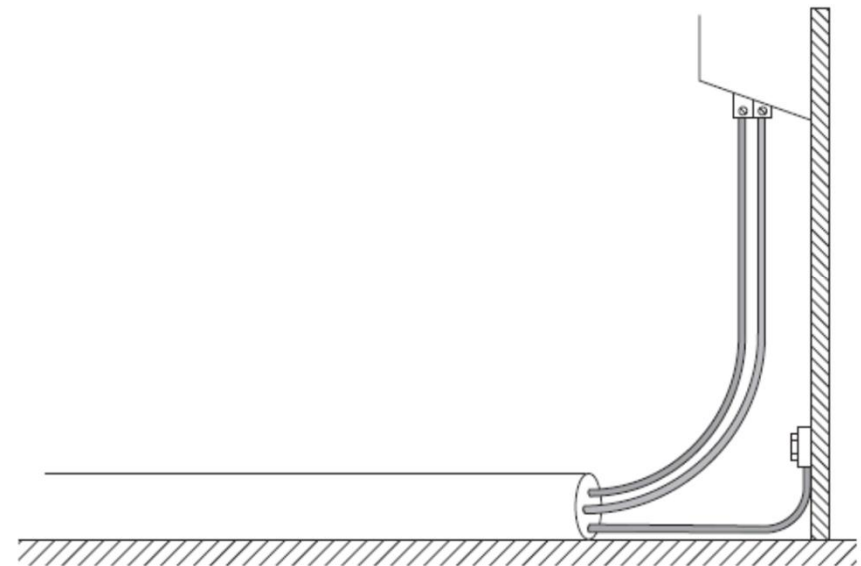
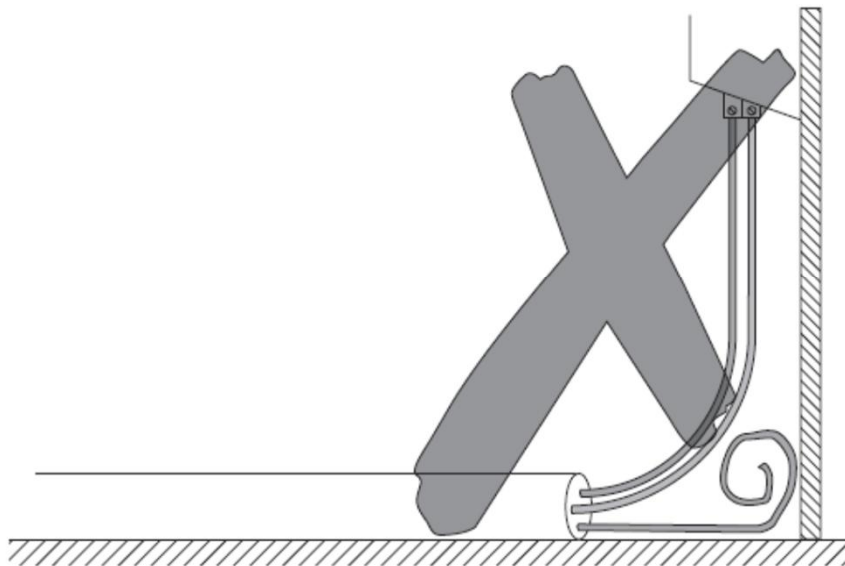


Кабельное соединение

Группа проводов	Источник помех	Чувствительность	Пример
I (очень чувствительные)	-	++	Низковольтные линии аналоговых сигналов. Измерительные линии (зонды, приемники и т. д.)
II (чувствительные)	0	+	Низковольтные линии цифровых сигналов (например шинный кабель). Линии с коммутируемыми низковольтными сигналами (двоичные переключатели 24 В и т. д.). Низковольтное питание (10 В, 24 В и т. д.)
III (Источники помех)	+	0	Линии системы управления для индуктивных нагрузок (защищены от помех). Защищенные от помех силовые линии (контакторы, тормоза и т. д.) Сетевые кабели (не подключенные)
IV (мощные источники помех)	++	-	Подводящие линии сварочных аппаратов. Силовые цепи. Электронный регулятор частоты вращения. Выходные линии преобразователей

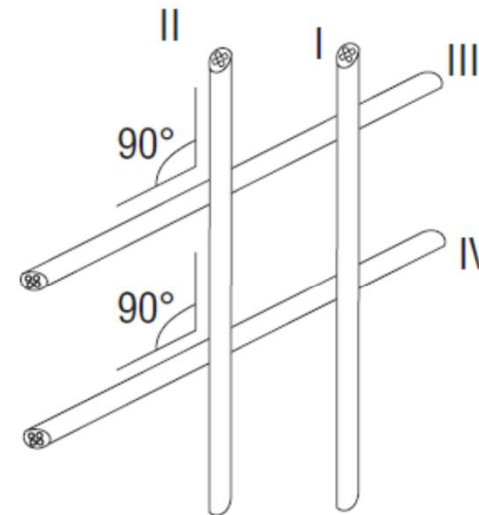
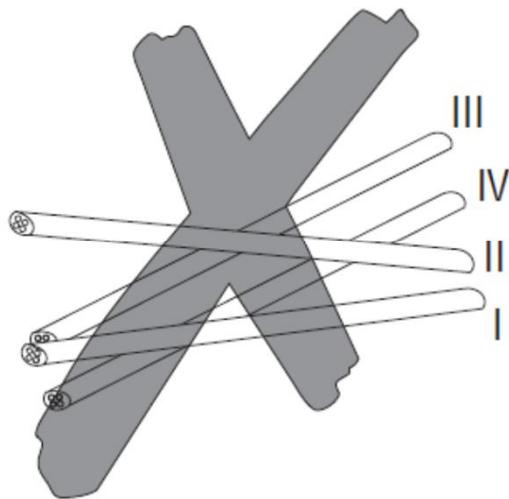
Меры по обеспечению электромагнитной совместимости

Неиспользуемые провода должны быть заземлены с обоих концов. На проводах группы I в результате соединения с землей, при определенных обстоятельствах, помехи от фона переменного тока (НЧ < 50 Гц) могут воздействовать на полезный сигнал.



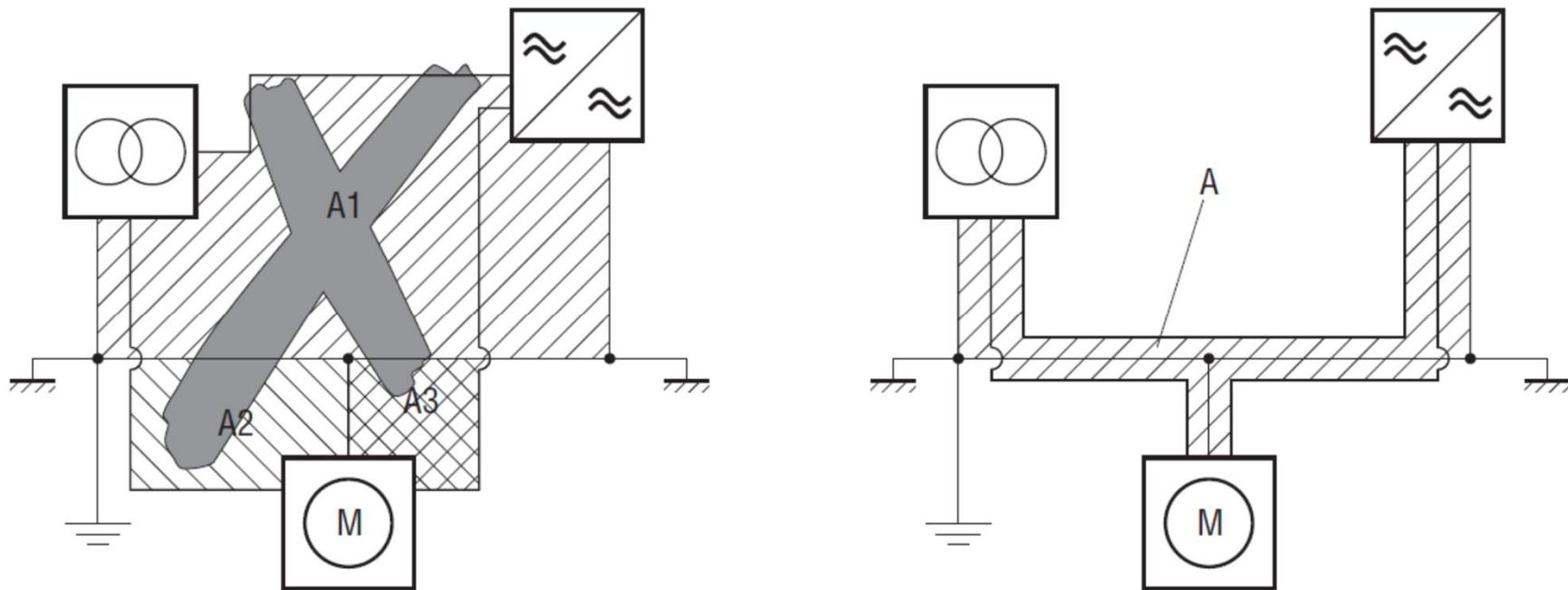
Меры по обеспечению электромагнитной совместимости

Всегда перпендикулярно скрещивать провода групп I и II и групп III и IV.



Меры по обеспечению электромагнитной совместимости

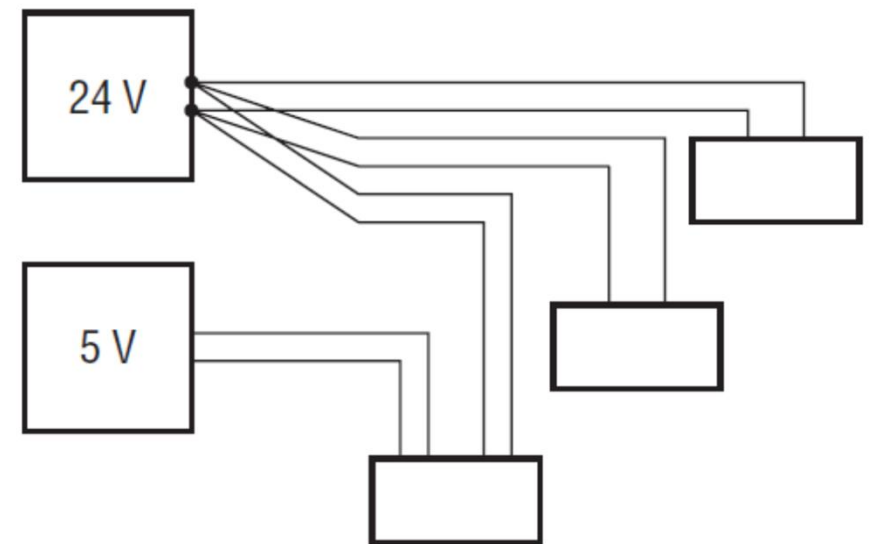
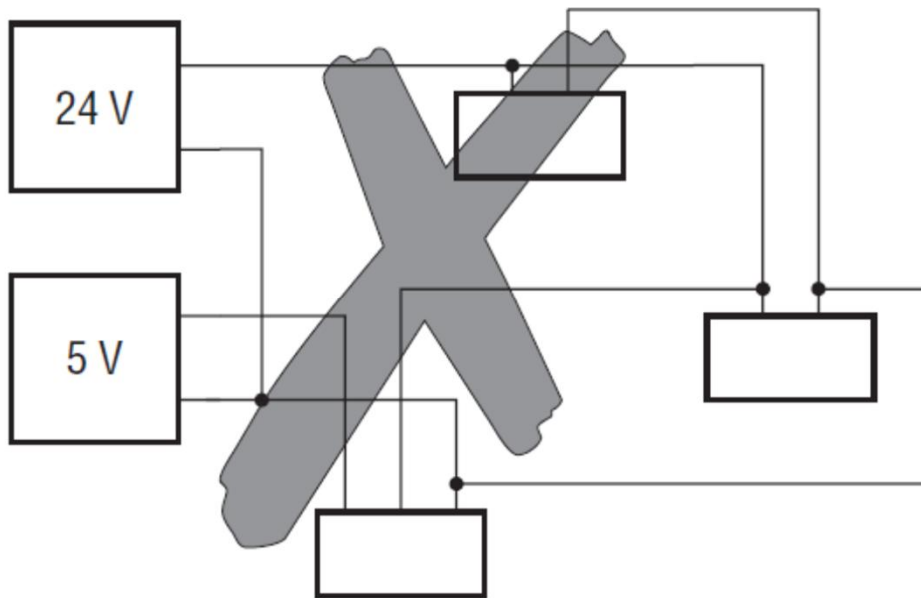
Между двумя компонентами установки должна находиться сплошная поверхность общего вывода заземленного корпуса. Все провода следует прокладывать вдоль поверхности общего вывода заземленного корпуса.






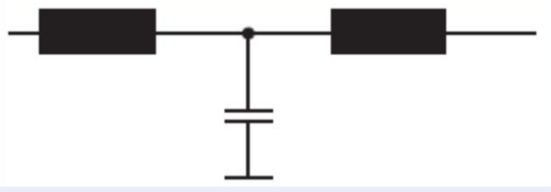
$A / A1 / A2 / A3$ = Площади заземляющих контуров

Меры по обеспечению электромагнитной совместимости

Выходящие и входящие провода прокладываются вместе по всей длине. Каждый провод питающего напряжения прокладывается вместе с заземляющим проводом.

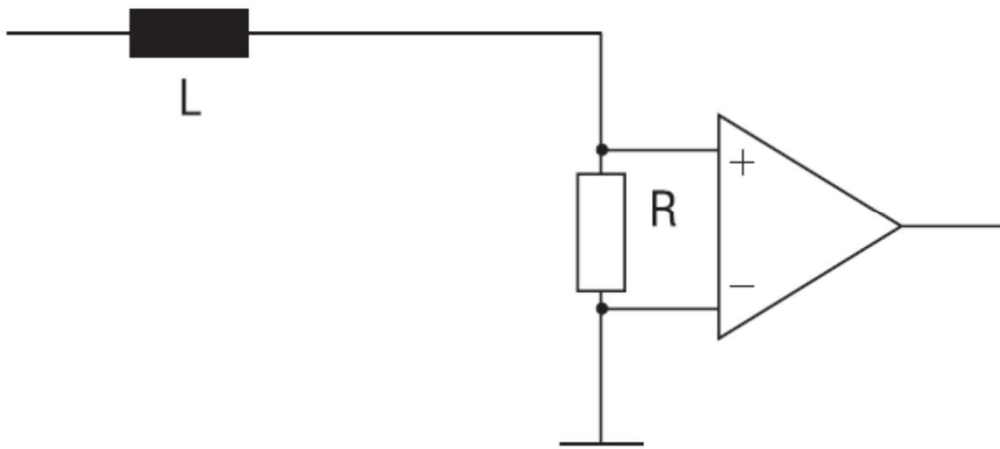


Применение фильтров

Полное сопротивление на входе	Установка фильтра	Полное сопротивление на выходе
Высокое		Высокое
Низкое		Высокое
Высокое		Низкое
Низкое		Низкое

Применение фильтров

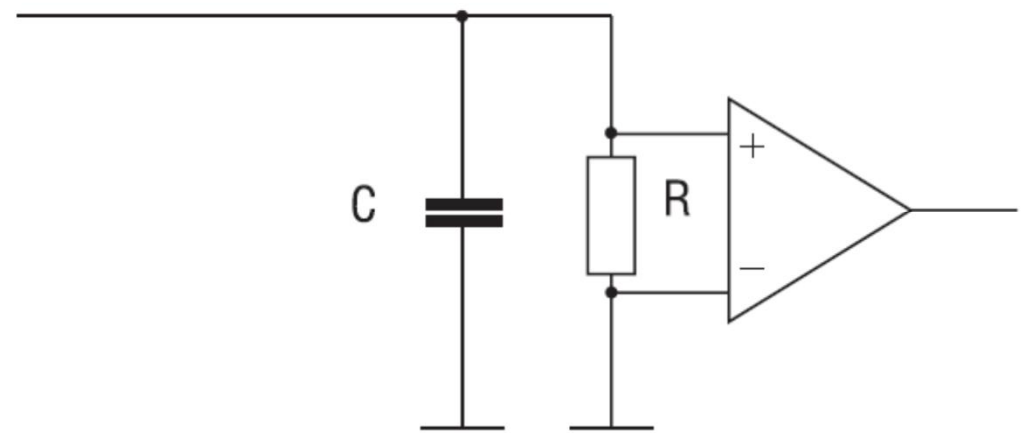
Индуктивное подавление помех



НЧ: $R \ll Z_L$
ВЧ: $R \gg Z_L$

$$Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Емкостное подавление помех



НЧ: $R \ll Z_C$
ВЧ: $R \gg Z_C$

$$Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Применение фильтров

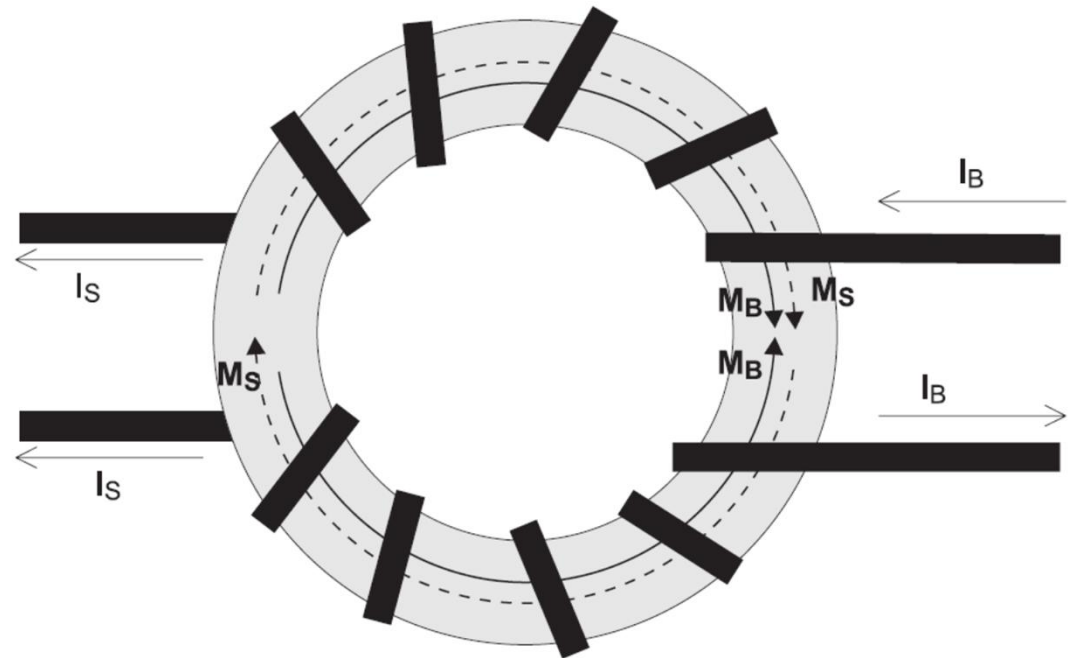
Для подавления высокочастотных синфазных помех лучше всего подходит ферритовый кольцевой сердечник, установленный на входящем и выходящем проводах. На рабочий ток I_B не действует практически никакая индуктивность, так как магнитные потоки взаимно компенсируются в сердечнике. Для токов синфазных помех I_S создается очень высокая индуктивность, которая сильно подавляет эти токи. Ферритовый кольцевой сердечник действует как фильтр низких частот.

I_S - ток помехи

I_B - рабочий ток

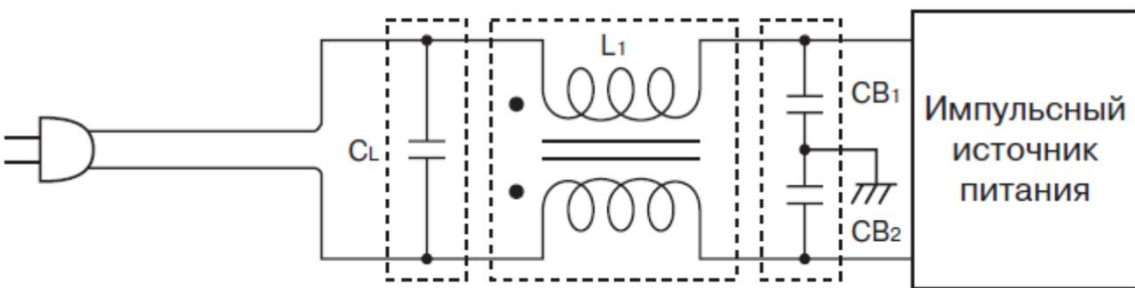
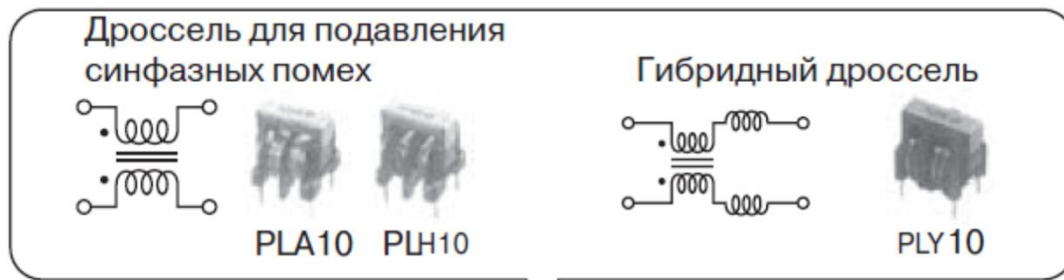
M_S - магнитный поток тока помехи

M_B - магнитный поток рабочего тока



Применение фильтров

Для подавления помех, проникающих через кабель питания в первичную цепь из импульсного источника питания, применяется приведенная на рисунке схема. Конденсаторы служат для замыкания тока помех, а дроссели, увеличивая импеданс линии, предотвращают прохождение помех в кабель питания.

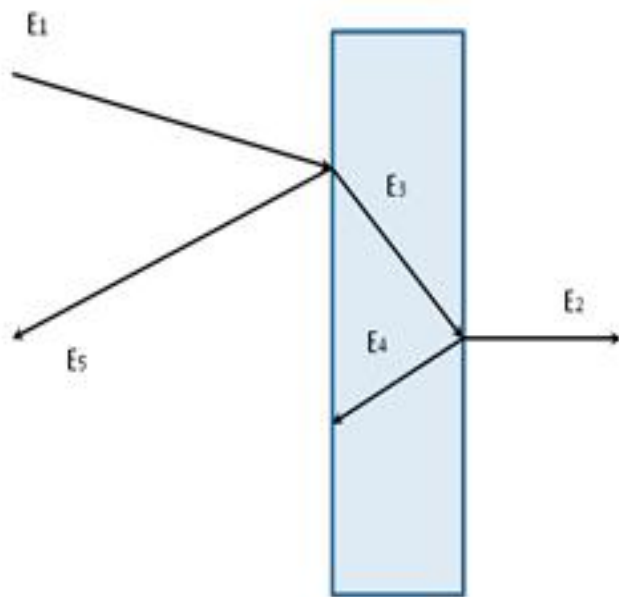


Обозначение	Наименование	Выполняемая функция
L_1	Дроссель для подавления синфазных помех	Подавление синфазных помех
C_L	X-конденсатор	Подавление дифференциальных помех
CB_1 CB_2	Y-конденсатор	Подавление синфазных и дифференциальных помех

Экранирование радиоэлектронной аппаратуры, как метод обеспечения электромагнитной совместимости

Основным методом обеспечения электромагнитной совместимости в части устойчивости к воздействию электромагнитным полем, а так же соответствию требованиям к уровню излучаемых помех, является электромагнитное экранирование. Установка экранов на помехоизлучающие элементы обеспечивает разделение сигналов, необходимое для функционирования радиоэлектронной аппаратуры, повышает избирательность приемников, помехозащищенность чувствительной аппаратуры, чистоту сигнала генераторов, точность работы приборов. Правильный выбор метода экранирования, материала экрана и его конструкции очень важны именно на начальном этапе проектирования, поскольку он будет определять возможность успешного прохождения испытаний на ЭМС и качественного функционирования разрабатываемой аппаратуры.

Рассмотрим взаимодействие электромагнитной волны с экраном и определение коэффициента экранирования. В общем случае коэффициент экранирования $K_э$ – это отношение интенсивности электромагнитного поля измеренного до установки непрерывного бесконечного экрана и после его установки. На рисунке приведены формулы для его расчета при измерении напряженности поля в различных величинах.



E_1 -падающая волна
 E_2 -прошедшая волна
 E_3 -поглощенная волна
 E_4 -переотраженная волна
 E_5 -отраженная волна

$$E_2 = E_1 - E_3 - E_4 - E_5$$

$$K_э[dB] = 10 \log(P_1/P_2)$$

$$K_э[dB] = 20 \log(E_1/E_2)$$

$$K_э[dB] = 20 \log(H_1/H_2)$$

$$K_э[dB] = P_1[dB] - P_2[dB]$$

От каждой границы раздела сред происходит отражение электромагнитной волны, а в толще материала происходит поглощение. На высоких частотах коэффициент экранирования определяется в основном **коэффициентом отражения E_5** , который для электромагнитного поля близок к ста процентам и растет с повышением частоты и проводимости материала. Коэффициент отражения связан с генерацией в тонком приповерхностном слое токов той же частоты, что и воздействующее поле и, следовательно, генерацией поля противоположной направленности. **Поглощение E_3** – связано со скин эффектом - протеканием токов высокой частоты в тонком приповерхностном слое проводника. Толщина скин слоя убывает с ростом частоты и проводимости и увеличивается с ростом магнитной проницаемости. Например, для 50Гц – 1см.; 5кГц – 0,1см; 0,5 МГц – 10мкм; 2,4 ГГц- 1,67мкм. Таким образом, для эффективного экранирования высокочастотных полей достаточно иметь тонкий экран из материала с высокой проводимостью и низкой магнитной проницаемостью.

Напротив, для экранирования постоянных **магнитных** полей и низкочастотных электромагнитных полей, где преобладает магнитная составляющая необходимы материалы с высокой магнитной проницаемостью. Чем выше магнитная проницаемость материала, тем выше коэффициент экранирования.

Итоговый коэффициент экранирования представляет собой сумму потерь на отражение и поглощение. На рисунке приведены расчетные значения потерь на отражение и поглощение для стали (проводимость $7,69 \times 10^6$ См/м, относительная магнитная проницаемость 50) и меди (проводимость 58×10^6 , проницаемость 0,9999).



Для меди с ростом частоты потери на отражение уменьшаются, а потери на поглощение увеличивается из-за её высокой проводимости. Для стали потери на отражение так же уменьшаются, потери на поглощение растут сначала даже быстрее чем у меди, так как на низких частотах все ещё велика магнитная составляющая, однако с дальнейшим повышением частоты эта же проницаемость, а так же низкая проводимость стали приводят к уменьшению потерь на поглощение и на сверхвысоких частотах сталь малоэффективна. Следовательно, для экранирования на высоких частотах предпочтительно использовать материалы с высокой проводимостью. На низких частотах материалы, с высокой проницаемостью.

Примеры металлов и сплавов сведены в таблицу, представленную на рисунке 3. Для экранирования магнитного поля предпочтительным материалом является пермаллой с начальной проницаемостью 10×10^3 - 100×10^3 , далее по убывающей, альсифер – 35000, железо чистое – 10000, трансформаторная сталь 250 – 1000, сталь конструкционная – 50 и другие магнитомягкие материалы.

Экранирование постоянного магнитного поля	Экранирование высокочастотного электромагнитного поля
Пермаллой	Серебро
Альсифер	Медь
Технически чистое железо	Алюминий
Трансформаторная сталь	Латунь
Электротехническая сталь	Электротехническая сталь
Магнитомягкие материалы	Материалы с высокой проводимостью

Для экранирования высокочастотных электромагнитных полей необходимо применять материалы с высокой проводимостью: серебро 62×10^6 См/м; медь 58×10^6 См/м, алюминий 37×10^6 См/м, латунь $12,5 \times 10^6$ См/м, сталь $7,6 \times 10^6$ См/м. При этом металлы и сплавы с высокой проводимостью, кроме стали не годятся для экранирования постоянных магнитных полей, т.к. имеют магнитную проницаемость равную 1 (как у воздуха). Для экранирования в широком диапазоне частот лучше всего подходят многослойные материалы, например сталь, с нанесенным слоем из хорошо проводящего металла. Такие листы применяют для изготовления безэховых камер. Для дальнейшего повышения коэффициента экранирования возможно использование комбинированных многослойных материалов.

Конструкция экранов

Получить качественный экран с высоким коэффициентом экранирования очень просто – необходимо изготовить замкнутый электрически герметичный контур (например, куб) и вы с легкостью получите $K_э$ порядка 100дБ и более. К сожалению, в реальности это невозможно, т.к. необходимы отверстия для ввода кабелей, для вентиляции и для обслуживания аппаратуры.



Коэффициент экранирования круглого отверстия:

$$K_э = 20 \log(\lambda / 2d)$$

λ -длина волны

d -наибольший диаметр отверстия

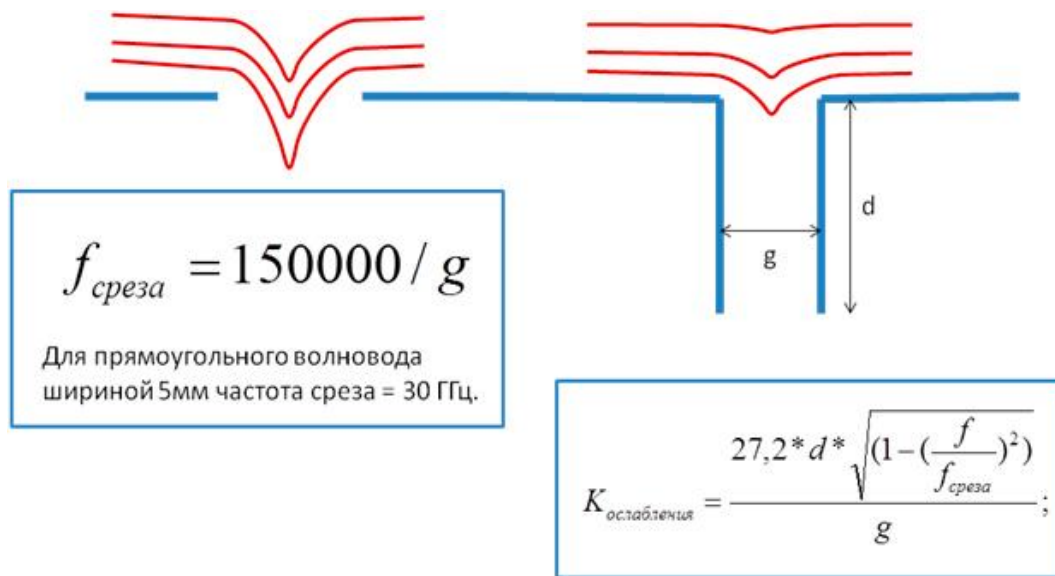
Два отверстия имеют коэффициент экранирования на 6 дБ хуже чем одно.

$$K_n = 20 \log n$$

Каждое отверстие или щель в экране сравнимые с $1/20$ длины волны следует учитывать при планировании экрана рисунок 4. Например, для 1ГГц отверстие диаметром 1,5 мм ухудшит коэффициент экранирования до 40дВ, 1,5 см до 20дВ. При увеличении количества отверстий коэффициент экранирования ухудшится на $K_n = 20 \log n$. Необходимо избегать больших отверстий и щелей в экране. Много маленьких отверстий лучше, чем одно большое.

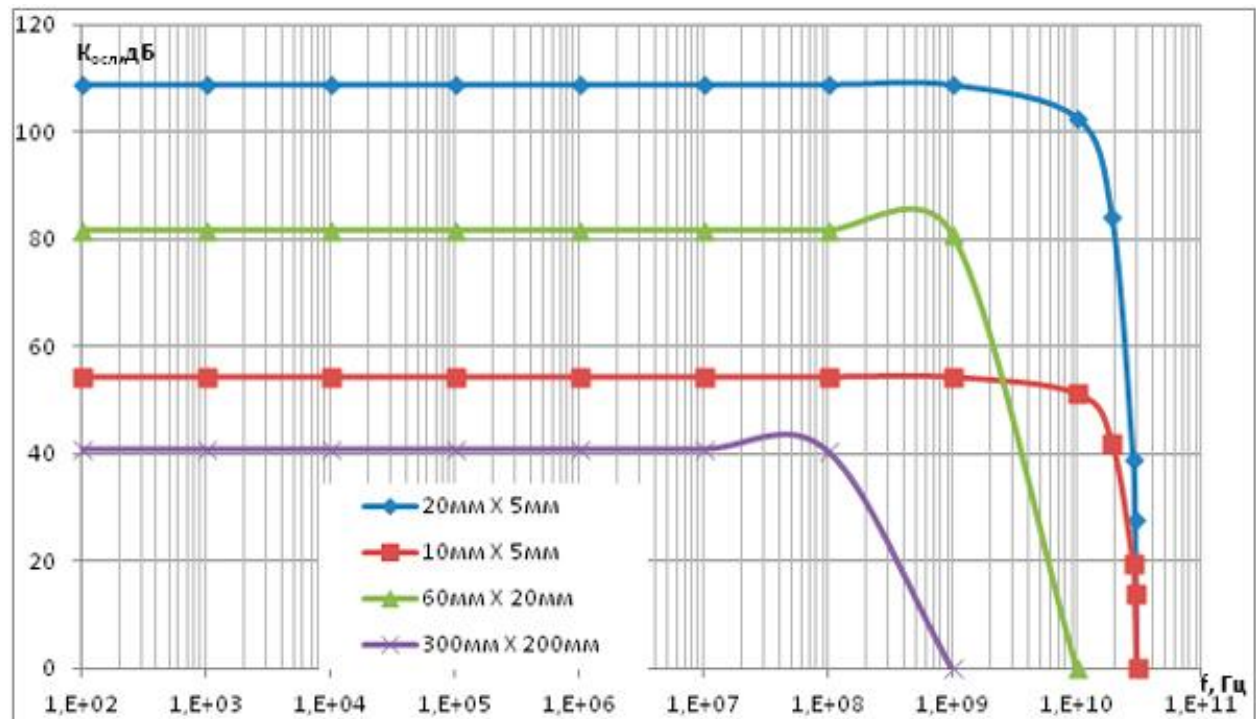
В случае, если все же необходимо использовать отверстие строго определенного диаметра (например, для вентиляции или ввода диэлектрических кабелей). Можно использовать запердельный волновод рисунок 5. Это полая трубка из проводящего материала, длина которой значительно превышает диаметр. Свойства этой конструкции частотно зависимы. Электромагнитные волны ниже определенной частоты будут распространяться с очень большим затуханием.

Частота выше которой электромагнитная волна распространяется по волноводу практически без потерь называется частотой среза волновода, и определяется из его наибольшего внутреннего размера по формуле $f = 150000/g$, где g -наибольший поперечный размер отверстия. Для прямоугольного волновода шириной 5 мм частота среза равна 30 ГГц. Коэффициент ослабления уже будет зависеть и от длины волновода и частоты и рассчитывается по формуле, представленной на рисунке.



Для примера на рисунке построены графики коэффициентов ослабления волноводов различной конфигурации. Видно, что при уменьшении длины трубки с 20 до 10мм K_{α} уменьшается со 108 дБ до 54 дБ, при этом частота среза остается постоянной. При изменении диаметра отверстия – изменяется частота среза волновода. Для волновода диаметром 20мм – это 10 ГГц, для волновода диаметром 200мм это уже 1 ГГц. У запердельного волновода есть еще одно ограничение - если внутрь волновода ввести проводящий кабель, то волновод потеряет свои изолирующие свойства.

Запердельный волновод подходит только для ввода диэлектрических кабелей типа оптических, которые не сильно искажают диэлектрическую проницаемость среды.



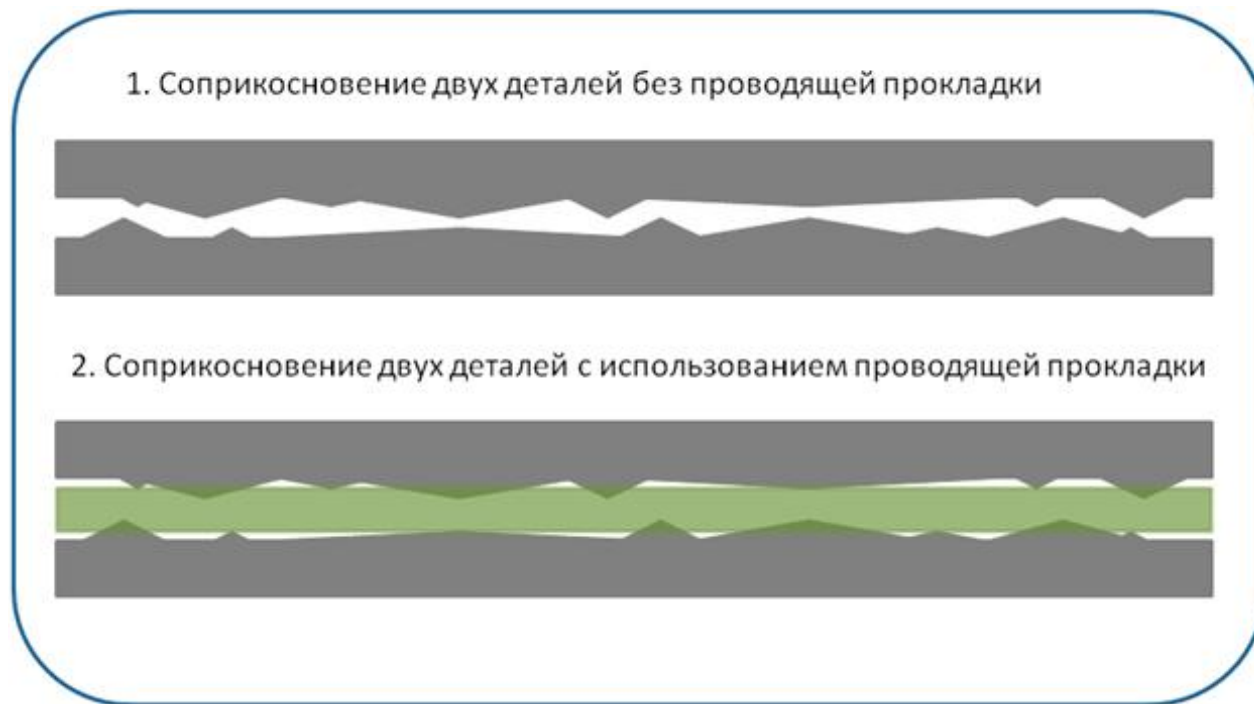
Вентиляционная
решетка типа
Honeycomb (пчелиная
сота)



Запредельный
волновод для ввода
оптического кабеля



Ещё одна проблема – образование щелей и зазоров, неизбежно появляющихся в процессе соединения элементов конструкции друг с другом. На рисунке 8 схематично изображены в большом увеличении две соприкасающиеся детали. Кроме непосредственного искривления самих элементов конструкции металлические детали имеют неровности, которые соприкасаясь друг с другом, образуют зазоры и щели. Для надежного электрического контакта в этом случае необходимо применить довольно большое усилие прижима либо, применить проводящую прокладку, которая обеспечит непрерывный контакт на всем протяжении щели.



В настоящее время промышленность выпускает огромное количество проводящих прокладок, самых различных свойств и размеров.

1. Проводящие прокладки с клеевым слоем



2. Жесткие проводящие прокладки



3. Формованные проводящие прокладки

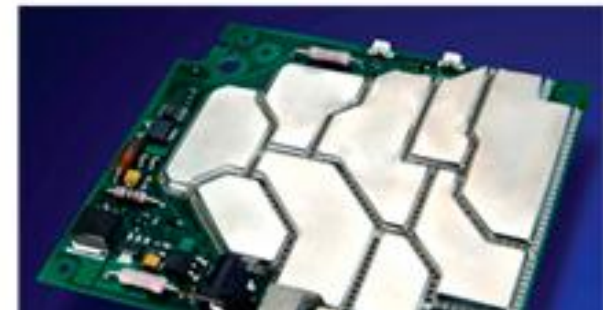


4. Пружинные контактные ленты



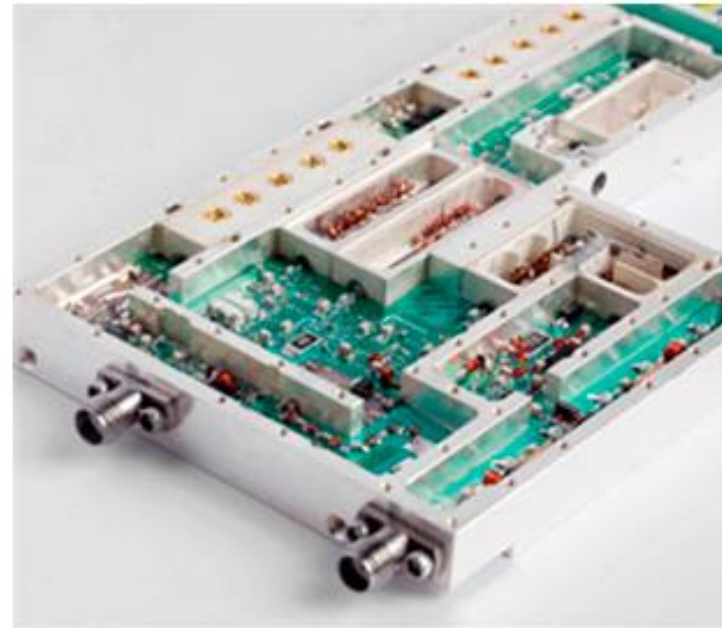
Планирование помеховой обстановки на различных этапах разработки

Первый уровень разработки - **дизайн печатной платы**, сюда относятся правильное проектирование полигонов земли, линий передачи, фильтров. Для экранирования отдельных элементов или целых областей печатной платы применяются металлические экраны. Они состоят из двух частей одна часть - основание, фиксируется на печатной плате, вторая часть - крышка надевается сверху и фиксируется зажимами, защелками, или пайкой.



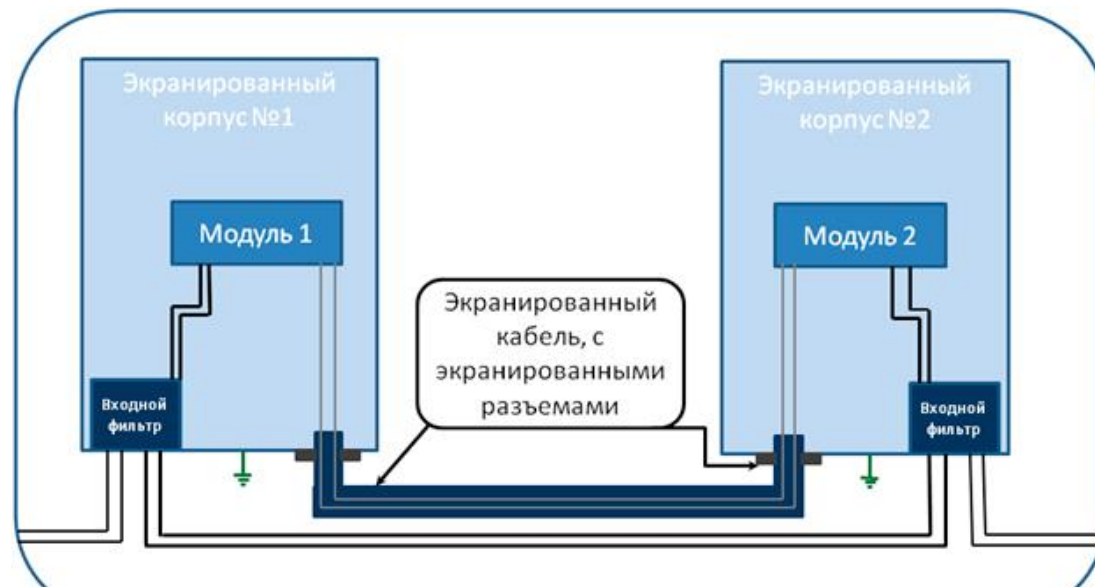
Дизайн блока

Представленные блоки, направленные на создание коэффициента экранирования около 100дБ. Шаг винтов выбирается исходя из максимальной частоты, которую необходимо экранировать, так же необходимо использовать проводящую прокладку. Корпус выполнен из цельного куска металла, это оправдано, когда необходимы сложные формы с разделением каналов, зон с разными частотами и мощностями.



Соединение двух экранированных систем

Кабели и соединители должны быть экранированы и иметь электрический контакт по всей окружности разъема. Необходимо избегать соединения экрана кабеля с корпусом оборудования одним тонким проводником, так как он вносит паразитную индуктивность, а следовательно имеет высокое полное сопротивление на высоких частотах. Ввод внешних кабелей должен осуществляться через проходные фильтры, заключенные в отдельный экранированный корпус.



Промежуточные выводы

Для создания эффективного экрана необходимо:

- а) Подобрать материал, его структуру и толщину в зависимости от составляющей электромагнитного поля, которую необходимо экранировать.
- б) По возможности исключить любые отверстия и щели и любые другие прерывания электрического контакта по размерам сравнимые с $1/20$ длиной волны.
- в) Для вентиляции и ввода кабелей использовать «запредельные волноводы»
- г) Для ввода сигналов и питания использовать оптические линии связи и проходные фильтры
- д) Для обеспечения контакта по периметру сборных конструкций использовать проводящие прокладки или пружинные контакты
- е) Контролировать коэффициент экранирования корпусов, проводя натурные измерения когда это возможно.

Испытания технических средств на ЭМС

Обеспечение электромагнитной совместимости технических средств относится к одной из наиболее актуальных проблем электронной техники, связанной с непрерывным развитием всех отраслей промышленности в современном мире. На сегодняшний день наиболее достоверным способом подтвердить способность технических средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам возможно только проведя натурные испытания.



Виды испытаний:

- испытания на устойчивость к изменениям в системе электропитания;
- изменения уровня электромагнитных помех (помехоэмиссии);
- испытания на восприимчивость к кондуктивным помехам;
- испытания на устойчивость к электростатическим разрядам;
- испытания на устойчивость к воздействию магнитных полей;
- испытания на устойчивость к воздействию электромагнитных полей.

ГОСТ РВ 20.57.308	ГОСТ Р 51317.3.2	ГОСТ Р 51317.4.4	ГОСТ Р 51317.4.14	ГОСТ Р 50648
ГОСТ РВ 20.57.309	ГОСТ Р 51317.3.3	ГОСТ Р 51317.4.5	ГОСТ Р 51317.4.16	ГОСТ Р 50649
ГОСТ РВ 20.57.310	ГОСТ Р 51317.3.4	ГОСТ Р 51317.4.6	ГОСТ Р 51317.4.17	ГОСТ 28751
ГОСТ Р МЭК 335-1	ГОСТ Р 51317.3.5	ГОСТ Р 51317.4.11	ГОСТ Р 51317.4.28	ГОСТ 29157
ГОСТ Р 12.1.019	ГОСТ Р 51317.4.2	ГОСТ Р 51317.4.12	ГОСТ Р 51317.4.34	ГОСТ Р 51317.3.4
ГОСТ Р 25803	ГОСТ Р 51317.4.3	ГОСТ Р 51317.4.13	ГОСТ Р 51317.3.2	ГОСТ Р 51317.3.12
ГОСТ Р 51317.3.3	ГОСТ 13109-97	ГОСТ Р 54149	ГОСТ 30804.3.3	
ГОСТ РВ 20.39.304	ГОСТ РВ 6601-001	ГОСТ РВ 20.57.305	ГОСТ РВ 6601-002	ГОСТ РВ 20.57.306
ГОСТ РД В 319.03.20	ГОСТ 19705	НЛГС-3 п.8.1.2, п.8.1.4.1		
ГОСТ 26807	ОСТ 1 00406	ГОСТ 54073	ОСТ 1 01169	

Нормативная база:

- НП-071-06 ФНП: ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ
- ОПБ-88/97 КАТЕГОРИИ БЕЗОПАСНОСТИ
- МЭК 61000-6.2 ОБЩИЙ СТАНДАРТ ПО ЭМС
- МЭК 62003:2009 СТАНДАРТ ЭМС НА ПРОДУКЦИЮ АЭС

- МЭК 61000-4 БАЗОВЫЕ СТАНДАРТЫ ПО ЭМС
- ГОСТ Р 51317.4 БАЗОВЫЕ СТАНДАРТЫ РФ ПО ЭМС
- ГОСТ Р 50746 СТАНДАРТ ЭМС РФ НА ПРОДУКЦИЮ АЭС
- INES ШКАЛА ЯДЕРНЫХ СОБЫТИЙ
- ГОСТ Р IEC 61000-1-2 СТАНДАРТ ФБ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЭМС
- ГОСТ Р IEC 61508-5 ОЦЕНКА РИСКА

Виды испытаний на электромагнитную совместимость

Испытания на устойчивость к изменениям в системе электропитания

В сетях питания постоянного и переменного тока вследствие переключения нагрузок, аварий возникают провалы напряжения, вариации частоты и прочие нестабильности. Работоспособность ТС в условиях нестабильности электропитания возможно подтвердить только проведя соответствующие испытания на электромагнитную совместимость.

Измерение уровня электромагнитных помех (помехоэмиссии)

Технические средства в процессе функционирования создают вокруг себя переменные электромагнитные и (или) постоянные магнитные и электрические поля (помехи) в широком диапазоне частот. Помехи распространяются от ТС как по проводам, так и посредством излучения. Уровень этих полей (помех) не должен превышать установленных нормативными документами (ГОСТ, ОСТ, КТ) величин, поскольку при превышении нормативов возможна неустойчивая работа расположенных рядом ТС. На сегодняшний день самым достоверным методом определения помехоэмиссии технических средств является непосредственное измерение с помощью набора измерительных антенн, эквивалента сети и измерительного приемника. Для исключения влияния внешних помех и неоднородностей окружающего пространства на результаты измерений все работы должны проходить в полубезэховой экранированной камере или на открытой аттестованной измерительной площадке.

Испытания на восприимчивость к кондуктивным помехам

Различные виды кондуктивных помех техногенного и природного характера, такие как молниевые разряды, переключения реле, и другие факторы могут отрицательно сказаться на функционировании аппаратуры, в случае если она не защищена соответствующим образом. Подтвердить работоспособность аппаратуры при воздействии кондуктивных помех возможно только проведя полноценные испытания на ЭМС.

Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам

Электростатические разряды характеризуются малыми токами и большими напряжениями, и несмотря на свою сравнительно малую энергетику способны довольно значительно влиять на функционирование ТС и даже вывести их из строя. Поэтому испытание на устойчивость к электростатическим разрядам является одним из обязательных. Различают испытания прямым разрядом (контактным и воздушным) и непрямым разрядом (электромагнитным полем, возникающим при разряде в пластину связи).

Испытания радиоэлектронной аппаратуры

Введение (1)

- Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) в процессе разработки и производства подвергается различным испытаниям, которые экспериментально проверяют ее соответствие заданным ТУ в результате воздействия внешних факторов.
- Основные воздействующие факторы:
 - Климатические
 - Механические
 - Биологические
 - Специальные среды
 - Электрические
 - Радиационные и электромагнитные излучения
 -

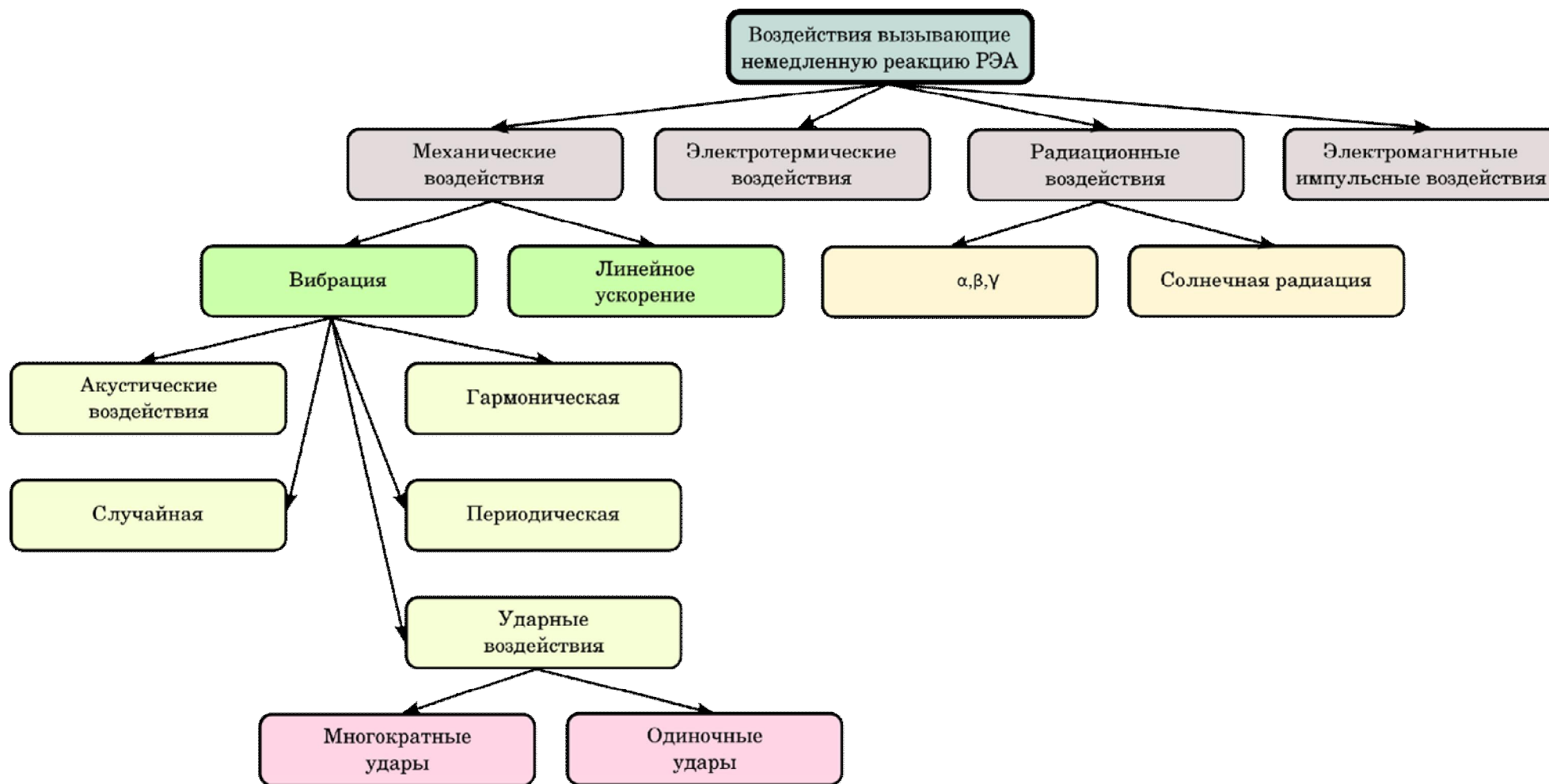
Введение (2)

- РЭА при эксплуатации и хранении подвергается воздействию окружающей среды. Эксплуатация аппаратуры зачастую проходит в сложных условиях, характеризующихся широким изменением температуры, влажности, давления, вибрации, скорости, уровня радиации, непрерывным ростом различного рода нагрузок и т.п. Работоспособность РЭА непосредственно зависит от ее возможности противостоять подобным внешним воздействиям, а также не оказывать нежелательного влияния на окружающую среду. Поэтому в решении проблемы обеспечения качества РЭА значительная роль принадлежит испытаниям с целью оценки ее работоспособности и долговечности

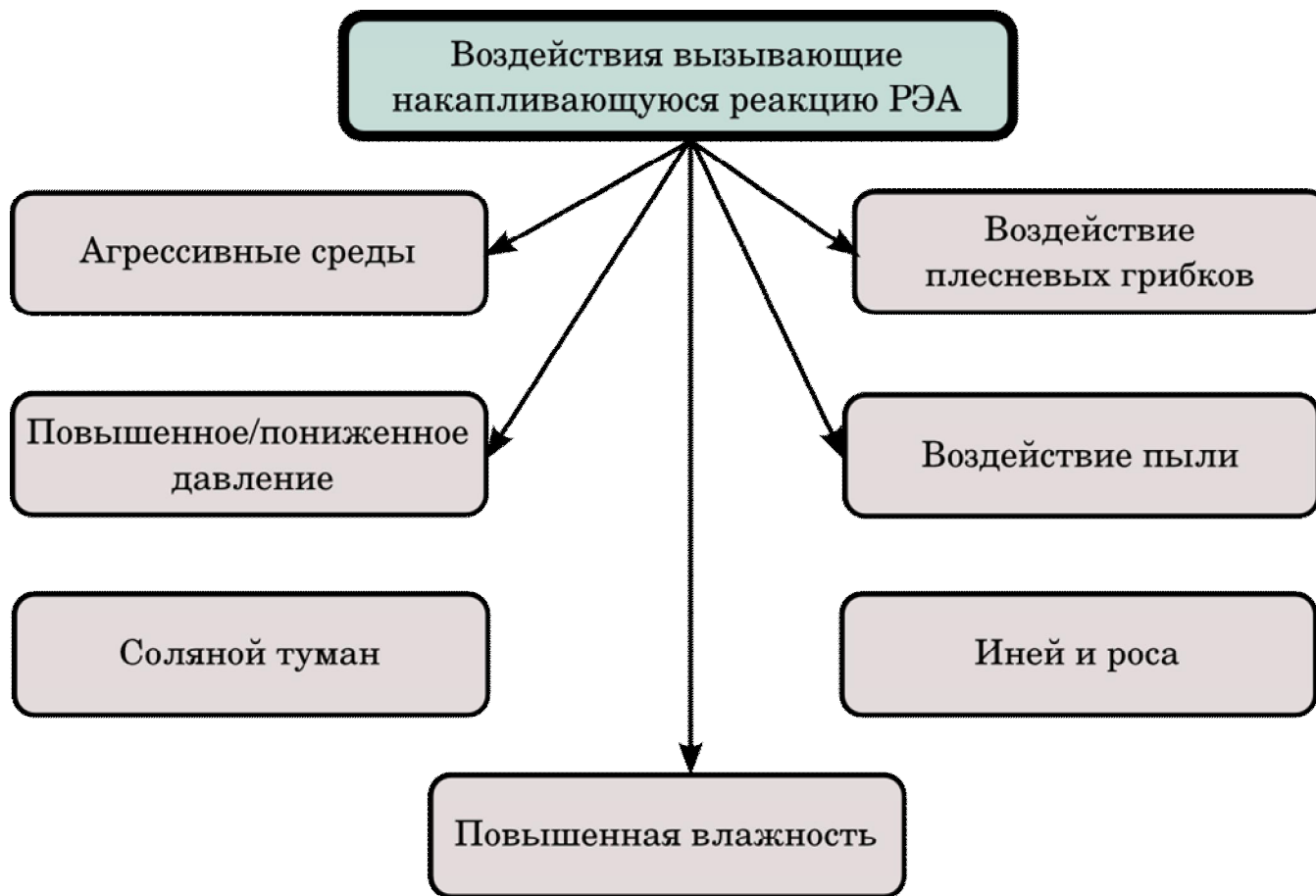
Факторы внешних воздействий

- **Воздействия, вызывающие немедленную ответную реакцию изделия:**
 - Механические воздействия,
 - Воздействия различных видов излучений,
 - Тепловые и электрические нагрузки и.т.п.
- **Воздействия, вызывающие накапливающуюся реакцию изделия:**
 - Климатические факторы
 - Влажность
 - Соляной туман
 - Агрессивные среды
 - Плесневые грибки и др.

Воздействия, вызывающие немедленную реакцию РЭА



Воздействия, вызывающие накапливающуюся реакцию РЭА



Механические воздействия

- Современные РЭА различного назначения при эксплуатации и транспортировке обычно находятся в условиях динамических воздействий
-



Реакция корпуса прибора за счет вибрации или акустических воздействий

- Знакопеременные механические напряжения в элементах корпуса
- Деформация сопряженных с корпусом элементов внутренней арматуры и полупроводникового кристалла
- Изменения диэлектрических свойств и удельного сопротивления материала, накопления статического заряда на изоляционных элементах корпуса
- Дegradация конструкции корпуса (в результате усталостных явлений в материале)
-

Реакция внутренней аппаратуры

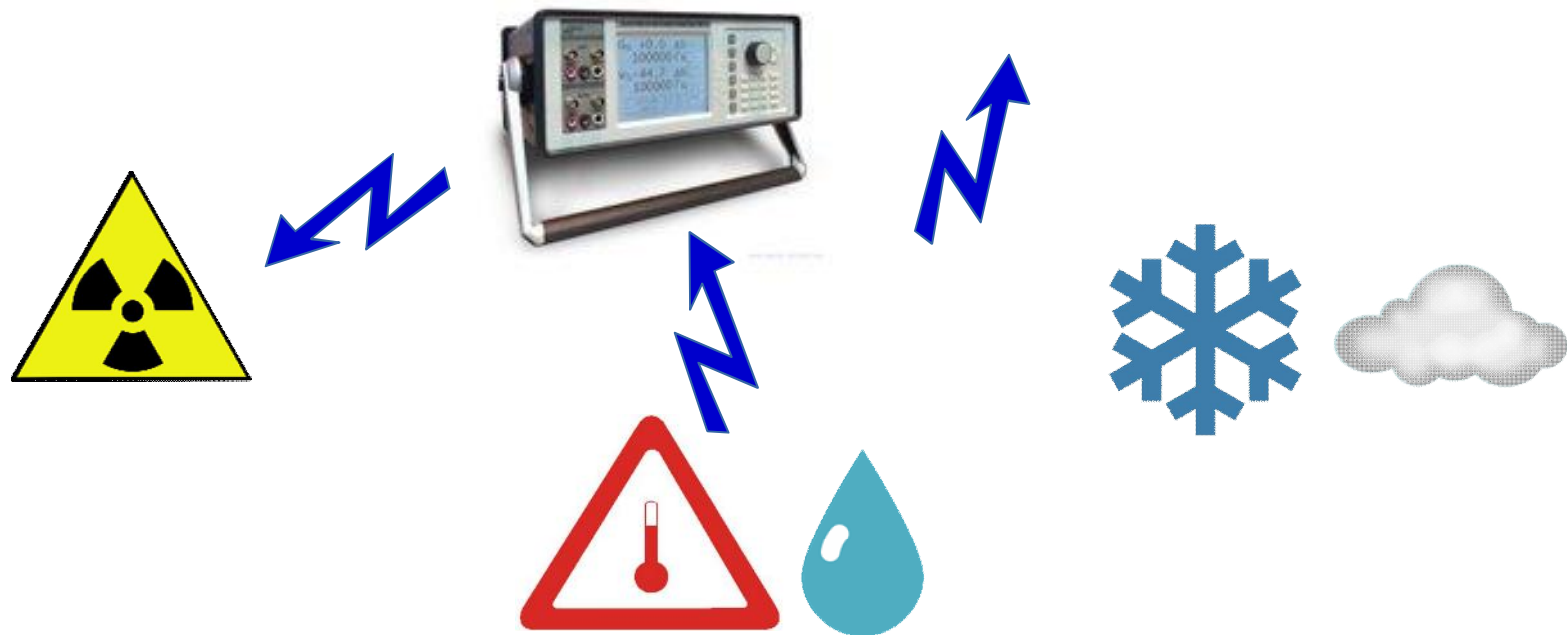
- Знакопеременные механические напряжения в элементах
- Механические колебания элементов
- Деформация полупроводникового кристалла в местах его соединения с элементами внутренней арматуры
- Дegrадация конструкции элементов внутренней арматуры (за счет усталости, разрушения, отслаивания).

• Реакция активного элемента

- Знакопеременные механические напряжения на элементах структуры р-n-перехода и полупроводникового кристалла
- Деформация проводящих элементов на поверхности полупроводникового кристалла, отслаивания и обрыва полупроводников
- Деформация переходного слоя между активным элементом и основанием, отрыв кристалла от кристаллодержателя;
- Деградация активного элемента прибора, растрескивание и разрушение кристалла.

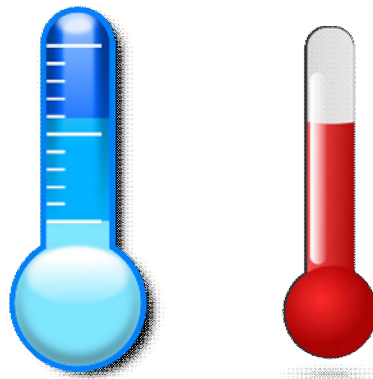
- Основные климатические факторы окружающей среды

-
- Солнечная радиация
- Температура и относительная влажность воздушной среды, ее плотность
- Движение и наличие в ней твердых и газообразных примесей: снег, иней, туман, роса, плесневые грибки



- **Воздействие пониженных и повышенных температур**

- непрерывное, связанное с функционированием РЭА в стационарных условиях;
- периодическое, возникающее при повторно-кратковременном включении РЭА, в результате резких изменений условий эксплуатации, а также при суточном изменении температуры;
- аperiodическое, вызывается единичным, но достаточно интенсивным воздействием тепла или холода.



- **Воздействие влаги**

- Действие влаги на РЭА связано с адсорбцией воды на поверхности элементов конструкции электронной схемы, конденсирующейся из окружающей среды. В естественных условиях содержание паров воды зависит от температуры
- Осаждаясь на поверхности, влага образует пленку электролита, возникающие при этом химические реакции ускоряются воздействием тепла, света и электрических полей



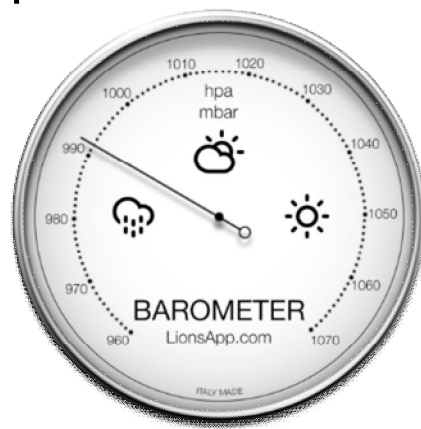
- **Воздействие биологической среды и пылевых взвесей в атмосфере**

- В условиях влажного тропического климата (и не только) значительную опасность для РЭА представляют плесневелые грибки, обладающие исключительной способностью к размножению. В процессе жизнедеятельности грибки выделяют лимонную, уксусную, щавельную кислоты и другие химически активные соединения, под воздействием которых изменяются физические характеристики герметизирующих пластических материалов, повышается их хрупкость, резко возрастает влагопрониц



- **Воздействие пониженного и повышенного давления**

- При воздействии на РЭА пониженного давления создается возможность возникновения отказов, обусловленных ухудшением теплового режима работы аппаратуры за счет снижения конвекции. В условиях пониженного давления ухудшается электрическая прочность воздуха, что может быть причиной возникновения коронного разряда между выводами, находящимися под высоким напряжением.
- Повышенное давление оказывает в первую очередь механическое воздействие на конструктивные элементы ЭС.



- **Электромагнитная совместимость**

- Способность РЭА одновременно (совместно) функционировать в реальных условиях применения с требуемым качеством, не создавая друг другу недопустимых помех. Обеспечивается применением различных технических и организационных мероприятий, таких как рациональный выбор диапазонов радиочастот, использование узких диаграмм направленности антенн, целесообразное распределение рабочих частот для действующей РЭА, правильный выбор и оборудование позиций РЭА и др.

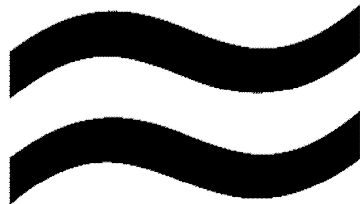
• Радиационные воздействия

- Радиационные воздействия на РЭА способны вызывать как немедленную, так и накапливающуюся реакцию элементов конструкции. Среди существующих видов излучений наибольшую опасность для приборов представляют мощные электромагнитные излучения и частицы высоких энергий.
- Внешние факторы, действуя на все элементы одновременно, могут вызывать изменения параметров резисторов, конденсаторов, соединителей, объемных и печатных проводников, что в свою очередь может привести к нештатному режиму работы активных элементов, та же перегрузке и



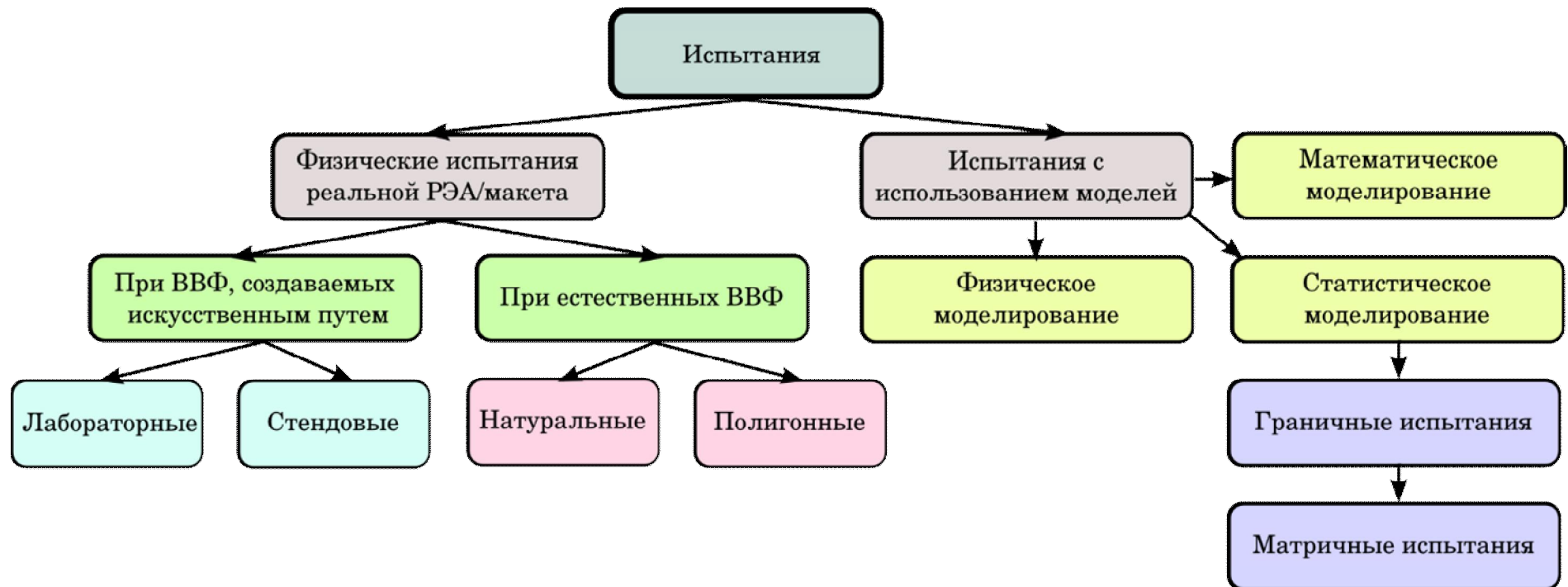
- **Адекватность условий испытаний реальным**
- Исследования, анализ и опыт эксплуатации РАЭ показывают, что существует значительное расхождение между показателями надежности, наблюдаемыми в условиях эксплуатации, и показателями, получаемыми расчетным путем или при испытаниях в лабораторных и производственных условиях.

- **Лабораторные**
 - **испытания**



- **Эксплуатационные**
результаты

• Классификация испытаний



- **Физические и лабораторные испытания**

- Физические испытания могут проводиться как при внешних воздействующих факторах, создаваемых искусственным путем с помощью испытательных стендов (стендовые испытания) или с помощью специальных методов и средств, применяемых в лабораторных условиях (лабораторные испытания), так и при естественных внешних факторах.
- Лабораторные и стендовые испытания отличаются от реальной эксплуатации тем, что при их проведении не удается пока смоделировать все внешние воздействия одновременно в той случайной совокупности, которая имеет место при реальной эксплуатации. Поэтому при исследовании влияния внешних факторов наряду с лабораторными и стендовыми испытаниями

предлагается также методика РСА в соответствии с

- **Испытания в естественных условиях (1)**

- **Полигонные.** Полигонные испытания объекта проводят на специально оборудованном полигоне. Широко распространены полигонные испытания, проводимые при испытании на воздействие внешних климатических факторов.
- **Натурные.** Натурные испытания объекта реализуются при выполнении трех основных условий:
 - - испытаниям подвергается непосредственно изготовленная РЭА (т.е. объект испытания) без применения моделей;
 - - испытания проводятся в условиях и при воздействиях на РЭА соответствующих условиям и воздействиям при ее эксплуатации;
 - - определяемые характеристики свойств объекта

- Испытания в естественных условиях (2)
-
- **Натурные** **Полигонные**



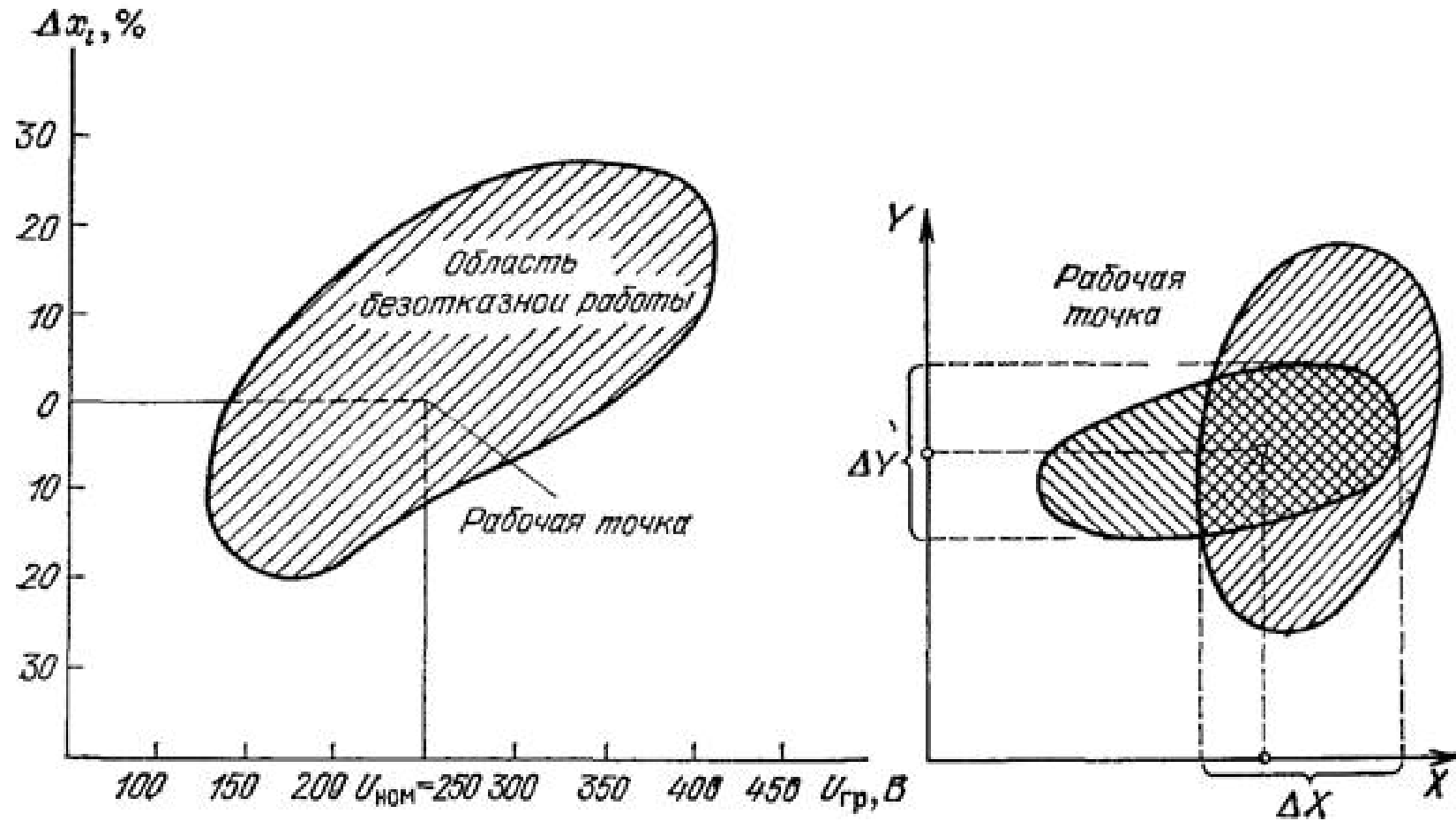
- Исследование комплексного влияния естественно воздействующих факторов на изменение параметров, свойств и механизмов отказов РЭА при ее эксплуатации и хранении. Эти испытания обеспечивают получение наиболее полной и достоверной информации о комплексном влиянии факторов окружающей среды на РЭА.

- **Испытания с использованием моделей**
- **Физическое моделирование** заключается в том, что первичный параметр объекта испытаний (процесс в элементе схемы или внешний фактор) заменяется простой физической моделью, способной имитировать изменение данного параметра.
- **Математическое моделирование** базируется на использовании уравнений, связывающих входные и выходные параметры объекта испытаний. Эти уравнения выводятся на основании изучения конкретного ЭС и его внутренних функциональных связей, после чего и осуществляется математическое описание установленных связей с учетом ВВФ на ЭС.

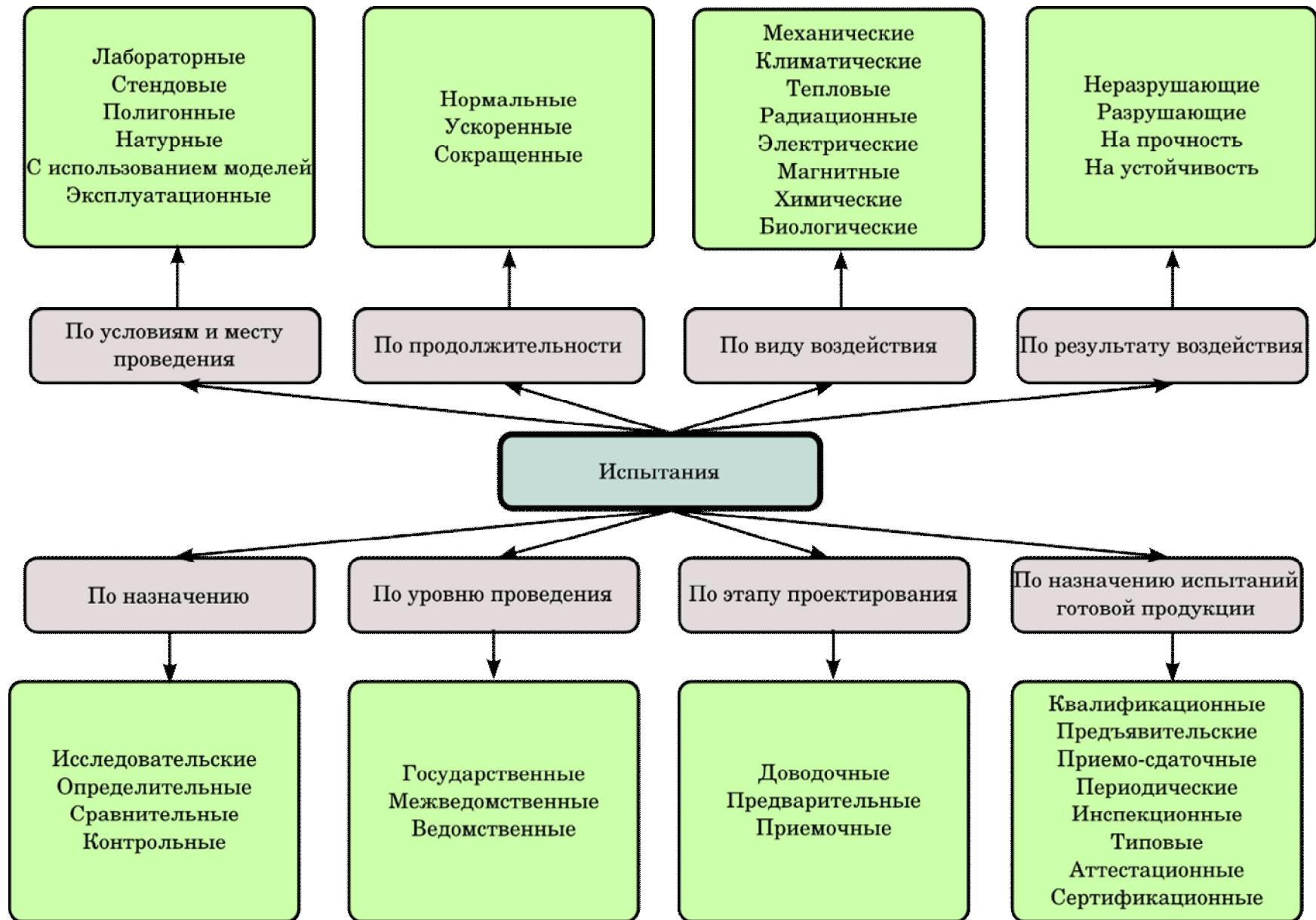
- **Граничные испытания**

- Частный вид статических испытаний. Проводятся для определения зависимости между предельно допустимыми значениями параметров объекта и режимами эксплуатации. Они являются экспериментальным методом, основанным на физическом моделировании области значений первичных параметров, при которых выходные параметры РЭА находятся в пределах допуска, т.е. в области безотказной работы РЭА.

- Граничные испытания (2)



• Виды испытаний



• Исследовательские испытания

- Проводят для изучения определенных характеристик, свойств объекта и их целью является:
- определение или оценка показателей качества функционирования испытуемого объекта в определенных условиях его применения;
- выбор наилучших режимов работы объекта или наилучших характеристик свойств объекта;
- сравнение множества реализации объекта при проектировании и аттестации;
- построение математической модели объекта (оценка параметров математической модели) либо выбор математической модели из заданного множества вариантов;
- отбор существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта

- **Определительные, сравнительные и контрольные испытания**

- **Определительные испытания** проводят для определения значений характеристик объекта с заданными значениями показателей точности и достоверности.
- **Сравнительные испытания** проводят для сравнения характеристик свойств аналогичных или одинаковых объектов. На практике иногда возникает необходимость сравнения качества аналогичных по характеристикам или даже одинаковых РЭА, но выпускаемых, например, различными предприятиями. Для этого испытывают сравниваемые объекты в идентичных условиях.
- **Контрольные испытания** проводятся для контроля качества объекта. Испытания этого вида составляют

- **Уровень проведения испытаний**

- **Испытания**

- **Государственные.** Испытания установленных важнейших видов РЭА, проводимые головной организацией по государственным испытаниям
- **Межведомственные.** Испытания РЭА, проводимые комиссией из представителей нескольких заинтересованных министерств и ведомств, или испытания приемки составных частей РЭА, разрабатываемых совместно несколькими ведомствами.
- **Ведомственные** испытания проводятся комиссией из представителей заинтересованного министерства или ведомства.

• **КОНТРОЛЬНЫЕ**

• Исследовательские Контрольные

• Уровень проведения испытаний

- **Доводочные**
- при проектировании РЭА
- достижение заданных значений показателей качества
- **Предварительные испытания**
- испытания опытных образцов
- определения возможности предъявления на приемочные испытания
- **Приемочные испытания**
- Испытания опытных образцов, партий единичного производства
- вопроса о целесообразности поставки этой продукции (РЭА) на производство и (или) использования



• **Результат воздействия**

- **Разрушающие испытания**
- разрушающие методы контроля
- непригодность его для дальнейшего применения
- **Неразрушающие испытания**
- неразрушающие методы контроля
- **Испытания на прочность**
- до момента достижения разрушения объекта
- ВВФ увеличивается постепенно до возникновения отказа испытуемого изделия
- **Испытания на устойчивость**
- сохранение работоспособности объекта после воздействия
- сохранение работоспособности объекта во время воздействия

• Способы проведения испытаний (1)

• **Последовательный**

- объект последовательно подвергается всем предусмотренным программой видам испытаний
- соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов
- начинается с воздействия на ЭС наименее жестких внешних факторов
- эффект накопления деградационных изменений в физической структуре объекта
-



• Способы проведения испытаний (2)

- **Параллельный**
- Одновременное воздействию различных влияющих факторов
- Большой объем информации за более короткий промежуток времени, чем последовательный способ
- Большого числа испытываемых изделий, чем последовательный способ
-



• Способы проведения испытаний (3)

- **Последовательно-параллельный**
- изделия разбиваются на несколько групп, которые испытываются параллельно
- в каждой из групп испытания проводят последовательно
- продолжительность испытаний во всех группах должна быть примерно одинаковой
- условия проведения объединенных в группу видов испытаний должны быть близки к реальным

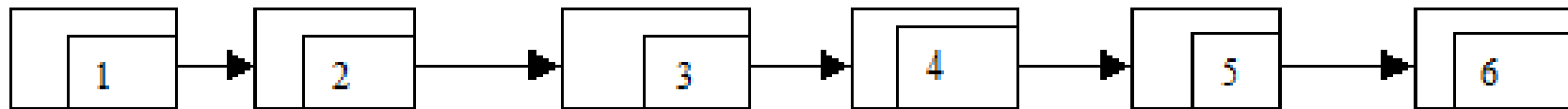
• Механические испытания

- Обнаружение резонансных частот
- Виброустойчивость
- Вибропрочность
- Ударная прочность
- Воздействие одиночных ударов
- Воздействие линейных (центробежных) нагрузок (ускорений).
- Воздействие акустических шумов

Позволяют выявить наличие дефектов, определить динамические характеристики испытываемых изделий

• Методы испытаний на воздействие вибрации (1)

• Структурная схема испытаний методом фиксированных частот

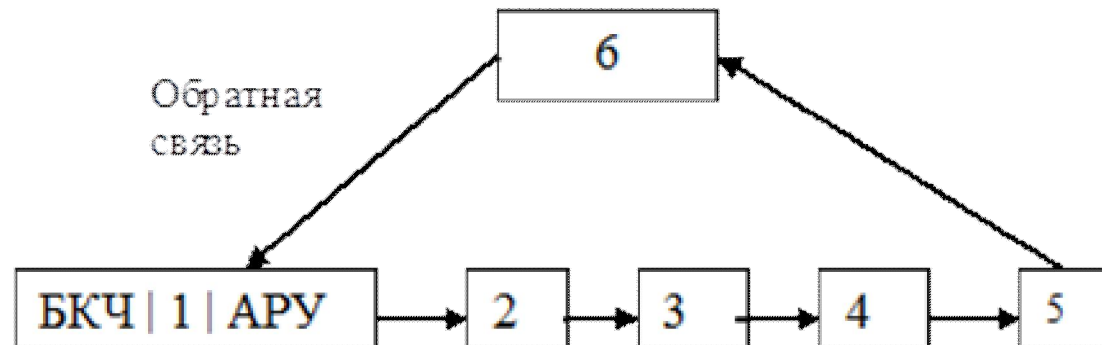


- 1 — задающий генератор; 2 — усилитель мощности; 3 — вибратор; 4 — испытываемое изделие; 5 — виброизмерительный первичный преобразователь (датчик); 6 — виброизмерительная аппаратура;

Испытания методом фиксированных частот на частотах механического резонанса. Испытуемые изделия требуют предварительного определения этих частот. Испытуемое изделие последовательно подвергают воздействию вибрации на частотах резонанса, выдерживая его в каждом режиме в течение некоторого времени.

• Методы испытаний на воздействие вибрации (2)

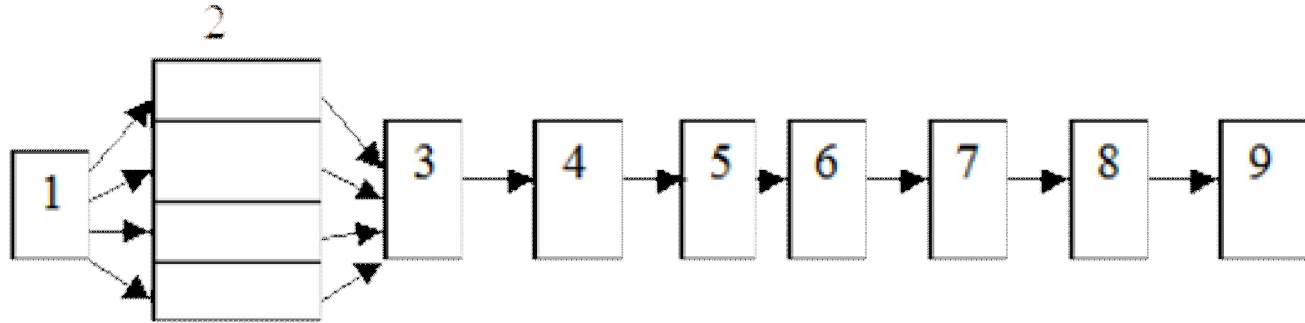
• Структурная схема испытаний методом качающейся частоты



- 1 — задающий генератор, в состав которого входит блок качания и автоматический регулятор уровня; 2 — усилитель мощности; 3 — вибратор; 4 — испытуемое изделие; 5 — виброизмерительный первичный преобразователь (датчик); 6 — виброизмерительная аппаратура;
- Непрерывное изменение частоты вибрации в сторону ее увеличения, а затем уменьшения. Основные параметры, характеризующие метод:
 - время одного цикла качания $T_{\text{ц}}$
 - скорость качания $n_{\text{к}}$
 - продолжительность испытаний $T_{\text{п}}$

• Методы испытаний на воздействие вибрации (3)

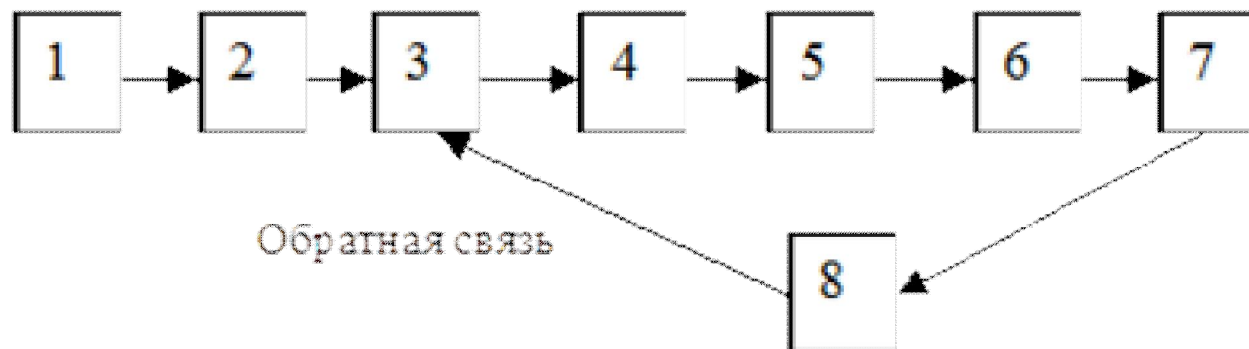
• Структурная схема испытаний широкополосной случайной вибрации



- 1 — генератор шума; 2 — блок фильтров (40-120 фильтров с фиксированными частотами пропускания); 3 — усилитель мощности; 4 — вибратор; 5 — испытуемое изделие; 6 — виброизмерительный преобразователь; 7 — виброизмерительная аппаратура; 8 — анализирующее устройство; 9 — регистрирующая аппаратура;
- Одновременное возбуждение всех резонансов испытуемого изделия, что позволяет выявить их совместное влияние.
- Степень жесткости испытаний определяется сочетанием следующих параметров:
 - Диапазоном частот
 - Спектральной плотностью ускорения
 - Продолжительностью испытания

• Методы испытаний на воздействие вибрации (4)

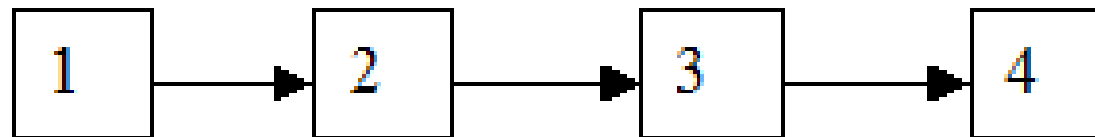
• Структурная схема испытаний узкополосной случайной вибрации



- 1 — генератор шума; 2 — полосовой фильтр; 3 — усилитель с автоматическим регулированием; 4 — усилитель мощности; 5 — вибратор; 6 — испытуемое изделие; 7 — виброизмерительный преобразователь; 8 — виброизмерительная аппаратура;
- Случайная вибрация возбуждается в узкой полосе частот, центральная частота которой по экспоненциальному закону медленно сканирует по диапазону частот в процессе испытания
- исключается взаимодействие механических резонансов
- увеличивается время испытаний

- **Методы проведения испытаний на ударную прочность**

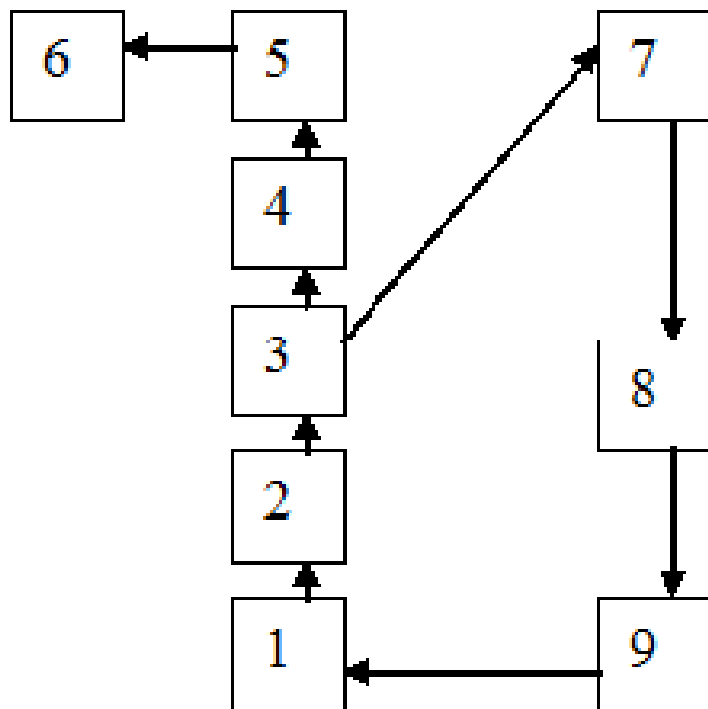
- **Структурная схема измерения ударного воздействия**



- 1 — измерительный преобразователь; 2 — согласующий усилитель; 3 — фильтр; 4 — регистрирующий прибор;
- Проверка способности РЭА противостоять разрушающему действию механических ударов, сохранять свои параметры в пределах, указанных в НТД.

• Испытания на воздействия линейных нагрузок

• Структурная схема установки линейного ускорения

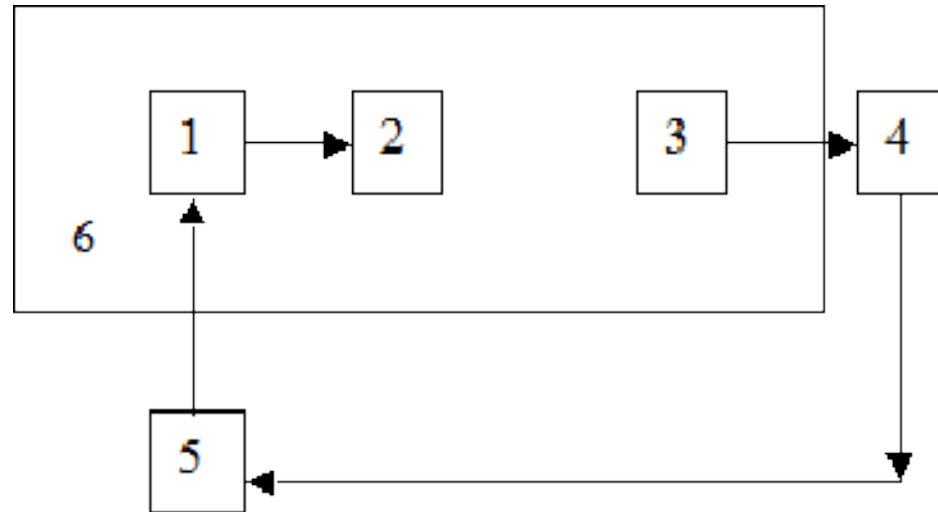


- 1 — привод; 2 — редуктор; 3 — средство измерений числа оборотов; 4 — стол центрифуги; 5 — токосъемочное устройство; 6 — средство измерений параметров испытуемой РЭА; 7 — измерительный прибор; 8 — система автоматического управления; 9 — источник питания;

- Проверка способности РЭА выполнять свои функции при линейных нагрузках
- Испытания проводят без электрической нагрузки.
- Используются центрифуги различных типов.

• Испытания на воздействия акустического шума

- Структурная схема лабораторной установки для испытаний на воздействие акустического шума



- 1 — источник акустического шума; 2 — рупор; 3 — измерительный микрофон; 4 — средство измерений значений параметров испытательных режимов; 5 — система формирования и управления спектром акустического шума; 6 — камера;
- Определение способностей изделий выполнять свои функции, сохраняя свои параметры в пределах норм, указанных в ТУ и стандартах, в условиях воздействия повышенного акустического шума
- Воздействие на изделие случайного акустического шума
- Воздействие тона меняющейся частоты

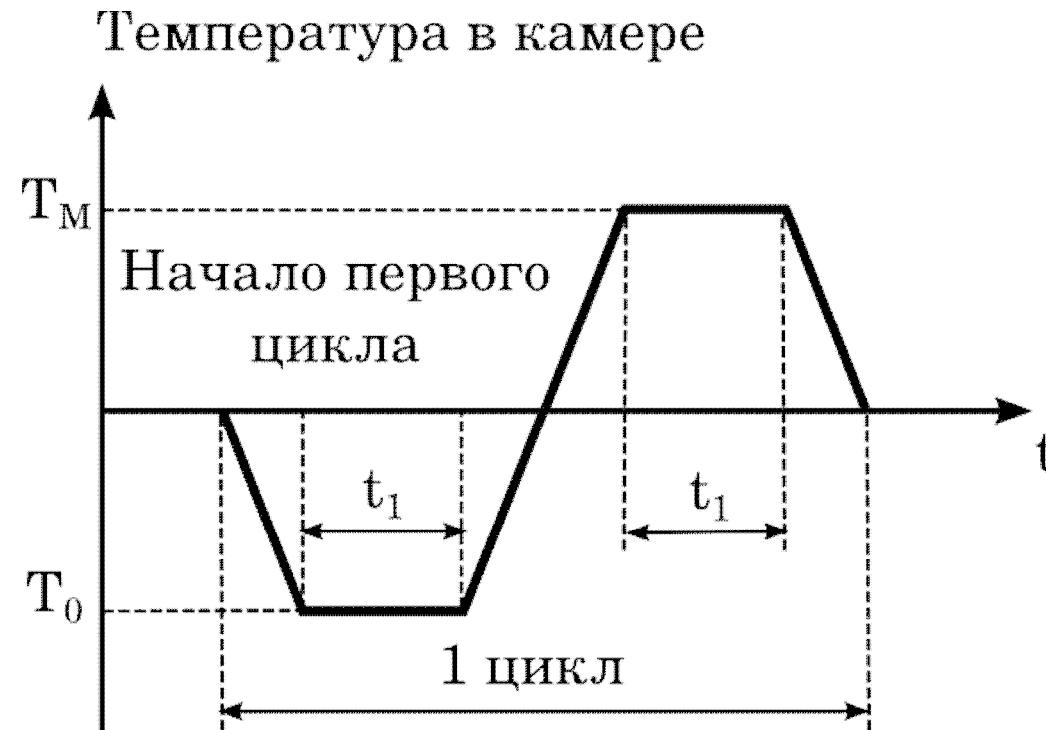
• Испытания на воздействие повышенной температуры

- Степени жесткости испытаний на повышенные температуры

Степень жесткости	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура, 0С	40	50	70	85	100	125	155	200	250	315

- Определение способности РЭА сохранять свои параметры и внешний вид в пределах норм T_u в процессе и после воздействия верхнего значения температуры
- Непрерывное тепловое воздействие
- Периодическое тепловое воздействие
- Аперриодическое тепловое воздействие

- Испытания на циклическое воздействие смены температур



- Постепенное изменение температуры или циклическое изменение температуры
- Тепловой удар
- Резкое изменение температуры

• Испытания на воздействие пыли

- Проверка устойчивости изделия к разрушающему (абразивному) воздействию пыли.
- **Динамические**
- Проверка устойчивости изделия к разрушающему (абразивному) воздействию пыли
- **Статические**
- Проверка способности РЭА работать в среде с повышенной концентрацией пыли
- **На пылепроницаемость**
- Выявление способности конструкции изделия препятствовать проникновению пыли внутрь его оболочки

- **Испытания на воздействие соляного тумана**
- Определения коррозионной стойкости РЭА в атмосфере, содержащей водные растворы солей.
- **Выдержка РЭА в соляном тумане с периодическим распылением соляного раствора**
- Температура (27 ± 2) °С и воздействие соляного тумана
- Продолжительность испытаний 2, 7 или 10 суток
- **Непрерывное распыление соляного раствора с последующей выдержкой РЭА в чистой влажной атмосфере при повышенной температуре**
- Испытание проводится циклами.
- Один цикл - длительность 2 часа, температура $(15...35)$ °С и воздействие соляного тумана.
- Выдерживают еще 22 часа при температуре (40 ± 20) °С и относительной влажности 95 %.
- 1, 3 или 6 циклов

- **Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления**

- Определение пригодности РЭА для эксплуатации в наземных или авиационных условиях на больших высотах.
- **Испытания при нормальной температуре**
- Температурные воздействия не являются критичными для РЭА
- **Испытания при повышенной температуре**
- Температурные воздействия являются критичными для РЭА
- **Испытания при пониженной температуре**
- Температурные воздействия являются критичными для РЭА

- **Испытания на воздействия биологических факторов**

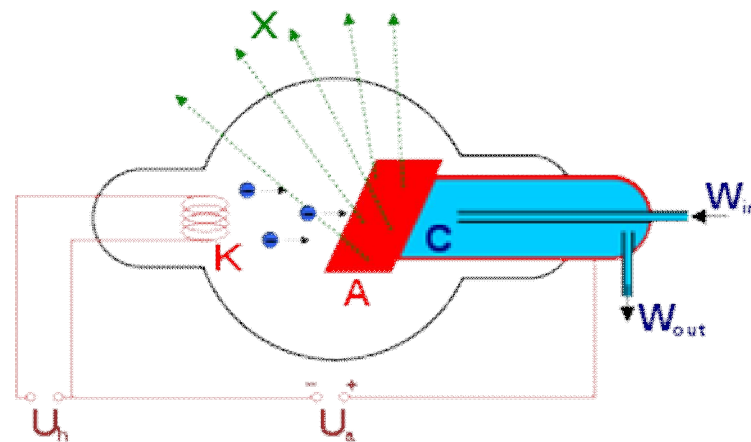
- Определение способности РЭА сохранять в условиях воздействия на нее биологических факторов значения показателей в пределах, установленных в НТД.
- Плесневые грибки
- Насекомые
- Грызуны
- Почвенные микроорганизмы
- Наибольшие разрушения РЭА возникают под действием грибковой плесени

• Испытания на воздействия коррозии

- Нормальные
- Ускоренные
- Ускорение процесса испытания осуществляется за счет изменения значений одного или нескольких параметров, определяющих скорость коррозии:
 - Относительная влажность
 - Степень конденсации влаги
 - Температура
 - Концентрация коррозионно-активных агентов
 - Продолжительность испытаний и чередование условий их проведения и.т.д.

- Испытания на воздействие рентгеновского излучения
 - излучения

- Испытания на импульсное воздействие рентгеновского излучения
- Испытания на воздействие статического (непрерывного) излучения
- Возникновение:
 - Обратимых эффектов
 - Необратимых катастрофических эффектов
 - Необратимых параметрических эффектов



• Испытания на воздействия потоков нейтронов

- Испытания на воздействия потоков нейтронов проводятся для определения обратимых и необратимых изменений параметров изделия, которые могут возникнуть при воздействии нейтронов ядерных энергетических установок, ядерного взрыва или вторичного нейтронного излучения, возникающего при воздействии на корпус космического объекта, высокоэнергетических космических излучений (главным образом при солнечных вспышках).
- Воздействие импульсных потоков нейтронов
- Воздействие непрерывных потоков нейтронов

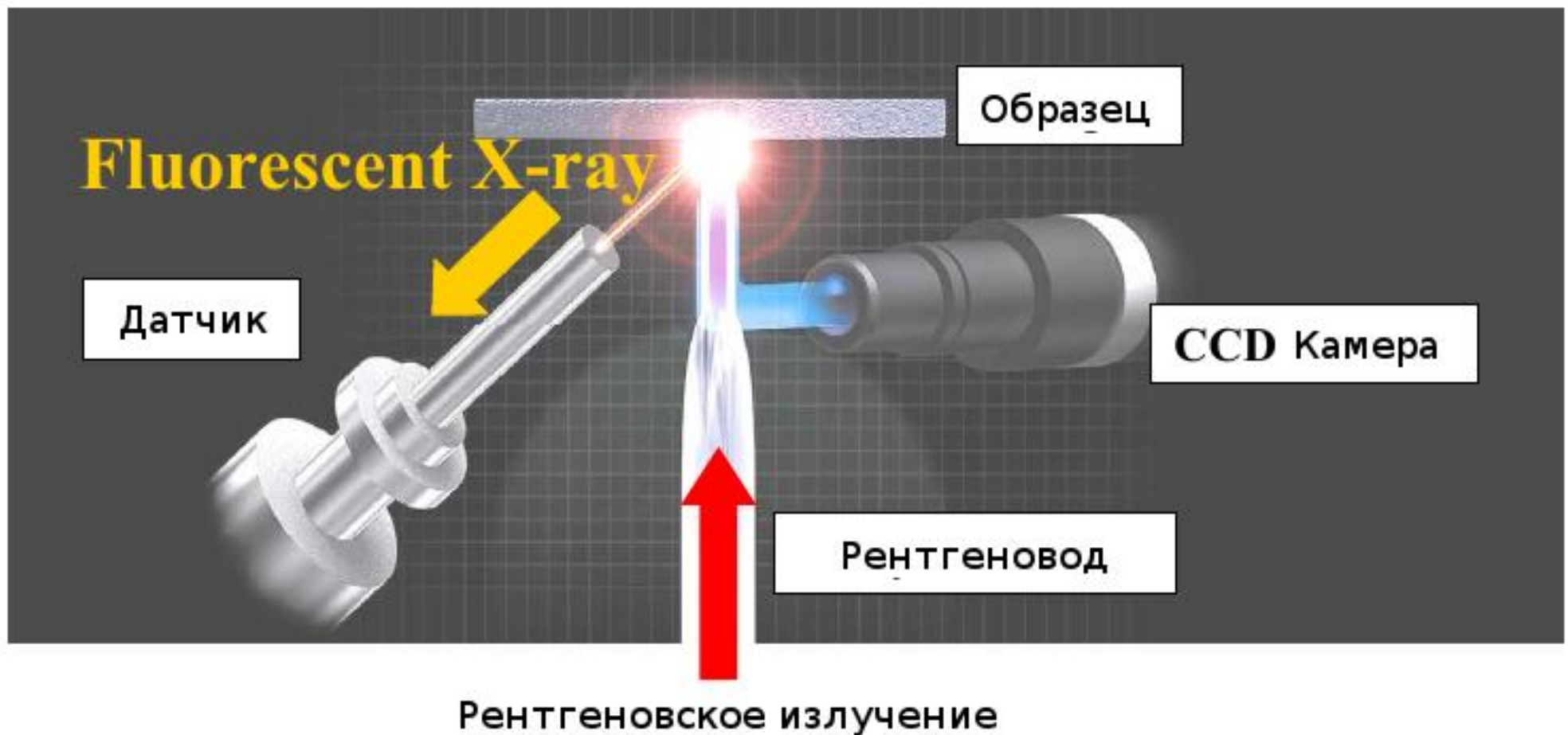
• RoHS



- RoHS (англ. Restriction of Hazardous Substances) — директива, ограничивающая содержание вредных веществ, была принята Европейским союзом в феврале 2003 года
- Ограничивает использование потенциально опасных элементов в электротехническом и электронном оборудовании и в производстве: свинец, ртуть, кадмий, шестивалентный хром (хром VI или Cr6+), полибромированные бифенилы (PBB), полибромированные дифениловые эфиры (PBDE).
- **Испытания:**
 - Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия
 - Фурье спектроскопия в инфракрасной области
 - Высокоэффективная жидкостная хроматография

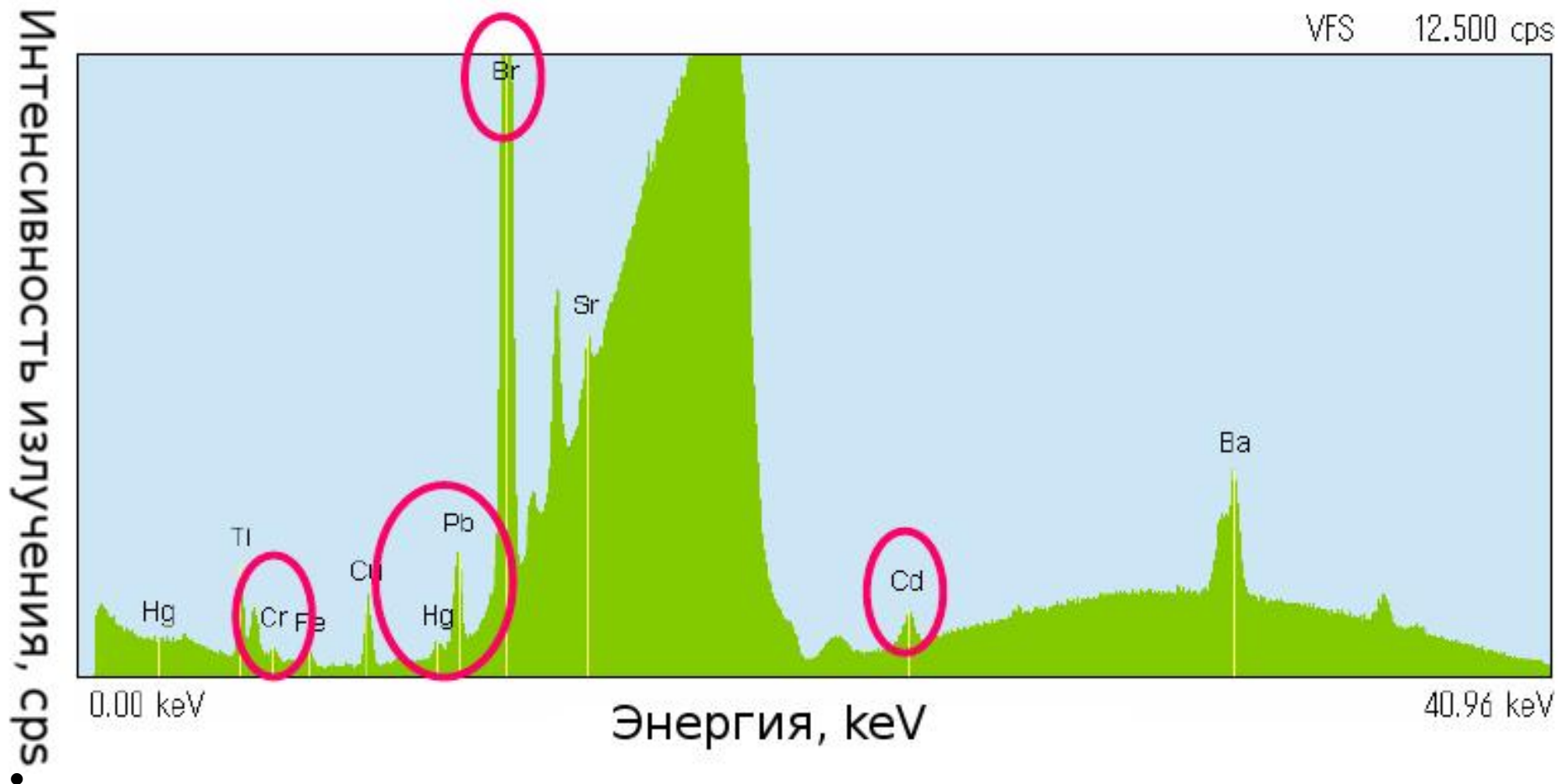
- **Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия**

- С помощью пучка электронов или рентгеновских лучей атомы исследуемого образца возбуждаются, испуская характерное для каждого химического элемента рентгеновское излучение. Исследуя энергетический спектр такого излучения, можно сделать выводы о качественном и количественном составе образца.



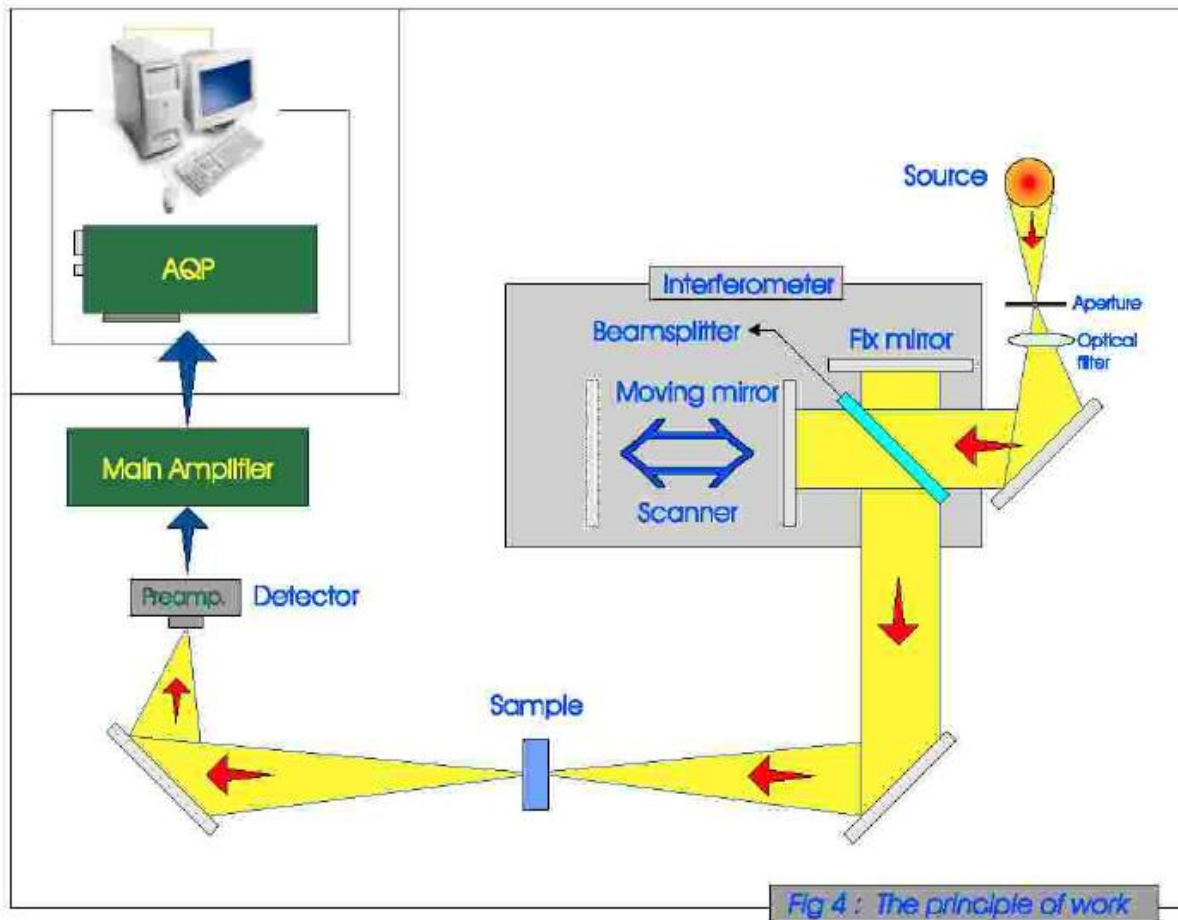
• Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия

- Определения состава веществ, основанный на исследовании их спектров испускания, поглощения, отражения и люминесценции.



- cps (counts per second) - количество импульсов в секунду

• Фурье спектроскопия в инфракрасной области

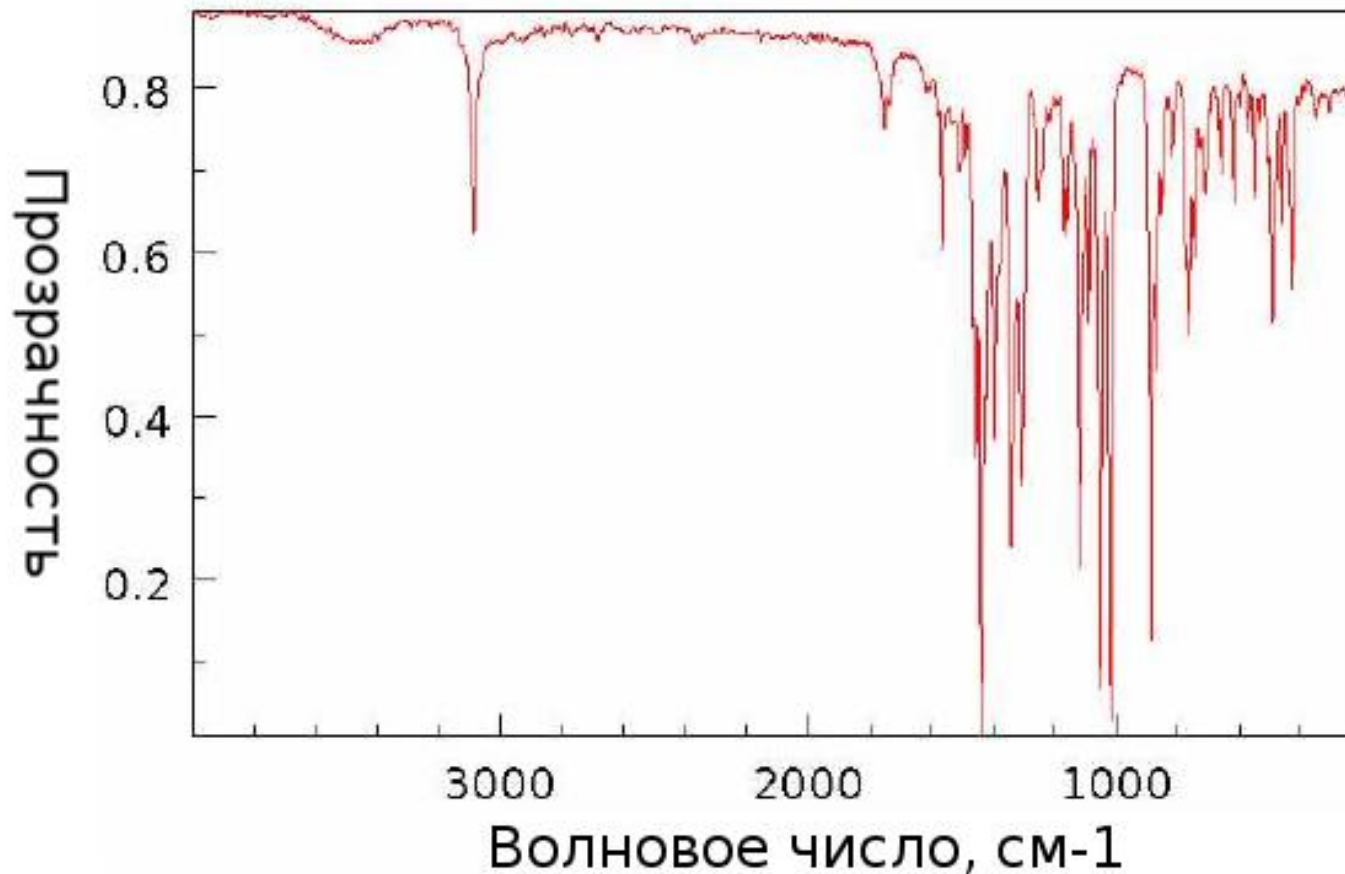


- Свет от источника разделяется на два ортогональных пучка с помощью полупрозрачного светоделительного зеркала пластины. Один из пучков отражается от неподвижного зеркала, второй — от подвижного зеркала.

- Степень ослабления или усиления интенсивности для различных длин волн зависит от разности хода лучей в пучках. Перемещение подвижного зеркала позволяет изменять разность хода лучей пучков. Это же светоделительное зеркало затем соединяет эти два пучка и направляет на фотоприёмник, где пучки интерферируют.

- **Фурье спектроскопия в инфракрасной области**

- **Инфракрасный спектр полибромированных бифенилов (PBВ) и полибромированных дифениловых эфиров (PBDE)**



- **PBВ и PBDE в диапазоне 1500 см⁻¹ - 1000 см⁻¹**

• Высокоэффективная жидкостная хроматография

- Высокоэффективная жидкостная хроматография — один из эффективных методов разделения сложных смесей веществ, широко применяемый как в аналитической химии, так и в химической технологии.
- Принцип жидкостной хроматографии состоит в разделении компонентов смеси, основанном на различии в равновесном распределении их между двумя несмешивающимися фазами, одна из которых неподвижна, а другая подвижна (элюент).

• CE



- Маркировка CE (аббревиатура фр. Conformité Européenne — европейское соответствие) — специальный знак, наносимый на изделие, который удостоверяет, что изделие соответствует основным требованиям директив ЕС и гармонизированным стандартам Европейского союза,
- Маркировка CE указывает на то, что изделие не является вредным (опасным) для здоровья его потребителей, а также безвредно для окружающей среды.

• СЕ

- **Испытания на возникновение вредных факторов возникающих от электронного оборудования:**
- защищенность от физических травм или другого урона, который может быть вызван электрическим контактом напрямую, либо косвенно
- температура, электрический разряд или радиация не возникают при эксплуатации
- защищенность от неэлектрического урона, который может случиться в процессе эксплуатации прибора
- соответствие изоляции predetermined условиям эксплуатации
- электромагнитная совместимость устройства
- **Испытания на возникновение вредных факторов от электронного оборудования возникающих при воздействии внешних факторов**
- соответствие predetermined механическим требованиям
- защищенность лиц, эксплуатирующих прибор, от опасных факторов при возникновении электрических перегрузок

• Заключение

- Результаты испытаний являются основой решений по использованию аппаратуры, усовершенствованию ее конструкции и технологии изготовления.
- Качество радиоэлектронной аппаратуры обеспечивается ее конструкцией, технологией изготовления и условиями производства. Этапы проектирования и производства аппаратуры предполагают получение информации о ее качестве на всех стадиях – от начала проектирования до изготовления в серийном производстве и последующей ее эксплуатации. Существенная роль в этом процессе отводится испытаниям.

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ



ВВЕДЕНИЕ

При создании современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) одной из основных задач является обеспечение (и, по возможности, повышение) её показателей качества, среди которых особую роль играют показатели надёжности, определяющие, в конечном итоге, конкурентоспособность вновь разрабатываемой или модифицируемой аппаратуры.

Требования к надёжности постоянно растут с увеличением степени интеграции, миниатюризации элементов, снижением их веса, увеличением плотности монтажа.



ВВЕДЕНИЕ

Возникновение проблемы надежности обусловлено, главным образом, следующими причинами:

- ростом сложности электронной аппаратуры;
- отставанием качества элементов радиоэлектроники от их количественного определения;
- повышением ответственности функций, выполняемых аппаратурой (цена отказа); исключением человека-оператора (полным или частичным) при выполнении аппаратурой своих функций;
- сложностью условий, в которых эксплуатируется РЭА.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Надежность является одним из свойств качества изделия.

Качество – совокупность свойств изделия, определяющих его пригодность для использования по назначению.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Под *надежностью* понимается свойство системы (изделия), связанное с ее безотказностью, долговечностью и ремонтпригодностью и обеспечивающее выполнение заданных функций.

Безотказность определяет свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации.

Долговечность — это свойство изделия или системы длительно сохранять работоспособность в определенных режимах и условиях эксплуатации.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ

Ремонтопригодность — это свойство изделия или системы, характеризующее ее приспособленность к предупреждению, обнаружению и устранению отказов.

Отказом называется такая неисправность, без устранения которой невозможно дальнейшее выполнение аппаратурой всех или хотя бы одной из ее основных функций.

СОВОКУПНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

Различают *вероятностные* (математические) и *статистические* показатели надежности. Математические показатели надежности выводятся из теоретических функций распределения вероятностей отказов. Статистические показатели надежности определяются опытным путем при испытаниях объектов на базе статистических данных эксплуатации оборудования.

Критерий надежности – это признак, по которому оценивается надежность объекта.

СОВОКУПНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

Количественными характеристиками надежности могут быть:

- вероятность безотказной работы;
- среднее время безотказной работы;
- интенсивность отказов;
- частота отказов;
- различные коэффициенты надежности.

ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Служит одним из основных показателей при расчетах на надежность.

Вероятностью безотказной работы прибора называется вероятность того, что он будет сохранять свои параметры в заданных пределах в течение определенного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации.

На практике этот показатель определяется статистической оценкой:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad \text{Где,}$$

N_0 - число однотипных объектов (приборов), поставленных на испытания (находящихся под контролем, при этом во время испытаний отказавший объект не восстанавливается и не заменяется исправным);

$n(t)$ - число отказавших объектов за время t .

ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

График вероятности безотказной работы объекта изображен на рис. 1

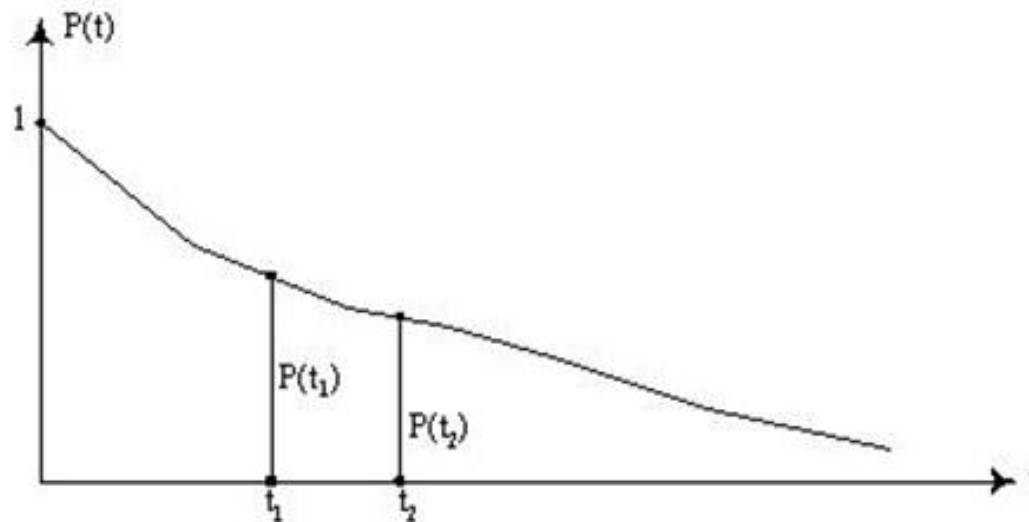


Рис. 1 График функции $P(t)$

Из определения вероятности безотказной работы видно, что эта характеристика является функцией времени, причем она является убывающей функцией и может принимать значения от 1 до 0.

ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Иногда практически целесообразно пользоваться не вероятностью безотказной работы, а вероятностью отказа $Q(t)$. Поскольку работоспособность и отказ являются состояниями несовместимыми и противоположными, то их вероятности связаны зависимостью:

$$Q(t) = 1 - P(t)$$

$$Q(t) = 1 - \frac{N_0 - n(t)}{N_0}$$

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}$$

ЧАСТОТА ОТКАЗОВ

Частотой отказов называется отношение числа отказавших приборов к их общему числу перед началом испытания при условии что отказавшие приборы не ремонтируются и не заменяются новыми.

Частота отказов есть плотность распределения времени работы изделия до его отказа. Таким образом, между частотой отказов, вероятностью безотказной работы и вероятностью отказов при любом законе распределения времени отказов существует однозначная зависимость:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = Q'(t) = f(t)$$

Полученная математическая связь позволяет записать:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt$$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

Интенсивность отказов — отношение числа отказавших объектов (образцов аппаратуры, изделий, деталей, механизмов, устройств, узлов и т. п.) в единицу времени к среднему числу объектов, исправно работающих в данный отрезок времени при условии, что отказавшие объекты не восстанавливаются и не заменяются исправными.

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{срi} * \Delta t_i} \text{ , где}$$

$n(\Delta t_i)$ - число отказов однотипных объектов на интервале для которого определяется интенсивность отказов;

$N_{срi}$ - число работоспособных объектов в середине интервала.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

Ресурсные испытания и наблюдения над большими выборками объектов показывают, что в большинстве случаев интенсивность отказов изменяется во времени немонотонно.



Рис.2 График интенсивности отказов

Из кривой зависимости отказов от времени видно, что весь период работы объекта можно условно поделить на 3 периода.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

I период – период приработки изделий (период «выгорания»).

Характеризуется повышенной интенсивностью отказов, вызванной приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа и наладки. В этот период "выжигаются" дефектные микросхемы, проявляются наиболее грубые погрешности изготовления и сборки изделий.

Физическая природа таких отказов носит случайный характер и отличается от внезапных отказов нормального периода эксплуатации тем, что здесь отказы могут иметь место не при повышенных, а и при незначительных нагрузках («выжигание дефектных элементов»).

Чем круче кривая на этом участке, тем лучше: меньше дефектных элементов останется в изделии за короткий срок.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

II период — период нормальной эксплуатации:

В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов практически остаётся постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно. Большинство отказов в этот период происходит по причине воздействия высокой температуры и влажности, перегрузок по току и напряжению, вибрации, тепловых и механических воздействий. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации прибора.

III период — период старения:

На данном этапе отказы вызваны износом деталей, старением материалов или и другими причинами, связанными с длительной эксплуатацией.

СРЕДНЕЕ ВРЕМЯ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Вероятностное определение: среднее время безотказной работы равно площади под кривой вероятности безотказной работы:

$$T = \int P(t) dt$$

Статистическая оценка для средней наработки до отказа определяется по формуле:

$$T = \frac{1}{N_0} \sum_j^{N_0} t_j \text{ , ч.}$$

где N_0 - число работоспособных однотипных невосстанавливаемых объектов при $t = 0$ (в начале испытания);

t_j - наработка до отказа j -го объекта.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Расчеты надежности - расчеты, предназначенные для определения количественных показателей надежности. Они проводятся на различных этапах разработки, создания и эксплуатации объектов.

На этапе проектирования расчет надежности производится с целью прогнозирования (предсказания) ожидаемой надежности проектируемой системы. Такое прогнозирование необходимо для обоснования предполагаемого проекта, а также для решения организационно-технических вопросов:

- выбора оптимального варианта структуры;
- способа резервирования;
- глубины и методов контроля;
- количества запасных элементов;
- периодичности профилактики.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

На этапе испытаний и эксплуатации расчеты надежности проводятся для оценки количественных показателей надежности. Такие расчеты носят, как правило, характер констатации. Результаты расчетов в этом случае показывают, какой надежностью обладали объекты, прошедшие испытания или используемые в некоторых условиях эксплуатации. На основании этих расчетов разрабатываются меры по повышению надежности, определяются слабые места объекта, даются оценки его надежности и влияния на нее отдельных факторов.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Под структурной схемой надежности понимается наглядное представление (графическое или в виде логических выражений) условий, при которых работает или не работает исследуемый объект (система, устройство, технический комплекс и т.д.)

Параллельно-последовательная структура - форма структурной схемы надежности.

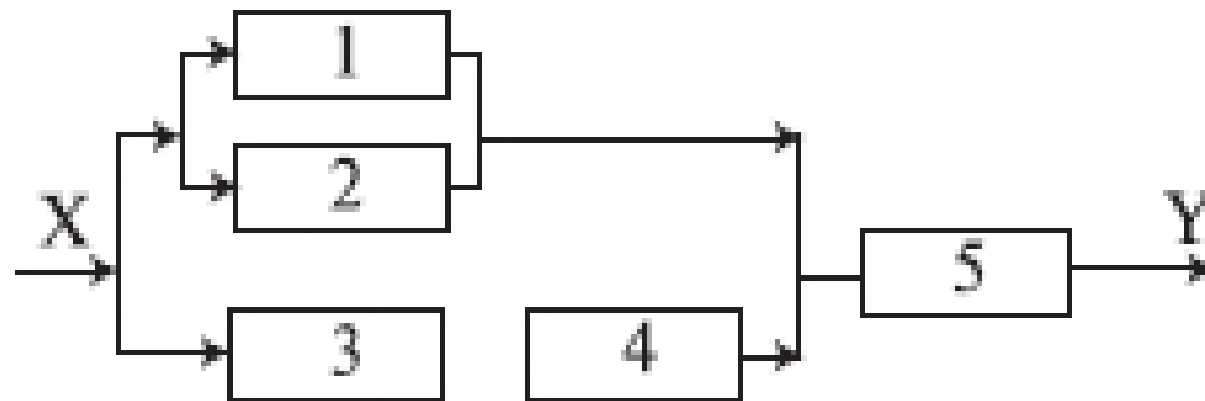


Рис.3 Пример последовательно-параллельной структурной схемы

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Система с последовательным соединением элементов

В такой системе отказ любого элемента равносител отказу системы в целом.



Рис.4 Блок-схема системы с последовательным соединением элементов

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Система с последовательным соединением элементов

Система логических уравнений для приведенной выше последовательной системы:

$$\begin{cases} y_1 = x_1 \\ y_2 = y_1 \cap x_2 \\ y_3 = y_2 \cap x_3 \end{cases}$$

Логическая функция работоспособности (решение системы логических уравнений):

$$Y_s = x_1 \cap x_2 \cap x_3$$

Вероятность безотказной работы:

$$P_s = p_1 p_2 p_3$$

где p_1, p_2, p_3 — вероятности отказов компонентов.

В общем случае вероятность безотказной работы системы равна:

$$P_s = \prod_{i=1}^N p_i$$

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Система с параллельным соединением элементов

В системе с параллельной структурой отказ системы в целом происходит только при отказе всех элементов.

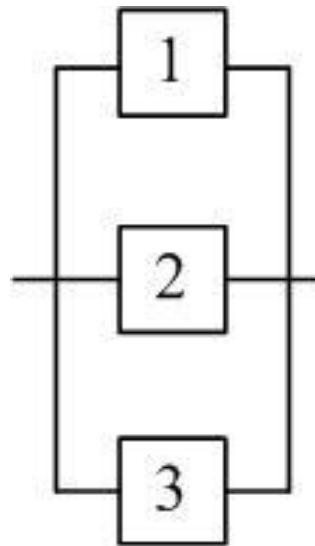


Рис.5 Блок-схема системы с параллельным соединением элементов

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ

Система с параллельным соединением элементов

Система логических уравнений для приведенной параллельной системы:

$$\begin{cases} y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = x_3 \end{cases}$$

Логическая функция работоспособности (решение системы логических уравнений):

$$Y_s = x_1 \cup x_2 \cup x_3$$

Вероятность безотказной работы:

$$P_s = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3)$$

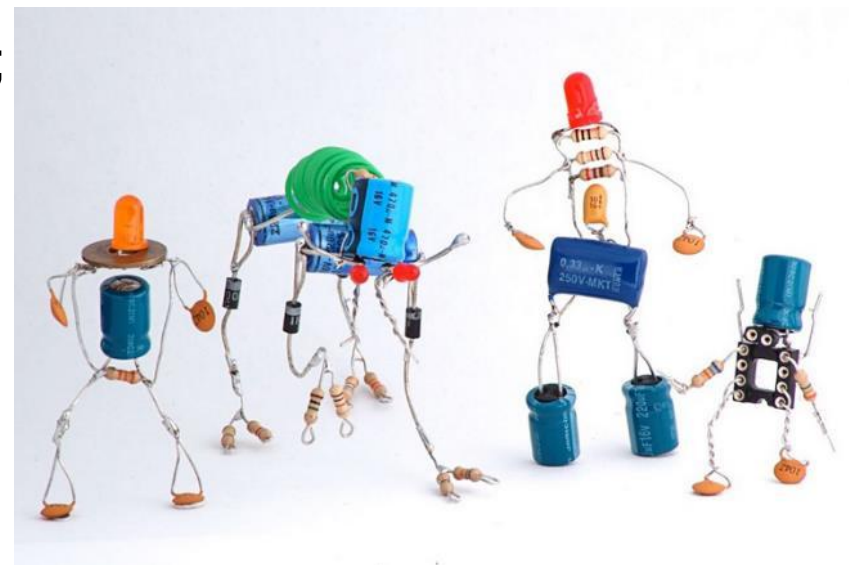
В общем случае вероятность безотказной работы системы равна:

$$P_s = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_i)$$

НЕГАТИВНЫЕ ФАКТОРЫ

Среди многих факторов, влияющих на корректную работу электронных приборов, можно выделить несколько основных :

- Воздействие температуры;
- Влажность;
- Перегрузки по току и напряжению;
- Механические воздействия.



ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Высокая температура является одним из вредных факторов, воздействующих на все без исключения типы компонентов электронной схемы.

Снизить температуру прибора и элементов во время функционирования аппаратуры можно посредством специальных теплоотводов, охлаждающих вентиляторов или просто отверстий в корпусе для естественной вентиляции воздуха.

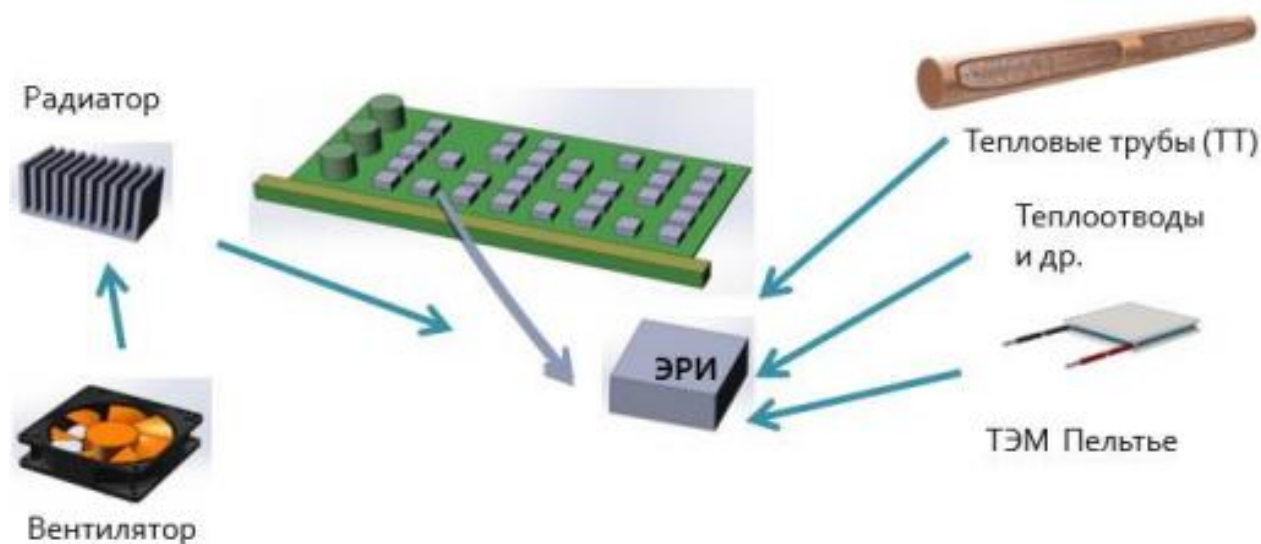
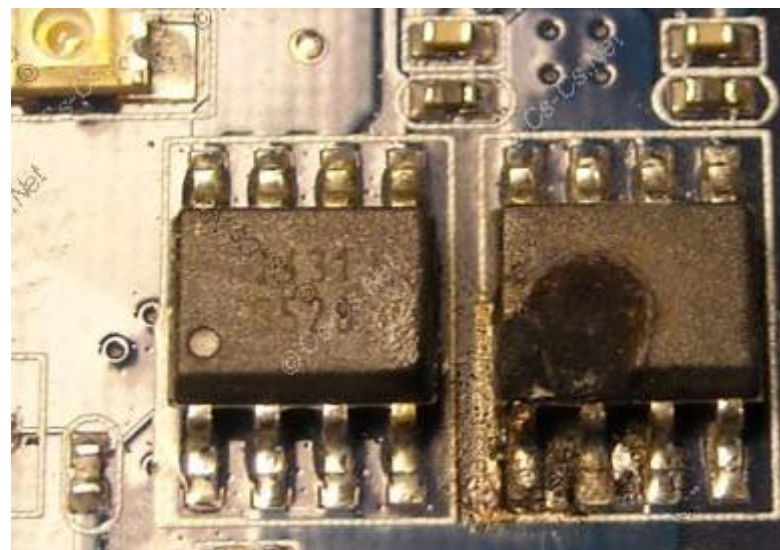


Рис.6 Применяемые средства обеспечения теплового режима.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

На тепловую нагрузку электронных устройств большое влияние оказывает температура окружающей среды. Ситуация ухудшается в области высоких температур, а значит при моделировании необходимо оценивать весь диапазон температур в реальных условиях эксплуатации. Повышенная температура резко увеличивает вероятность выхода из строя полупроводниковых приборов. Это объясняется тем, что все реакции имеют физико-химическую природу и при повышенных температурах протекают быстрее. Таким образом, подавляющее большинство механизмов отказов является зависимым от температуры.



ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Косвенными причинами тепловых повреждений являются электрические перегрузки и электростатические разряды, вызывающие перегорание или плавление проводников.

Для предотвращения повреждений необходимо эксплуатировать электронные приборы в пределах рабочей температуры и соответствующим образом защищать от воздействия тепловых перегрузок, которые могут стать причиной термической усталости материалов, тепловых уходов параметров, появления точек перегрева и некоторых других форм тепловых повреждений, в конечном счете приводящих к полной или частичной потере работоспособности компонента.



ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температурная деформация материалов и конструкций.

Все материалы при изменении температуры в некоторой степени претерпевают деформацию, величина которой зависит от их физических свойств и характера воздействия температуры. Изменение линейных размеров однородного тела Δl определяется известной зависимостью:

$$\Delta l = \alpha l (t_2 - t_1)$$

где α - температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); t_2 и t_1 - конечная и начальная температуры соответственно; l - линейный размер тела, например, его длина.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Из уравнения видно, что на деформацию тела в одинаковой степени оказывает влияние как температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), так и разность температур. Если конструкция однородна и у всех ее частей температура изменилась на одну и ту же величину, то внутренних напряжений в ней не возникает - форма конструкции не искажается. Если же температура отдельных частей однородной конструкции не одинаковая, то она деформируется.

На величину деформации конструкции сильное влияние оказывает теплопроводность материалов. При нагреве части конструкции, обладающие лучшей теплопроводностью, будут нагреваться быстрее и их температура будет выше температуры других частей. При охлаждении же эти части будут охлаждаться быстрее и их температура будет ниже, чем у других частей, обладающих худшей теплопроводностью. Таким образом, материалы с плохой теплопроводностью способствуют получению больших деформаций, обусловленных большой разностью температур отдельных частей конструкции.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Влияние температуры на свойства материалов.

Температурные воздействия оказывают заметное влияние на свойства материалов. Так, например, при повышении температуры увеличивается электрическое сопротивление металлов и сплавов. При температуре от 200 до 500°C заметным становится уменьшение модуля упругости и предела прочности материалов. При понижении температуры у всех материалов понижается пластичность, а при достаточно низких температурах пластичность практически исчезает и материалы становятся хрупкими.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

От температуры в значительной степени зависят электрические свойства диэлектриков. При повышении температуры сопротивление изоляции резко падает, растут диэлектрические потери, изменяется диэлектрическая проницаемость, некоторые диэлектрики размягчаются. Электрическая прочность большинства диэлектриков при действии тепла вначале увеличивается, а механическая прочность уменьшается вследствие удаления влаги. Затем начинается уменьшение электрической прочности. Конечным результатом является физическое разрушение диэлектрика. Изоляционные материалы под действием тепла и холода растрескиваются, что способствует усиленному проникновению влаги и потере диэлектрических свойств.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

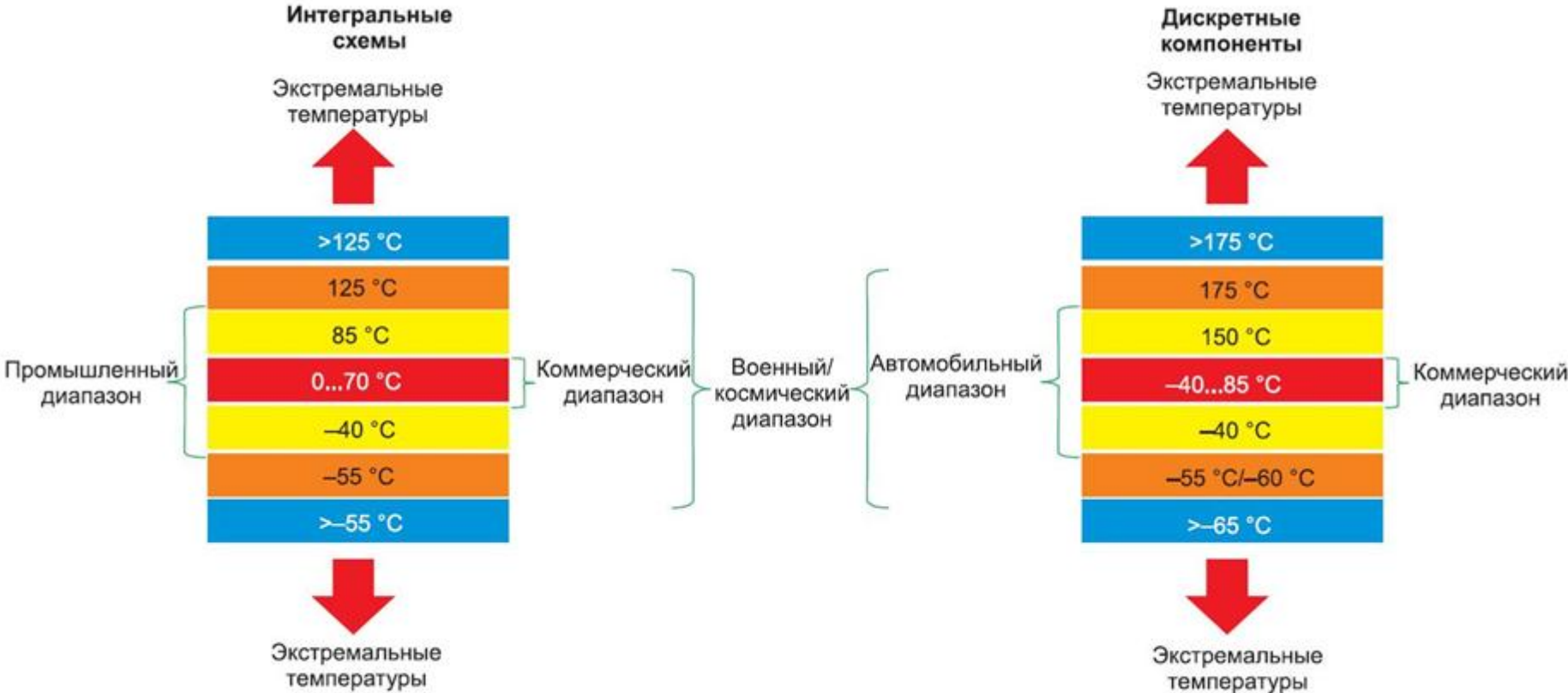


Рис.5 Стандартные диапазоны рабочих температур

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рекомендации по устранению проблем, связанных с перегревом:

- Чувствительные к нагреванию элементы, например, электролитические конденсаторы и полупроводниковые устройства, необходимо размещать отдельно от интенсивных источников тепла, таких как проволочные резисторы, мощные диоды, транзисторы и регуляторы напряжения, установленные на теплоотводах.
- Вокруг теплоотводов должны быть созданы хорошие условия для циркуляции воздуха.
- При необходимости в корпусе устройства должны быть проделаны вентиляционные отверстия.
- Выбор теплоотводов и вентиляторов необходимо произвести на начальном этапе проектирования, так как доработки, связанные с их присутствием, сокращают полезное пространство оборудования и ухудшают циркуляцию воздуха.
- Требования к охлаждению должны определяться назначением оборудования и степенью его надежности. Достаточным коэффициентом снижения температуры переходов и рассеиваемой мощности считается 80%.
- Для оценки температуры переходов критических полупроводниковых устройств и внутренних температур других компонентов рекомендуется провести моделирование тепловых процессов в системе.
- Съёмка рабочего макета печатной платы с помощью тепловизора в условиях предельной нагрузки позволяет выявить локальные перегревающиеся области на ней, которые впоследствии могут вызвать отказы.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ

Влияние влажности на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы связано с адсорбцией воды, содержащейся в окружающей атмосфере, на поверхности корпуса и выводов прибора. Влага в атмосфере содержится в парообразном состоянии и в виде растворов солей и кислот. Осаждаясь на поверхности корпусов приборов, она образует пленку электролита. Протекающие при этом химические реакции ускоряются под воздействием света и электрических полей. Коррозия металлических элементов корпусов приборов приводит к снижению их механической прочности. Объемная коррозия, связанная с проникновением влаги в поры и микротрещины, приводит к нарушению герметичности корпусов приборов.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ

Все компоненты для поверхностного монтажа чувствительны к влажности. Негативное влияние влажности на надежность электронных компонентов очень часто недооценивается. Влажность, содержащаяся в воздухе, может проникать в компоненты, чувствительные к влаге, даже через защитный корпус из пластика или другого органического материала. Особое значение эта проблема приобрела с освоением методов бессвинцовой пайки и ростом температуры обработки, приводящей к существенному увеличению давления паров воды в электронных компонентах.



ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ

Изменение свойств материалов обычно возрастает, если одновременно действуют два или более возмущающих факторов. Например холод, периодически чередующийся с положительной температурой (зона пустынь, где дневная жара сменяется заморозками), вызывает конденсацию влаги на поверхности радиодеталей и радиокомпонентов.

При низкой температуре вода в порах и трещинах замерзает и, расширяясь, вызывает их увеличение.

При высоких температурах быстрое испарение влаги приводит к повышению гидростатического давления внутри электронных компонентов. Различие в значениях коэффициентов теплового расширения для различных материалов, используемых в конструкции полупроводниковых приборов (пластмассы, кремний, и т.д.) приводит к возникновению дополнительных напряжений. Указанные причины повышают риск повреждения электронных приборов в следствии обрыва соединительных проводников, образования микротрещин в кристалле микросхем, а также в пластмассовом корпусе.

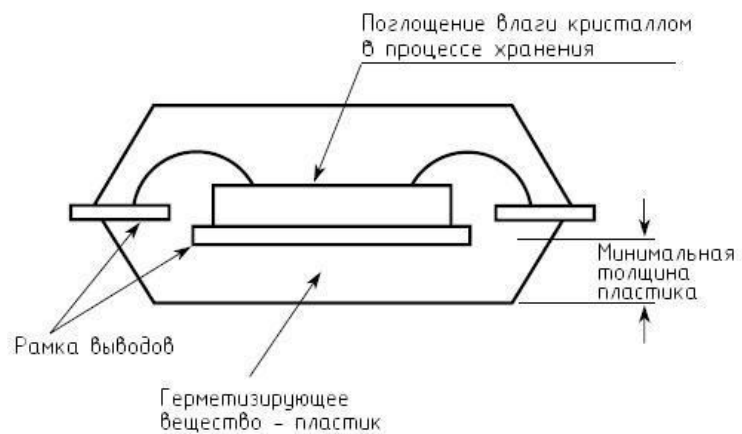
ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ

Влага ускоряет коррозию металлов, изменяет электрические характеристики диэлектриков, способствует тепловому распаду материалов и росту плесени. Все тела, даже при нормальной относительной влажности атмосферы (65%), покрыты тончайшей (0,001... 0,01 мкм) пленкой воды. Эта пленка ионизируется окисью углерода атмосферы, солнечным светом и солями. Ионизация увеличивает ее проводимость. Образование пленок на поверхностях изоляционных материалов уменьшает их поверхностное сопротивление, а проникновение влаги внутрь материала уменьшает объемное сопротивление. Причем степень изменения сопротивления изоляции зависит от влажности и температуры, от способности материала диэлектрика впитывать влагу и загрязненности его поверхности.

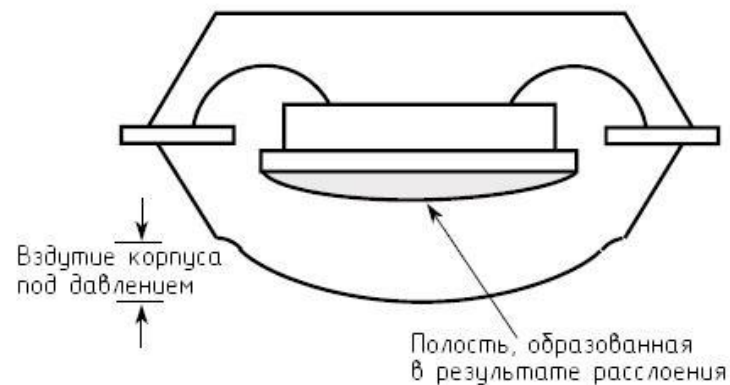
ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ

Механизм образования трещин в корпусе представлен на рис.6. Суммарное воздействие давления водяного пара и термического расширения пластика при нагреве превосходит силу адгезии пластика к площадке для монтажа кристалла. Пластик отслаивается от площадки, образуется полость, заполненная паром, она расширяется, и на корпусе образуется характерное вздутие (рис.6б). Далее в корпусе появляется трещина, вздутие схлопывается, и пар выходит из полости наружу (рис.6в). Данный процесс часто называют «эффектом попкорна» за характерный звук, раздающийся при схлопывании полости. Оставшийся объем полости является концентратором напряжений, ведущих к дальнейшему разрастанию трещины при последующих температурных циклах.

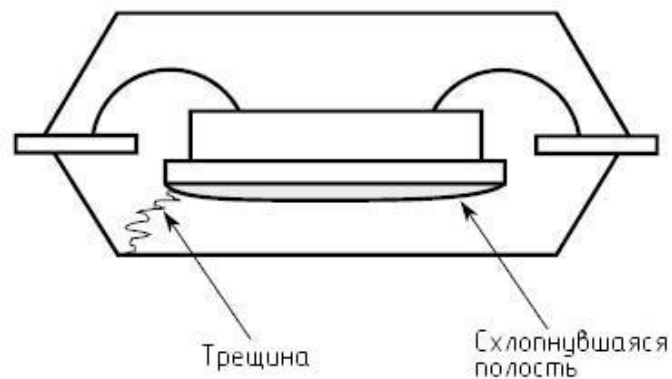
ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЛАЖНОСТИ



а)



б)



в)

Рис.6 Механизм образования трещин в пластиковом корпусе:

- а) накопление корпусом влаги;
- б) испарение влаги в процессе нагрева;
- в) образование трещины в корпусе.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

При эксплуатации РЭС могут возникнуть воздействия механического характера в виде ударов, линейных ускорений, вибраций, а также опасные механические воздействия, связанные с отгрузкой и транспортированием радиодеталей и радиокомпонентов к месту назначения в упаковке или в составе РЭС. Вибрации, линейные ускорения и удары могут вызвать как механические повреждения, так и изменение электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов.

Можно выделить шесть основных причин, вызывающих механические повреждения радиодеталей и радиокомпонентов или изменение их электрических параметров: статический отказ, хрупкий излом, нестабильность конструкции, ползучесть и усталость материала, коррозия.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Статический отказ - это поломка или полное разрушение радиодетали и радиокомпонента, или их деформация сверх допустимых пределов во время единичного приложения постепенно нарастающей нагрузки.

Хрупкий излом также возникает в условиях статической нагрузки, но в отличие от статического отказа характерен внезапностью наступления. Хрупкий излом в пластичном материале может возникнуть при наличии дефектов в сильно напряженных участках.

Механические повреждения и изменения электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов за счет *ползучести* и *усталости материалов* относятся к явлениям, зависящим от времени, так как деформации этого типа увеличиваются со временем.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Механические повреждения, связанные с *нестабильностью конструкции*, вызываются скачкообразным увеличением деформации элемента конструкции при достижении нагрузки критического значения.

Причиной механических повреждений и изменений электрических параметров радиодеталей и радиокомпонентов часто является *коррозия*. Коррозия уменьшает прочность конструкции, причем она протекает быстрее у материалов, которые находятся под механическим напряжением.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Ухудшение надежности и стабильности работы электронной аппаратуры тесно связано с механическими воздействиями.

Источниками механических воздействий могут быть различные двигатели, акустические шумы, ударная волна и т.п.

Сложность защиты ЭП от механических воздействий обусловлена тем, что блоки электронных устройств, представляют собой сложные механические конструкции, в которых возникают резонансные колебания, усиливающие механические нагрузки в несколько раз.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Механические воздействия, особенно ударные, могут вызвать различные поломки, которые приводят к отказу РЭС. У крупных радиодеталей и радиокомпонентов, например трансформаторов, дросселей низкой частоты, больших конденсаторов и т. д., под влиянием ударов создается опасность поломки креплений, а для керамических и других хрупких деталей - опасность их растрескивания. В результате механических воздействий возможно нарушение плохих паек, появление трещин и сколов на поверхности остеклованных резисторов, растрескивание и отслаивание лакокрасочных покрытий, нарушение контактов реле и переключателей, обрыв тонких проводов и т. п.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Наиболее опасными механическими воздействиями являются линейные перегрузки, вибрации и удары.

Перегрузка - отношение действующего значения ускорения к ускорению свободного падения: $j=a/g$.

Линейные перегрузки не поддаются ослаблению. Обеспечение работоспособности элементов конструкции достигается за счет жесткости или прочности, что ведет к увеличению массы.

Повышение прочности может быть достигнуто за счет применения материалов с высоким отношением $[\sigma]/\rho$,

где,

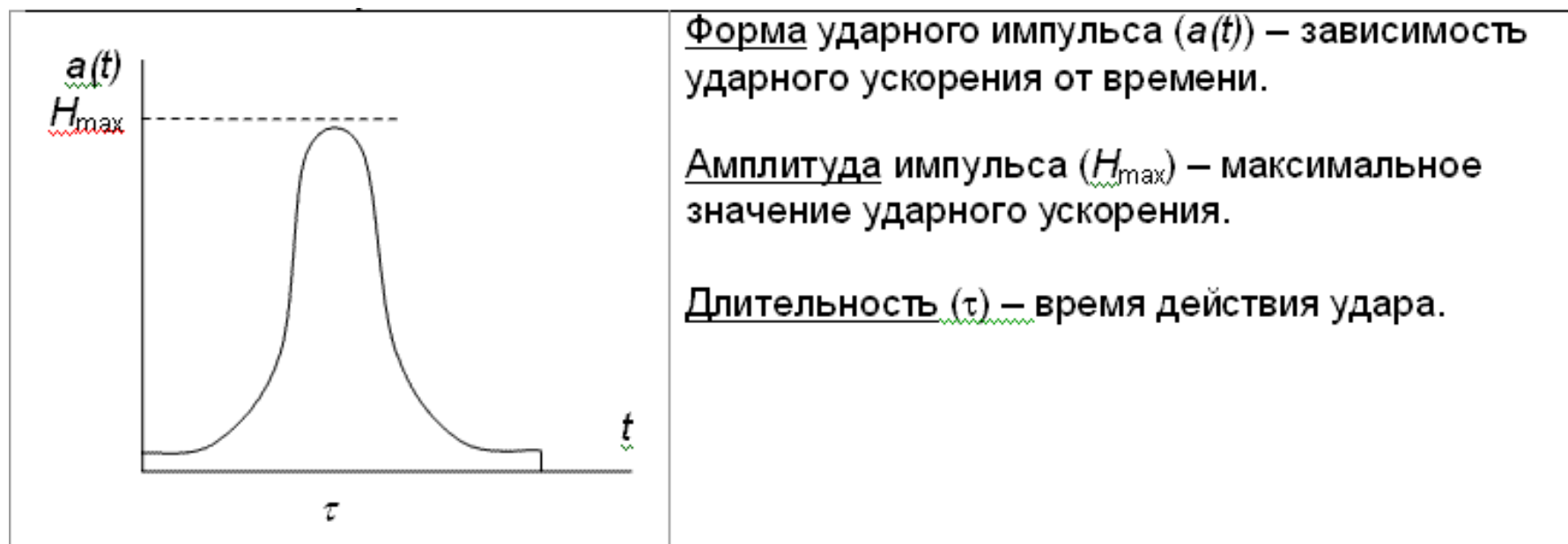
$[\sigma]$ - допустимое напряжение материала;

ρ – плотность материала.

Величину перегрузок определяют с помощью акселерометра.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Удар – быстрое изменение скорости на конечную величину за конечный промежуток времени. После удара, если система упругая, возникают колебания, которые могут попасть в резонанс с собственными колебаниями радиоэлементов или конструкции РЭА. Интенсивность ударного воздействия зависит от формы импульса, амплитуды и длительности ударного импульса.



МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Под вибрацией понимают механические колебания элементов РЭА или ее конструкции в целом.

Вибрация может быть периодической (гармонической) и случайной

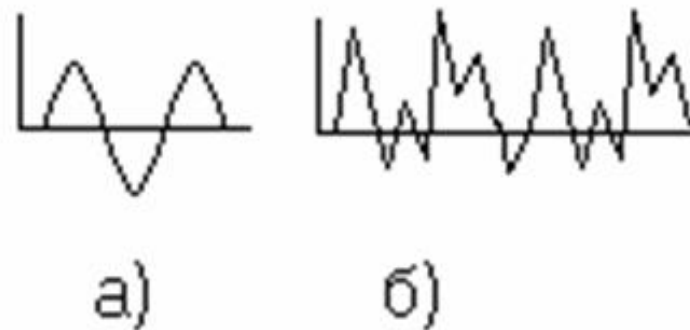


Рис.7. Виды вибраций: а- гармоническая; б- случайная

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Конструкция РЭА представляет собой сложную колебательную систему. Изучение этой системы является трудной и не всегда выполнимой задачей.

При анализе действия вибраций сложное устройство представляют в виде простых колебательных систем, которые можно свести к колебательным системам с одной степенью свободы (рис.7). В этом случае воздействие вибрации сводится к гармоническим колебаниям. Гармоническая вибрация в реальных условиях встречается редко, однако ее широко используют при лабораторных испытаниях и при определении динамических характеристик электрорадиоэлементов и конструкции РЭА.

Вибрации могут привести к самоотвинчиванию винтов и гаек креплений, облому выводов радиодеталей и радиокомпонентов, замыканию проводов с поврежденной изоляцией. Вибрации и конструктивные особенности элемента будут ослаблять высокочастотное возбуждение до того момента как оно дойдет до деталей элемента.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для уменьшения влияния акустического шума опорные элементы конструкций и кожухи элементов и РЭС изготавливают из материалов, имеющих высокие демпфирующие свойства. Все малогабаритные радиодетали должны иметь жесткое крепление. Уменьшение числа объемных проводников достигается использованием многослойного печатного монтажа. Хорошие результаты по уменьшению интенсивности воздействия акустического шума дает заливка компаундами отдельных групп элементов.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Так, воздействие *гармонической вибрации* задается законом колебаний

$$z = A_B \sin(2\pi ft)$$

с параметрами A_B (амплитуда колебания) и f (частота), а воздействие *случайной вибрации* - функцией автокорреляции возмущающего случайного процесса:

$$R_z(\tau) = \sigma_z^2 r_z(\tau)$$

с параметром σ_z .

Акустическое воздействие задается уровнем интенсивности звука:

$$I = 10 \lg(E/E_0)$$

где E - интенсивность звука, создаваемого источником (например реактивными двигателями самолетов и ракет); $E_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Основная причина возникновения механических повреждений – напряжения, возникающие в области монтажа компонента и непосредственно на его выводах. Максимальное механическое напряжение в корпусе SMD-компонента при изгибе платы (рис. 8) можно определить как:

$$\delta = \frac{E_K h_K}{2R'_K},$$

где E_K – модуль упругости компонента;

h_K – толщина компонента;

R'_K – эквивалентный радиус изгиба системы корпус SMD–плата.

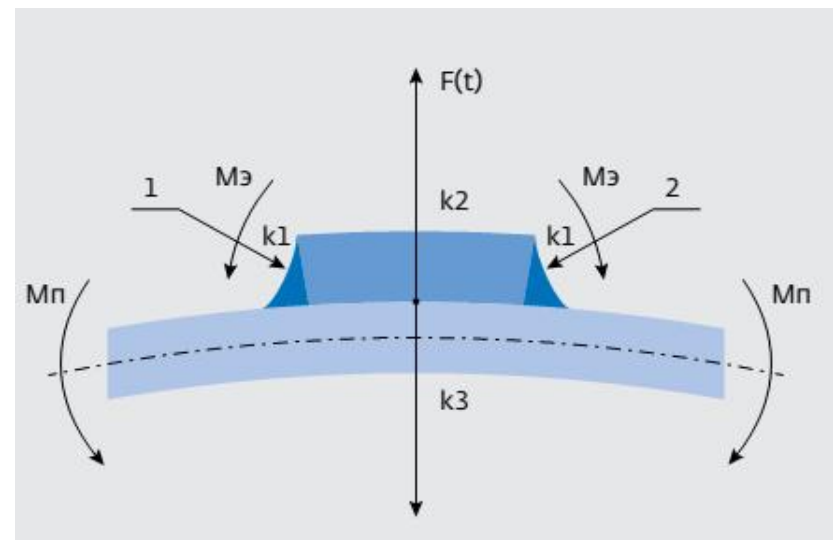


Рис.8 Модель изгиба поверхностно монтируемого компонента на плате: 1 – компонент; 2 – паяное соединение

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

$R'_K = \frac{(EJ)_{\Sigma}}{M_K}$, где J – момент инерции; M_K – изгибающий момент компонента; $(EJ)_{\Sigma}$ – суммарная жесткость SMD и паяного соединения:

$(EJ)_{\Sigma} = \frac{(EJ)_K (EJ)_{\Pi}}{(EJ)_K + (EJ)_{\Pi}}$, где $(EJ)_K$ – жесткость корпуса; $(EJ)_{\Pi}$ – жесткость паяного соединения.

Момент инерции для конструктивного элемента прямоугольного сечения равен:

$J = \frac{bh^3}{12}$ где b – ширина элемента; h – высота.

Поскольку компонент монтируется непосредственно на поверхность ПП и жестко крепится к ней с двух сторон припоем, можно предположить, что изгибающий момент в области пайки равен изгибающему моменту платы ($M_{\text{пл}} \approx M_{\text{э}}$).

$M_{\text{пл}} = \frac{(EJ)_{\text{пл}}}{R_{\text{пл}}}$, где $R_{\text{пл}}$ – радиус аппроксимированной окружностью формы изгиба:

$R_{\text{пл}} = \frac{(a^2 + 4\xi^2)}{8\xi}$, где a – длина изгибающегося участка платы; ξ – стрела прогиба (амплитуда колебаний платы).

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Механическое напряжение, возникающее в выводном компоненте (рис.9), определяется как

$$\sigma = \frac{M_{И}}{W},$$

где $M_{И}$ – изгибающий момент;
 W – момент сопротивления изгибу поперечного сечения электродного вывода:

$$W = \frac{\pi d^3}{32},$$

где d – диаметр вывода компонента.

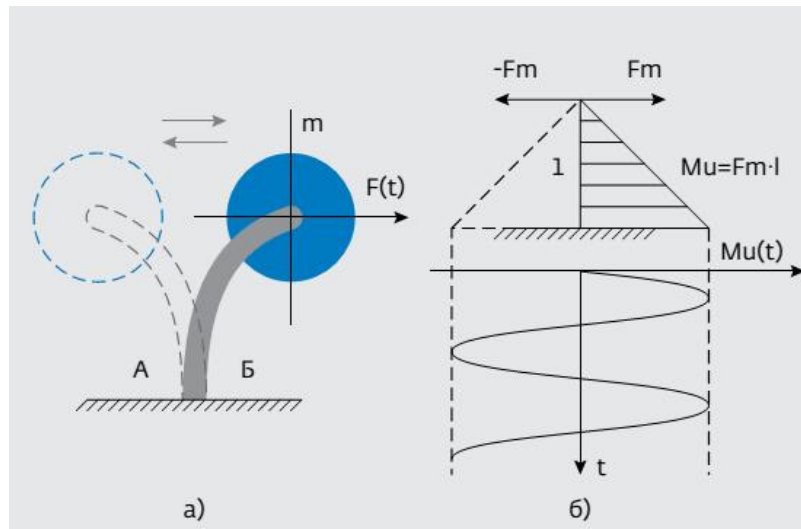


Рис.9 Циклические нагрузки электродного вывода при механических колебаниях: схема колебаний (а); эпюра изгибающих моментов (б)

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Применительно к конкретным условиям эксплуатации и выполняемым функциям различают:

вибро- и ударопрочные РЭС, способные сохранять свои параметры в пределах установленных норм до подачи и после снятия механических воздействий;

вибро- и удароустойчивые РЭС, способные сохранять свои параметры в пределах установленных норм, в том числе и во время механических воздействий.

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

При эксплуатации электронного оборудования в его цепях возникают различные виды электрических перегрузок, наиболее опасным из которых являются перепады напряжения.

Перепад напряжения – случайные пульсации напряжения с амплитудой большей, чем рабочее напряжение в цепи. Такие перегрузки возникают в результате возникновения электромагнитных импульсов естественного происхождения (грозовые разряды), импульсов искусственного происхождения (излучение радиопередающих устройств, высоковольтных линий передач), а также за счет внутренних переходных процессов в оборудовании. Перепад может длиться от нескольких наносекунд до нескольких миллисекунд.

Такие переходные процессы сокращают срок службы электронного оборудования или вовсе выводят его из строя.

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Перегрузки по току и по напряжению в основном возникают в процессе подключения или отключения источника питания от нагрузки. Основная причина токовой перегрузки при подключении питания – повышенный пусковой ток, значение которого может на порядок превышать номинальный ток.

Высокий пусковой неконтролируемый ток способен сжечь предохранитель в цепи питания (лучший вариант с позиции безопасности), вывести из строя входные цепи питаемого электронного блока, а также привести к выходу из строя выходных силовых транзисторов источника питания. Высокие пусковые токи могут возникать и в цепях питания мощных электроприводов.

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Электрическая прочность – способность элемента выдерживать электрические нагрузки без потери работоспособности; характеризуется следующими параметрами:

Рабочее напряжение $U_{раб}$ – это максимальное напряжение, при котором при нормальных условиях элемент может находиться в течение гарантированного срока службы.

Напряжение пробоя или пробивное напряжение $U_{пр}$ – это минимальное напряжение, при котором происходит пробой изоляции.

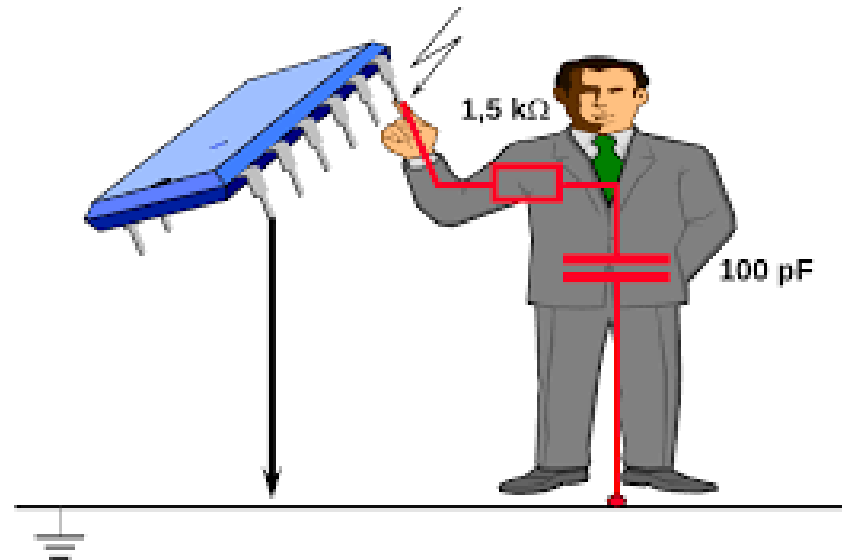
Испытательное напряжение $U_{исп}$ – показывает максимальное напряжение, в котором элемент может находиться в течение от нескольких секунд до минуты. Используется при перенапряжении.

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Номинальная мощность P_H – это максимально допустимая мощность, которую элемент может рассеивать в течение гарантированного срока службы при нормальных условиях. Как правило этот параметр указывается для резисторов, так как именно они предназначены для поглощения электрической энергии.

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Одна из очевидных причин электрической перегрузки – электростатический разряд (ЭСР). Если 2 тела, имеющие разность электростатических потенциалов в сотни или тысячи вольт, находятся в непосредственной близости друг от друга, появляется возможность электростатического разряда. При создании проводящего пути между этими двумя телами происходит перенос ЭСР до тех пор, пока заряды не будут нейтрализованы.



ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Обычно повреждение от ЭСР происходит в результате неправильного обращения с интегральными микросхемами. Электростатический разряд происходит за долю секунды, как правило, менее 250 нс.

После изучения характеристик ЭСР производители полупроводниковых приборов начали встраивать в конструкцию новых интегральных схем защитные электрические цепи. Такие цепи существенно снижают вероятность повреждения интегральных схем электростатическим разрядом.

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Однако внутренняя цепь для защиты от электростатического разряда не предназначена для защиты от электрических перегрузок. Может случиться так, что интегральная схема, полностью рабочая до подачи питания (рис.7), внезапно приходит в негодность после включения питания и подачи входных сигналов.



Рис.10 Полностью функциональная интегральная схема

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Электрическая перегрузка может быть столь сильной, что интегральная схема нагревается до высокой температуры, при этом оплавляются кристалл микросхемы и материал корпуса. Пример таких разрушительных последствий показан на рис.8.



Рис.11 Поврежденная интегральная схема после электрической перегрузки

ПЕРЕГРУЗКИ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Для защиты цепей электронных устройств от воздействия электрических перегрузок могут использоваться различные методы, основными из которых являются: конструкционные, структурно-функциональные, схемотехнические.

Конструкционные методы защиты включают в себя: рациональное расположение и монтаж компонентов, экранирование, заземление и др.

Методы структурно-функциональной защиты включают: рациональный выбор принципа действия оборудования и выбор используемых стандартов передачи сигналов.

Схемотехнические способы защиты включают: пассивную и активную защиту. Наиболее эффективным средством защиты оборудования от воздействия является активная защита.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭП

Надежность изделий определяется многими факторами. В соответствии с этими факторами можно различать и методы повышения надежности.

Под *повышением надежности* будем понимать ее обеспечение в соответствии с требованиями. В этом смысле повышение и обеспечение надежности – одно и то же понятие.



МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭП

Схемотехнический метод

Предусматривает правильный выбор схемных решений, правильное применение компонентов схемы, правильное задание режимов работы компонентов.

Здесь следует отметить один общий принцип разработки надежных схем – применение компонентов более высокой интеграции, как правило, повышает надежность электронного устройства. В первую очередь это касается микросхем и микропроцессоров. Например, современные микропроцессоры, содержащие достаточного объема внутреннюю память более надежны чем микропроцессоры, требующие обращения к внешней памяти. При этом сокращается число микросхем, сокращается число паек и контактных соединений, уменьшатся частота сигналов по отношению к той, которая имеется на внешних шинах адреса и данных.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭП

Конструктивный метод

Конструкция устройства электроники должна обеспечивать надежность. Должны быть обеспечены необходимые температурные режимы компонентов схемы за счет их правильного расположения; правильно выбраны охладители, где необходимо должно быть предусмотрено принудительное охлаждение. Должны быть правильно выполнены разводка печатных плат и монтажные соединения, чтобы исключить или уменьшить влияние внешних электромагнитных полей и не создавать собственных. То есть должна быть обеспечена помехоустойчивость схемы. При этом используется радиальная разводка общей точки и питания, свивка сигнальных проводов с общей точкой и другие меры.

Могут быть приняты меры по ограничению влияния внешних факторов – вибраций, температуры, влажности, агрессивности среды, токопроводящей пыли и других.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭП

Технологический метод

Надежность устройств электроники в большой мере определяется технологией пайки компонентов и соединительных проводов. Потеря контакта является основным видом отказов в устройствах электроники. При низкой технологии изготовления могут быть также повреждены и компоненты устройства.

В случае микропроцессорных систем управления повышение надежности устройств электроники может быть связано с совершенствованием управляющих программ и с совершенствованием аппаратной части, посредством которой реализуется программа.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭП

Резервирование

Эффективным методом повышения надежности является резервирование. Резервирование – это метод повышения надежности путем введения избыточности.

Структурное резервирование предусматривает избыточность элементов объекта. При этом резервироваться могут как отдельные узлы, так и полностью устройство.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭП

Диагностика

Эффективным методом повышения надежности является диагностика.

Различают *тестовую* диагностику и *функциональную*.

Тестовая диагностика проводится между периодами работы изделия или при восстановлении отказавшего изделия или его части. Тестирование изделия до начала его работы позволяет выявить повреждения, которые могут привести к отказу и таким образом избежать отказов, что и повышает безотказность изделия. В микропроцессорных системах применяют специальные тестовые программы для проверки работоспособности изделия перед его включением в работу.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭП

Диагностика

Функциональная диагностика проводится во время функционирования изделия и позволяет:

- выявить повреждения изделия, которые могут привести к отказам с последующим их устранением после завершения работы изделия;
- уменьшить время восстановления изделия. В ряде технологических процессах допускается кратковременный перерыв в работе. Если за это время поврежденное изделие было восстановлено, то причина, приведшая к вынужденному перерыву в работе может не считаться отказом. Это время называют критическим временем восстановления. Таким образом, увеличивается безотказность изделий за счет за счет уменьшения времени восстановления ниже критического;
- при возникновении отказа выявить его причины с последующим их устранением и соответствующим увеличением безотказности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При освоении новых изделий их надежность, как правило, повышается год от года. Это связано с постепенным учетом недоработок по схемным, конструктивным решениям, с совершенствованием технологии изготовления, а для микропроцессорных систем и совершенствованием программного обеспечения.

Для того, чтобы обеспечить указанное повышение надежности необходимо иметь хорошо отлаженную систему сбора и учета информации по эксплуатационной надежности изделий. Необходимо по фактам отказов изделий проводить анализ отказов и разрабатывать мероприятия по повышению надежности. Такие действия также можно квалифицировать как один из методов повышения надежности.

Обеспечение тепловых режимов приборов контроля

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение. Причины контроля тепловых режимов
2. Средства обеспечения тепловых режимов РЭУ
3. Расчёт тепловых режимов РЭУ

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств: учебное пособие для студ. вузов / Г. Ф. Баканов, С. С. Соколов, В. Ю. Суходольский. - М.: Академия, 2007. - 368 с.: ил.
2. Тупик В.А. Технология и организация производства радиоэлектронной аппаратуры. – СПб: Издательство: СПбГЭТУ "ЛЭТИ" – 2004
3. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Учебное пособие для студентов высших технических заведений. «Энергия», 1971. – 248 с.: ил.
4. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. DeWitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition. Chapter 15.

1 Введение

Проблемы теплообмена в радиоэлектронных средствах (РЭС) обусловлены несколькими факторами.

- Во-первых, только часть подводимой к РЭС суммарной мощности входного сигнала и источников питания выделяется на нагрузке в виде полезной мощности; остальная ее часть выделяется в виде тепловой энергии внутри корпуса РЭС, вызывая повышение температуры в нем, дополнительный нагрев электрорадиокомпонентов (ЭРК), что снижает их надежность и срок службы РЭС в целом. Таким образом, всегда существует проблема отвода тепла из внутренних областей корпуса РЭС в окружающее пространство.

$$P = P_{\text{полезная}} + P_{\text{нагрева}}$$

1 Введение

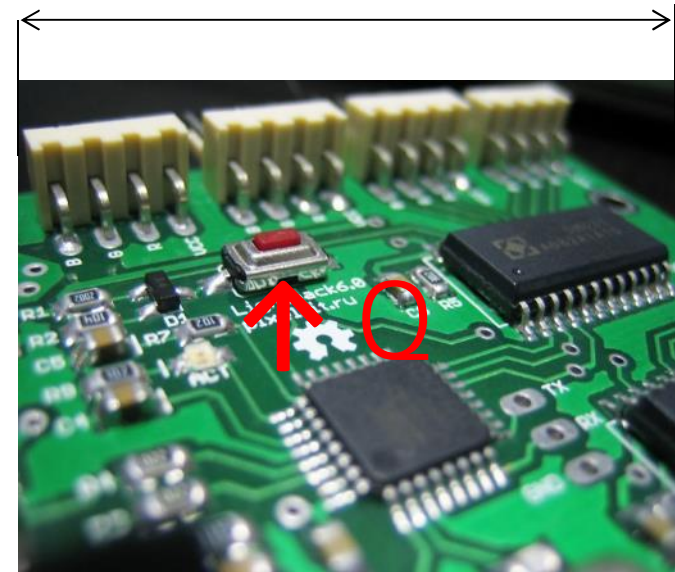
- Во-вторых, для нормальной эксплуатации отдельных ЭРК (например, кварцевых резонаторов) необходимо поддержание постоянного температурного режима в очень узком интервале температур в замкнутой области пространства и при значительном изменении температуры окружающей среды. Таким образом, существует проблема статирования теплового режима РЭС.
- В-третьих, в целях снижения уровня их собственных шумов отдельным ЭРК требуется охлаждение до сверхнизких температур, что возможно лишь с помощью специальных средств криогенной техники.



1 Введение

Особое же внимание к процессам теплообмена обусловлено проблемой микроминиатюризации РЭС, так как выделение значительных тепловых потоков в малых объемах изделий препятствует повышению плотности компоновки РЭС, приводит к появлению нежелательных тепловых связей, особенно для быстродействующих интегральных микросхем.

При уменьшении размера РЭС увеличивается Q на см^2

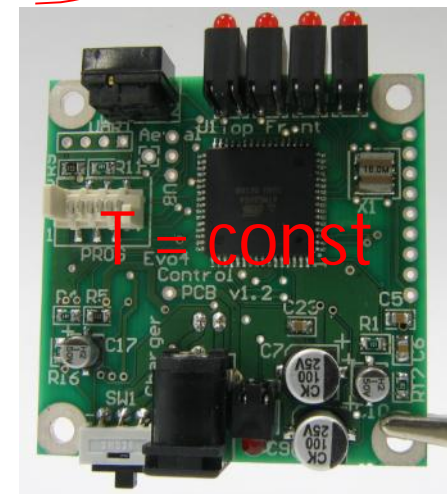


1 Введение

Поскольку всякая материальная система сама стремится к тепловому равновесию со средой (минимуму энтропии), то задачами проектирования конструкций РЭС, с точки зрения указанных проблем, являются:

- повышение эффективности переноса теплового потока из внутренних областей конструкции РЭС в окружающее пространство за счет известных механизмов теплообмена;
- обеспечение заданного температурного режима в замкнутой области пространства конструкции РЭС независимо от значения температуры окружающей среды;
- разработка и использование компактных и эффективных охлаждающих устройств.

Теплопроводность
Конвекция
Испарение

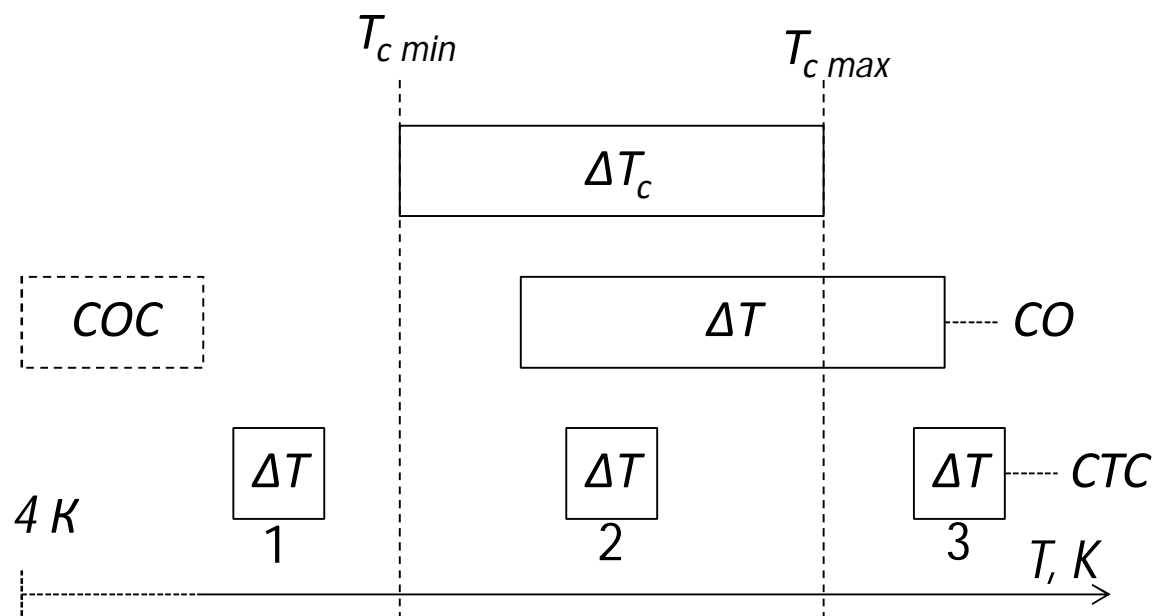


2 Средства обеспечения тепловых режимов РЭС

Функционирование средств обеспечения тепловых режимов (СОТР) РЭС основано на использовании ряда известных физических явлений и эффектов: кипение, испарение и конденсация жидкостей и газов, плавление твердых тел, при которых скрытая теплота фазовых переходов затрачивается на отбор тепла от источника и на нагрев аккумулятора тепла. Кроме того, используют эффект температурного адиабатического расширения газов и явление термоэлектричества.

2.1 Классификация средств обеспечения тепловых режимов РЭС

- Положение диапазона ΔT температур объекта относительно диапазона ΔT_c температур окружающей среды: средства охлаждения (СО), в том числе до сверхнизких температур (СОС) и средства термостатирования (СТС);



- 1 - нереверсивные холодильники и криостаты;
- 2 - реверсивные термостаты;
- 3 - нереверсивные термостаты; СО - средства охлаждения; СТС - средства термостатирования; СОС - средства охлаждения до сверхнизких температур.

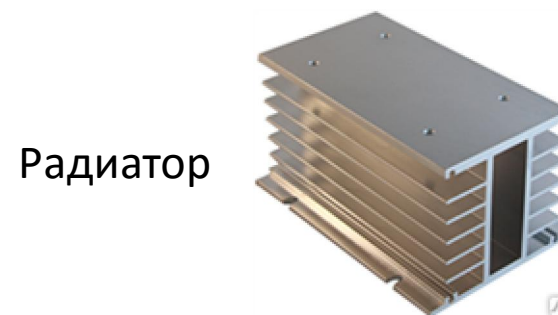
2.1 Классификация средств обеспечения тепловых режимов РЭС

- Зависимость от внешнего источника энергии: **пассивные** и **активные**;
- Возможность совмещения одним устройством функций нагревателя и охладителя: **реверсивные** и **нереверсивные**;
- Способ транспортирования теплового потока: **кондуктивные**, **конвективные** и **испарительные**;
- Вид рабочего вещества теплоносителя: **твердотельные**, **жидкостные** и **газообразные**;
- Тип режима функционирования: с **естественным** и **принудительным** режимами;
- Место размещения в составе конструкции РЭС: **стационарные**, **передвижные** и **встроенные**.

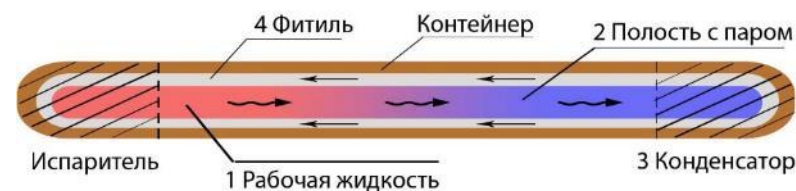
2.1 Классификация средств обеспечения тепловых режимов РЭС

В качестве СО большое распространение получили радиаторы различных конструкций, вихревые трубы и дроссельные микроохладители; в качестве СТС нашли применение пассивные термостаты и криостаты, активные нереверсивные термостаты с охладителем или нагревателем и активные реверсивные термостаты.

Для передачи (транспортирования) теплового потока из внутренних объемов РЭС к периферии используются тепловые трубы.



Пассивный термостат ТП-1



2.2 Примеры СОТР РЭС. Охлаждение за счет теплопроводности

Температура компонентов стабилизируется после повышения в случае, если

$$Q = Q_{\text{рассеив}}$$

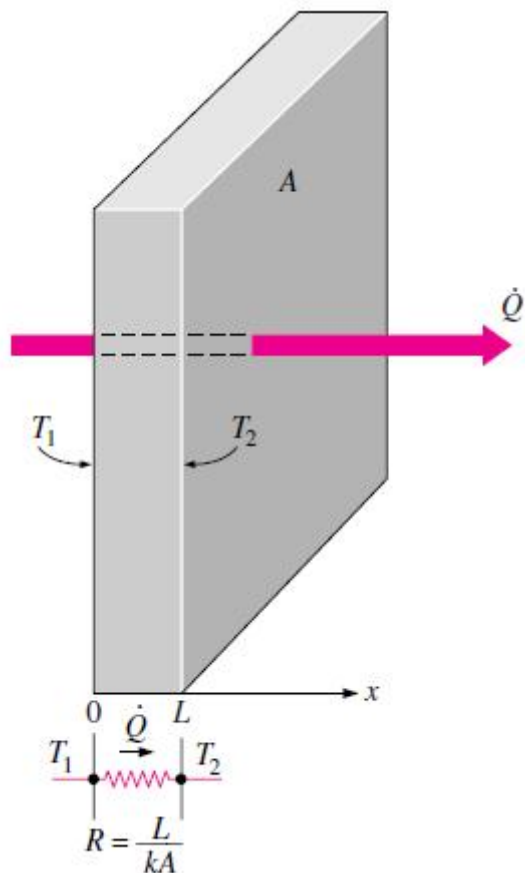
Для того, чтобы свести к минимуму повышение температуры компонентов, необходимо установить эффективные пути передачи тепла между компонентами и конечным поглотителем тепла (обычно атмосферный воздух).

Передаваемое тепло через среду одномерно с толщиной L , площадью поверхности теплопередачи A , и теплопроводность k может быть найдена как:

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{L} = \frac{\Delta T}{R},$$

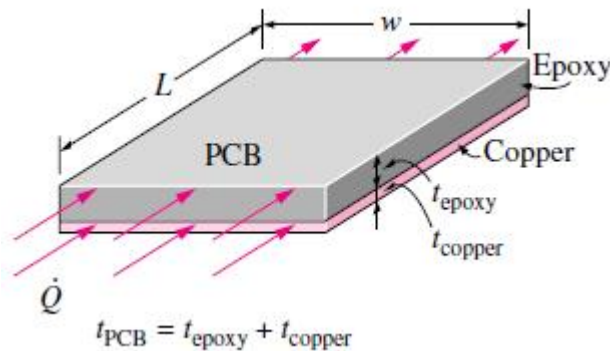
где $R = \frac{L}{kA} = \frac{\text{Длина}}{\text{Теплопроводность} * \text{Площадь}}$

R – сопротивление теплопередаче, ΔT – разница температур в среде передачи.



2.2 Примеры СОТР РЭС. Охлаждение за счет теплопроводности

Рассмотрим печатную плату, покрытую медью, шириной w и длиной L , в которой есть разность температур ΔT . Предполагая, что передаваемое тепло через среду одномерно с толщиной L и передаваемое тепло в других измерениях незначительно, скорость теплопроводности вдоль этой печатной платы равна сумме теплопроводности вдоль эпоксидного слоя и слоя меди и выражается в виде:



$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{PCB}} &= \dot{Q}_{\text{epoxy}} + \dot{Q}_{\text{copper}} = \left(kA \frac{\Delta T}{L}\right)_{\text{epoxy}} + \left(kA \frac{\Delta T}{L}\right)_{\text{copper}} \\ &= [(kA)_{\text{epoxy}} + (kA)_{\text{copper}}] \frac{\Delta T}{L} \\ &= [(kt)_{\text{epoxy}} + (kt)_{\text{copper}}] \frac{w\Delta T}{L}\end{aligned}$$

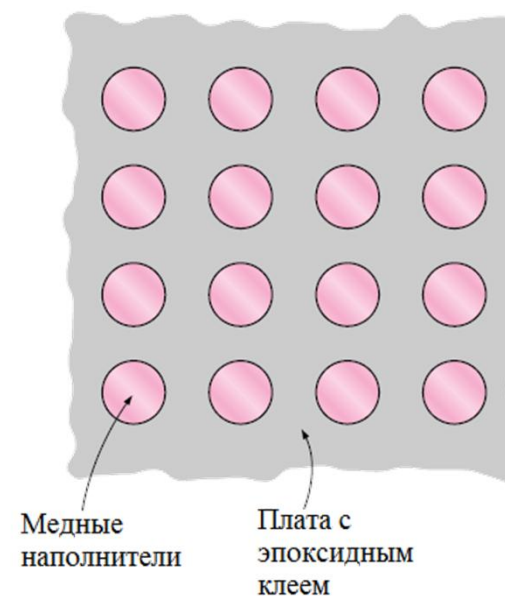
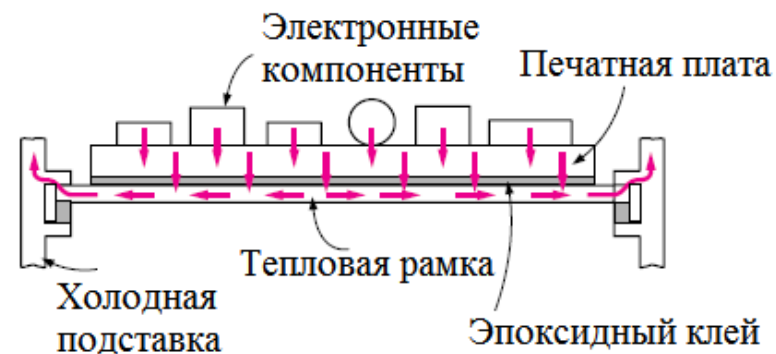
где t – толщина.

Заметим, что чем тоньше толщина меди, тем быстрее происходит вывод тепла вдоль печатной платы. Таким образом, это наиболее распространенный способ охлаждения с помощью теплопроводности.

2.2 Примеры СОТР РЭС. Охлаждение за счет теплопроводности. Тепловые рамки

Тепло, вырабатываемое в электронных компонентах, проходит через печатную плату, через эпоксидный клей, затем проходит через центр тепловую рамку, и через радиатор или холодную подставку рассеивается в окружающую среду. Тепловая рамка обеспечивает путь с низким сопротивлением для потока тепла от печатной платы к радиатору. Чем толще тепловая рама, тем меньше тепловое сопротивление, и, таким образом, меньше разность температур между центром и концами тепловой рамки.

Это сопротивление может быть уменьшено благодаря отверстиям в эпоксидной смоле и заполнению их медью, которые, как правило, 1 мм в диаметре, а их центры расположены в нескольких миллиметрах друг от друга. Такие высокопроводящие наполнители обеспечивают лучшую теплопроводность от одной стороны печатной платы к другой.



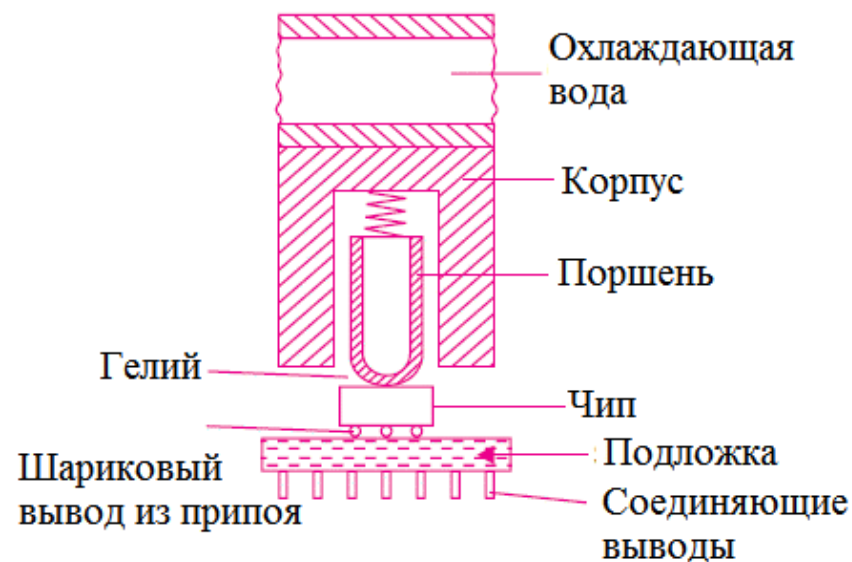
2.2 Примеры СОТР РЭС. Теплоотводящий модуль

Следующим этапом развития систем охлаждения является создание теплоотводящего модуля. В данной методике процесс разработки электронного компонента включает одновременное проектирование как непосредственного элемента, так и технических решений для регулирования отвода теплота.



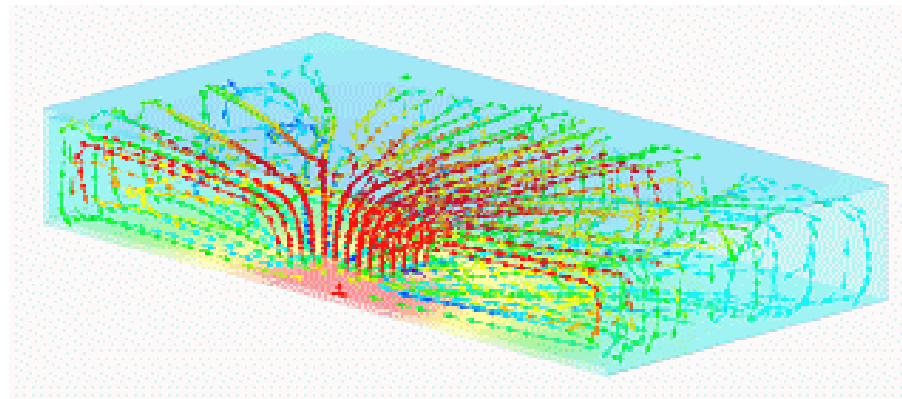
2.2 Примеры СОТР РЭС. Теплоотводящий модуль. Секция для одного чипа

Теплоотводящий модуль содержит от 100 до 118 логических чипов, присоединенных к многослойной керамической подложке размером 9 см x 9 см с шариками вывода из припоя, которые обеспечивают электрическое соединение между чипами и подложкой. Каждый чип рассеивает около 4 Вт мощности. Поток тепла от чипа к металлическому корпусу проходит через поршень (подпружиненный), который прижимается к задней поверхности чипа. Край поршня слегка изогнут, чтобы обеспечить хороший тепловой контакт, даже при наличии несоосности. Поскольку площадь контакта ограничена, тепло также проводится от чипа к поршню через гелий, заполняющий пространство в корпусе модуля, конечный поглотитель тепла - вода.



2.3 Примеры СОТР РЭС. Тепловая труба

Тепловая труба - герметичное испарительно-конденсационное устройство, работающее по принципу термосифона (рис. 2, а), когда передача теплового потока с одного («горячего») конца на другой («холодный») происходит за счет возвратно-поступательного движения теплоносителя в разных фазовых состояниях по циклу «пар-жидкость-пар» с использованием скрытой теплоты фазовых превращений.



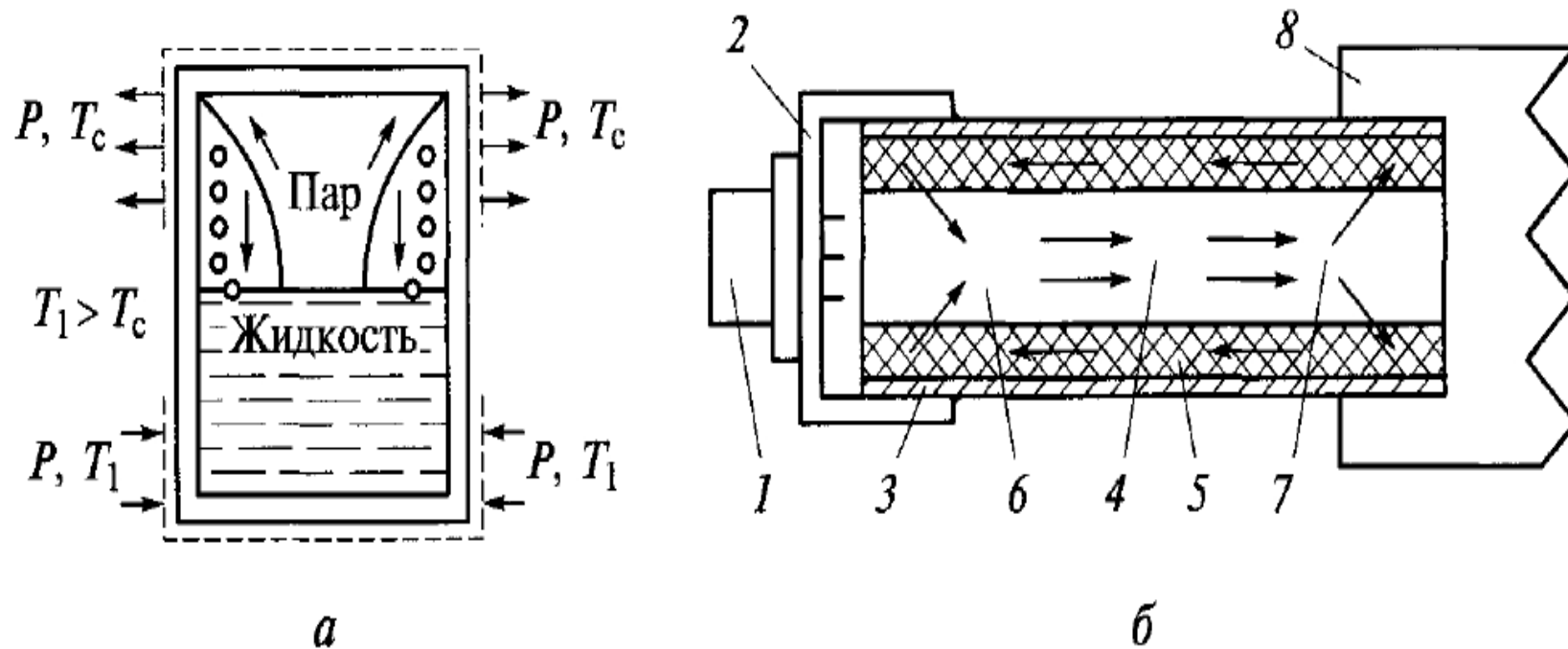


Рисунок 2 - Тепловая труба:

а - механизм отвода теплового потока; б - конструкция; 1 - источник теплоты; 2 - радиатор; 3 - внешняя оболочка; 4 - теплоноситель; 5 - фитиль; 6 - зона испарения; 7 - зона конденсации; 8 - аккумулятор теплоты.

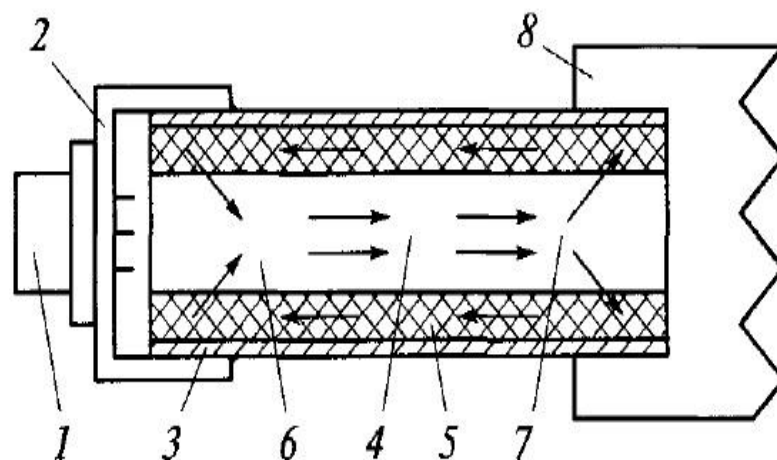
Отводимый термосифоном тепловой поток:

$$P = r \frac{dm_{\text{п}}}{dt},$$

где r - удельная теплота парообразования, кДж/кг; $m_{\text{п}}$ - масса пара, кг.

Значения r для разных теплоносителей следующие: фреон - 162, вода - 2256, ртуть - 285. Однако выбор конкретного вида и типа теплоносителя зависит от диапазона рабочих температур.

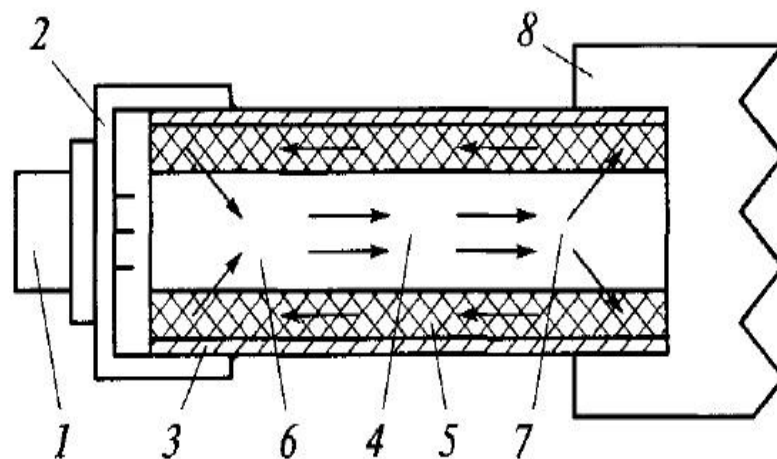
2.3 Принцип работы тепловой трубы



Источник теплоты (транзистор) 1 за счет специальной смазки (контактола) имеет хороший тепловой контакт с радиатором 2, приваренным к внешней оболочке 3 тепловой трубы, внутри которой по всей ее длине в разных фазовых состояниях находится теплоноситель 4 и капиллярно-пористая структура (фитиль) 5 в виде металлического войлока, сетки или спеченного порошка.

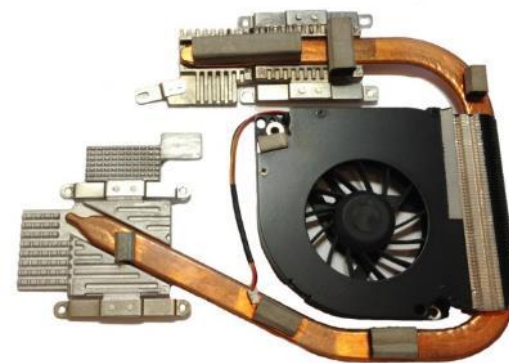
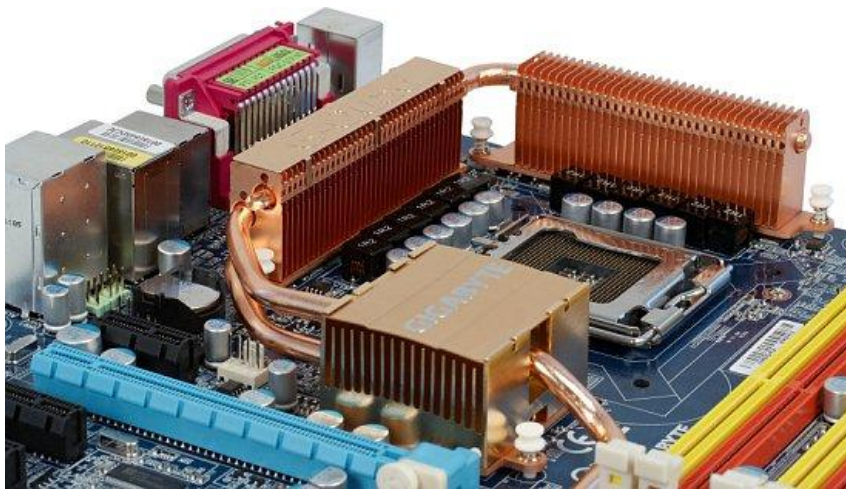
В зоне испарения 6 за счет тепловой энергии тела 1 происходит испарение теплоносителя, находящегося в фитиле в капельножидком состоянии; теплоноситель, уже в фазе пара, двигаясь по свободному пространству трубки, попадает в зону конденсации 7.

2.3 Принцип работы тепловой трубы (Продолжение)



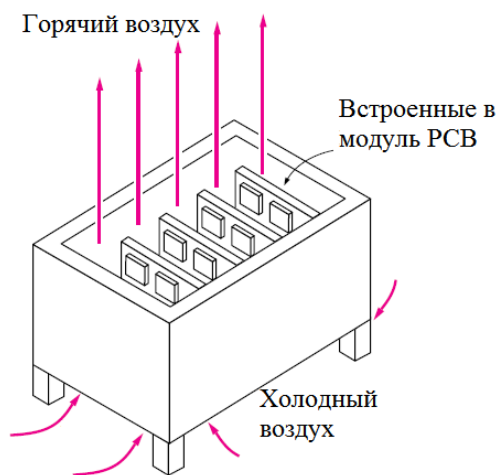
Внешняя оболочка 3 трубы в этом месте имеет хороший тепловой контакт с аккумулятором теплоты 8, температура которого значительно ниже температуры пара. Здесь происходит переход теплоносителя из парообразного в капельножидкое состояние. Обратное движение теплоносителя по капиллярам фитиля 5 в сторону зоны испарения 6 замыкает цикл смены фазовых состояний. В качестве теплоносителя используются сжиженные газы и аммиак (до 0°C), ацетон, спирт или вода (до 250°C), легкоплавкие металлы (до 500°C).

Благодаря простоте конструкции тепловой трубы ее конфигурации может быть придана любая форма, позволяющая транспортировать тепловые потоки из внутренних, малодоступных объемов блоков РЭС, прежде всего от мощных процессорных элементов, к внешним аккумуляторам тепловой энергии и в окружающую среду.

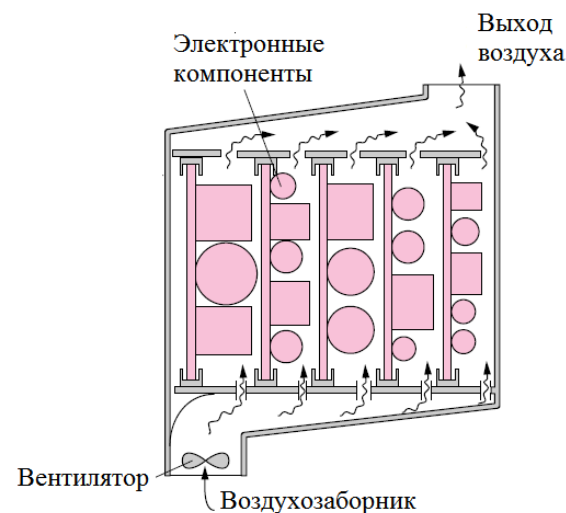


2.4 Примеры СОТР РЭС. Средства воздушного охлаждения

В качестве пассивных СО используются элементы несущих конструкций РЭС - рамы, кожухи, обладающие большой теплоемкостью и значительной площадью взаимодействия с окружающим воздушным пространством, обеспечивая простой, надежный и без дополнительных затрат **естественный режим** охлаждения РЭС. Большой эффективностью обладают воздушное принудительное охлаждение, а также естественное и **принудительное жидкостное** и **испарительное** охлаждения.

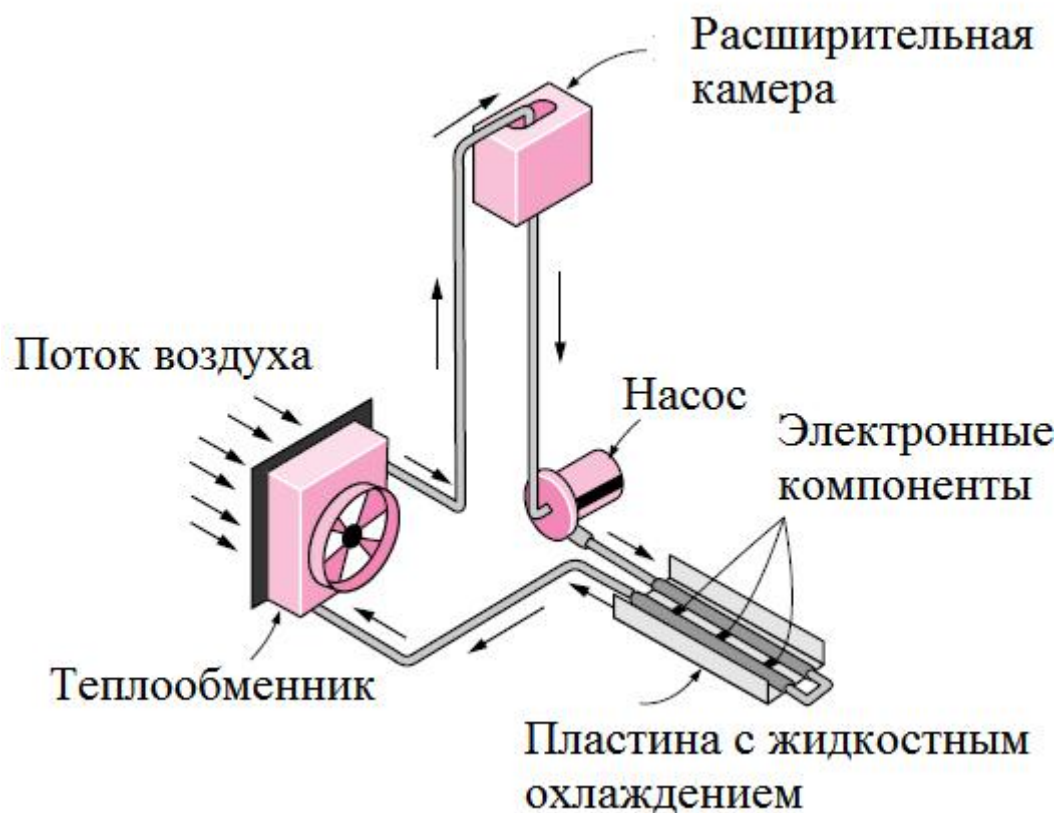


Естественное воздушное охлаждение



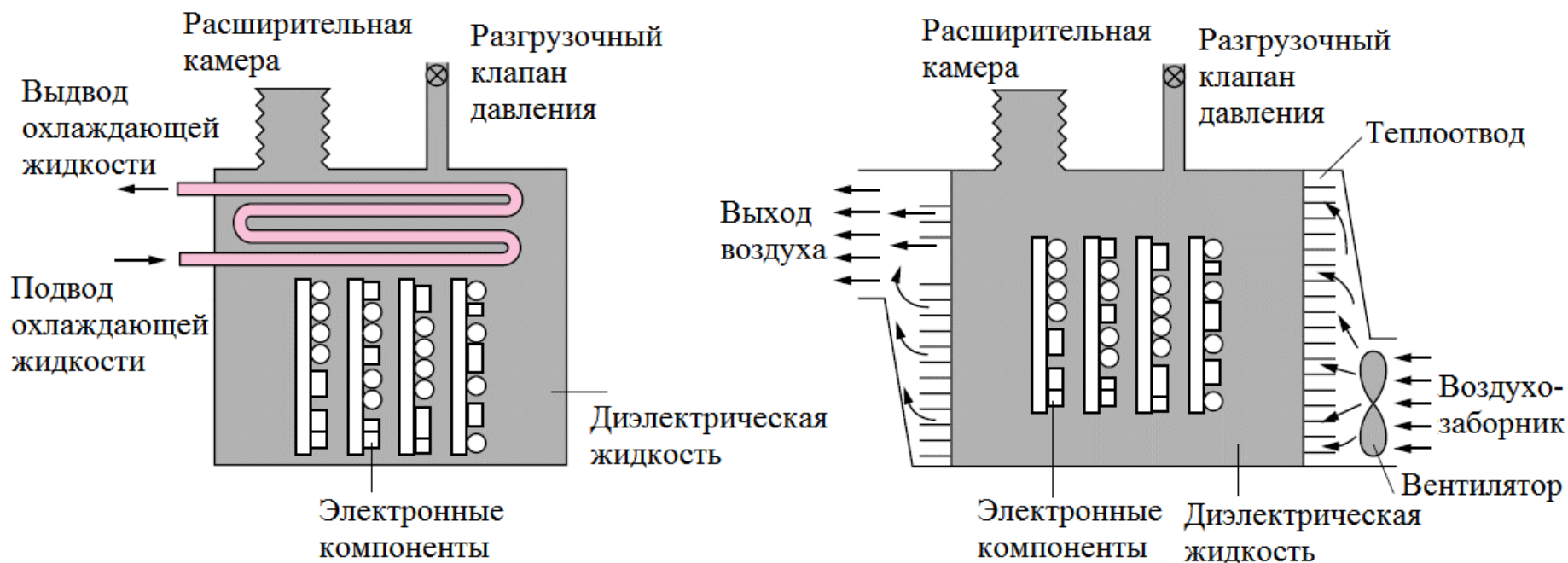
Принудительное воздушное охлаждение

2.5 Примеры СОТР РЭС. Средства жидкостного непрямого охлаждения



Электронные компоненты установлены на металлической пластине, выполненной из хорошо проводящего материала, такого как медь или алюминий. Металлическая пластина охлаждается за счет циркуляции охлаждающей жидкости через трубы, прикрепленные к ней. Нагретая жидкость затем охлаждается в теплообменнике, как правило, с помощью воздуха, и циркулирует в по трубам за счет насоса. Расширительная камера компенсирует изменения объема жидкости при температурных измерениях.

2.6 Примеры СОТР РЭС. Средства жидкостного охлаждения путем прямого погружения



В первом случае используются специальные охлаждающие рубашки (теплообменники), через трубопроводы которых непрерывно прокачивают холодный теплоноситель. В качестве теплоносителя используются жидкие металлы (например, сплав на основе галлия).

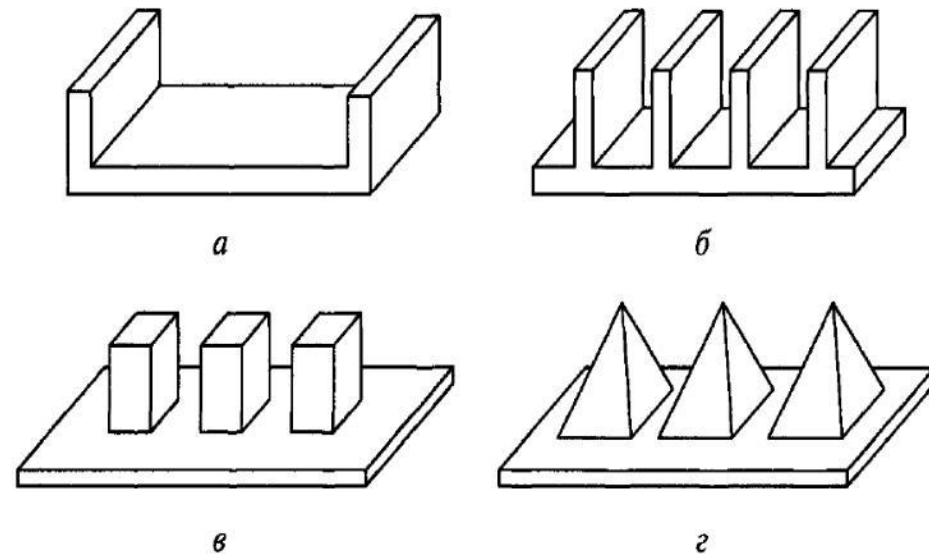
Последние достижения в этой области - использование жидкого металла с высокой теплопроводностью, перемещение которого внутри системы происходит посредством «магнитного насоса».

Во втором случае для создания воздушного омывающего потока достаточной интенсивности необходимы дополнительные устройства (вентиляторы).

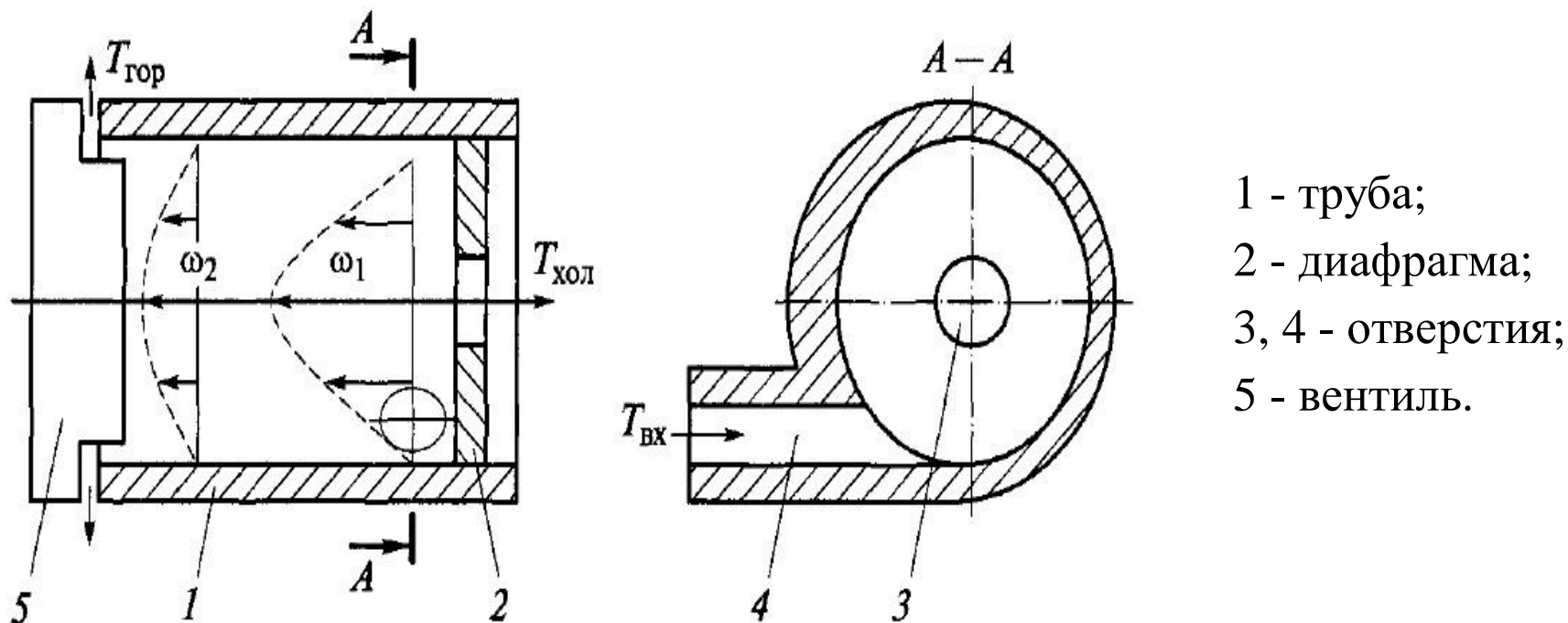
2.7 Примеры СОТР РЭС. Радиаторы

Чаще всего в качестве СО РЭС используются радиаторы различных конструкций, способные отводить потоки мощности до нескольких сотен ватт. На рисунке представлены конфигурации теплоотводящих элементов распространенных типов радиаторов, изготовляемых из меди, латуни, алюминия или силумина с $\alpha_{\text{кв}} \approx 102 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, в порядке возрастания их эффективности.

- а - пластинчатый;
- б - ребристый;
- в - штыревой;
- г - игольчатый.

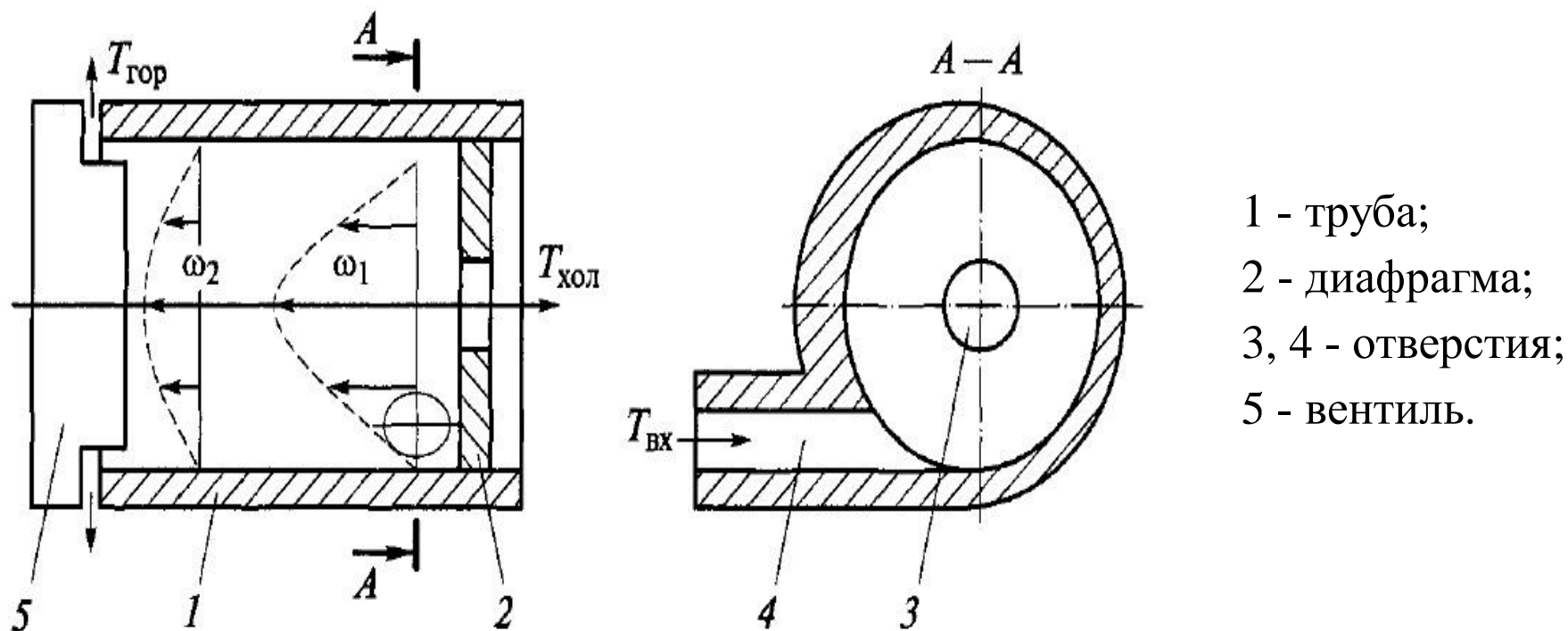


2.8 Примеры СОТР РЭС. Вихревые трубы



Для охлаждения небольших объектов с массой порядка нескольких десятков граммов (транзисторы, чувствительные элементы приемников излучений) до умеренно низких температур используются вихревые трубы (ВТ), действие которых основано на эффекте снижения температуры реального газа при его адиабатическом расширении и эффекте Ранка (рис. 4). В трубе 1 размещена диафрагма 2 с центральным отверстием 3; входное для хладонителя отверстие 4 расположено тангенциально; вентиль 5 предназначен для выхода нагретого хладонителя.

2.8 Примеры СОТР РЭС. Вихревые трубы



Струя газа под давлением $p = 1 \cdot 10^6$ Па и при температуре $T_{вх} = 293$ К через входное отверстие 4 поступает внутрь трубы 1 и при расширении охлаждается; благодаря тангенциальному расположению отверстия 4 струе газа сообщается дополнительное вихревое движение, начальное поле угловых скоростей ω_0 , которого является неравномерным; однако в результате вращательно-поступательного движения газа вдоль трубы 1 конечное поле угловых скоростей ω_2 выравнивается.

Это происходит за счет трения между слоями газа, центральные слои которого отдали часть своей кинетической энергии на производство механической работы против сил трения, сохранив при этом пониженную температуру, которую они получили при расширении на входе. При КПД = 10 % вихревые трубы отводят тепловые потоки $P = 5... 10$ Вт при температуре $T_x = 218$ К.

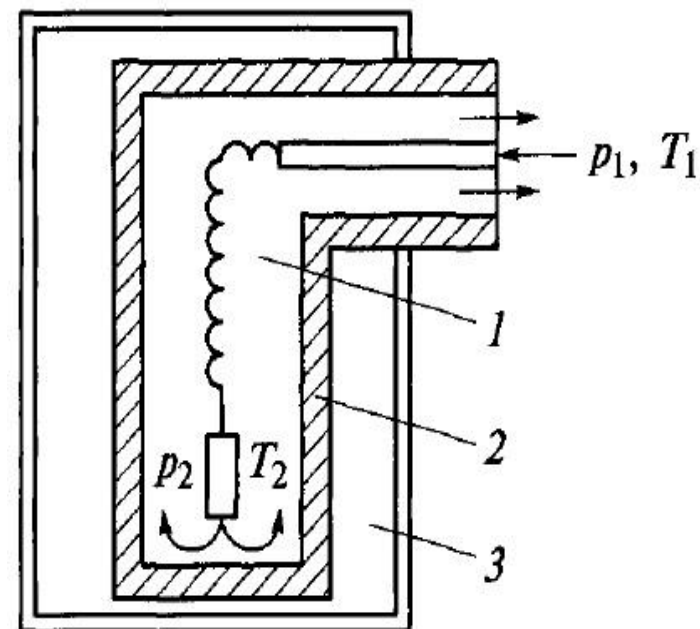
2.9 Примеры СОТР РЭС. Дроссельный микроохладитель

Для охлаждения малогабаритных активных приборов РЭС до температур порядка 4...200 К применяются миниатюрные дроссельные микроохладители.

Действие дроссельного микроохладителя основано на эффекте Джоуля - Томсона - снижении температуры реального газа при его адиабатическом расширении (адиабатное дросселирование).

Газ при температуре T_1 - 255 К и давлении $p_1 = 8$ МПа поступает на вход дросселя 1, находящегося в теплообменнике 2, помещенном в охлаждаемый объект 3. На выходе дросселя температура газа $T_2 = 195$ К, а давление $p_2 = 5,6$ МПа.

Эффективность действия дросселя зависит от разности давлений газа $\Delta p = p_1 - p_2$. При этом разность температур $T_1 - T_2 = k_d \Delta p$, где k_d - коэффициент дросселирования ($k_d = 2,5 \cdot 10^{-5}$ К/Па).

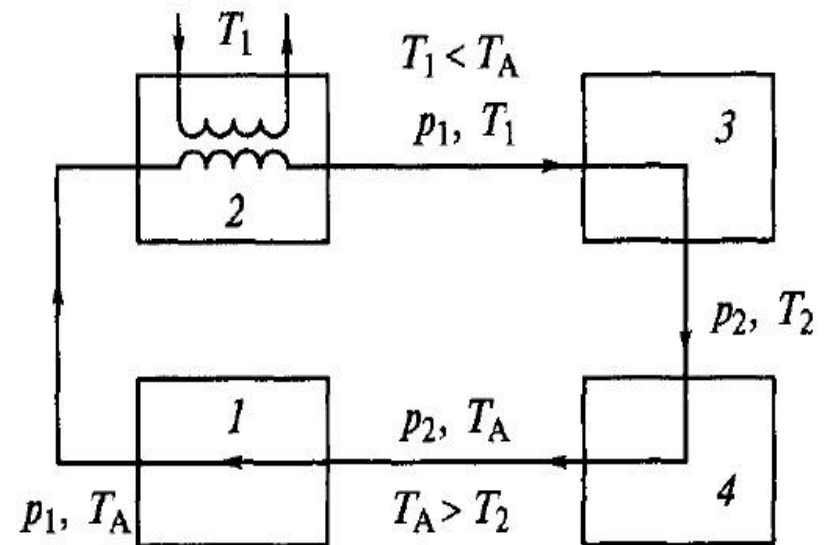


- 1 - дроссель;
- 2 - теплообменник;
- 3 - охлаждаемый объект

2.10 Примеры СОТР РЭС. Компрессионная холодильная машина

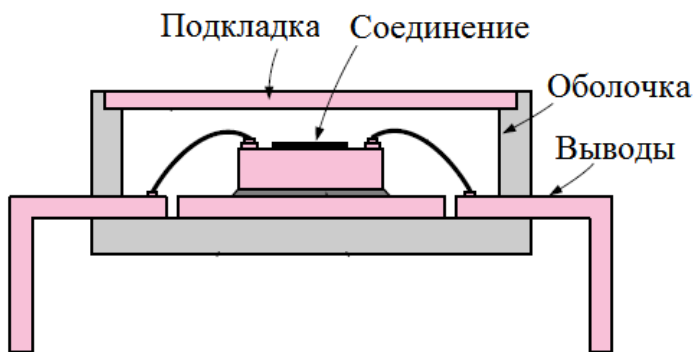
Для охлаждения крупногабаритных блоков РЭС до температур 300... 120 К применяются кондиционеры и компрессионные холодильные машины (КХМ). Действие КХМ основано на циклическом изменении параметров хладоносителя в замкнутой цепи циркуляции: компрессор 1 – охладитель, 2 – детандер, 3 – РЭС, 4 – компрессор 1.

Нагретый в РЭС до температуры T_A хладоноситель под давлением P_2 поступает в компрессор, поднимающий давление газа до значения P_1 . В охладителе 2 температура теплоносителя понижается до значения T_1 , и он поступает в детандер 3. В детандере происходит адиабатическое расширение газа с совершением внешней работы, в результате чего его температура еще понижается до значения T_2 , и под давлением p_2 газ поступает в отсеки РЭС, нагреваясь в них до температуры T_A . Далее цикл повторяется.



2.11 Примеры СОТР РЭС. Средства термостатирования

Известны средства пассивной и активной стабилизаций температуры объекта. Средства **пассивной** стабилизации обеспечивают кратковременное (до нескольких часов) поддержание постоянной средней температуры объекта за счет большой тепловой инерции оболочки термостата и редко встречаются в конструкциях РЭС. Наибольшее распространение получили средства **активной** стабилизации температурных режимов (САСТР), поддерживающие тепловой баланс термостата за счет его реверсивного или нереверсивного регулирования.



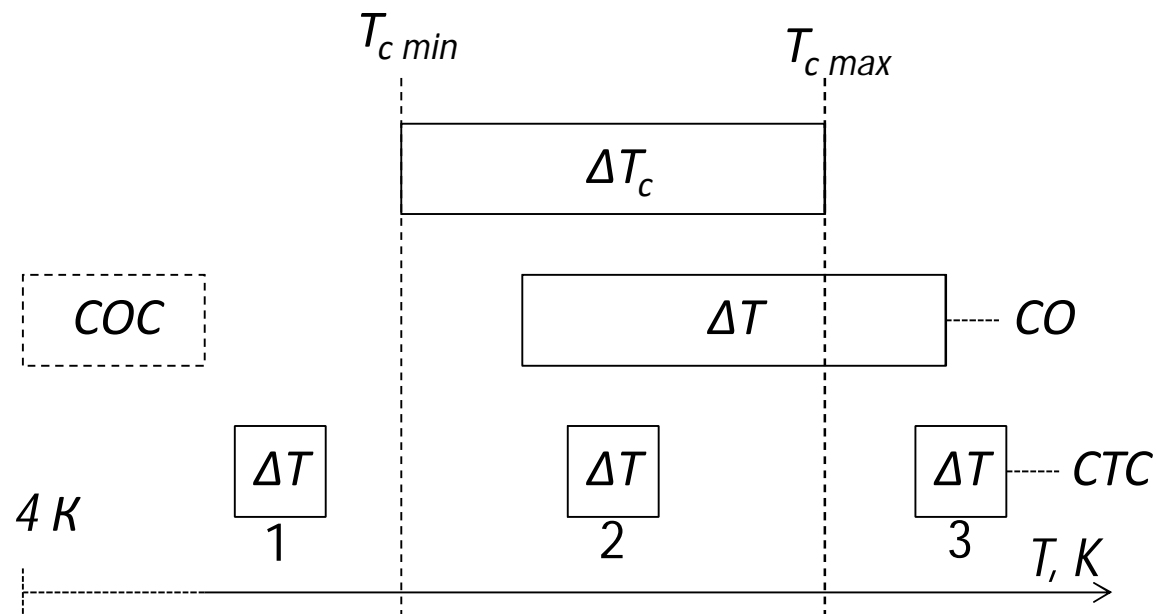
Пассивная стабилизация



Активная стабилизация (эфф. Пельтье)

2.12 Примеры СОТР РЭС. Типы САСТР

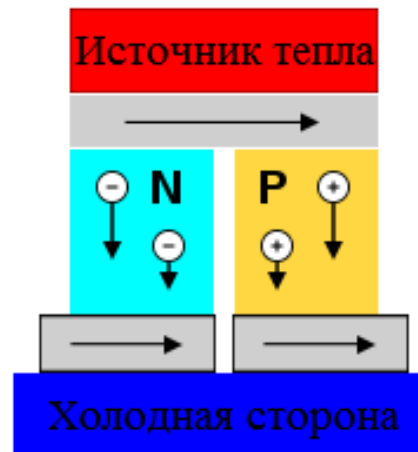
САСТР **нереверсивного** регулирования способны поддерживать температуру объекта в интервалах, лежащих за пределами ΔT_c . На рисунке - это САСТР 1 (холодильники и криостаты) и 3 (термостаты). САСТР **реверсивного** регулирования способны поддерживать температуру объекта в интервале, лежащем внутри ΔT_c , на рисунке - это активный реверсивный термостат 2.



2.12.1 Примеры СОТР РЭС. САСТР реверсивного типа. Эффект Зеебека

Большое распространение получили компактные встраиваемые САСТР реверсивного регулирования, функционирующие на основе **эффекта Пельтье**.

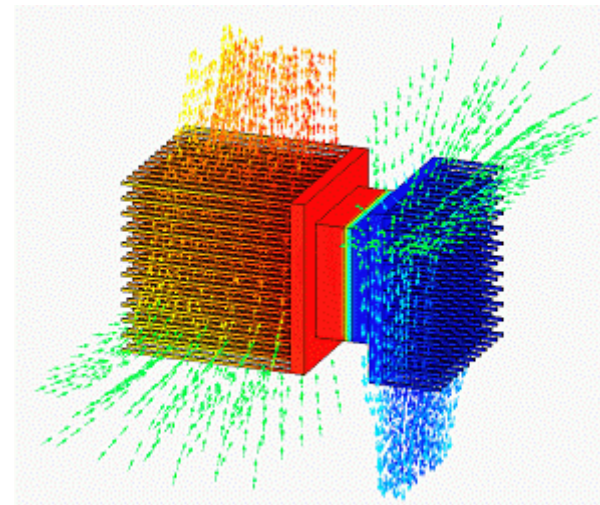
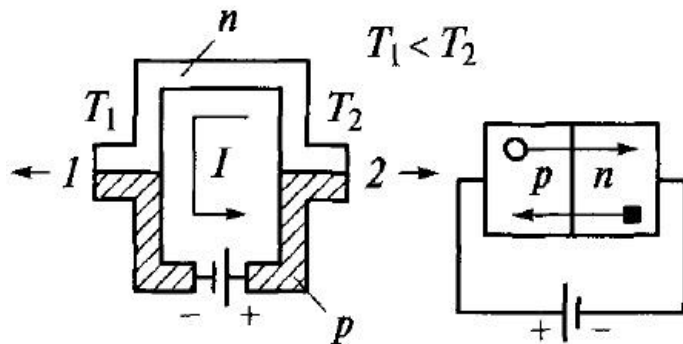
Эффект Пельтье является обратным **эффекту Зеебека**, связанному с возникновением в контуре, составленном из двух полупроводников с разными типами проводимости (n и p), термотока I если один из спаев контура подогреть, а другой — охладить. ТермоЭДС, возникающая из-за диффузии носителей и температурной зависимости контактной разности потенциалов, создает термоток.



Эффект Зеебека

2.12.1 Примеры СОТР РЭС. САСТР реверсивного типа. Эффект Пельтье

Термоэлектрoэлемент - устройство, использующее эффект Пельтье. При заданном направлении тока I в обедненном слое спая I происходит непрерывная генерация пар электрон-дырка, которые под воздействием внешнего поля E движутся в разные стороны; при этом на переброс электрона из валентной зоны в зону проводимости затрачивается некоторая энергия кристаллической решетки, и спай 1 охлаждается. Спай 2 при этом нагревается, так как к нему с разных сторон подходят электроны и дырки, которые, рекомбинируя, отдают энергию в спай 2 в виде теплоты (известное явление теплового насоса). При смене направления тока физические эффекты в спаях 1 и 2 поменяются местами.



Поток теплоты Пельтье:

$$\gamma = \pm \Pi I$$

где Π - коэффициент Пельтье, $\Pi = \gamma T$, В; I - сила тока, А; γ - коэффициент Зеебека,

$$\gamma = \frac{k}{e} \ln \frac{N_n}{N_p}$$

постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; e - заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $N_n \dots N_p$ - концентрация соответственно электронов и дырок в материалах спая).

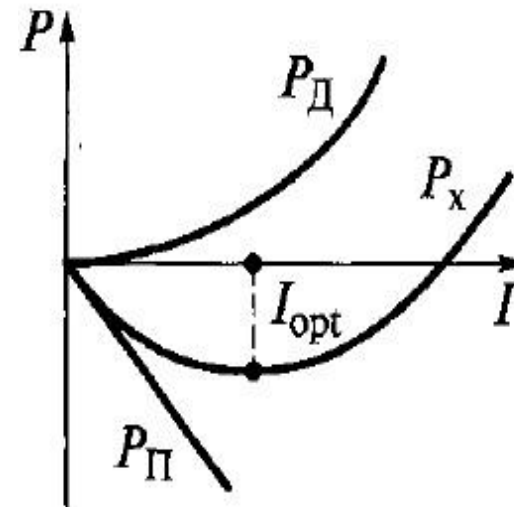
Одновременно с полезным тепловым эффектом на спаях термоэлектрoэлементa проявляются вредные тепловые эффекты, обусловленные свойствами электропроводности и теплопроводности самих полупроводниковых материалов.

Расчет отводимой мощности

Так, в соответствии с законом Джоуля в проводниках возникают тепловые потери $P_d = I^2 R$ (где R - электрическое сопротивление контура); в соответствии с законом Фурье возникают потери, связанные с неидеальностью тепловой развязки спаев $P_\phi = \sigma_T \Delta T$ (где σ_T - тепловая проводимость контура). С учетом этих потерь поток мощности, отводимый от холодного спаев, или холодопроизводительность термоэлемента:

$$P_x = P_\Pi - P_d - P_\phi, \text{ или } P_x = \gamma I T_x - 0,5 I^2 R - \sigma_T \Delta T.$$

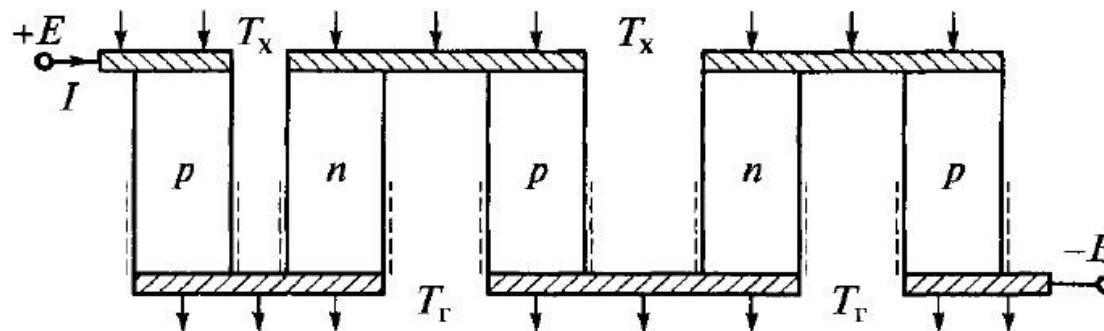
В этих уравнениях теплового баланса холодного спаев учтены выделение «джоулевой» теплоты и влияние конечной теплопроводности материала термоэлектрoэлемента, снижающие его холодопроизводительность. Максимум P_x имеет место при некотором оптимальном значении тока I_{opt} .



Повышение холодопроизводительности термоэлектрoэлемента

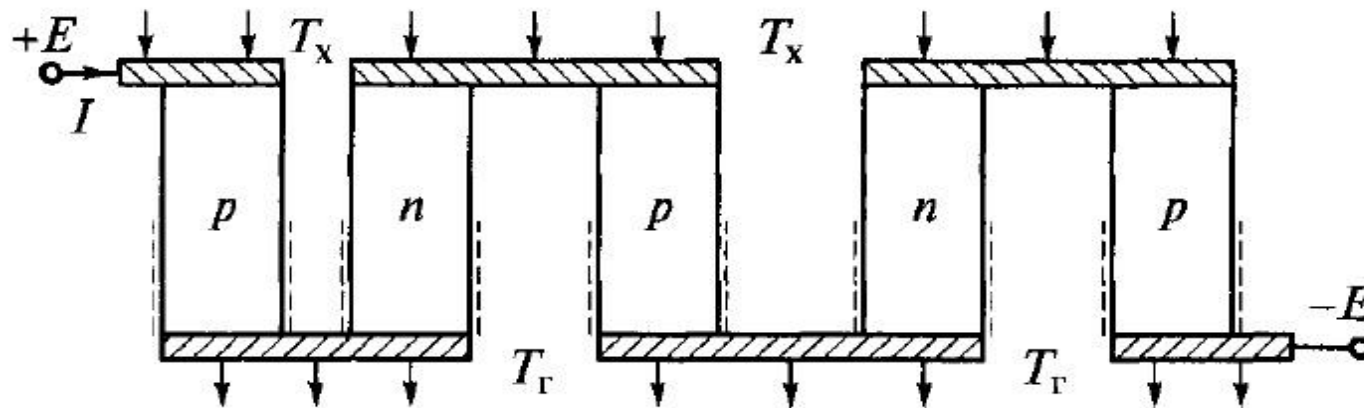
Дальнейшее увеличение мощности отводимого теплового потока возможно путем объединения термоэлектрoэлементов в термоэлектрoбатарею.

Конструктивно ее изготовляют таким образом, что все «холодные» спаи (T_x) вынесены на одну ее поверхность, на которой и размещают охлаждаемый объект, а все «горячие» спаи (T_r) - на другую, имеющую хороший тепловой контакт с аккумулятором тепловой энергии. Для увеличения холодопроизводительности необходимо несколько термоэлектрoбатареи соединить последовательно в тепловую цепь, что потребует дополнительных энергетических затрат.



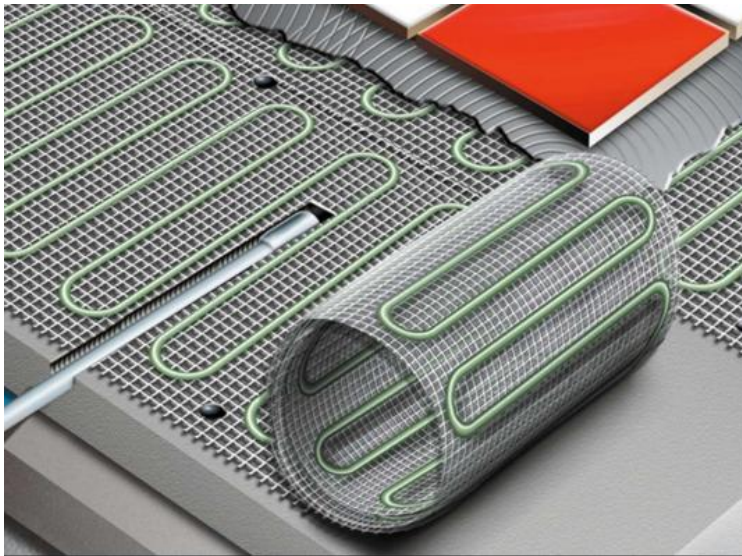
Повышение холодопроизводительности термоэлектрoэлемента. Продолжение

Одним из способов снижения значения P_{ϕ} является покрытие поверхности полупроводниковых секций сегнетокерамической пленкой (на рисунке она показана штрихами). С возрастанием температуры секции возрастает степень поляризации пленки, что приводит к частичному связыванию свободных носителей зарядов полупроводника, переносящих тепло. В то же время действует фоновый механизм передачи теплоты за счет колебаний кристаллической решетки.



2.13.1 Примеры систем нагрева РЭС. Электроподогрев

Повышение температуры поверхности прибора поддерживается за счет термоэлементов, принцип работы которых заключается в протекании электрического тока по проводнику и соответствующего повышения температуры проводника за счет выделяющейся энергии.



2.13.2 Примеры систем нагрева РЭС. Термочехлы

При температуре окружающей среды -60°C температура во внутреннем объеме чехла поддерживает на уровне не ниже $+15^{\circ}\text{C}$.

Также термочехлы выполняют защитную функцию, предохраняя измерительные приборы от осадков, высокой влажности и других климатических факторов.

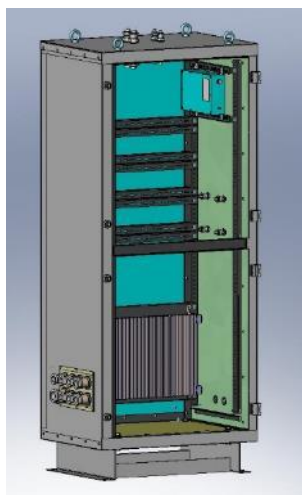
Утепляющие чехлы изготавливаются из материалов не поддерживающих горение и могут дополнительно армироваться металлической сеткой для придания им большей прочности.



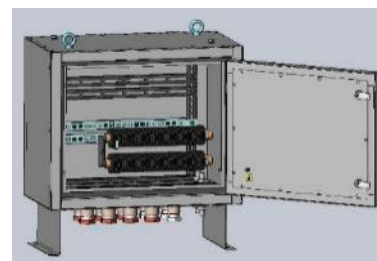
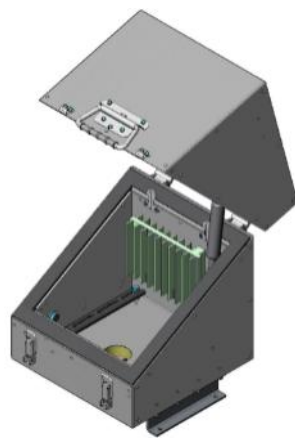
2.13.3 Примеры систем нагрева РЭС. Шкафы утепленные электро- и водогреваемые

Шкафы выпускаются в исполнении для климатических условий УХЛ категории размещения 1 по ГОСТ 15150-96 и применяются для работы в следующих условиях:

- окружающая среда – отсутствие агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металл и изоляцию;
- место установки – неотапливаемые помещения и наружные установки;
- температура окружающей среды от минус 60 °С до плюс 50 °С с относительной влажностью до 95% при температуре 35 °С и более низких температурах без конденсации влаги.



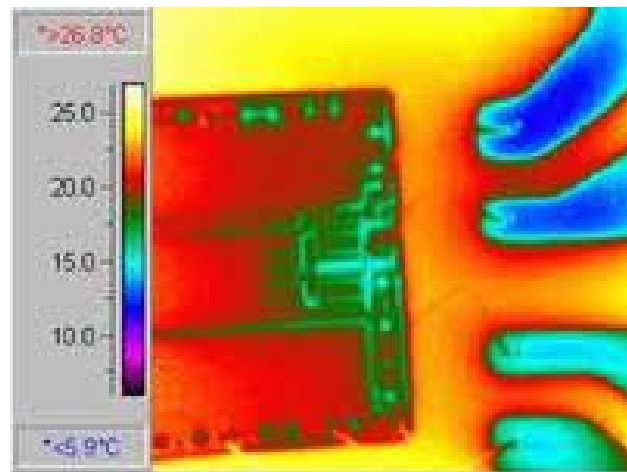
Шкафы электрообогреваемые



Шкафы водогреваемые

3 Расчет тепловых режимов РЭС

Целью расчета тепловых режимов является определение параметров теплового поля конструкции РЭС и сравнение их с допустимыми значениями. Кроме того, для СОТР рассчитываются их теплофизические и конструктивные параметры, обеспечивающие заданный температурный режим тепловыделяющих ЭРК.



Расчетными параметрами теплового поля являются:

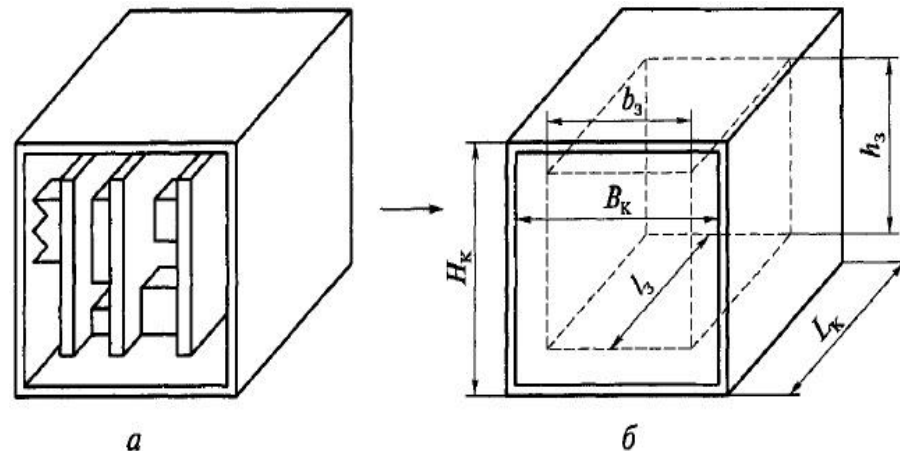
- распределение температуры нагретой зоны $T_3 = f(x, y, z, t, T_c, P)$;
- тепловая характеристика корпуса блока РЭС $\theta_3 = f(P)$ — зависимость перегрева нагретой зоны от мощности внутренних источников.

Для расчета распределения температуры нагретой зоны можно воспользоваться уравнением теплопроводности, приняв допущения о стационарности теплового режима, изотропности среды нагретой зоны и равномерном распределении внутренних источников тепла.

3.1 Параметры расчета тепловых режимов РЭС

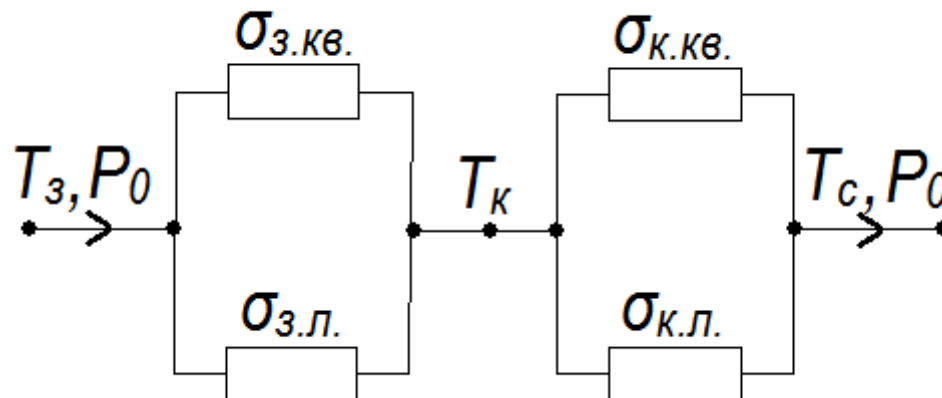
Для определения тепловой характеристики корпуса блока удобен метод последовательных приближений. Рассмотрим основные этапы расчета этим методом. На рисунке показаны фрагменты блока РЭС и его физическая тепловая модель.

Конструктивными параметрами физической модели являются геометрические размеры корпуса (L_K, B_K, H_K) и условной нагретой зоны (l_3, b_3, h_3); теплофизическими параметрами модели являются степени черноты корпуса ϵ_K и нагретой зоны ϵ_3 , а также коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением корпуса ($\alpha_{к.кв}, \alpha_{к.л}$), и нагретой зоны ($\alpha_{3.кв}, \alpha_{3..л}$).



3.2 Пример расчета тепловых режимов РЭС

Для тепловой топологической модели блока приняты следующие допущения: режим теплообмена - стационарный; среда нагретой зоны - изотропная; мощность источников тепловой энергии равномерно распределена по объему нагретой зоны; теплообмен нагретой зоны с корпусом и корпуса с окружающей средой происходит за счет механизмов естественной конвекции и излучения; эффективность теплоотдачи с поверхностей корпуса блока зависит от их положения в пространстве.



3.2 Пример расчета тепловых режимов РЭС

Связь между параметрами тепловой модели описывается следующей зависимостью:

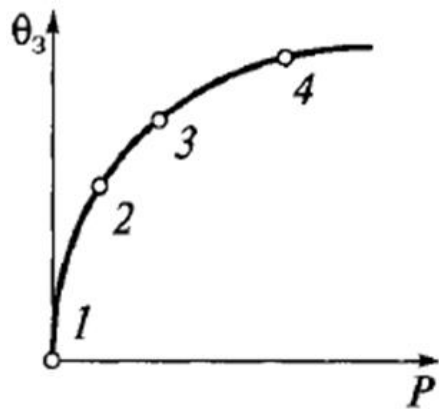
$$T_3 = T_c + P_0 [(\sigma_{3.кв.} + \sigma_{3.л.})^{-1} + (\sigma_{к.кв.} + \sigma_{к.л.})^{-1}]$$

ИЛИ

$$\theta_3 = \theta_k (1 + \sigma_k / \sigma_3),$$

где θ_k — перегрев корпуса, $\theta_k = P_0 / k$; σ_k — тепловая проводимость корпуса, $\sigma_k = \sigma_{к.кв.} + \sigma_{к.л.} = S_K (\alpha_{к.кв.} + \alpha_{к.л.})$ (S_K — площадь поверхности корпуса).

3.2 Пример расчета тепловых режимов РЭС

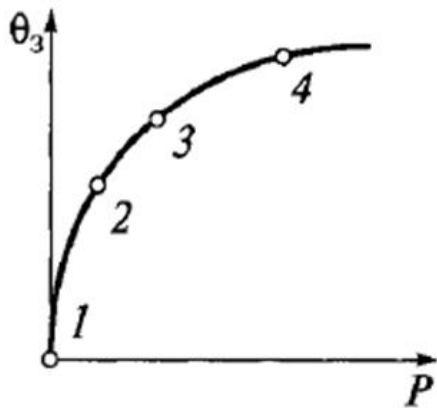


1 ... 4 — расчетные точки тепловой характеристики; P_0 — суммарный тепловой поток; T_3 , T_k , T_c — соответственно температура нагретой зоны, корпуса и окружающей среды; $\sigma_{з.кв.}$ и $\sigma_{з.л.}$ — тепловые проводимости нагретой зоны соответственно для конвективного и лучистого механизмов теплообмена; $\sigma_{к.кв.}$ и $\sigma_{к.л.}$ — аналогичные тепловые проводимости корпуса блока.

σ_3 — тепловая проводимость зоны, $\sigma_3 = \sigma_{з.кв.} + \sigma_{з.л.} = S_3(\alpha_{з.кв.} + \alpha_{з.л.})$ — перегрев нагретой зоны, $\theta_3 = T_c - T_3$ (S_3 — площадь поверхности корпуса). В практических расчетах следует обязательно учитывать различие в эффективности сноса теплового потока со стенок кожуха, его крышки и дна.

3.2 Пример расчета тепловых режимов РЭС

Для построения тепловой характеристики блока рассчитывают несколько ее точек (первая точка - начало координат). Для определения второй точки тепловой характеристики в первом приближении задают значение перегрева $\theta_{к2}$ корпуса. Затем, по известным значениям геометрических и теплофизических параметров корпуса рассчитывают значение тепловой проводимости $\sigma_{к2}$ и значение мощности P_0 теплового потока. При этом начальное значение проводимости σ_3 нагретой зоны в условиях неопределенности значения ее температуры находят по эмпирической формуле: $\sigma_3 = 0,026 S_3/\delta$, где δ — максимальный зазор между поверхностью нагретой зоны и корпусом.



3.2 Пример расчета тепловых режимов РЭС

Определив значения T_{K2} , θ_{32} и T_{32} , уточняют параметры нагретой зоны при определяющей температуре $T_m = 0,5(T_{32} + T_{K2})$ и рассчитывают значения θ_{32} и T_{32} во втором приближении. Если в результате окажется, что разность $\Delta T_{31} = T_{32} - T_{32\text{доп}}^2$, то расчет ограничивают двумя приближениями. Тогда вторая точка тепловой характеристики будет иметь координаты $[P_2, \theta_{32}^{(2)}]$.

Если $\Delta T_{32} \geq T_{32}$, то рассчитывают параметры нагретой зоны в **третьем** приближении при температуре $T_m = 0,5(T_{32}^{(2)} - T_{K2})$.

3.2 Пример расчета тепловых режимов РЭС

Для получения последующих точек тепловой характеристики задают другие значения перегрева корпуса и находят значения перегрева зоны в том же порядке. По рассчитанным точкам строят аппроксимирующую линию тепловой характеристики, которой можно пользоваться для определения значения температуры нагретой зоны для произвольных значений T_C и P_0 .

Дальнейшая детализация анализа теплового режима РЭС состоит в определении температур T_j корпусов отдельных ЭРК с учетом их расположения на поверхности коммутационного основания и реального распределения мощностей P_j по компонентам.

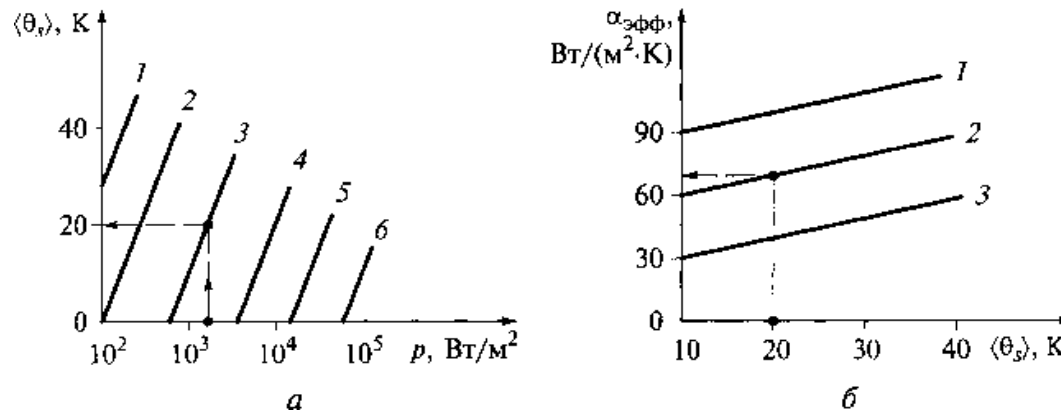
3.2 Пример расчета тепловых режимов РЭС

Расчет конструктивных параметров охлаждающего радиатора, например площади S его основания, начинают с выбора типа радиатора при заданном ориентировочном значении плотности p теплового потока и допустимом значении среднего перегрева (θ_S) основания. Поскольку для радиаторов любого типа справедлив закон Ньютона-Рихмана, то для заданных значений (θ_S) и p площадь основания S может быть определена, если для выбранного типа радиатора известно значение эффективного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{эфф}}$, учитывающего действие и конвективного, и лучевого механизмов теплообмена.

3.3 Графический метод расчета радиаторов

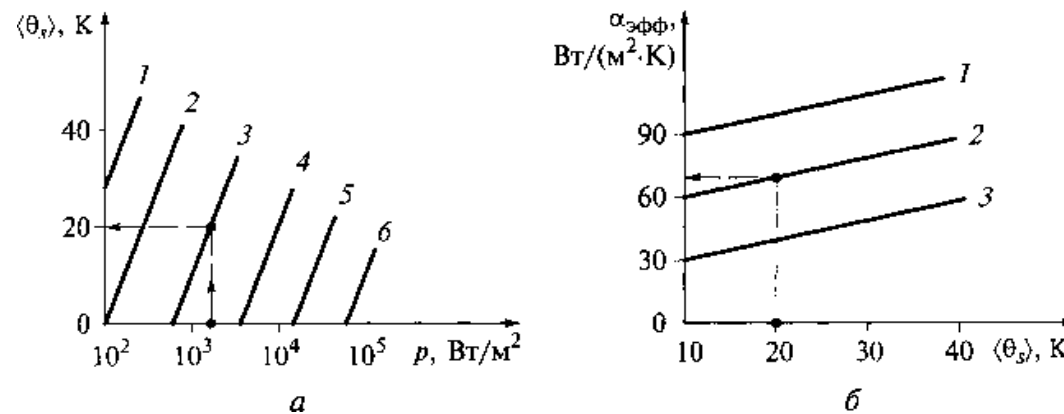
На рис. а представлено семейство экспериментальных зависимостей $\langle \theta_s \rangle = f(p)$ для некоторых типов радиаторов в порядке возрастания их эффективности.

В качестве примера на рис. б представлено семейство зависимостей $\alpha_{эфф} = f(\langle \theta_s \rangle)$ для штыревых алюминиевых радиаторов с диаметром штырей $d = 2,5$ мм, расположенных на пластине с шагом $\delta = 7$ мм при различной их высоте h .



а - выбора типа радиатора по семейству зависимостей $\langle \theta_s \rangle = f(p)$ (1 - пластинчатый; 2 - ребристый; 3 - штыревой; 4 - игольчатый; 5 - проволочный; 6 - жалюзийный); б - определение конструктивных параметров радиатора по семейству зависимостей $\alpha_{эфф} = f(\langle \theta_s \rangle)$ (1 - $h = 32$ мм; 2 - $h = 20$ мм; 3 - $h = 12$ мм)

3.3 Графический метод расчета радиаторов



а - выбора типа радиатора по семейству зависимостей $\langle \theta_s \rangle = f(p)$ (1 - пластинчатый; 2 - ребристый; 3 - штыревой; 4 - игольчатый; 5 - проволочный; 6 - жалюзийный); б - определение конструктивных параметров радиатора по семейству зависимостей $\alpha_{эфф} = f(\langle \theta_s \rangle)$ (1 - $h = 32$ мм; 2 - $h = 20$ мм; 3 - $h = 12$ мм)

Для найденного значения $\langle \theta_s \rangle$ определяют значение $\alpha_{эфф}$ и после подстановки его в уравнение Ньютона - Рихмана находят площадь S основания радиатора, а его линейные размеры - длину и ширину - определяют по конструктивным и компоновочным соображениям.

Выводы

- В результате изучения темы «Обеспечение тепловых режимов приборов контроля» были рассмотрены причины контроля тепловых режимов, а также возможные способы контроля тепловых режимов приборов контроля.
- Были подробно рассмотрены средства обеспечения тепловых режимов РЭУ, изучены схемы подвода тепла к электронным компонентам, а также их охлаждения.
- Приведен пример расчёта тепловых режимов РЭУ, включающая математическую модель тепловых полей.