

ISBN 978-5-6050218-3-4



9 785605 021834 >

О. М. КУЗНЕЦОВА-ТАДЖИБАЕВА *** КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО РЭС

О. М. КУЗНЕЦОВА-ТАДЖИБАЕВА

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

О. М. Кузнецова-Таджибаева

Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств

Учебное пособие

Томск
Издательство ТУСУРа
2024

УДК 621.38.001.63+621.396.6.002:658.562
ББК 32.844-02
К891

Рецензенты:
Гладышев Ю.Г., канд. техн. наук,
Иванова В.С., канд. техн. наук

Кузнецова-Таджибаева, Ольга Михайловна
К891 Основы конструирования и технологии производства радио-
электронных средств : учеб. пособие / О. М. Кузнецова-Таджибаева.
– Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники,
2024. – 251 с.

ISBN 978-5-6050218-3-4

Рассмотрены основные принципы проектирования радиоэлектронных средств с учетом обеспечения электромагнитной совместимости, тепловых режимов, защиты от внешних механических воздействий. Описаны схемотехнические и конструкторские решения для повышения помехозащищенности радиоэлектронных средств. Предложены рекомендации по проектированию печатных плат.

Для студентов технических специальностей.

УДК 621.38.001.63+621.396.6.002:658.562
ББК 32.844-02

ISBN 978-5-6050218-3-4

© Кузнецова-Таджибаева О. М., 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2024

Предисловие

Нас окружает различная электронная техника, которая постоянно совершенствуется. С учетом тенденций миниатюризации, повышения надежности, эргономичности и т. д. процесс конструирования электронных устройств приобретает особую важность, требуя наличия знаний из разных областей науки и техники.

Любое техническое решение обусловлено рядом требований, определяющих внешний вид устройства, удобство его использования, функции. Надежность электронного устройства во многом связана с условиями его эксплуатации, которые могут меняться, поэтому конструктор еще на этапе проектирования должен предусмотреть защиту устройства от воздействия внешних факторов (климатические, механические, электромагнитные и др.). Кроме того, необходимо учесть разные процессы, которые возникают внутри устройства во время эксплуатации под действием протекающих в электрических соединениях токов и приводят к ухудшению качества функционирования.

Среди электронной техники особое место занимают радиоэлектронные средства (РЭС), состоящие из одного или нескольких устройств – радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), работа которой основана на преобразовании сигнала, его передаче и приеме, либо комбинации таких устройств и включающих в себя вспомогательное оборудование. При этом важно, чтобы сохранялась целостность сигнала, т. е. его распространение без искажений. Одно из значимых направлений конструирования современной РЭА – обеспечение ее электромагнитной совместимости (ЭМС), которое становится все актуальнее из-за непрерывного повышения быстродействия и плотности компоновки элементов в устройстве.

Любое устройство состоит из монтажных плат, в которых установлены электрорадиоизделия (ЭРИ), а между собой платы соединены проводным монтажом. Наряду с предусмотренными схемой межсоединениями всегда существуют многочисленные побочные пути распространения электромагнитных сигналов, в том числе опасных.

В настоящем пособии особое внимание уделяется причинам возникновения паразитных связей, путям их распространения, особенностям воздействия на различные объекты, а также мерам по защите РЭА и подавлению помех: выбору печатных плат (ПП), экранированию отдельных ЭРИ или целых функциональных узлов, заземлению устройства, применению помехоподавляющих фильтров.

В процессе эксплуатации на компоненты электронных устройств влияет колебание температуры вследствие изменения условий окружающей среды, а также выделения этими компонентами тепловой энергии. В результате химических реакций и физических процессов материалы, из которых состоит РЭА, постепенно теряют свои свойства. Как правило, под действием высокой температуры материалы деградируют быстрее и вероятность выхода устройства из строя увеличивается. Поэтому конструкция электронного устройства должна обеспечивать такой тепловой режим, в котором его компоненты будут работать стабильно и надежно. Как правило, температурные условия работы теплонагруженных ЭРИ и приборов обеспечиваются системами охлаждения, выбор которых зависит от степени нагрева компонентов, конструкции РЭА и допустимой рабочей температуры.

Все виды РЭА в процессе эксплуатации подвергаются воздействию внешних механических нагрузок, которые передаются каждой детали, входящей в конструкцию, и могут привести к механическому резонансу, усталости материалов и, как следствие, полному разрушению корпуса или отдельных его частей. Задача разработчика РЭА состоит в обеспечении устойчивости и прочности конструкции. Для изоляции устройства от механической энергии применяются амортизационные системы. Повышение защитных свойств достигается более жестким закреплением краев плат, введением ребер жесткости, заливкой плат, ЭРИ на них и других элементов конструкции вибропоглощающим материалом.

Конструктор должен видеть проблему жизнеспособности изделия в целом в условиях его эксплуатации с учетом реальной среды, в которой оно будет функционировать. Процесс поиска конструкторских решений сочетается с непрерывным анализом полученных результатов испытаний изделия или его эксплуата-

ции, и поэтому новое решение должно приниматься обязательно с учетом выявленных дополнительных требований к разрабатываемому изделию. Разработка РЭА приводит к расширению круга профессиональных задач конструктора.

Опираясь на свой многолетний опыт работы инженером-конструктором в научно-производственном центре «Полюс» (г. Томск), автор настоящего пособия охватил основные направления конструирования РЭА. Представлено большое количество примеров реализации конструктивных решений, внедренных при создании надежной аппаратуры, работающей в разных условиях эксплуатации. Предложенные рекомендации для проектирования помехозащищенной вибро- и ударопрочной аппаратуры с оптимальными температурными режимами будут полезны студентам технических специальностей и конструкторам, проектирующим электронные устройства.

1 КАТЕГОРИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ, ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЕЕ КОНСТРУКЦИЮ

1.1 Категории электронной техники

Конструирование (от лат. *construo* – строю, создаю) – процесс создания модели, машины, сооружения, технологии с выполнением проектов и расчетов, процесс определения формы, размеров, взаимного расположения и параметров частей и элементов конструкции, выбора материалов отдельных элементов и разработки конструкторской документации.

Существуют три вида конструирования: умственное (система мыслительных операций), графическое (выполнение эскизов, схем и пр.), предметно-манипулятивное (моделирование или построение опытного образца устройства). Все эти виды взаимосвязаны.

Все многообразие окружающей нас электронной техники можно условно разделить на следующие категории:

- бытовая техника (тостеры, стиральные машины, кухонные плиты, морозильные камеры, холодильники, сотовые телефоны и т.д.);
- оргтехника (системные блоки, мониторы, ноутбуки, копировальные аппараты, сканеры и т.д.);
- узкопрофильное оборудование (медицинская техника, рентгенологическое оборудование, производственные станки и т.д.);
- радиотехника (радиоприемники, ретрансляторы и т.д.);
- оборудование специального назначения (военное, космическое, морское, нефтегазовое и т.д.).

Бытовая техника – электрические механические приборы, которые выполняют бытовые функции, такие как приготовление пищи или чистка. Бытовая техника уже настолько прочно вошла в жизнь современных людей, что без нее представить себе быт практически невозможно. Ко всем бытовым приборам предъявляются требования, регламентируемые нормативными документами [1]. Главные из них – функциональность, удобство в работе

и длительный срок эксплуатации. Также для многих потребителей важен внешний вид и низкое энергопотребление.

Оргтехника (организационная техника) – это оборудование для организации рабочей среды. Без оргтехники в офисе никуда. Требования к оргтехнике предъявляются исходя из нагрузки на оборудование, а также условий эксплуатации. Требования к вычислительной технике определены стандартом [2].

Узкопрофильное оборудование предназначено для выполнения специальных работ в промышленной, производственной, медицинской, строительной и многих других сферах. В первую очередь оно должно быть безопасным, т. е. не должно причинять вред жизни и здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному и муниципальному имуществу в течение назначенного срока службы. Данное оборудование также должно быть прочным с учетом нагрузок, возникающих во время его эксплуатации, транспортировки, монтажа и пр.

Радиотехника – электронная техника, работа которой основана на законах распространения электромагнитных волн. К радиотехнике относится РЭА, которую подразделяют на аналоговую, цифровую, цифроаналоговую. Функции РЭА заключаются в преобразовании и обработке сигналов для получения, например, наиболее качественных характеристик изображения и звука. Основные технические требования к любой аппаратуре, в том числе к цифровым устройствам, – функционально-узловой принцип построения, технологичность, минимальные габариты, масса и номенклатура комплектующих изделий, защита от воздействия климатических и механических факторов, ремонтпригодность.

Оборудование специального назначения предназначено для отдельной отрасли промышленности, а также для выполнения определенных задач заказчика, потребителя. К нему относится специальное технологическое оборудование (химическое, металлообрабатывающее, кузнечно-прессовое, термическое, сварочное и др.), применяемое для выполнения нестандартных операций; контрольно-испытательная аппаратура и оборудование (стенды, пульта, макеты готовых изделий, испытательные установки и др.), предназначенное для регулировок, испытаний изделий и сдачи их заказчику (покупателю); реакторное оборудование; дезак-

тивационное оборудование; оборудование для транспортных средств и др.

В частности, к авиационному можно отнести оборудование для грузовых самолетов и вертолетов, вертолетов скорой помощи, воздушную спецтехнику МЧС и т. д. Водная спецтехника используется на баржах, рыболовецких судах, паромов и т. д. Наземная спецтехника применяется в машинах, передвигающихся по суше, в колесных, гусеничных, рельсовых транспортных средствах. Подводное оборудование используется на военных подлодках, исследовательских подводных судах, подводной строительной технике. Космическая спецтехника предназначена для исследования космоса в составе ракет и спутников, космических кораблей, луноходов и др.

1.2 Требования, влияющие на конструкцию электронной техники

Любое проектное решение всегда обусловлено значительным количеством взаимосвязанных требований и факторов, которые иногда противоречат друг другу. Поэтому при анализе возможных вариантов реализации электронной техники приходится, как правило, искать компромисс и учитывать, какие требования являются приоритетными, а какие второстепенными.

Все требования к электронной технике можно разделить на четыре группы: специальные, эксплуатационные, конструкторско-технологические, экономические [3].

1. Специальные требования описывают область применения, функциональное назначение и иные специфические характеристики электронной техники и в основном учитываются на ранних этапах системотехнического и схематического проектирования. Однако ряд требований, связанных с условиями эксплуатации, приходится выполнять и на этапе конструирования. Специальные требования содержат набор характеристик, используемых для узкого класса технических средств: для источников питания – выходное напряжение, мощность нагрузки, коэффициент стабилизации, коэффициент пульсаций; для усилителей – коэффициент усиления, полоса пропускания, коэффициент искажений, уро-

вень шумов и т. д. Перечень и значения таких характеристик и методы их проверки обычно приводятся в нормативных документах на аппаратуру данного класса.

2. Эксплуатационные требования относятся к удобству использования электронной техники, назначению, надежности, безопасности и экономичности.

– Изделие должно быть простым и эргономичным в использовании. Эргономические требования разделяют на следующие группы:

антропометрические – соответствие форме, размерам и распределению массы тела человека;

физиологические – соответствие силовым, скоростным, энергетическим возможностям человека и его органам чувств;

психологические – соответствие возможностям человека воспринимать, перерабатывать информацию и формировать сигналы управления;

гигиенические – соответствие освещенности, температуры, влажности и других факторов комфортным условиям работы оператора.

– Изделие должно иметь заданный уровень надежности в реальных условиях эксплуатации с учетом комплексного влияния внешних факторов.

– Случайное неправильное обращение с изделием не должно выводить его из строя. Ошибки обслуживающего персонала так или иначе происходят, поэтому должны применяться следующие защитные меры: защита от коротких замыканий на выходе изделия; исключение неправильного подключения кабелей путем применения для различных цепей нестыкующихся друг с другом типов электрических соединителей; размещение поясняющих надписей и другой маркировки на корпусе изделия; защита от неправильной полярности питающего напряжения.

– Должны быть обеспечены удобная сборка и разборка ремонтпригодной электронной техники, легкий доступ к узлам, требующим периодического технического обслуживания.

– Изделие должно быть безопасным в обращении. Необходимо предусмотреть меры, исключаящие либо сводящие к минимуму возможность несчастных случаев.

– Изделие должно быть экологически безопасным.

– Изделие должно иметь минимальные эксплуатационные расходы, связанные с энергопотреблением, охлаждением, заменой быстроизнашивающихся частей, пополнением расходных материалов.

3. Конструкторско-технологические требования связаны с ускорением процесса проектирования и повышением технологичности конструкции.

– Конструкция изделия должна быть максимально простой и обеспечивать заданные технические характеристики.

– Масса и габаритные размеры изделия должны быть минимальными для снижения расходов на материалы, изготовление, упаковку, транспортировку, хранение.

– Материалы должны обеспечивать оптимальное сочетание физических и механических свойств, коррозионную стойкость, технологичность при обработке.

– Целесообразно использовать модульный (блочный) принцип построения изделия.

– Необходимо обеспечивать взаимозаменяемость однотипных узлов и деталей изделия.

– Номенклатура применяемых материалов и деталей должна быть минимальной.

– Целесообразно использовать в новых разработках детали и узлы от ранее выпускаемых изделий (конструктивная преемственность).

– Следует максимально использовать готовые стандартизованные и нормализованные изделия, например готовые корпуса и несущие конструкции.

– Необходимо обеспечить максимальную технологичность сборочных и электромонтажных работ, минимальное количество подгоночных и регулировочных операций.

– При разработке следует учитывать объем выпуска изделия и имеющееся в распоряжении технологическое оборудование.

4. Экономические требования определяют затраты на реализацию технического решения: финансовые расходы, время разработки, количество привлекаемых исполнителей, организационные ресурсы. Для сокращения сроков работ целесообразно поручать

разработку отдельных частей сложного оборудования сторонним организациям, имеющим соответствующий опыт. Не следует применять компоненты со значительно более высокими характеристиками, чем необходимо. Важно помнить, что в стоимость изделия также входят затраты на подготовку производства: разработку техпроцессов, конструирование и изготовление технологической оснастки, приобретение недостающего оборудования, обучение персонала. Поэтому подготовка производства изделий с высокой конструктивной преемственностью будет дешевле и потребует меньших сроков. В каждом случае экономическая оптимизация решения зависит от многих факторов, среди которых один из важнейших – объем выпуска изделия.

Однако экономическая сторона не всегда играет главную роль. Например, в военной технике, системах жизнеобеспечения и других видах специальной аппаратуры при решении вопроса «цена – качество» приоритет отдается достижению максимальной надежности и эксплуатационной эффективности изделия.

1.3 Условия эксплуатации электронной техники

Надежное функционирование электронной техники в значительной степени связано с условиями ее эксплуатации, которые определяются *внешними воздействующими факторами* (ВВФ).

ВВФ – это явления, процесс или среда, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособного состояния изделия в процессе эксплуатации [4].

ВВФ разделяются на следующие классы:

- *климатические*: тепло и холод; относительная влажность воздуха; атмосферные осадки, роса и обледенение; пыль и песок; атмосферное давление; солнечная радиация; ветер; морской туман; коррозионные вещества в окружающей среде;

- *механические*: вибрация, удары (механический, гидравлический, аэродинамический, звуковой), ударная волна, шум; механическое давление; качка, крен, дифферент; сейсмическое воздействие, землетрясение;

– **биологические**: бактерии; плесневые грибы; термиты; организмы, вызывающие обрастание тел в воде, и др.;

– **термические**: тепловой удар; разогрев ионизирующим излучением, электрическим полем, ультразвуком, аэродинамической струей;

– **радиационные**: ионизирующее излучение при распаде радиоактивных частиц;

– **ВВФ специальных сред**: органические и неорганические масла, смазки, растворители; различные виды топлива; рабочие растворы и др.;

– **ВВФ электромагнитных полей**: лазерное излучение.

Перечень и характеристики ВВФ, учитываемых при проектировании, устанавливаются в стандартах на конкретные виды аппаратуры в зависимости от предполагаемого региона эксплуатации и места установки изделия [5].

В зависимости от макроклиматических районов эксплуатации изделия изготавливают в следующих климатических исполнениях:

У – для районов с умеренным климатом;

УХЛ – для районов с умеренным и холодным климатом;

ТВ – для районов с влажным тропическим климатом;

ТС – для районов с сухим тропическим климатом;

Т – для районов как с сухим, так и с влажным тропическим климатом;

О – для всех районов суши, кроме Антарктиды (общеклиматическое исполнение);

М – для районов с умеренно-холодным морским климатом;

ТМ – для районов с тропическим морским климатом;

ОМ – для районов как с умеренно-холодным, так и с тропическим морским климатом, в том числе для судов с неограниченным районом плавания;

В – для всех районов суши и моря, кроме Антарктиды (всеклиматическое исполнение).

В [5] приводится географическая карта, на которой обозначены упомянутые климатические районы. Для каждого климатического исполнения возможны различные категории размещения изделий (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Категории размещения изделий на объекте эксплуатации

Укрупненные категории		Дополнительные категории	
Характеристика	Обозначение	Характеристика	Обозначение
Для эксплуатации на открытом воздухе	1	Для хранения в процессе эксплуатации в помещениях категории 4 и работы как в условиях категории 4, так и (кратковременно) в других условиях, в том числе на открытом воздухе	1.1
Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, а также в оболочке комплектного изделия категории 1	2	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории размещения 1; 1.1; 2, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах	2.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше	3	Для эксплуатации в нерегулярно отапливаемых помещениях	3.1

Окончание таблицы 1.1

Укрупненные категории		Дополнительные категории	
Характеристика	Обозначение	Характеристика	Обозначение
Для эксплуатации в помещениях с искусственными регулируемые климатическими условиями	4	Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом	4.1
		Для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других помещениях подобного типа	4.2
Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (шахты, подвалы, трюмы, в которых возможно длительное наличие воды)	5	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов изделий категории 5, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах	5.1

Сочетание исполнения и категории – вид климатического исполнения. Например, УХЛ1 означает, что изделие предназначено для районов с умеренно-холодным климатом и может эксплуатироваться на открытом воздухе. В зависимости от климатических факторов выбираются исполнение и категория размещения изделия. Вид климатического исполнения указывают во всей документации, в том числе эксплуатационной.

К некоторым изделиям предъявляются требования по обеспечению устойчивости к проникновению твердых предметов и воды при эксплуатации. Защита изделий от данных факторов обеспечивается с помощью корпуса.

Степень защиты устанавливается [6], обозначается буквами IP и следующими за ними двумя цифрами, например IP54. Первая цифра обозначает степень защиты изделия от проникновения внутрь твердых тел и пыли, а вторая – от попадания воды (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Степень защиты корпуса

Цифра	Защита от проникновения твердых тел	Защита от проникновения воды
0	Нет защиты	Нет защиты
1	Защищено от доступа к опасным частям тыльной стороны руки и твердых тел диаметром больше или равным 50 мм	Защищено от вертикально падающих капель воды
2	Защищено от доступа к опасным частям пальцем и твердых тел диаметром больше или равным 12,5 мм	Защищено от вертикально падающих капель воды, когда оболочка отклонена на угол 15°
3	Защищено от доступа к опасным частям инструмента и твердых тел диаметром больше или равным 2,5 мм	Защищено от воды, падающей в виде дождя
4	Защищено от доступа к опасным частям проволоки и твердых тел диаметром больше или равным 1,0 мм	Защищено от сплошного обрызгивания
5	Пылезащищено	Защищено от водяных струй
6	Пыленепроницаемо	Защищено от сильных водяных струй
7	Не предусмотрено	Защищено от воздействия при временном (непродолжительном) погружении в воду
8	Не предусмотрено	Защищено от воздействия при длительном погружении в воду
9	Не предусмотрено	Защищено от горячих струй под высоким давлением

Обозначение IP (Ingress Protection Code – коды защиты от проникновения) – это классификация способа защиты, обеспечиваемого оболочкой технического изделия от доступа к опасным частям, попадания твердых предметов и воды. Если знать расшифровку обозначения, можно продлить срок службы любого оборудования, бережно его эксплуатируя. Например, бытовая электрическая розетка может иметь степень защиты IP22 – она защищена от проникновения пальцев и не может быть повреждена вертикально или почти вертикально капающей водой.

Показатели IP важны при выборе того или иного технического устройства применительно к условиям, в которых оно будет эксплуатироваться. Например, если оборудование предполагается использовать на открытом воздухе, то его корпус должен позволять проводить работы в условиях повышенной влажности, загрязнений. В состав кода после цифр при необходимости могут входить дополнительные буквы, которые обозначают степень защиты людей от доступа к опасным частям (например, IP23CS). Дополнительные буквы используются, если действительная степень защиты выше, чем обозначенная первой цифрой. Первая дополнительная буква:

- А – защищено от доступа к опасным частям тыльной стороной кисти;

- В – защищено от доступа к опасным частям пальцем;

- С – защищено от доступа к опасным частям инструментом;

- D – защищено от доступа к опасным частям проволокой.

Вторая дополнительная буква:

- Н – высоковольтное оборудование;

- М – оборудование с движущимися частями испытано на соответствие степени защиты от вредных воздействий, связанных с проникновением воды, с движущимися частями, находящимися в состоянии движения;

- S – оборудование с движущимися частями испытано на соответствие степени защиты от вредных воздействий, связанных с проникновением воды, с движущимися частями, находящимися в состоянии неподвижности.

Контрольные вопросы

1. Какие категории электронной техники существуют?

2. Какие требования предъявляются к каждой категории электронной техники?

3. Назовите требования, влияющие на конструкцию электронной техники.

4. Что называется ВВФ?

5. На какие классы разделяются ВВФ?

6. Что означают цифры в обозначении степени защиты согласно ГОСТ 14254–2015?

2 БАЗОВЫЕ НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭРГОНОМИКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

2.1 Задачи и методы компоновки электронной техники

Компоновка – это процесс создания из отдельных составных частей функционально законченной конструкции устройства или системы. В процессе компоновки решаются следующие задачи:

- выбор корпуса устройства с учетом заданных условий эксплуатации;
- обеспечение устойчивости к дестабилизирующим воздействиям (влага, пыль, вибрация, электромагнитные помехи и др.);
- выбор типов и мест расположения элементов индикации с учетом эксплуатационных и эргономических требований;
- распределение электронных компонентов по ПП;
- обеспечение охлаждения устройства в целом и его отдельных элементов;
- компоновка составных частей внутри корпуса;
- разработка печатного и объемного электрического монтажа.

Прежде всего необходимо выбрать корпус устройства: унифицированный или специально разработанный. Корпус собственной конструкции, как правило, способен наиболее полно удовлетворить требования технического задания, но для него необходимо разработать рабочую документацию и технологию изготовления, приобрести материалы и комплектующие изделия. В связи с этим при проектировании электронной техники широко используют базовые несущие конструкции, которые производятся специализированными предприятиями по отработанной технологии – это гарантирует высокое качество и относительно невысокую стоимость изделий.

При конструировании электронных систем в зависимости от варианта расположения отдельных блоков используют централизованную или децентрализованную схему компоновки.

При централизованной схеме отдельные устройства системы в виде блоков устанавливаются в одном месте (шкаф, стойка, пульт, стеллаж и т. д.). Преимущества этой схемы: минимальная длина соединительных кабелей, возможность использования общего источника питания, удобство обслуживания. Недостатки: усложнение естественного охлаждения аппаратуры, ухудшение ЭМС устройств.

Причинами децентрализации могут являться:

- отсутствие свободного пространства для установки всей аппаратуры в одном месте, что характерно для бортового оборудования подвижных объектов (самолеты, корабли, автомобили и др.);

- необходимость устранения влияния длинных линий на результаты измерения в системах сбора и обработки информации, что заставляет устанавливать электронные преобразователи рядом с датчиками.

Для конструирования электронной техники применяются моносхемный, схемно-узловой и функционально-узловой принципы компоновки. При моносхемном принципе все электронные компоненты размещаются на одной ПП. Схемно-узловой принцип используется при дроблении сложных функциональных узлов и предполагает расположение на ПП части функциональной схемы, имеющей четко выраженные входные и выходные характеристики. При функционально-узловом принципе отдельные электронные модули являются функционально и конструктивно законченными.

Компоновку осуществляют тремя основными методами, дополняющими друг друга: аналитическим, графическим и модельным. Аналитическая компоновка проводится на начальном этапе конструирования для решения следующих задач: выбор типоразмера унифицированного корпуса; оценка линейных размеров и объема устройства; обоснование необходимого количества и размеров ПП и др. Графическая компоновка производится путем вычерчивания частей устройства на бумаге или экране компьютера и проработки различных вариантов их расположения. Результатом графической компоновки является чертеж устройства. Модельная компоновка позволяет найти оптимальный вариант расположения

составных частей устройства. Для этого используют плоские или объемные модели элементов, выполненные в одинаковом масштабе. Объемные модели выполняются с помощью систем автоматизированного проектирования.

2.2 Базовые несущие конструкции

Несущая конструкция – это элемент или совокупность конструктивных элементов, предназначенных для размещения составных частей изделия, обеспечения их конструктивной целостности и неизменности в соответствии с конструкторской документацией. Несущая конструкция, имеющая стандартизованные размеры и конструктивное решение, обязательное при конструировании электронных средств различного функционального назначения, называется **базовой несущей конструкцией** (БНК). Выделяют три структурных уровня БНК:

– **БНК1** (ячейка, кассета и др.) предназначена для размещения электронных модулей нулевого уровня, изделий электронной техники и электротехнических изделий, для создания электрических модулей первого уровня цифровой и аналоговой РЭА, модулей от низкочастотного до сверхвысокочастотного диапазона, а также модулей систем вторичного электропитания и управления. БНК1 может быть каркасного и бескаркасного типа, иметь защитный экран, радиатор и герметичный корпус. БНК1 устанавливают в конструкции более высокого уровня по направляющим (рисунок 2.1).

Обязательными элементами БНК1 являются ключи и ловители, обеспечивающие соблюдение однозначной установки и взаимной ориентации сочленяемых частей РЭА, а также фиксаторы, предназначенные для удержания сочлененных частей в строго определенном положении.

– **БНК2** (отдельный блок, вставной блок, блочный каркас и др.) предназначена для размещения электронных средств, выполненных на основе БНК1. БНК2 является сборочной единицей, состоящей из боковых рам, соединенных профилями или стяжками, или монолитных конструкций (см. рисунок 2.1), и служит для

размещения БНК1, ЭРИ и деталей, имеет лицевую и заднюю панели, а также фиксирующие элементы. На передней панели размещаются элементы индикации и управления, на задней монтируются электрические соединители. БНК1 размещают в БНК2 в один или два ряда по высоте. Корпус БНК2 может иметь защитный кожух или входить в состав более крупных изделий.



Рисунок 2.1 – Установка БНК1 в БНК2

— **БНК3** предназначена для размещения электронных средств, выполненных на основе БНК2 и (или) БНК1, и создания электронных модулей третьего уровня. Основу БНК3 составляют вертикальные и горизонтальные профили, а также межэтажные перегородки и рамы с направляющими для установки БНК1 и БНК2. К БНК3 относятся стойки, корпуса шкафов, пультов, моноблоков, стеллажи, тумбы, секции, приборные столы и монтажные рамы (рисунок 2.2). Для удобства перемещения БНК3 могут быть снабжены колесами.

Вся сложная электронная техника в настоящее время строится на основе БНК, что обусловлено преимуществами принципов модульности, стандартизации и унификации. Применение БНК обеспечивает конструктивную совместимость электронных модулей и их взаимозаменяемость по габаритным и монтажным раз-

мерам. Конструирование при этом сводится к разработке новых ПП, межблочного монтажа и передних панелей.



Рисунок 2.2 – БНКЗ

Существуют каркасные и бескаркасные БНК. У первых стойкость, прочность, жесткость и устойчивость конструкции обеспечивается наличием каркаса, у вторых – совокупностью составляющих БНК элементов.

Системы построения БНК основываются на унификации координатных, установочных и присоединительных размеров изделий, при этом определяющим фактором является шаг модульной сетки. В зависимости от выбранных единиц измерений различают метрические (размеры в миллиметрах) и дюймовые (размеры в дюймах) конструктивы. Для БНК в качестве базовых приняты

размерные модули 2,5 мм (для координатных размеров БНК1 и присоединительных размеров БНК всех уровней) и 25 мм (для координатных размеров БНК2 и БНК3) [7].

В рамках международного 19-дюймового стандарта МЭК 297 (1 дюйм = 25,4 мм) вертикальные посадочные размеры данных БНК кратны 1,75 дюйма (44,45 мм), горизонтальные – 0,2 дюйма (5,08 мм). Ширина передней панели блочного каркаса – 19 дюймов. Новый метрический стандарт МЭК 917 предназначен для совмещения метрических и дюймовых конструктивов. Размеры модулей в МЭК 917 построены по координатной сетке с шагом 25 мм по всем трем осям, а для более легких элементов конструкции – с шагом 2,5 мм или 0,5 мм.

Ряд фирм предлагает готовые БНК, которые с минимальными усилиями могут быть приспособлены для различного применения. Готовые конструктивы ведущих производителей обеспечивают надежную защиту оборудования, удобство для разработчика и потребителя, а также привлекательный внешний вид. Стоят они дешевле самодельных аналогов, так как являются продуктом крупносерийного производства. Некоторые типы изделий сертифицированы для эксплуатации в особых условиях: во взрывоопасных зонах; при внешних механических воздействиях, электромагнитных помехах.

2.3 Эргономика и техническая эстетика в проектировании электронной техники

Основная часть электронных компонентов РЭА располагается на ПП. На лицевую панель устройства выводятся индикаторы, органы оперативного управления, часто используемые соединители. На задней и боковых стенках монтируются соединители для подключения питания и внешних устройств, держатели предохранителей и другие элементы, к которым необходим свободный доступ в процессе монтажа и эксплуатации. Периодически используемые подстроечные резисторы, к которым необходимо обеспечить доступ без вскрытия корпуса блока, выводятся «под шлиц». Подстроечные и регулировочные элементы желательно

располагать на ПП – как с точки зрения технологичности сборки и надежности, так и для обеспечения помехозащищенности РЭА. Крупногабаритные и тяжелые элементы – трансформаторы, массивные электролитические конденсаторы, мощные резисторы, радиаторы – монтируются на шасси прибора. Элементы, выделяющие значительное количество тепла, устанавливаются на металлических стенках корпуса или радиаторах.

Компоновку лицевой панели производят с учетом требований эргономики и технической эстетики.

Эргономика – это область знания, изучающая взаимодействие человека и технической среды в процессе использования оборудования или инструментов [8]. В узком смысле под эргономикой понимают свойства материальных объектов, позволяющие их использовать с максимальным удобством, без дополнительных трудностей, препятствий и дискомфорта.

Одной из основных категорий эргономики является **человеческий фактор** – понятие в рамках предельно общего уровня анализа социальной реальности, специфически обозначенная функция человека в системе социальных, экономических, производственных, организационно-управленческих и прочих отношениях, т. е. всего того, что относится к нему как к субъекту деятельности в различных сферах общественной жизни [9]. При разработке электронного устройства, предназначенного для эксплуатации человеком, нужно знать и понимать три наиболее важных аспекта взаимодействия человека и машины – сенсорный, моторный и психофизиологический.

Сенсорный аспект подразумевает учет сенсорных способностей человека. Информация из окружающего мира поступает через органы чувств человека, формируя биосигналы, которые после их преобразования дают зрительные, слуховые, осязательные, обонятельные и вкусовые образы. В бытовой обстановке информация, поступающая из внешней среды, распределяется следующим образом: зрительная – 90 %, слуховая – 7 %, тактильная – 3 %. На остальные анализаторы приходятся доли процента.

Зрительная система человека воспринимает электромагнитные колебания (видимый свет) в диапазоне волны примерно 380–720 нм (точные границы индивидуальны). Глаз также различает

яркость цвета, т. е. насыщенность светового потока. При этом яркость разных цветов воспринимается по-разному. Глаз наиболее чувствителен в середине спектра (зеленый цвет), а наименее – по его краям (фиолетовый и красный цвет) (рисунок 2.3).

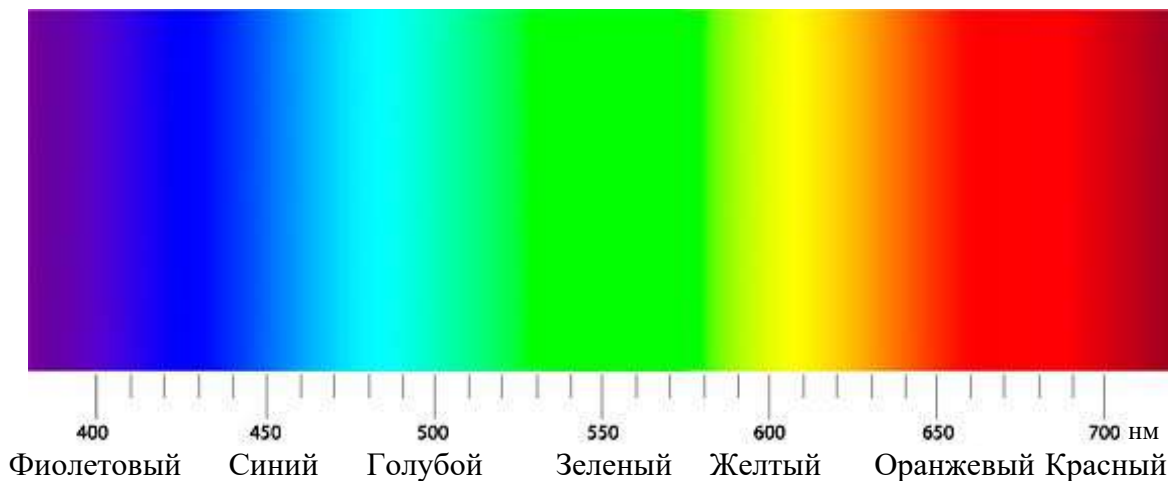


Рисунок 2.3 – Видимый спектр света

Адаптация глаза к разной яркости занимает время (время адаптации). Поэтому, если оператор работает с яркими объектами или при ярком свете, индикаторы и/или дисплей прибора должны быть умеренно яркими. Если они будут тусклыми, время адаптации глаза при переводе взгляда увеличивается, а также раньше наступит утомление. Напротив, при работе в условиях невысокой яркости дисплей и индикаторы не должны быть излишне яркими. Если прибор будет использоваться в разных условиях (например, переносное оборудование, предназначенное для работы как в помещении, так и на улице), то целесообразно предусмотреть регулировку яркости.

Также нужно учитывать остроту зрения, т. е. способность различить детали предметов на расстоянии. Рекомендуется использовать следующие размеры знаков на дисплеях: при расстоянии 0,5 м – не менее 3 мм; при расстоянии 2 м – не менее 12 мм. При большем расстоянии необходимо пропорционально увеличивать размер знаков. Если у пользователей слабое зрение, размеры знаков необходимо существенно увеличить.

При расположении дисплея необходимо учитывать следующие особенности. Направление взгляда человека в естественном

положении составляет 5° ниже линии горизонта, а средний рост мужчин и женщин в России составляет 175 и 165 см соответственно. Поле зрения, в котором глаз четко различает символную и графическую информацию, составляет 30° в каждую сторону от направления взгляда, а предельный угол обзора – $\pm 60^\circ$ по вертикали и $\pm 90^\circ$ по горизонтали.

Вторая по важности сенсорная система человека – слух. Поэтому в электронных устройствах целесообразно использовать звуковые сигналы для информирования о выполнении операций. Для звуковых сигналов характерны определенная длительность и тональность. Человеческий слух воспринимает звуки в диапазоне приблизительно от 20 Гц до 20 кГц, а наиболее чувствителен на частоте 2–5 кГц. Люди по-разному различают тональность и запоминают звуки. При использовании нескольких видов звуковых сигналов лучше варьировать не только их тональность, но и, например, длительность. Громкость сигнала должна быть оптимальной, с возможностью регулировки.

При взаимодействии с техникой стоит также учитывать осязание. Человек может ощущать прикосновение, давление, рельеф, температуру поверхности. Достоверней всего человек воспринимает сигналы, поступающие одновременно по нескольким каналам восприятия, например зрительному и слуховому.

При поступлении информации от устройства к оператору происходит ее анализ, выработка решения и реакция. Как правило, время выработки решения составляет не менее 0,1 с, в зависимости от скорости реакции оператора. Далее следует **моторная** реакция – воздействие на органы управления (нажатие кнопок, поворот переключателей и т. д.), характеризуемое силой и скоростью.

Органы управления необходимо подбирать исходя из характера основной деятельности человека, который будет эксплуатировать устройство. Они должны требовать приложения небольшого усилия для коммутации, которое исключает ложное или преждевременное нажатие, а также непредвиденное переключение через несколько позиций. Для обеспечения более четкой обратной связи, чтобы оператору не приходилось прикладывать большее усилие или дополнительно нажимать кнопку, лучше ис-

пользовать кнопки или переключатели с более выраженным осязанием срабатывания (ощущением «щелчка»), сопровождать срабатывание звуковой и/или световой индикацией.

Органы индикации и управления должны располагаться, по возможности, в поле зрения и соответствовать антропометрическим характеристикам – росту, расположению (сидя или стоя), длине рук и т. д. Кнопки экстренного реагирования (аварийное отключение и др.) должны находиться вблизи правой руки оператора.

Полезные рекомендации по эргономике пультов управления содержатся в [10].

При выборе типа и расположения органов управления и индикации необходимо также учитывать *психологические* и *психофизиологические* особенности человека. Информацию следует представлять так, чтобы воспринимать ее можно было максимально быстро и удобно. Так, мониторинг до четырех индикаторов одновременно, как правило, не создает значительной нагрузки на когнитивную систему человека. При большем же количестве имеет смысл предусмотреть дополнительные средства, например индикаторы выхода параметров процесса за установленные пределы.

Цвет индикаторов также имеет значение. Например, красный обычно воспринимается как опасность, а зеленый – как норма.

Громкий и низкий звук также воспринимается как индикатор опасности. Высокочастотные звуки, а также слепящий свет, перепады яркости, необходимость часто поворачивать голову, анализ сложной для восприятия информации приводят к быстрому утомлению. Преобладающие цветовые тона могут влиять на эмоциональное состояние: так, оранжевый успокаивает, белый и синий тонизируют, розовый и фиолетовый возбуждают и при длительном воздействии могут вызывать раздражительность.

Органы управления можно ранжировать по степени значимости выполняемых действий. Для типовых операций целесообразно использовать устройства, требующие малого усилия для коммутации. Более важные органы должны требовать более значительного усилия для срабатывания и иметь четко выраженную обратную реакцию. Размеры органов управления можно регули-

ровать по такому же принципу, но отличия должны быть незначительны.

Органы управления следует располагать в соответствии с порядком выполнения типовых манипуляций и движением руки оператора от одного органа к другому. Если орган управления изменяет информацию на индикаторном устройстве, то его следует располагать в непосредственной близости от индикатора, чтобы в процессе регулировки было удобно наблюдать за изменением показаний. Увеличение индуцируемого параметра должно производиться вращением ручки по часовой стрелке либо ее перемещением слева направо или снизу вверх. У тумблеров положение ручки «Вверх», «Вправо», «От себя» должно соответствовать состоянию «Включено». Если тумблеры и кнопки расположены в ряд, то расстояние между их осевыми линиями должно быть не менее 19 мм, а при работе в перчатках – не менее 25 мм [11].

В настоящее время большое значение имеет дизайн устройства. Часто эффектный внешний вид создает у потенциального покупателя ощущение более высокого качества. Конструктор должен постоянно расширять свой художественный кругозор, например, путем анализа уже существующих решений.

Художественно-эстетическое оформление технических средств изучает *техническая эстетика*. Задачей технической эстетики и дизайна является создание гармоничной и комфортной для человека предметной среды. Конечно, художественное оформление – творческий и субъективный процесс, зависящий от видения, убеждений, представлений о мире конструктора. Однако в технической эстетике есть категории, подчиняющиеся рационально-логическому анализу – это гармоничность, выразительность, оригинальность, стиль, цвет.

Гармоничность конструкции предполагает, что отдельные ее детали и узлы должны быть сочетаемы друг с другом по обозначениям, размерам, форме, цвету, взаимному расположению. Желательно, чтобы внешний вид устройства сочетался с фоном, т. е. окружающим пространством, в котором устройство будет эксплуатироваться.

Выразительность – способность конструкции своим внешним видом наглядно отражать свойства и качество устройства. Выразительный внешний вид получается в результате целостности художественного стиля и соответствия художественного образа, воплощенного в конструкции, свойствам и назначению устройства.

Оригинальность – совокупность своеобразных элементов и деталей в конструкции, позволяющих отличить данное изделие от общей совокупности других изделий. Оригинальность не должна нарушать гармоничность внешнего вида и противоречить общему представлению целевых пользователей о конструкциях подобного рода устройств. Оригинальность может быть отличительным признаком производителя электронных устройств.

Стиль – это устойчивая общность художественных приемов и средств, отражающая социально-экономические, культурные, идейно-эстетические принципы определенного направления технической эстетики. С точки зрения стиля оформление устройства может быть классическим, современным, утилитарным, футуристичным и т. д. Используемый в конструкции стиль должен соответствовать социальной группе целевых пользователей.

Цветовая гармония формируется за счет совокупности использованных цветовых решений. Сочетанием цветов можно создать впечатление определенных габаритов, формы, массы и даже температуры. Цветом можно выделять определенные детали конструкции, подразделять ее на структурные элементы, формировать эмоционально-окрашенное восприятие пользователя.

Совокупность всех использованных художественных приемов формирует композицию, т. е. восприятие устройства как единого, цельного художественного образа. Средствами композиции также являются симметрия, пропорциональность, фактура элементов конструкции.

При разработке следует учесть влияние художественных решений на конечную себестоимость устройства. Целесообразно искать разумный компромисс между получаемым результатом и затратами, чтобы обеспечить экономическую эффективность проектной работы.

В целом техническая эстетика ориентирует действия разработчиков на очеловечивание технического средства. Таким образом, минимальная работоспособность сотрудников зависит не только от затраченных ими физических усилий, но и от таких, казалось бы, «мелочей», как непродуманный цвет оборудования и даже неудобная форма рукоятки инструмента. Техническая эстетика – это творческая деятельность. Она направлена на развитие и регулирование предметной среды с целью достижения целостности и единства ее многофункциональных и эстетических нюансов.

Проектируя оборудование, конструктор должен придать изделию не только форму, но и эмоциональную выразительность. Кроме того, следует принимать во внимание такие детали, как красота и польза, рациональность конструкции и технологичность ее изготовления при проектировании не только бытовой техники, но и узкопрофильного оборудования и техники специального назначения.

Контрольные вопросы

1. Что называется компоновкой?
2. Какие задачи решаются в процессе компоновки РЭА?
3. Какие методы компоновки существуют?
4. Что называется несущей конструкцией?
5. Что называется БНК?
6. Какими факторами эргономики следует руководствоваться при проектировании электронной техники?
7. Какие категории включает в себя техническая эстетика?

3 ВИДЫ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ

3.1 Емкостная, индуктивная и гальваническая паразитные связи

В любых РЭА и РЭС, наряду с предусмотренными схемой межсоединениями, всегда существуют многочисленные побочные пути распространения электрических сигналов, в том числе опасных. Эти пути создаются в результате паразитных связей и наводок, которые, в свою очередь, обусловлены полями, создаваемыми электрическими зарядами и токами в цепях РЭС и действующими на элементы и цепи других устройств и систем. Известны три вида паразитных связей: емкостная, индуктивная и гальваническая (связь через общее сопротивление) [12].

Емкостная связь образуется в результате воздействия электрических полей между любыми элементами схемы (провода, печатные проводники, радиоэлементы и пр.) и корпусом. Речь идет не о конденсаторах, входящих в состав элементной базы, которые могут играть положительную роль, как, например, емкость между слоем питания и общим слоем земли в составе многослойных ПП. Имеются в виду емкости, которые могут оказывать отрицательное влияние, выступая в качестве скрытых (паразитных) параметров, вызывающих синфазные помехи (составляющая аналогового сигнала, присутствующая с одним знаком, амплитудой и фазой на всех рассматриваемых выводах, определяется как полусумма напряжений). Непредвиденные контуры нежелательных токов, протекающих по проводящим элементам конструкции, могут иметь значительную площадь, повышая уровень помехоэмиссии и восприимчивости к воздействию внешних полей. Вследствие емкостной связи могут возникать перекрестные помехи в линиях передачи (при которых сигнал, передаваемый по одной цепи, создает амплитудные и фазовые искажения в другой), а также электростатические разряды (ЭСР) в материалах конструкции РЭА. Паразитная емкость прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды, диаметру проводов и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

Уровень паразитной емкостной связи между рядом расположенными устройствами определяется суммой их собственных емкостей. Электрическое поле в любой точке между проводниками пропорционально заряду Q на каждом из них. Разность потенциалов U_{ab} между проводниками также пропорциональна заряду. Это отношение называют конденсаторной емкостью:

$$C = \frac{Q}{U_{ab}}.$$

Емкостная паразитная связь возникает главным образом в схемах с высоким волновым сопротивлением (более 377 Ом), когда проводники и иные незаземленные участки воспринимают или генерируют электрические поля. Очень часто это явление встречается в ПП без встроенного слоя земли [13]. Волновое сопротивление Z в свободном пространстве определяют две фундаментальные величины: магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и диэлектрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377 \text{ Ом}.$$

Электрическая емкость зависит только от геометрических параметров проводников и диэлектрической проницаемости окружающей среды, т. е. от конструкторских параметров. Выбирая материалы, геометрические и физические размеры элементов конструкции и монтажа, конструктор тем самым задает емкостные параметры РЭА. Отношения емкостей в двух геометрически подобных системах проводников равны отношению собственных размеров этих систем. Таким образом, чем больше размер объекта, тем больше емкость системы. Соответственно емкость более широких проводников будет больше. Увеличение диэлектрической проницаемости среды, например нанесением лакового покрытия на поверхность проводника за счет вытеснения воздуха, также приводит к увеличению емкости [13].

Индуктивная связь образуется в результате воздействия магнитного поля одного элемента схемы на характеристики и параметры других элементов. При анализе влияния паразитной

индуктивности наибольший интерес представляет индуктивность проводников монтажных соединений. Изменяющийся ток в проводнике вызывает электродвижущую силу в смежном проводнике, расположенном в непосредственной близости (например, в жгуте или на ПП). Сцепление между проводниками описывается их взаимной индуктивностью, которая является важным фактором при рассмотрении перекрестных помех в монтажных соединениях.

Взаимная индуктивность L , Гн, двухпроводной линии в общем случае определяется через индуктивность одиночных проводов L_1 и L_2 и взаимную индуктивность между проводами M по формуле [14]

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M.$$

Знак «+» используется при одинаковом направлении токов в проводниках, а знак «−» при различных направлениях.

Если рассматривать немагнитный провод, т. е. для материала справедливо соотношение $\mu = \mu_0$, то его индуктивность L_0 , мкГн, определяется по формуле

$$L_0 \approx 0,2l \left(\ln \frac{l}{r} - 1 \right),$$

где l – длина провода, м; r – радиус поперечного сечения провода, м.

Взаимная индуктивность M , мкГн, двух немагнитных проводов одинакового радиуса поперечного сечения определяется по формуле

$$M = 0,2l \left[\ln \left(\frac{l}{d} + \sqrt{1 + \frac{l^2}{d^2}} \right) - \sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} + \frac{d}{l} \right],$$

где d – расстояние между проводами, м.

При $l \gg d$ можно пользоваться упрощенным выражением

$$M = 0,2l \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right).$$

Также можно провести оценку индуктивных параметров произвольных конструкций, которые отличаются размерами и конфигурацией.

Индуктивная связь является функцией площади контура тока, поэтому уменьшение площади контура цепей источника и рецептора помех является одним из способов уменьшения связи по магнитному полю. Паразитная индуктивная связь зависит от взаимного расположения и конфигурации проводников, параметров протекающих по ним токов, сопротивлений цепей и проявляется тем сильнее, чем большая часть магнитного поля тока одной цепи пронизывает проводники другой цепи. Индуктивность определяется числом линий магнитного потока, которые окружают проводник с током 1 А. Следует принимать во внимание только общее число линий магнитного потока, а не их концентрацию. Наличие диэлектрических материалов не влияет на магнитные свойства.

При выборе ориентации контуров следует помнить, что в случае ортогональной ориентации магнитных полей источника и рецептора взаимодействие между ними практически отсутствует. Кроме того, нужно учитывать, что близость материалов с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$ (например, железо, сталь, никель, феррит, пермаллой) к цепям источника и рецептора может значительно увеличить или уменьшить паразитную взаимную индуктивность между ними в зависимости от конструкции устройства. Для уменьшения индуктивности необходимо минимизировать длину межсоединений.

Индуктивная паразитная связь заметна преимущественно в схемах с низким волновым сопротивлением (менее 377 Ом). Проводники, катушки индуктивности с разомкнутым сердечником воспринимают и генерируют электромагнитные поля, что создает перекрестные помехи или электромагнитные наводки в цифровых интегральных схемах. Такой тип паразитной связи особенно нежелателен, когда чувствительные схемы располагаются вблизи нечувствительных, по которым течет большой ток. Данная связь часто встречается в ПП с общей землей [13].

Индукцированное напряжение помех возникает только в том случае, когда изменяется ток в источнике. В РЭА часто источниками помех являются контуры тока, в которых изменение тока происходит синхронно. За счет взаимной индукции на контуре-рецепторе может возбуждаться электродвижущая сила, вызванная

токами от этих контуров. Помехи такого типа называются помехами переключения, или коммутационными. Наиболее важно для снижения уровня коммутационных помех уменьшить взаимную индуктивность контуров. Это может быть достигнуто разнесением контуров или изменением их взаимной ориентации. Взаимная индуктивность контуров не может превышать собственную индуктивность меньшего из них, поэтому для снижения взаимной индуктивности необходимо снижать собственную.

Рекомендованы следующие способы снижения индуктивности проводников: уменьшение длины и увеличение площади их сечения, выполнение проводников плоскими (чем шире плоский проводник, тем меньше его индуктивность).

Гальваническая связь – наиболее часто встречаемый вид паразитной связи, осуществляемой через внутреннее сопротивление и межсоединения источников питания. Через цепь источника протекают токи всех частот, которые наводят напряжение, снимаемое с общего сопротивления. При постоянном токе и очень низких частотах это в основном сопротивление дросселей фильтра и диодов выпрямителя, при звуковых частотах – активное сопротивление соединительных проводов и емкостное сопротивление выходного конденсатора фильтра питания [13].

На частотах более 100 кГц общее сопротивление Z зависит в основном от индуктивного сопротивления соединительных проводов и емкости фильтра питания:

$$Z = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}},$$

где L_l – погонная индуктивность линии, Гн/м; C_l – погонная емкость линии, Ф/м.

Любую проводящую среду (контактная площадка на ПП, сплошной слой земли, проводник и т. д.) можно представить в виде отрезка линии передачи (рисунок 3.1) длиной l , в которой R – сопротивление, G – проводимость, L – паразитная индуктивность, C – паразитная емкость.

Электрические токи в пути по длинной линии неизбежно слабеют и затухают, а мощность становится меньше. Проводники линии всегда обладают сопротивлением (омическим, активным)

и нагреваются, когда по ним проходит электрический ток. Нагрев может быть незначительным – доли градуса. Кроме того, мощность поглощается выделением тепла в изоляции, вызванным токами утечки.

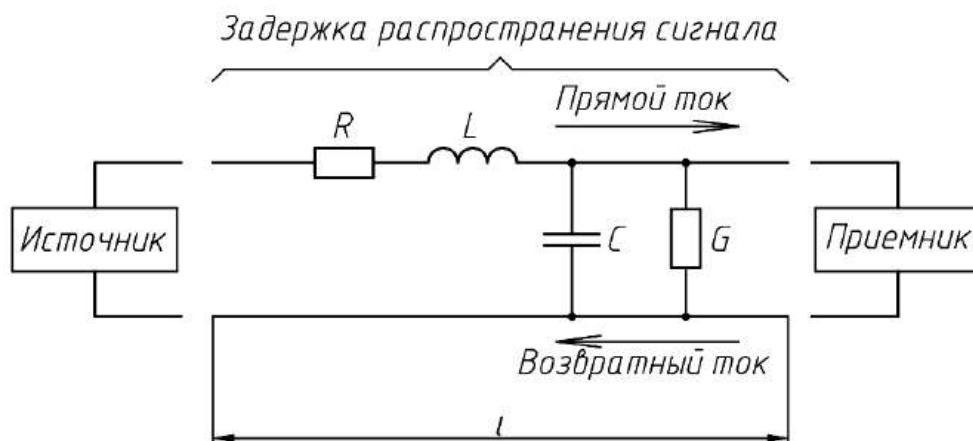


Рисунок 3.1 – Модель элементарного отрезка линии передачи

Таким образом, сопротивление вызывает активные потери в линии и содержит две составляющие: сопротивление постоянному току или токам низкой частоты и сопротивление на высоких частотах, где начинает проявляться скин-эффект. Чем выше частота, тем сильнее концентрируется ток в тонком поверхностном слое (скин-слое) проводника (рисунок 3.2).

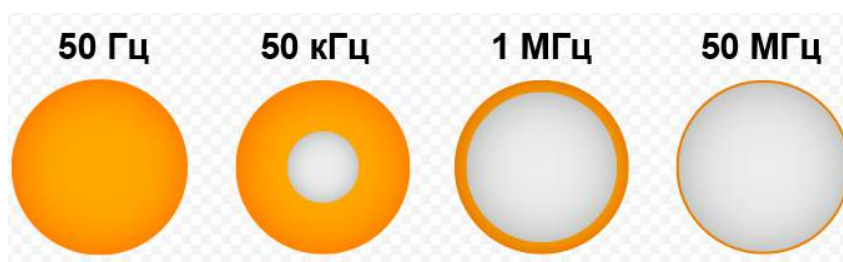


Рисунок 3.2 – Скин-эффект

В этом случае ток протекает по скин-слою и высокой считается частота, при которой толщина скин-слоя будет меньше толщины проводника. Толщина скин-слоя уменьшается прямо пропорционально квадратному корню из частоты [15]. Чем неравномернее распределен ток, тем бóльшая часть его энергии теряется на единицу длины проводника. Потери в изоляции между про-

водниками также растут с частотой тока. Многие материалы являются хорошими изоляторами для токов низких частот и плохими для высоких частот. Поэтому, чем выше частота тока, тем больше его затухание в линии передачи.

Таким образом, **электрическая емкость** определяется конструкцией линии и применяемыми материалами. Для шин питания эта емкость должна быть по возможности больше, а для сигнальных линий – меньше. **Индуктивность** также зависит от конструкции линии и применяемых материалов. Для снижения индуктивности в линии не должны применяться магнитные материалы, способные привести к нежелательному снижению скорости распространения электромагнитной волны. **Проводимость** определяется утечками в диэлектрическом материале линии. Токи утечки современных материалов, которые применяются при создании ПП и проводов, малы, и ими можно пренебречь до определенных частот. Однако на высоких частотах (более 100 МГц) потери в диэлектрике становятся заметными и начинают влиять на целостность сигнала [13].

Мгновенный ток в линии всегда пропорционален напряжению, т. е. линия ведет себя как линейный резистор. При распространении электромагнитной волны вдоль линии ее полное сопротивление подобно резистивной нагрузке. Мгновенное полное сопротивление зависит от двух параметров (емкость и индуктивность), каждый из которых полностью зависит от сечения линии, определяющего его емкость, и диэлектрических свойств материала.

Модуль полного сопротивления проводника $|Z|$, Ом, в виде последовательно соединенных сопротивления R , индуктивности L и емкости C сигналов с частотой f можно представить в виде

$$|Z| = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left(2\pi f L - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2},$$

где U – действующее значение напряжения цепи, В; I – действующее значение тока в цепи, А.

Индуктивности проводов и распределенные емкости монтажа могут образовывать резонансные контуры. Полное сопротивление

зависит от частоты. При ее увеличении индуктивное сопротивление увеличивается, а емкостное – уменьшается. Следовательно, всегда имеется частота, на которой индуктивное и емкостное сопротивления равны, т. е. полное сопротивление Z имеет наименьшее значение, равное активному сопротивлению R . Эта частота

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

называется резонансной, а цепь представляет собой последовательный резонансный контур. Таким образом, на резонансной частоте последовательная цепь ведет себя так, как будто индуктивность и емкость в ней отсутствуют.

3.2 Электростатический разряд

Электростатический разряд – это внезапный поток электричества между двумя электрически заряженными объектами, вызванный контактом, коротким замыканием или пробоем диэлектрика. Опасность воздействия ЭСР существует на всем жизненном цикле РЭА. Обычно это воздействие трактуется только как форма проявления электромагнитной помехи (ЭМП), хотя это только одно из проявлений ЭСР. Для возникновения ЭМП ЭСР должен воздействовать непосредственно на оборудование. В некоторых случаях борьба с ЭМП может только усугубить ситуацию с ЭСР [16].

Тип электрической энергии, повседневно встречающийся и опасный как для людей, так и для электроники, называется *статическим электричеством* и представляет собой заряд, который накапливается на каком-либо изоляторе как в ловушке и остается там даже после отключения питания. Основные причины появления статического электричества:

- контакт между двумя материалами и их отделение друг от друга (включая трение, намотку, размотку);
- быстрый температурный перепад (например, в момент помещения материала в духовой шкаф);
- радиация с высоким значением энергии, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи, сильные электрические поля;

- операции резки;
- электромагнитная индукция – вызванное статическим зарядом возникновение электрического поля.

Например, когда человек идет по ковру с густым ворсом, его ноги трутся о ворс и тело накапливает электрический заряд. При касании рукой любого металлического предмета, например дверной ручки, накопленный заряд моментально высвобождается, в результате человек почувствует легкий удар током. Ток, протекающий во время такого удара, слишком слаб, но для электронных компонентов и его может оказаться достаточно. Статическое электричество с напряжением несколько тысяч вольт еле заметно ударит человека (ток будет слишком мал, чтобы его реально ощутить), но может вывести из строя чувствительные ЭРИ.

Статическое электричество накапливается до тех пор, пока оно не получит возможность рассеяться или как-то высвободиться. В большинстве случаев со временем накопленный заряд рассеивается самостоятельно, но иногда может высвободиться мгновенно. Электрические заряды в материалах могут возникать при разрыве контакта между ними, трении друг о друга, деформации материалов. При соприкосновении двух тел происходит перераспределение зарядов и, когда тела разъединяются, неравномерное распределение зарядов сохраняется. В результате на границе тел возникает двойной электрический слой, обусловленный обменом зарядами между ними. В этот момент вся система является электронейтральной. После того как контактирующие материалы механически разъединены, поверхность одного из них будет заряжена с одним знаком, а поверхность другого – с противоположным, причем заряды будут равны по значению (рисунок 3.3) [13].

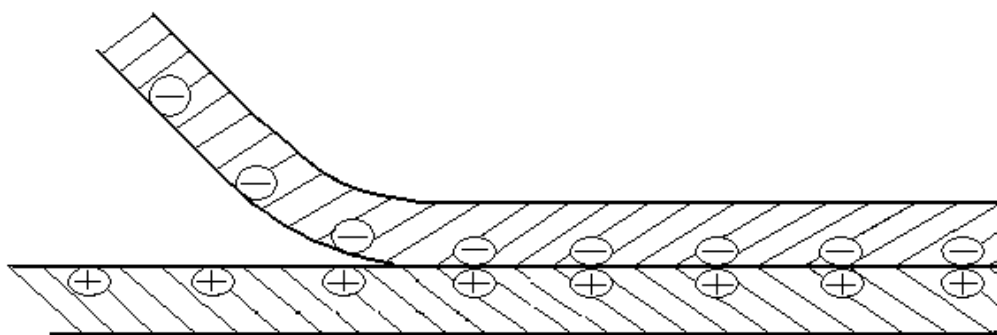


Рисунок 3.3 – Электризация контактом материалов

При трении материалов друг о друга вследствие неровностей поверхностей на отдельных участках возникает последовательный многократный контакт (рисунок 3.4). Разрыв такого контакта сопровождается электризацией материалов. Это явление называется трибоэлектрическим эффектом. Совершаемая при трении работа переходит в теплоту, что способствует изменению энергетического состояния соприкасающихся поверхностей. Поэтому эффект зарядания намного значительнее, чем при контакте материалов с последующим разрывом [13].

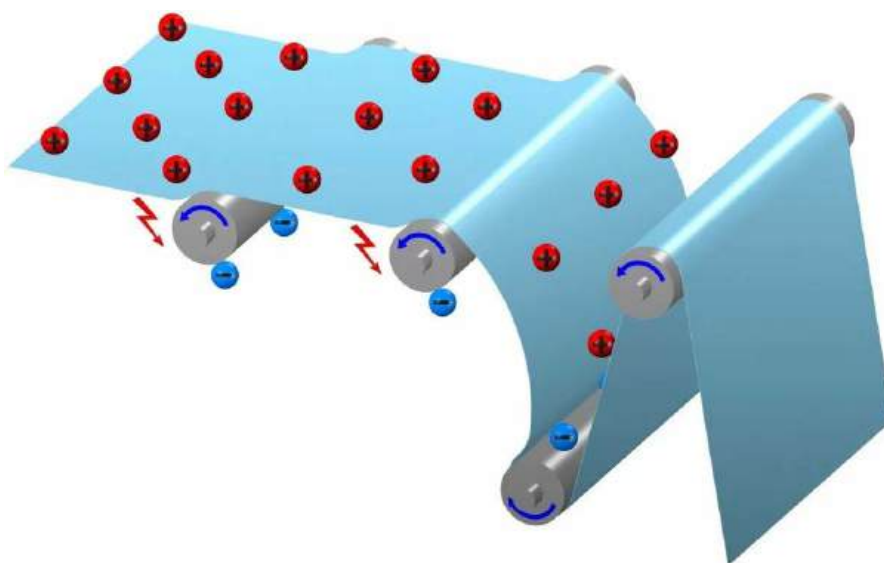


Рисунок 3.4 – Электризация трением

При деформации диэлектрических материалов происходит перераспределение зарядов под воздействием механической нагрузки, т. е. электроэластичный эффект, который проявляется при деформации и вытяжке волокон материала (рисунок 3.5).

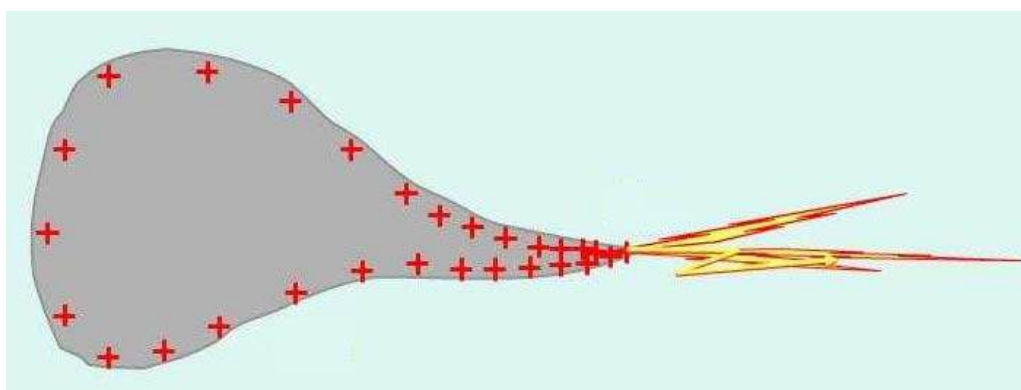


Рисунок 3.5 – Электризация деформацией

В результате контакта изоляционные материалы меняют свое поведение – склеиваются между собой или отталкиваются, прилипают к оборудованию, притягивают пыль, неправильно наматываются на приемное устройство. Притягивание или отталкивание происходит с силой F , Н, в соответствии с законом Кулона:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2},$$

где Q_1 и Q_2 – заряды одного и другого объектов, Кл; r – расстояние между заряженными объектами, м.

Интенсивность проявления этого эффекта связана с амплитудой статического заряда и расстоянием между объектами. Притягивание и отталкивание происходит в направлении силовых линий электрического поля. Если два заряда имеют одинаковую полярность – они отталкиваются, если противоположную – притягиваются. Если один из объектов заряжен, он будет провоцировать притягивание, создавая зеркальную копию заряда на нейтральном объекте.

Таким образом, электрический заряд накапливается в диэлектрике или изолированном металле. Значения зарядов могут быть настолько большими, что в месте отрыва материалов, в зазорах трущихся деталей, где расстояния между ними очень малы, наблюдается пробой воздушного промежутка, сопровождающийся электрической искрой [13].

Искра – это разряд между двумя проводниками. Она характеризуется ярко выраженным световым каналом разряда, несущим ток высокой плотности. Искра возникает, когда напряженность поля между проводниками превышает электрическую напряженность атмосферы. Разница потенциалов, необходимая для пробоя, зависит от формы проводников и расстояния между ними. Электрический разряд может спровоцировать возгорание в зависимости от таких переменных факторов, как тип разряда, его мощность, источник и энергия, минимальная энергия воспламенения легковоспламеняющейся среды.

Электрические разряды делятся на три типа: коронный, искровой, кистевой [16]. **Коронный разряд** наблюдается, когда один электрод, имеющий острые кромки, находится под высоким

напряжением, а второй электрод заземлен (рисунок 3.6, *а*). Плотность силовых линий электрического поля перед заостренной частью электрода очень велика, и в этой локальной области напряженность поля может превысить пробивную напряженность воздуха, при этом наличие высокого напряжения не обязательно. Коронный разряд также может происходить, если заземленный заостренный проводник с нулевым потенциалом расположить вблизи тела, обладающего большим электростатическим зарядом (рисунок 3.6, *б*). В результате коронного разряда электростатический заряд полностью не высвобождается, тем не менее этот вид разряда позволяет ограничивать возникающее напряжение и во многих случаях предотвращать электрический пробой [13].

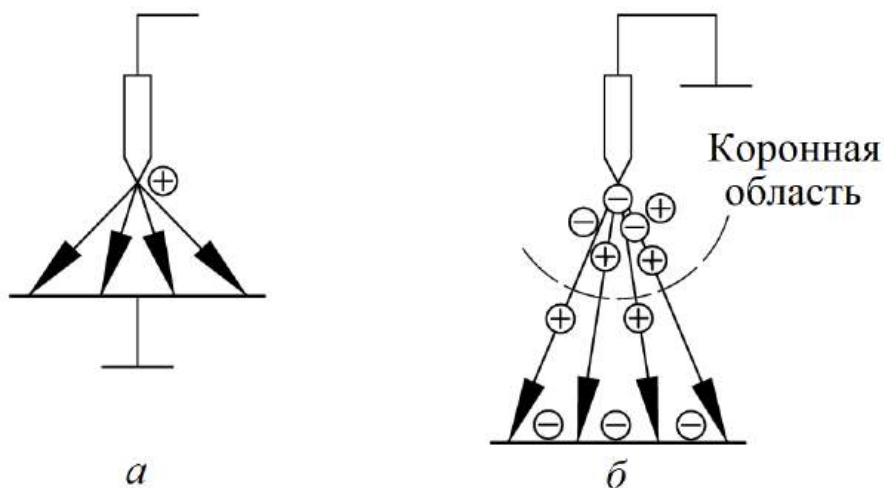


Рисунок 3.6 – Образование коронного разряда:
а – между заостренным и заземленным электродами;
б – между заземленным заостренным электродом
и телом с большим электростатическим зарядом

Искровой разряд может происходить между двумя округлыми металлическими электродами (рисунок 3.7). В этом случае электрическое поле достаточно однородно. Электроды должны иметь различные потенциалы. Обычно один из них заземлен. Разряд начинается около точки, где напряженность превышает напряженность поля пробоя. В отличие от коронного при искровом разряде ионизация газа между двумя электродами происходит полностью и плазменный канал распространяется от одного электрода до другого. Если электроды подсоединены к источнику напряжения, разряд может превратиться в непрерывную дугу (ду-

говой разряд). Когда высвобождается заряд статического электричества, он быстро стекает по плазменному каналу и разряд тут же прекращается.

Существует разновидность разряда, промежуточная между коронным и искровым, – **кистевой разряд**. Он может происходить между заряженным материалом и заземленным электродом с радиусом кривизны в несколько миллиметров. Если кистевой разряд поддерживается достаточно долго, он выглядит как неправильное люминесцентное свечение (рисунок 3.8). Почти все разряды от изоляторов – кистевые [13].

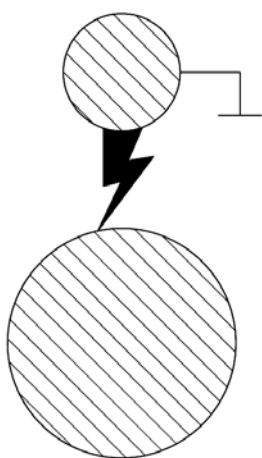


Рисунок 3.7 – Искровой разряд

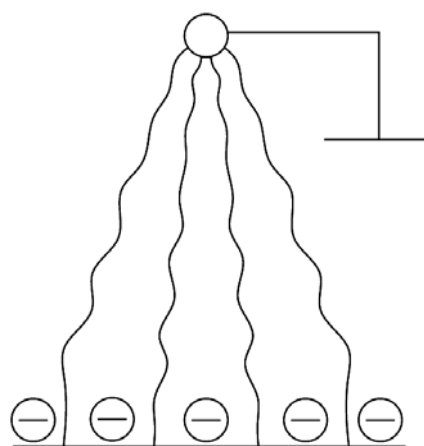


Рисунок 3.8 – Кистевой разряд

Поскольку объекты, между которыми возникает искра, являются проводниками, преобладающая часть сохраненного заряда проходит через искру. В большинстве случаев почти вся сохраненная энергия рассеивается. Энергия искры W , Дж, между телом и проводящим заземленным объектом может быть вычислена по формуле

$$W = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2},$$

где Q – количество заряда в проводнике, Кл; U – потенциал проводника, В; C – емкость проводника, Ф.

Максимальная энергия искры зависит от типа проводника (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Емкость различных проводников

Проводник	Емкость, пФ
Мелкие металлические предметы (наконечники)	10–20
Малые конструкции (до 50 л)	10–100
Средние конструкции (250–500 л)	50–300
Крупные объекты (реакторы, окруженные заземленными структурами)	100–1000
Тело человека	100–200

Имеются две основные группы способов защиты от ЭСР:

- 1) предотвращение накопления зарядов статического электричества путем увеличения проводимости материалов;
- 2) нейтрализация зарядов статического электричества с помощью специальных устройств [13].

Материалы по-разному накапливают статическое электричество. К материалам, способным накапливать значительный статический заряд, относятся вещества, сопротивление которых выше 10^6 Ом. На веществах с сопротивлением ниже 10^6 Ом и проводящих материалах, соединенных с землей, практически не образуются статические заряды.

Важную роль при разрядах играет относительная влажность воздуха. Она повышает поверхностную проводимость материалов и тем самым способствует стоку заряда.

Заземление не является защитой от зарядов, но оно необходимо для ограничения предельного заряда, который может накапливаться на изоляционных материалах и передаваться на проводящие конструкции установок. Для статического электричества заземленным считается объект, который имеет сопротивление менее 10^7 Ом при относительной влажности воздуха 60 % [13].

Основная опасность непосредственного воздействия ЭСР на РЭА заключается в поражении ее элементной базы и связана со статическим зарядом, исходящим от человека. При разряде образуется тепло, которое приводит к выжиганию соединений, прерыванию контактов и разрыву дорожек микросхем. Часто компоненты не полностью выходят из строя, что еще более опасно, так как неисправность проявляется не сразу, а в непредсказуемый момент в процессе эксплуатации устройства. При работе с чувствитель-

ными к статическому электричеству устройствами необходимо всегда принимать меры для нейтрализации заряда, накопленного на теле человека (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Антистатический браслет

При нейтрализации электрических зарядов на поверхности диэлектриков накопление заряда не исключается, но предотвращается нежелательное или опасное его проявление.

Различают основные виды дефектов, вызванных перенапряжением в полупроводниковых приборах устройств в результате воздействия ЭСР: разрыв соединительных проводников, короткое замыкание коммутационной металлизации, ухудшение электрических характеристик (отклонение параметров, пробой, разрушение диэлектриков и др.) [13].

Одним из эффективных способов защиты от перенапряжений, вызванных ЭСР, является применение ограничителей напряжения (стабилитроны, варисторы, диоды со смещением). Для подавления ЭСР в сигнальных линиях и шинах питания применяются фильтры. Обычно импульс от ЭСР длится не более нескольких микросекунд. Поэтому любой вход, через который одиночный импульс может оказать необратимое воздействие на схему, должен быть защищен дважды. Помехоустойчивость микросхемы определяется в этом случае динамической помехоустойчивостью.

В связи с этим рекомендуется применять менее чувствительные и менее быстродействующие устройства. Следует по возможности не использовать логические схемы, срабатывающие по фронту импульса, и широкополосные устройства. Высокая амплитуда импульса помехи может вызвать ложное срабатывание логической схемы: ложный сигнал пройдет по всей цепи так, как будто это реальный сигнал. Аналогично широкополосные устройства будут срабатывать от очень коротких импульсных помех. Необходимо разносить чувствительные входы от линий, в которых могут распространяться помехи, связанные с ЭСР. Также следует соединять неиспользуемые входы с землей или питанием. Неиспользуемый вход обычно находится в состоянии покоя на пороге переключения. Возникающий помеховый сигнал на этом входе может быть достаточным для превышения порога переключения и вызвать выходной сигнал.

Как и в случае схемотехнического проектирования, на этапе конструирования при разработке мер по устранению статического электричества на РЭА основными задачами остаются: обеспечение невосприимчивости устройства к воздействию ЭСР; создание условий, предотвращающих накопление зарядов; обеспечение рассеяния или нейтрализация зарядов, когда не удастся предотвратить их накопление. Разработаны базисные конструкторские способы обеспечения стойкости РЭА к воздействию ЭСР:

- рациональная компоновка (разнесение, зонирование и т. д.);
- создание качественного заземления;
- эффективное экранирование узлов и блоков;
- ограничение доступа во внутренний объем аппаратуры;
- выбор материалов и покрытий.

Рациональная компоновка используется для минимизации уровня связи при косвенном воздействии ЭСР и заключается в создании зон с различным уровнем потенциальных помех, установке барьеров между зонами, применении защиты в месте прохождения интерфейса через барьер, специальном проектировании системы рабочего заземления в виде отдельной подсистемы.

Концепция зонирования заключается в том, что конструкция разделяется на несколько зон (рисунок 3.10), внутри которых применяются различные уровни защиты от ЭСР. Зона 0 (незащи-

щенная) представляет собой окружающую среду. Для данной зоны характерно отсутствие специальных мер защиты от ЭСР, хотя расположенная внутри нее аппаратура должна соответствовать всем требованиям ЭМС по помехоэмиссии и помехоустойчивости.

Зона 1 является защищенной, находящейся внутри зоны 0, с единой электромагнитной обстановкой. Внутри зоны 1 могут допускаться как более низкие уровни помехозащищенности, так и более высокие уровни помехоэмиссии, поскольку эффект зонирования обеспечивает определенный уровень изоляции системы от внешней обстановки [13].

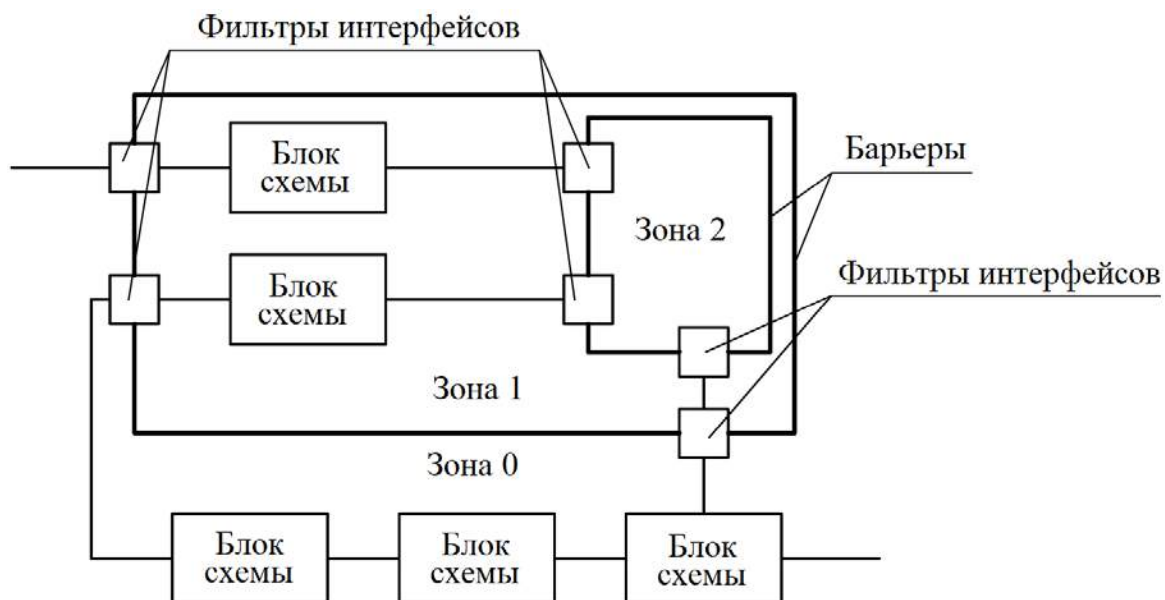


Рисунок 3.10 – Схема зонирования

Зона 2 представляет собой малую область с высокой эффективностью защиты. Она может быть расположена внутри зоны 1 или зоны 0, если обладает большей степенью защиты, чем зона 1. Стандартный подход к реализации зоны 2 состоит в исполнении полностью экранированного корпуса.

Для любых интерфейсов, пересекающих границы зон, необходимо выполнять условия для ослабления помеховой связи, возникающей в результате ЭСР. Это обеспечивается системами защиты интерфейсов – фильтрами и ограничителями напряжений. Подобный прием достаточно просто выполнить для экранированных кабелей питания, но для сигнальных линий и цепей управле-

ния это может вызвать значительные проблемы, в частности увеличить емкость кабеля, что приведет к снижению быстродействия системы. Существенным является качество подсоединения экрана кабеля к структуре заземления на границе зон. Это гарантирует, что токи помех на экране возвращаются к земле более эффективно, чем проникают из одной зоны в другую.

Заземление проектируется как отдельная подсистема (рисунок 3.11). Хорошо спроектированная система заземления может существенно снизить помеховую связь внутри защищаемой зоны, поскольку от заземления зависит комплексный ток. Остаточные токи помех не создают значительной разности потенциалов в пределах зоны, поэтому аппаратура внутри зоны не подвержена существенным электромагнитным воздействиям [13].

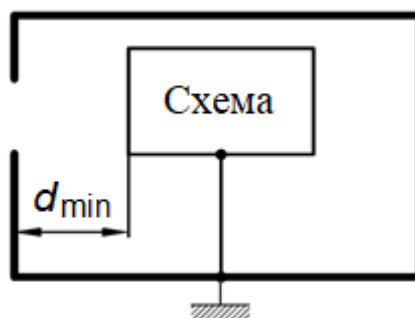


Рисунок 3.11 – Экранирование схемы

И наоборот, токи помех, которые созданы аппаратурой внутри зоны, возвращаются непосредственно к источнику и не распространяются вне зоны. Основные требования к системе заземления – минимизация полного сопротивления цепей заземления и реализация принципа одноточечного заземления.

Все металлические части корпуса должны быть соединены с корпусной землей. Внутренние электронные цепи должны быть удалены от незаземленных частей корпуса на расстояние не менее 10 мм, а от заземленных – не менее 1 мм. Эти значения получены из отношения максимального напряжения электростатического заряда на человеке (около 25 кВ) и напряжения на импедансе корпусной земли от протекания тока ЭСР (около 1,5 кВ) к напряженности пробоя воздуха (около 30 кВ/см). Для других изоляторов, имеющих большее напряжение пробоя, эти расстояния можно уменьшить.

Очень эффективное решение для устранения заряда заключается в установке между источником ЭСР и электронным устройством высокопроводящего экрана. При этом необходимо полностью окружить всю систему, включая кабели, металлическим экраном и качественно заземлить его. Заземление отведет с экрана заряд и таким образом устранил электростатическое поле. Металлический экран, полностью окружающий систему, гарантирует, что поле не будет действовать на нее, даже если на внешней поверхности экрана будет наведен заряд. Используют также

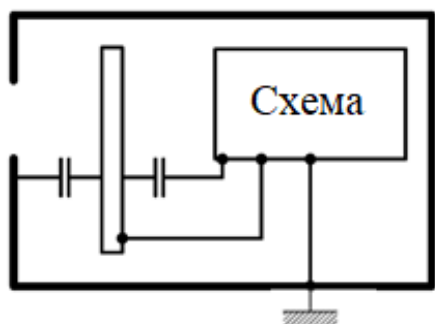


Рисунок 3.12 – Введение экрана между схемой и частью корпуса

дополнительный экран, уменьшающий емкость между частью корпуса, подверженной ЭСР, и близлежащими электронными цепями (рисунок 3.12) [13].

На практике аппаратура должна иметь смотровые окна, вентиляционные отверстия и прочие апертуры, поэтому полностью окружить ее экраном невозможно. Для ограничения доступа во внутренний объем аппаратуры возможные отверстия в корпусе устройства выполняются таких размеров, чтобы через них нельзя было достать никаким предметом до электронных компонентов, чувствительных к ЭСР, или до металлических частей, расположенных внутри корпуса.

Влияние ЭСР на работу схемы будет разным в зависимости от формы корпуса и варианта подключения схемной земли к корпусной земле. Влияние ЭСР на схему, схемная земля которой подключена к корпусной в непосредственной близости от места проникновения ЭСР, будет меньше (рисунок 3.13). Наименьшим сопротивлением будет обладать путь А (рисунок 3.13, а), тогда как путь Б (рисунок 3.13, б), вероятнее всего, затронет элементы схемы. Однако определение пути наименьшего сопротивления (в силу широкого спектра ЭСР) может оказаться непростым. Даже протекание тока по пути А может сильно повлиять на электронные цепи. Поэтому правильное расположение точки подключения схемной земли к корпусной должно обеспечивать отведение токов от чувствительных цепей.

Также влияние ЭСР может быть связано с кабелями, играющими роль приемных и передающих антенн и способствующими проникновению токов ЭСР в цепи внутри корпуса. Если экран кабеля сплошной (рисунок 3.14, *а*), то он является продолжением корпуса и уменьшает влияние ЭСР. Если же экран соединяется с корпусом проводником (рисунок 3.14, *б*), то протекание большого тока ЭСР по проводнику может создать наводки на входе кабеля [13].

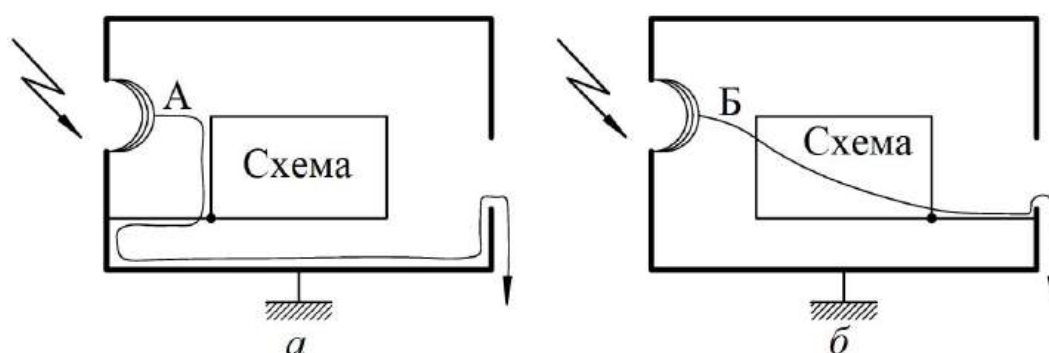


Рисунок 3.13 – Путь распространения электростатического разряда в зависимости от подключения схемной земли к корпусной: *а* – около места проникновения ЭСР; *б* – после элементов схемы

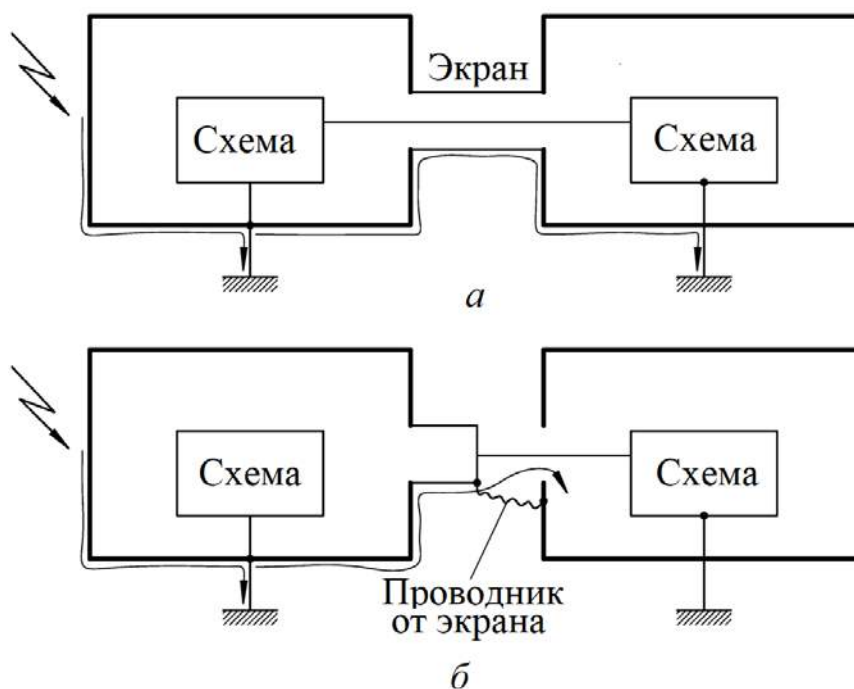


Рисунок 3.14 – Путь распространения электростатического разряда: *а* – по сплошному экрану кабеля; *б* – по проводнику между экраном кабеля и корпусом

Основной поражающий фактор ЭСР – это высокие амплитуды и скорости изменения электрического и магнитного полей. Эти воздействия предъявляют соответствующие требования к однородности корпусных экранов, размерам отверстий и качеству соединения в месте стыковки деталей. Если на пути протекания токов ЭСР возникает неоднородность (см. рисунок 3.14, б), то в этой точке может возникнуть вторичный ЭСР, что означает новый источник помеховой активности. Все доступные для касания токопроводящие детали должны быть заземлены для предотвращения вторичного электростатического разряда.

Контрольные вопросы

1. Какие виды паразитных связей существуют в РЭА?
2. Дайте определение причин возникновения паразитных связей.
3. Какими способами можно уменьшить емкость между проводниками?
4. Какими способами можно уменьшить индуктивность проводников?
5. Назовите причины появления статического электричества.
6. Какой разряд называется электростатическим?
7. Какие типы электрических разрядов существуют?
8. Назовите существующие схемотехнические способы защиты от ЭСР.
9. Какие существуют конструкционные способы защиты от ЭСР?

4 ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ПУТИ ВОЗВРАТНЫХ ТОКОВ В НИХ

4.1 Виды печатных плат

В состав большинства РЭА входят монтажные платы, на диэлектрическом основании которых установлены ЭРИ.

Печатная плата – это диэлектрическая пластина, на поверхности или в объеме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы (рисунок 4.1).

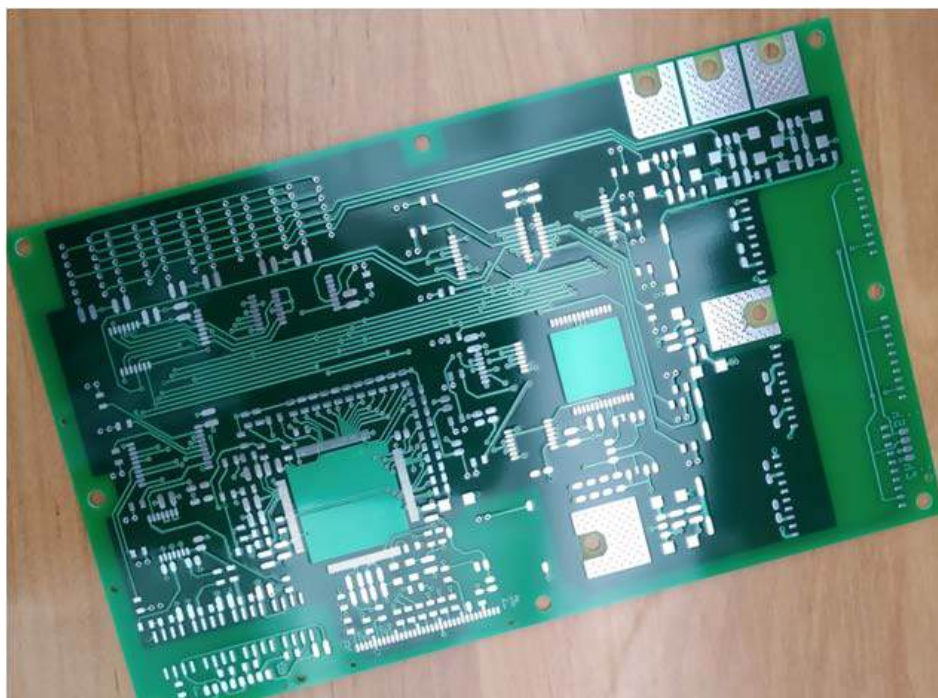


Рисунок 4.1 – Печатная плата

ПП предназначена для электрического и механического соединения различных электронных компонентов, которые соединяются на ней своими выводами с элементами проводящего рисунка пайкой. В отличие от навесного монтажа, на ПП электропроводящий рисунок выполнен из фольги, целиком расположенной на твердой изолирующей основе. Плата содержит монтажные отверстия и контактные площадки для монтажа выводных или планарных компонентов. Кроме того, в ПП имеются переходные отверстия для электрического соединения участков фольги, рас-

положенных на разных ее слоях [17]. С внешних сторон на плату обычно нанесены защитное покрытие (паяльная маска) и маркировка (вспомогательный рисунок и текст согласно конструкторской документации).

Выбор конструкции ПП является важным фактором, определяющим механические характеристики устройства [18]. Очень важно знать параметры слоистых пластиков: удельное сопротивление, диэлектрическую постоянную, воспламеняемость, высокотемпературную стабильность, коэффициент гигроскопичности. Типовые конструкции ПП основаны на использовании стандартных теплостойких негорючих стеклотекстолитов марок СТФ и FR-4 (flame resistant – сопротивляемость к воспламенению). Эти материалы обладают отличными механическими и электрическими характеристиками. Особое внимание необходимо уделять толщине фольги ПП исходя из максимального протекающего тока. Как правило, применяется стеклотекстолит, покрытый с одной или двух сторон медной фольгой толщиной 18, 35, 50, 70 и 105 мкм.

В зависимости от общей сложности схемы и требований к качеству необходимо прежде всего определить количество слоев печатной платы [13]. Простые электронные схемы выполняются на односторонних ПП (ОПП) с использованием односторонних фольгированных материалов и часто имеют много перемычек, напоминая двусторонние ПП (ДПП). Такой способ рекомендуется только для низкочастотных схем, поскольку ОПП в большой степени восприимчивы к наводкам – электромагнитным или радиочастотным помехам.

На ДПП схемы трассируются гораздо легче, так как в двух слоях проще развести пересекающиеся трассы. Однако для аналоговых схем пересечение трасс выполнять не рекомендуется. Там, где возможно, нижний слой необходимо отводить под полигон обратного провода, а остальные сигнальные проводники разводить в верхнем слое. Использование полигона в качестве обратного провода дает несколько преимуществ:

- обратный провод наиболее часто используется в схеме, поэтому лучше иметь подключение к нему во многих местах для упрощения разводки;

- уменьшается сопротивление всех подключений к обратному проводу, что в свою очередь уменьшает помехи;
- увеличивается распределенная емкость для каждой цепи схемы, помогая подавлять излучаемые помехи;
- увеличивается механическая прочность платы;
- полигон, являющийся экраном, подавляет помехи, излучаемые источниками, расположенными с его стороны.

Расстояния между проводниками и другими элементами проводящего рисунка зависят от допустимых рабочих напряжений и определены [18] (таблицы 4.1, 4.2).

Таблица 4.1 – Допустимое рабочее напряжение (амплитудное) между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях ПП

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Допустимое рабочее напряжение (амплитудное), В
От 0,05 до 0,075 включительно	10
Свыше 0,075 до 0,1 включительно	15
Свыше 0,1 до 0,2 включительно	25
Свыше 0,2 до 0,3 включительно	50
Свыше 0,3 до 0,4 включительно	150
Свыше 0,4 до 0,5 включительно	200
Свыше 0,5 до 0,75 включительно	350
Свыше 0,75 до 1,5 включительно	500
Свыше 1,5 до 2,5 включительно	650

Таблица 4.2 – Допустимое рабочее напряжение (амплитудное) между элементами проводящего рисунка, расположенными на наружном слое ПП, в зависимости от воздействующих факторов

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Допустимое рабочее напряжение (амплитудное) в условиях эксплуатации, В			
	Нормальные климатические условия	Относительная влажность воздуха (98±2) % при температуре (40±2) °C	Пониженное атмосферное давление	
			53600 Па (400 мм рт. ст.)	666 Па (5 мм рт. ст.)
От 0,05 до 0,075 включительно	10	6	8	5

Окончание таблицы 4.2

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Допустимое рабочее напряжение (амплитудное) в условиях эксплуатации, В			
	Нормальные климати- ческие условия	Относительная влажность воз- духа (98±2) % при температу- ре (40±2) °С	Пониженное атмосферное давление	
			53600 Па (400 мм рт. ст.)	666 Па (5 мм рт. ст.)
Свыше 0,075 до 0,1 включи- тельно	15	9	12	8
Свыше 0,1 до 0,2 включительно	25	15	20	10
Свыше 0,2 до 0,3 включительно	50	30	40	30
Свыше 0,3 до 0,4 включительно	150	100	110	50
Свыше 0,4 до 0,7 включительно	300	200	160	80
Свыше 0,7 до 1,2 включительно	400	300	200	100
Свыше 1,2 до 2 включительно	600	360	300	130
Свыше 2 до 3,5 включительно	830	430	400	160
Свыше 3,5 до 5 включительно	1160	600	560	210
Свыше 5 до 7,5 включительно	1500	830	660	250
Свыше 7,5 до 10 включительно	2000	1160	1000	300
Свыше 10 до 15 включительно	2300	1600	1160	320

Конфигурация электронных схем, выполненных в виде печатных проводников, зависит от уровней протекающего по проводникам тока и напряжения. Ширина печатных проводников определяется токовой нагрузкой (рисунок 4.2) [19].

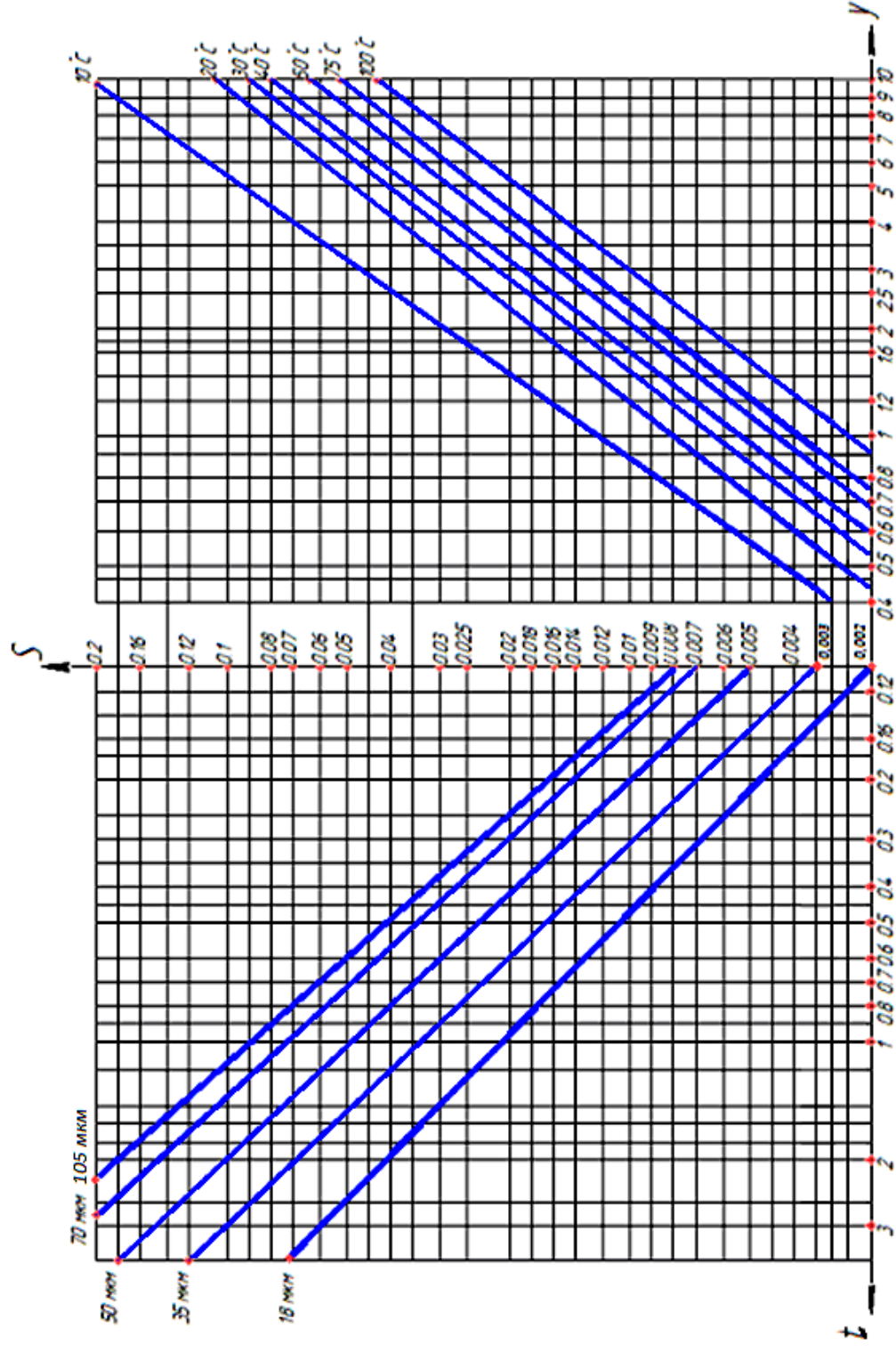


Рисунок 4.2 – Зависимости ширины печатного проводника от токовой нагрузки, толщины фольги и температуры эксплуатации ПП

Совмещение ДПП с металлическим основанием через диэлектрический слой, обеспечивающий электрическую прочность изоляции, образует помехозащищенную теплопроводную монтажную плату (ПТМП) (рисунок 4.3) [20]. В первую очередь металлическое основание используется в качестве несущей конструкции, теплоотвода и корпусного заземления. Но такое основание можно применять и для силового и/или сигнального заземления, что позволяет уменьшить взаимную индуктивность в межсоединениях, а также площадь контуров, по которым протекают прямые и возвратные токи. Сигналы распространяются по линиям передачи с контролируемым волновым сопротивлением, которые похожи на микрополосковые линии. Печатные проводники наружного сигнального слоя, отделенные от металлической пластины подложкой ДПП и изолирующим слоем, образуют подвешенные полосковые линии. Печатные проводники внутреннего сигнального слоя, отделенные от металлической пластины изолирующим слоем, образуют обращенные полосковые линии. Металлическая пластина ПТМП существенно уменьшает влияние электромагнитных полей на ПП, а также излучение от нее [13].

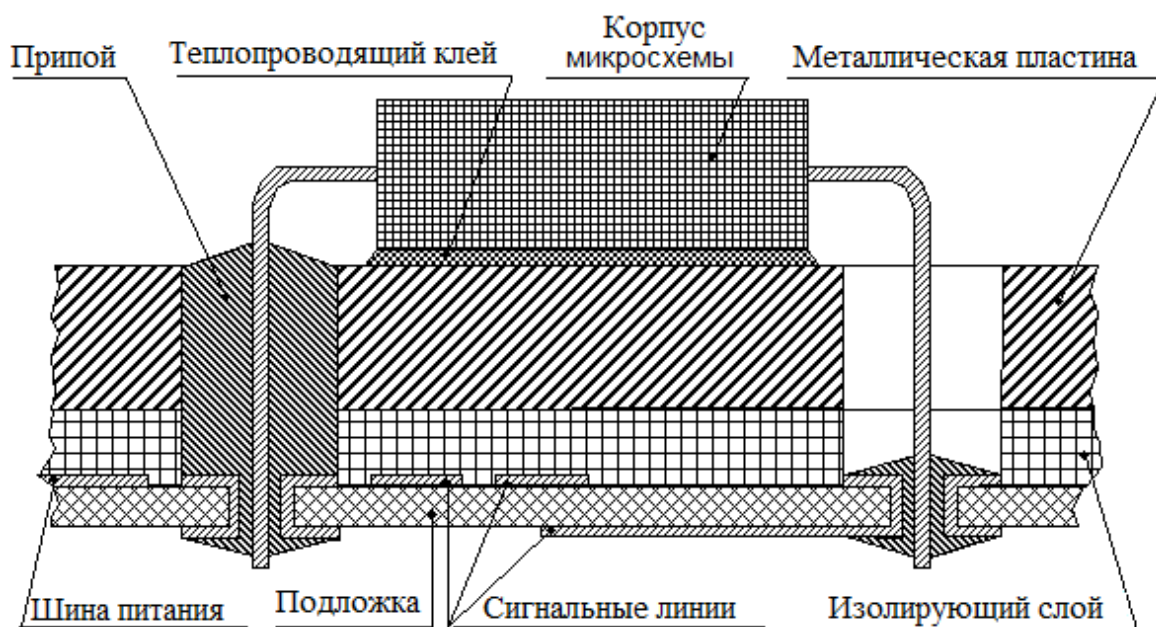


Рисунок 4.3 – Помехозащищенная теплопроводная монтажная плата

Несмотря на все свои преимущества, двусторонние ПП не являются оптимальными для малосигнальных или высокочастотных

схем. В общем случае толщина ПП, т. е. расстояние между слоями металлизации, составляет 1,5–2 мм, что слишком много для полной реализации преимуществ ДПП, приведенных выше. Для выполнения схемотехнических разработок, к которым предъявляются повышенные требования по помехоустойчивости, применяются многослойные печатные платы (МПП). Некоторые их преимущества очевидны:

- такая же удобная, как и при использовании шины обратного провода, трассировка шин питания (если в качестве шин питания используются полигоны на отдельном слое, то можно с помощью переходных отверстий подвести питание к каждому элементу схемы);

- сигнальные слои освобождаются от шин питания, что облегчает трассировку сигнальных проводников;

- между полигонами земли и питания появляется распределенная емкость, которая уменьшает высокочастотные помехи.

Кроме этих преимуществ, существуют другие, менее очевидные [13]. Во-первых, благодаря эффекту отражения лучше подавляются электромагнитные и радиочастотные помехи. Когда проводник размещается близко к плоской проводящей поверхности, большая часть возвратных высокочастотных токов протекает по плоскости непосредственно под проводником. Эффект отражения достигается только при неразрывных сплошных полигонах (ими могут быть как полигоны земли, так и полигоны питания). При любом нарушении целостности полигонов возвратный ток будет обтекать вырезы, создавая неоднородности, изменятся емкости и индуктивности, что приводит к уменьшению подавления помех.

Во-вторых, несмотря на то что изготовление МПП обходится дороже, чем односторонних и двусторонних, они менее восприимчивы к воздействию помех, а также их возможное излучение меньше. В связи с этим существенно сокращается время настройки, доработки и изготовления устройства, что снижает его общую стоимость при мелкосерийном производстве. Применение МПП может снизить уровень излучаемых помех на 20 дБ по сравнению с ДПП [13].

4.2 Линии передачи в печатных платах

Межсоединения в ПП можно классифицировать следующим образом:

- по назначению: сигнальные линии, шины питания и межсоединения корпуса и экрана;
- по числу проводников в отрезке: одиночные, связанные и многопроводные;
- по сложности схем: одиночный отрезок, последовательно соединенные отрезки, схемы с ответвлениями, схемы с замкнутыми контурами;
- по сложности конфигураций: двумерные и трехмерные;
- по виду поперечного сечения проводников: круг, прямоугольник, трапеция;
- по виду диэлектрического заполнения: однородные и неоднородные.

Рассмотрев конфигурацию каждой ПП и межсоединений на платах с учетом ширины и толщины проводников, расстояния между ними, а также толщины, относительной диэлектрической проницаемости и потерь подложки, покрывающего слоя (лака), изолирующего слоя между подложкой и металлическим основанием, можно оценить влияние паразитных эффектов в межсоединениях. В результате анализа можно оптимизировать параметры межсоединений с целью уменьшения искажения сигналов и повышения плотности монтажа.

Проводники на поверхности или в объеме ПП образуют *линию передачи* – систему прямых и обратных проводников достаточной протяженности, расположенных в непосредственной близости друг от друга и формирующих единое электромагнитное поле, которое распространяется в этой системе преимущественно от источника к приемнику. Сумма токов прямых проводников равна сумме токов возвратных проводников, но их направление противоположно (рисунок 4.4) [13].

Очень часто один из проводников линии передачи, по которой протекает возвратный ток, называют землей. Более корректно использовать термин «возвратный проводник», поскольку его основная роль заключается не в заземлении, а в формировании пути

с малым полным сопротивлением возвратным токам. Путь высокочастотного возвратного тока будет зеркально отражать путь сигнального тока. На высоких частотах, когда индуктивность замкнутого контура из сигнального и возвратного проводников минимизируется, возвратный провод будет расположен настолько близко к сигнальному, насколько позволит конструкция линии передачи. При распространении сигнала вдоль линии передачи электромагнитное поле формируется между сигнальным и возвратным проводниками. Поэтому оба проводника важны. Когда они выполнены одинаково, например в витой паре, безразлично, какой проводник будет назван сигнальным, а какой возвратным. Когда же один проводник отличается от другого (как в микрополосковой или полосковой линии передачи), необходимо оговорить назначение каждого из них. В данном случае в качестве сигнального принимается узкий проводник, а в качестве возвратного – плоскость.



Рисунок 4.4 – Линия передачи из двух протяженных проводников

Одной из задач обеспечения целостности сигнала при проектировании ПП является выполнение всех соединений в виде регулярных линий передачи и минимизация длины нерегулярных линий передачи. Под регулярностью понимается неизменность поперечного сечения вдоль всей длины. К нерегулярным относятся линии передачи, у которых размеры сечения и свойства материалов меняются по всей длине. Линия, прямой и возвратный проводники которой при одинаковой длине имеют одинаковые форму и размер сечения, называется сбалансированной или сим-

метричной. В большинстве случаев качество сигнала и перекрестная помеха (амплитудные и фазовые искажения сигнала) не будут зависеть от того, сбалансирована линия или не сбалансирована. Однако на помехи по шинам заземления будут влиять особенности формы возвратного проводника [13].

Скорость распространения сигнала в линии передачи зависит от материалов, которые окружают проводники, и от того, насколько быстро изменяющиеся магнитные и электрические поля взаимодействуют с сигналом, который может их создавать и распространяться вокруг проводников линий передачи. Сигнал представляет собой разность потенциалов между сигнальным и возвратным проводниками, что определяет наличие между проводниками электрического поля. Скорость распространения фронта сигнала v , м/с, в произвольной среде находится по выражению

$$v = \frac{2,99 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}.$$

В воздухе, где относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r и относительная магнитная проницаемость μ_r равны 1, скорость распространения электромагнитной волны есть скорость света. Практически все материалы, из которых выполняют линии передачи в ПП, включая металлы и диэлектрики, имеют относительную магнитную проницаемость, равную единице. Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектриков, входящих в конструкцию линий передачи, больше единицы. Это означает, что скорость электромагнитной волны в линиях передачи всегда будет меньше скорости света.

4.3 Путь возвратного тока в линиях передачи

Одним из основных аспектов любой электрической схемы является путь возвратного тока. Если на схеме путь, по которому идет ток, чтобы вернуться к полюсу низкого потенциала источника питания, очевиден, то он может быть не столь очевиден на пла-

те. Возвратный ток в линии передачи возвращается к источнику через емкость между сигнальным и возвратным проводниками. Емкость определяется взаимным расположением проводников и диэлектрической постоянной изолятора и в общем случае не зависит от напряжения между проводниками. В некотором смысле сигнал сам выбирает собственный возвратный путь.

Считается, что ток идет по пути наименьшего сопротивления, но это справедливо только для цепей постоянного тока. Возвратный ток изменяющихся со временем сигналов следует по пути наименьшего полного сопротивления. Из базового курса электроники известно, что полное сопротивление можно разложить на активную часть (не зависящую от частоты) и реактивную (зависящую от частоты). На самом деле любая цепь в ПП может вести себя только как резистивная, или емкостная, или индуктивная в зависимости от формы, работы различных компонентов и частоты протекающего через цепь сигнала. Реальные цепи на плате следуют моделировать как RLC -цепи, даже если они не содержат конденсаторов и катушек индуктивностей.

Параметры линии передачи сигналов определяются качеством выполнения сигнального и возвратного путей. Любые изменения поперечного сечения или геометрической формы проводников на пути прохождения токов влияют на волновое сопротивление линии и, соответственно, на форму сигнала. Такие изменения волнового сопротивления называются неоднородностями. Каждая неоднородность вызывает определенные искажения сигнала от его первоначальной формы. Примерами неоднородностей геометрического характера могут служить изменение ширины проводника, наличие ответвлений от него; топологического характера – переход со слоя на слой, разрыв в плоскости заземления; схемно-конструктивного – наличие соединителя и несогласованной нагрузки на конце линии передачи.

Воздействие любой неоднородности линии передачи на целостность сигнала зависит от длительности фронта или спада сигнала. Если сигнал становится короче, то искажения увеличиваются. Это означает, что неоднородность, которая не была проблемой в плате, работающей, например, на частоте 33 МГц, может стать такой при частоте 100 МГц [13].

Следует всегда помнить, что ток протекает по замкнутому контуру, начинаясь в источнике и возвращаясь к нему. В линиях передачи принимаем, что сигнальный (прямой) проводник служит для подвода тока от источника к нагрузке, а возвратный путь тока расположен в проводящей среде, которая находится рядом с прямым проводником. При постоянном токе возвратный ток всегда протекает по пути с наименьшим активным сопротивлением, но при переменном токе он будет стремиться располагаться рядом с прямым путем. Чем выше частота, тем ближе конфигурации пути возвратного тока и прямого, при этом уменьшается полное сопротивление возвратного пути. Любые возмущения, которые имеются на пути возвратного тока, будут приводить к возмущениям в сигнальном токе и нарушат целостность сигнала. Поэтому в быстродействующих системах важно уделять внимание не только сигнальному проводнику, но и проводнику, несущему возвратный ток. При сближении прямого и возвратного токов происходит снижение индуктивности линии передачи и уменьшение ее волнового сопротивления. В любом случае путь возвратного тока будет формироваться таким образом, что индуктивность контура тока станет минимальной. Любая неоднородность на пути возвратного тока будет приводить к увеличению индуктивности, а следовательно, и волнового сопротивления, увеличивая искажения сигнала.

Сигнальный проводник может иметь любую топологию, и возвратный ток на плоскости будет следовать ей. Чем выше частота, тем ближе к сигнальному проводнику протекает возвратный ток. Это эффект близости, который замечен уже на частотах около 10 МГц. Поскольку токи в проводнике и в плоскости равны по значению и противоположны по направлению, излучаемые помехи уменьшаются. Анализ результатов вычислений показывает, что ширина зоны, в которой протекает возвратный ток, примерно в три раза больше ширины сигнального проводника (рисунок 4.5) [13].

Если сигнал, распространяющийся в линии передачи, встретит какую-либо неоднородность, которая влечет изменение волнового сопротивления, то часть его энергии отразится, а форма

прошедшей части сигнала будет искажена. Он будет изменяться в каждой точке, в которой изменяется волновое сопротивление.

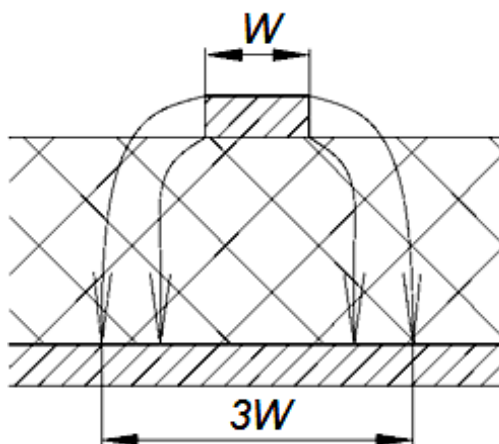


Рисунок 4.5 – Распределение тока в возвратном проводнике

Поворот сигнального проводника на 90° является неоднородностью, которая вызывает отражение сигнала и его искажения. Такой поворот эквивалентен увеличению ширины проводника, по которому распространяется сигнал, и увеличивает емкость на данном участке. Изменение угла поворота до 45° и его округление минимизирует влияние неоднородностей.

Кроме того, необходимо помнить, что при разводке ПП создание переходного отверстия, т. е. межслойного соединения, приводит к паразитной индуктивности. Металлизированные отверстия следует рассматривать как неоднородности в линии передачи. В низкочастотных системах они незначительно влияют на целостность сигнала, однако при длительности фронтов цифрового сигнала менее 1 нс их влияние следует учитывать. В области металлизированного отверстия путь возвратного тока не следует за сигнальным током, из-за чего появляется неоднородность. Параметры этой неоднородности зависят от размеров металлизированного отверстия. Эксперименты показали, что каждое такое отверстие увеличивает системную задержку примерно на 25 пс [15].

Следует иметь в виду, что индуктивность отверстия совместно с паразитной емкостью формируют резонансный контур, что может сказаться при работе на высоких частотах. Собственная индуктивность отверстия достаточно мала, и резонансная частота

находится в гигагерцовом диапазоне, но если сигнал в течение своего пути вынужден проходить через несколько переходных отверстий, то их индуктивности складываются (последовательное соединение), а резонансная частота понижается. Следовательно, необходимо избегать большого числа переходных отверстий при разводке высокочастотных проводников ПП. Кроме того, при большом количестве переходных отверстий в полигоне земли могут создаваться петлевые участки [13].

Для сохранения целостности сигнала возможны различные варианты. Один из них заключается в установке развязывающих конденсаторов между слоем питания и слоем заземления у каждого переходного отверстия. Другой вариант запрещает переход трассы со слоя на слой, что, очевидно, неприемлемо. Эффективно применение слепых и глухих отверстий – это сокращает длину пути прохождения сигнала.

Разберем для примера четырехслойную плату, содержащую два сигнальных слоя и два полигонных: слой земли и слой питания. Часто расположение слоев не имеет особого значения, поскольку все равно компоненты располагаются на внешних слоях, а шины, подводящие сигналы к их выводам, проходят через все слои, поэтому любыми экранными эффектами можно пренебречь. В данном случае лучше позаботиться о создании большой распределенной емкости между полигонами питания и земли, расположив их во внутренних слоях как можно ближе друг к другу. Другим преимуществом расположения сигнальных слоев снаружи является доступность сигналов для тестирования и изменения [13].

Для МПП с более чем четырьмя слоями существует общее правило: располагать высокочастотные сигнальные проводники между полигонами земли и питания, а низкочастотным отводить внешние слои. Лучшее подавление электромагнитных и радиочастотных помех происходит благодаря эффекту отражения. В составе МПП используется несколько потенциальных слоев, в которых можно расположить пути возвратных токов. Особый интерес представляет слой, рядом с которым имеется другой потенциальный слой [15].

Проанализируем конструкцию МПП из четырех слоев (рисунок 4.6). Предположим, что в первом наружном слое располагаются сигнальные проводники. Когда проводники размещаются близко к плоской проводящей поверхности, возвратные высокочастотные токи будут протекать по поверхности второго слоя, непосредственно под проводником. Направление этих токов будет противоположно направлению токов в проводнике. Согласно законам индукции на поверхности третьего слоя наводятся токи противоположного направления, которые в свою очередь наводят токи в четвертом слое. Такое распределение тока в слоях с учетом скин-эффекта будет зависеть от частоты. Распределение тока в каждом слое будет таким, чтобы минимизировать общую индуктивность в сигнальном контуре. Для минимизации индуктивности и волнового сопротивления между смежными проводящими плоскостями следует использовать по возможности более тонкий диэлектрик. Это увеличит связь между слоями и будет обеспечивать путь с низким полным сопротивлением для возвратного тока, протекающего вблизи сигнального [13].

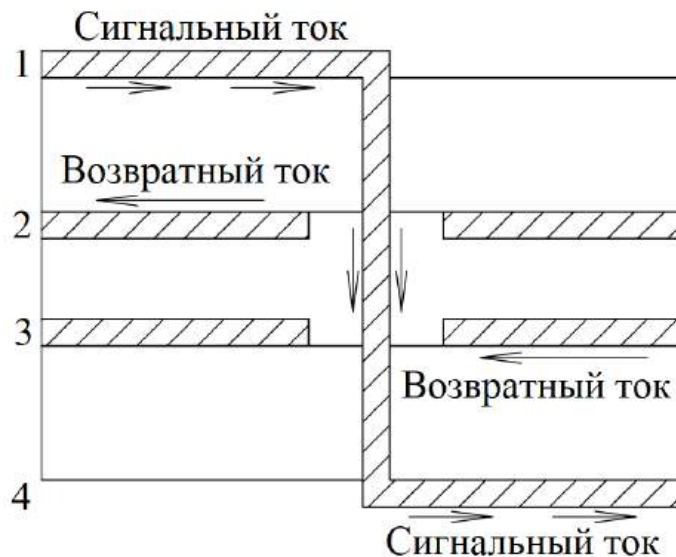


Рисунок 4.6 – Сечение четырехслойной печатной платы с переходом сигнального тока по металлизированному переходному отверстию

Сложнее определить, как будет протекать возвратный ток при прохождении сигнального тока по металлизированному отверстию, которое соединяет слои МПП. Здесь также соблюдается

общий принцип минимизации общей индуктивности пути тока. Металлизированное отверстие обеспечивает резкое изменение направления тока, но оно достаточно короткое (определяется толщиной платы), а плоскости имеют низкое полное сопротивление. Поэтому вносимая неоднородность будет достаточно мала. Переходное отверстие имеет гарантированный зазор от потенциальных внутренних плоскостей. Возвратный ток будет распределен по внутренней поверхности плоскости, связан через емкость «плоскость – плоскость» и встретит на своем пути сопротивление, равное полному сопротивлению линии передачи, созданной этими плоскостями. За счет этого сопротивления возвратный ток будет вызывать изменение напряжения на своем пути, которое называется «подскок» [21]. При большом полном сопротивлении возвратного пути увеличивается напряжение подскока и в системе повышается уровень помех. Одной из главных задач проектирования возвратного пути является минимизация его индуктивности для минимизации подскока напряжения. Это реализуется расположением слоев питания и земли на минимальном расстоянии друг от друга.

4.4 Путь возвратного тока в аналого-цифровых платах

Хорошее заземление – общее требование насыщенной многоуровневой системы. И оно должно планироваться на этапе проектирования. Разделение земли на аналоговую и цифровую – один из простейших и наиболее эффективных методов подавления помех. Не менее одного слоя МПП обычно отводится под земляные полигоны [15]. Землю на МПП необходимо разделять при ее проектировании. Для этого к аналоговому земляному полигону подключаются компоненты аналоговой схемы (аналоговая земля), а к цифровому – компоненты цифровой (цифровая земля). И лишь после этого в источнике объединяются цифровая и аналоговая земля.

Рассмотрим различные варианты зонирования для аналого-цифровых схем. В простейшем случае потенциальный слой разделяют на две зоны (рисунок 4.7). При таком разделении зазор

между аналоговой и цифровой землей (щель) полностью прервет возвратные токи, которые должны повторять конфигурацию сигнальных проводников [13].

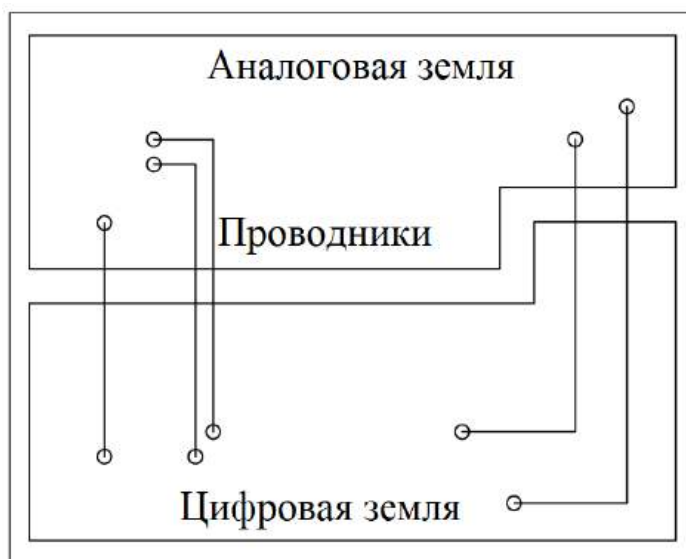


Рисунок 4.7 – Разделение плоскостей возвратных токов на две зоны

Единственный путь, по которому может протекать возвратный ток в данном случае, должен быть организован только посредством внешних проводников, соединяющих потенциальные участки с источником питания или общей точкой (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Контур возвратных токов при разделении на две зоны

В этом случае могут образоваться токовые контуры значительной площади из-за разнесения прямых и возвратных токов, что приведет к существенному возрастанию уровня перекрестных помех и помехоэмиссии.

Часто сигнальный проводник располагают над слоем аналоговой земли (рисунок 4.9), из-за чего в этом слое будут индуцироваться возвратные токи, вызывающие помеховые напряжения в аналоговой схеме. Если возвратные токи протекают в обход щели, то увеличивается площадь контура, что ухудшает ЭМС. Так что оба варианта неприемлемы. В идеале сигнальный проводник должен располагаться строго над участком слоя цифровой земли, отведенным для цифровой схемы. При этом надо помнить, что зона, занимаемая возвратным током, примерно в три раза больше ширины сигнального проводника, так что проводник следует располагать только над слоем, соответствующим зоне расположения соединяемых компонентов [13].

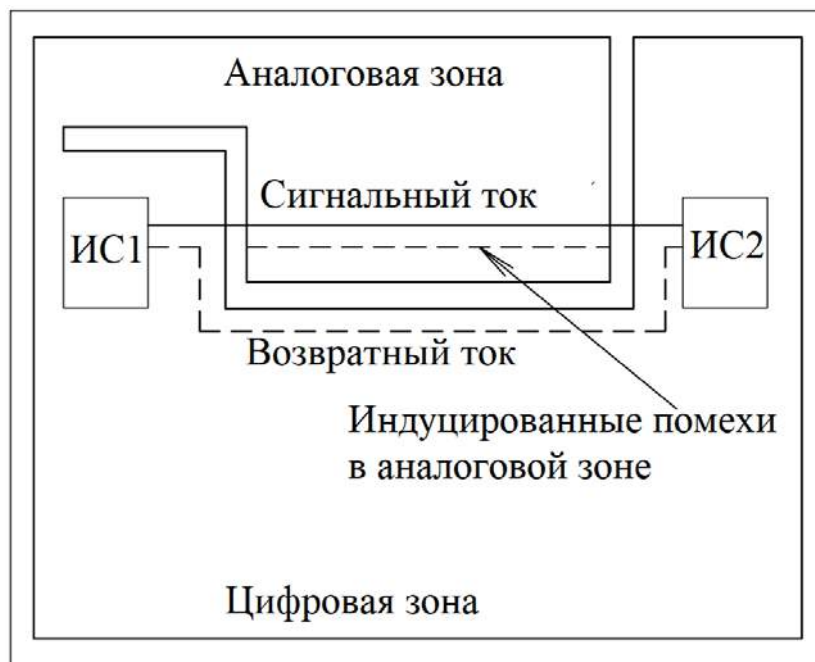


Рисунок 4.9 – Неприемлемый вариант расположения сигнального проводника аналого-цифровой схемы

Ситуация улучшится, если отдельные зоны потенциального слоя соединить в узкой области, поверх которой располагаются проводники (рисунок 4.10). Тогда возвратные токи станут протекать под сигнальными проводниками и площади токовых конту-

ров будут минимальны. Недостаток подобного способа – усложнение трассировки.

Можно обойтись и без щели в потенциальном слое. Если учесть, что высокочастотные токи протекают строго под сигнальными проводниками, являясь их как бы зеркальными отражениями на потенциальном слое, то при строгом расположении этих проводников в соответствующих зонах обеспечивается разделение и возвратных токов.

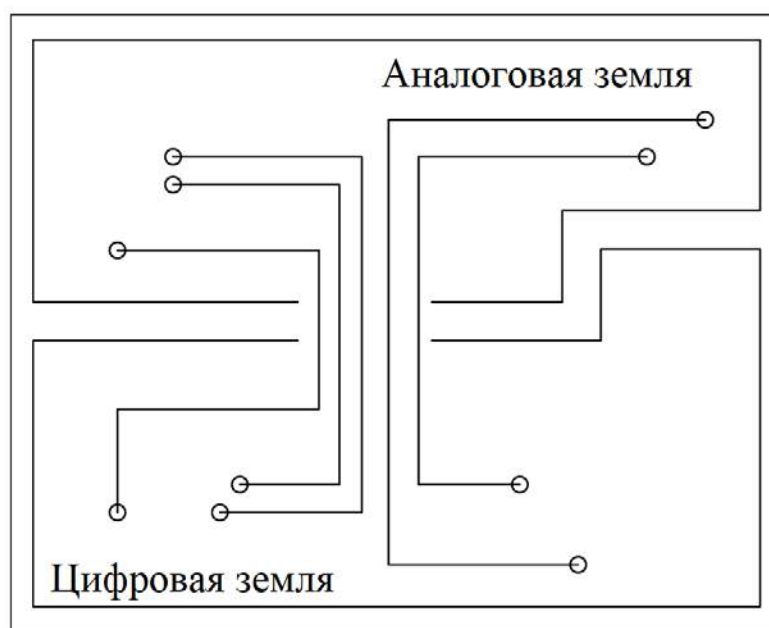


Рисунок 4.10 Одноточечное соединение в потенциальном слое

Тогда зоны будут разделены границей и для корректного перехода между зонами на ней следует располагать аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи. Этот вариант наиболее предпочтителен (рисунок 4.11).

Необходимо принимать во внимание, что цифровые элементы преобразователя могут ухудшать качественные характеристики схемы, внося цифровые помехи в цепи аналоговой земли и аналогового питания. При разработке преобразователей это негативное воздействие учитывается таким образом, чтобы цифровая часть потребляла как можно меньше мощности. При этом помехи от переключений логических элементов уменьшаются. Если цифровые выходы преобразователя не сильно нагружены, то внутренние переключения обычно не вызывают особых проблем. При разра-

ботке ПП, содержащей АЦП или ЦАП, необходимо должным образом отнестись к развязке цифрового питания преобразователя на аналоговую землю [13].

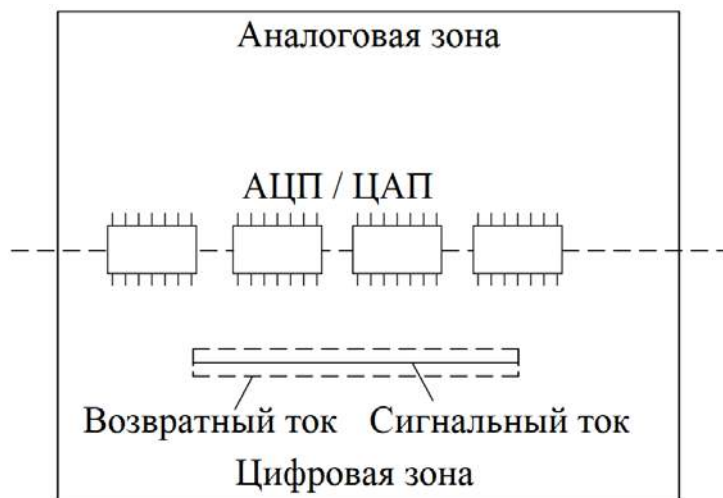


Рисунок 4.11 – Разделение потенциального слоя на аналоговую и цифровую зоны с помощью АЦП/ЦАП

Существуют такие варианты, в которых между зонами на минимальном расстоянии от сигнальных проводников устанавливают высокочастотные конденсаторы (рисунок 4.12).

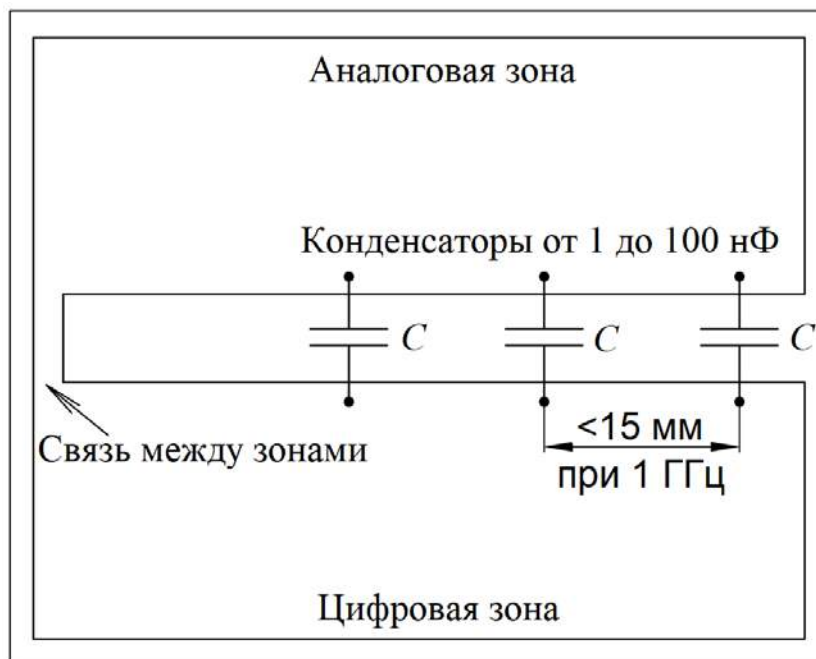


Рисунок 4.12 – Разделение потенциального слоя на аналоговую и цифровую зоны с помощью конденсаторов

Возможен также вариант размещения всех компонентов на плате, включая источник питания (рисунок 4.13), при котором используются три отделенных друг от друга и изолированных полигона «земля – питание»: для схемы питания, цифровой и аналоговой схем. Цепи земли и питания цифровой и аналоговой схем объединяются только в схеме питания. Высокочастотная помеха отфильтровывается в цепях питания дросселями. В этом примере высокочастотные сигналы цифровой и аналоговой схем разнесены друг от друга. Такой вариант имеет очень высокую вероятность минимального взаимовлияния частей схемы, поскольку обеспечено оптимальное размещение компонентов и следование правилам разделения цепей [13].

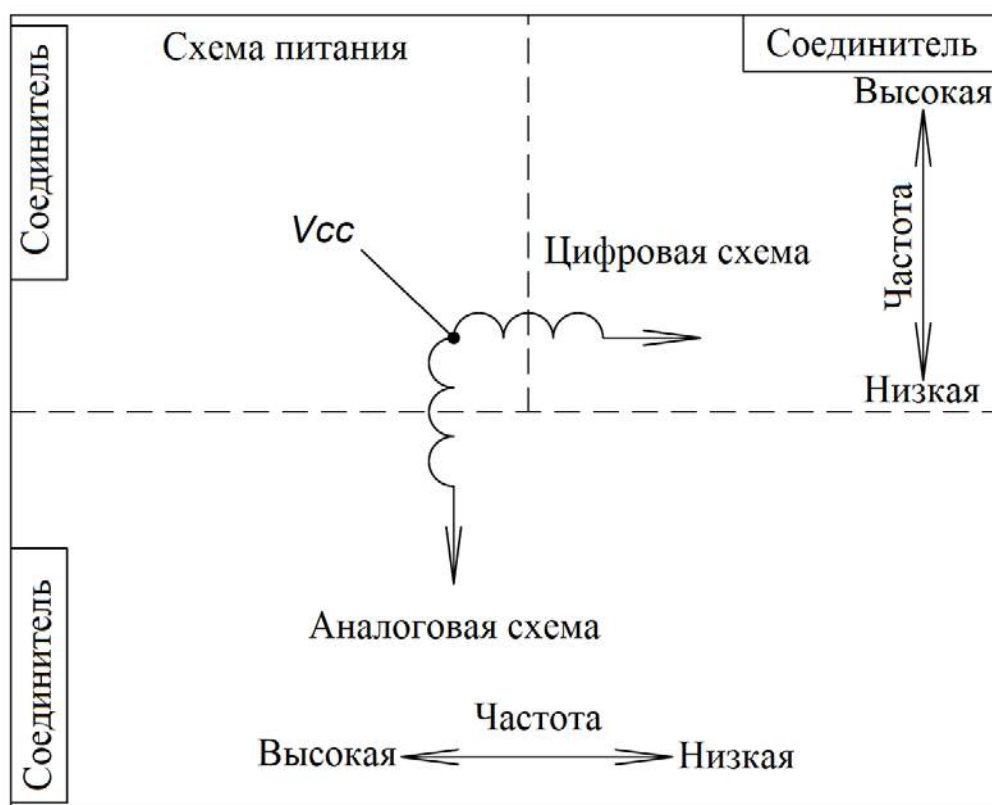


Рисунок 4.13 – Размещение на плате трех схем

Итак, основные правила формирования земли на ПП:

- шины питания и земли должны находиться под одним потенциалом по переменному току, что подразумевает использование конденсаторов развязки и распределенной емкости;
- не допускаются перекрытия аналоговых и цифровых полигонов. Шины и полигоны аналогового питания располагаются над

полигоном аналоговой земли (аналогично для шин цифрового питания). Если в каком-либо месте существует перекрытие аналогового и цифрового полигонов, распределенная емкость между перекрывающимися участками будет создавать связь по переменному току и наводки от работы цифровых компонентов попадут в аналоговую схему;

– необходимо разделять выводы соединителей, предназначенные для передачи возвратных токов, т. е. возвратные токи должны объединяться только в точке системной земли. Старение контактов соединителей, а также частая расстыковка их ответных частей вызывают увеличение сопротивления контактов. Следовательно, для более надежной работы необходимо использование дополнительных выводов. Сложные цифровые ПП имеют много слоев и содержат сотни или тысячи проводников. Добавление еще одного проводника редко создает проблему в отличие от дополнительных выводов соединителей. Необходимо создавать два проводника возвратного тока для каждой силовой цепи на плате;

– важно отделять шины цифровых сигналов от аналоговых компонентов схемы. Это предполагает изоляцию (экранирование) полигонами, создание коротких трасс аналоговых сигналов и тщательное размещение пассивных компонентов при наличии рядом расположенных шин высокочастотных цифровых и аналоговых сигналов. Шины цифровых сигналов должны разводиться вокруг участков с аналоговыми компонентами и не перекрываться шинами и полигонами аналоговой земли и аналогового питания. В противном случае схема будет содержать новый непредусмотренный элемент – антенну, излучение которой будет воздействовать на аналоговые компоненты и проводники с высоким сопротивлением;

– необходимо помнить, что не только основная тактовая частота может вызывать проблему, но и ее высшие гармоники. Почти все сигналы тактовых частот являются достаточно высокочастотными, поэтому даже небольшие емкости между трассами и полигонами могут создавать значительные связи.

Оптимально размещать аналоговую часть схемы вблизи входных и выходных соединений платы. Проектировщики цифровых ПП, использующие мощные интегральные схемы, часто

склонны разводиться шины шириной 1 мм и длиной несколько сантиметров для соединения аналоговых компонентов, полагая, что малое сопротивление трассы поможет избавиться от наводок. При этом получается протяженный пленочный конденсатор, на который будут наводиться паразитные сигналы от цифровых компонентов, цифровой земли и цифрового питания, усугубляя проблему [13].

Контрольные вопросы

1. Что называется печатной платой?
2. Какие виды плат существуют?
3. Какую роль играет металлизированный полигон в ПП?
4. Назовите преимущества применения многослойных ПП.
5. Что понимается под линией передачи сигналов?
6. От чего зависит скорость распространения сигнала в линии передачи?
7. Что относится к неоднородностям линии передачи?
8. Какова ширина зоны, в которой протекает возвратный ток?
9. С какой целью рекомендуется разделение аналоговой и цифровой земли на ПП?
10. Где рекомендуется располагать слои с полигонами земли и питания в МПП?

5 ПОМЕХИ В СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ И ШИНАХ ПИТАНИЯ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

5.1 Перекрестная помеха в связанных линиях передачи

Когда на одном проводнике есть сигнал, то на нем возникает некоторое напряжение и в нем протекает ток. Электрические и магнитные поля от токов и напряжений в активной линии взаимодействуют с расположенными рядом проводниками (пассивными линиями) и, согласно законам индукции, наводят в них токи и электрические заряды. Эти наведенные токи и заряды вследствие входных и выходных сопротивлений компонентов, подключенных к пассивной линии, создают на концах линии наведенные напряжения помех, которые называются *перекрестными помехами*. Помеховые напряжения могут быть достаточно высокими. Согласно принципу суперпозиции они могут складываться с полезными сигналами и в конечном счете сами по себе или совместно с полезным сигналом могут повлиять на работоспособность системы. Если между цепями существуют индуктивная и емкостная связи, это обеспечивает путь для попадания нежелательных сигналов из одной цепи в другую [13].

Перекрестная помеха – одна из важнейших проблем обеспечения целостности сигнала. Данные помехи образуются при передаче электромагнитной энергии из активной цепи в соседнюю пассивную цепь. На ПП перекрестным помехам подвержены печатные проводники, расположенные в непосредственной близости от линии передачи, в которой происходят динамические процессы переключения. При взаимодействии линий различают перекрестную помеху на ближнем к драйверу (преобразователь электрических управляющих сигналов в сигналы, необходимые для непосредственного управления) конце пассивной линии и на ее дальнем конце – нагрузке. Напряжение помех на дальнем конце пассивной линии представляет большой интерес, так как от него

зависит условие переключения микросхемы нагрузки, следовательно, системная задержка и возможность сбоя.

При проектировании линий передачи в печатных платах, особенно многослойных, в качестве возвратного пути используются слои металлизации. Наличие таких слоев снижает магнитную и электрическую компоненты связи между отдельными линиями. Любое нарушение однородности возвратного пути в слое металлизации будет приводить к увеличению связи между линиями.

Существует несколько способов уменьшения уровня перекрестных помех в связанных линиях передачи [21]:

- 1) увеличение расстояния между проводниками и уменьшение ширины проводников. При этом предельная ширина определяется технологическим процессом и толщиной фольги. Если два проводника проходят близко друг к другу, то между ними образуется емкостная и индуктивная связь. Сигнальные проводники не должны располагаться параллельно друг другу, кроме разводки дифференциальных или микрополосковых линий. Зазор между проводниками должен быть как минимум в три раза больше их ширины – тогда помеха уменьшается на 65 %. При этом, конечно, уменьшается и плотность расположения проводников на ПП. Кроме того, расстояние между проводниками влияет на напряжение электрического пробоя: чем оно больше, тем большее напряжение необходимо приложить для пробоя. Идеальных диэлектриков не бывает, и при определенных условиях любой материал может проводить ток. То же самое относится и к воздуху, окружающему проводники. Воздушный электрический пробой – большая проблема в электронике, если учитывать влажность воздуха;

- 2) уменьшение длины зоны взаимодействия. При этом снижается амплитуда перекрестных помех;

- 3) покрытие линий диэлектрическим материалом, что делает среду более однородной. Добавление диэлектрического покрытия увеличивает помеху на ближнем конце и уменьшает волновое сопротивление линии. Если линия заглублена при толщине покрытия, равной примерно пяти значениям ширины проводника, можно считать, что она расположена в однородном диэлектрике. В некоторых случаях при толщине покрытия, равной толщине ос-

нования, помеха на дальнем конце линии равна нулю. Оптимальная толщина покрытия зависит от формы топологических рисунков и диэлектрической проницаемости. Даже тонкая паяльная маска будет обеспечивать заметное уменьшение помех на дальнем конце линии;

4) переход на полосковые линии. В этом случае линии расположены в однородном диэлектрике и помехи на дальнем конце равны нулю. При более детальном рассмотрении диэлектрик ПП также неоднороден, поэтому неоднородна и диэлектрическая проницаемость. Это может вызвать небольшой уровень перекрестных помех;

5) применение защитных трасс, расположенных между активной и пассивной линиями передачи. Защитная трасса фактически играет роль экрана, перехватывая силовые линии электрического поля между сигнальными проводниками. Она создает дополнительный возвратный путь для сигнальных токов, что приводит к снижению индуктивности сигнального контура. Но это происходит только при замыкании накоротко защитной трассы на обоих концах. В противном случае сигнал, распространяющийся по активной линии, будет генерировать напряжение помех на защитной трассе. Возвратный помеховый сигнал достигнет замкнутого накоротко ближнего конца защитной трассы и отразится с коэффициентом отражения минус 1. Это означает, что увеличенная помеха на ближнем конце защитной трассы при движении ее в обратном направлении будет скомпенсирована такой же по амплитуде отрицательной отраженной помехой ближнего конца, распространяющейся в прямом направлении. Металлизированные отверстия непосредственно не влияют на связь между активной и пассивной линиями, но способствуют подавлению напряжения помех, которое генерируется в защитной трассе. Отверстия должны распределяться вдоль защитной трассы так, чтобы на зону взаимодействия приходилось не менее трех из них. Это будет гарантией перекрытия помех дальнего конца с отрицательным отражением, что обеспечит устранение напряжения помех в защитной трассе;

6) использование слоя заземления для борьбы с перекрестными помехами, которые являются внутренним проявлением про-

блемы ЭМС. Перекрестная помеха, возникающая при электромагнитном взаимодействии двух проводников, обусловлена индуктивной и емкостной связью, а также связью через общее сопротивление заземления. В общем случае присутствуют все три фактора. Действие слоя заземления заключается в существенном уменьшении общего полного сопротивления заземления на 40–70 дБ при бесконечном заземленном слое по сравнению с узким проводником. Слой заземления может также уменьшить взаимную индуктивность. Емкостная связь между проводниками непосредственно не подвергается воздействию данного слоя, но уменьшение волнового сопротивления линии будет снижать амплитуду перекрестной помехи.

5.2 Помехи в шинах питания

Весьма актуальной в ЭМС стала проблема помех в цепях «земля – питание». Суть ее заключается в том, что активные компоненты (транзисторы, аналоговые и цифровые микросхемы) при работе создают всплески потребления тока по цепям «земля – питание», характеризующиеся величиной dI/dt . Эти всплески могут приводить к помехам. Крайне остра эта проблема для цифровых микросхем, особенно высокой или малой степени интеграции, но при большом их количестве на одной ПП большого размера. Образование импульсного тока при переключении цифровых микросхем приводит к импульсному падению напряжения на шинах питания.

Помехи в печатных платах возникают не только в сигнальных проводниках, но и в шинах питания и заземления, подходящих к каждому корпусу микросхем. При изменении тока потребления во время работы микросхем происходит уменьшение напряжения питания и увеличение напряжения в шине заземления [22]:

$$V = L \frac{dI}{dt}.$$

При этом роль индуктивности L будут выполнять печатные проводники и выводы микросхем. По этой причине при проекти-

ровании ПП следует учитывать, что на каждые 2,5 см проводника приходится индуктивность, равная 20 мкГн.

Для печатного проводника индуктивность L , нГн, определяется по формуле

$$L = 0,2l \left(\ln \frac{2l}{w+t} + 0,2235 \frac{w+t}{l} + 0,5 \right),$$

где l , w , t – длина, ширина, толщина проводника соответственно, см.

Необходимо отметить, что индуктивность печатного проводника также зависит от толщины фольги ПП. Логарифмическая зависимость указывает, что при уменьшении длины печатного проводника в два раза его индуктивность уменьшится также в два раза. В то же время увеличение ширины проводника в 10 раз даст такой же эффект, т. е. уменьшение индуктивности в два раза.

Каждое переходное отверстие между слоями ПП представляет собой катушку индуктивности. Ее индуктивность L , нГн, определяется по формуле

$$L = 0,2h \left(1 + \ln \frac{4h}{d} \right),$$

где h – толщина ПП, мм; d – диаметр переходного отверстия, мм.

При толщине ПП 1,5 мм каждое переходное отверстие диаметром 0,4 мм будет иметь индуктивность 1,1 нГн. Кажется, что таким небольшим значением можно пренебречь. Однако даже подобная индуктивность может вызвать неустойчивость работы микросхемы. По этой причине развязывающий конденсатор следует устанавливать в непосредственной близости от вывода питания микросхемы.

В высокопроизводительных микропроцессорах и микросхемах наблюдается тенденция уменьшения напряжения питания и увеличения потребляемой мощности. Это в первую очередь вызвано стремлением повысить быстродействие микросхем. В каждом цикле потребляется определенная энергия. При повышении частоты переключения энергия цикла остается неизменной, но за единицу времени ее поглощается больше, что приводит к значительной потребляемой мощности всего устройства, вследствие

чего увеличивается перепад тока потребления за один цикл и снижается допустимый уровень помех. Поскольку напряжение питания микросхем уменьшается, а уровень тока растет, любая просадка напряжения в шине питания становится все более серьезной проблемой.

Импульсные эмиссии в цепях питания могут приводить к сбоям в работе микросхем по следующим основным причинам [13]:

- изменение питающего напряжения выше установленного допуска изменяет характеристики работы микросхем вплоть до ложного срабатывания, нарушает работу схемы ограничения тока;
- импульсное падение напряжения в шине «земля» приводит к искажению информационного сигнала на входе микросхемы;
- помехи из цепей питания переносятся в сигнальные цепи из-за наличия индуктивной и емкостной связи между ними.

Для снижения уровня помех в шинах питания применяют следующие способы:

- уменьшение активного сопротивления и индуктивности шин питания с учетом взаимной магнитной связи прямого и обратного проводников и расположения шины питания и заземления в МПП на минимальном расстоянии с минимально возможной толщиной диэлектрической прокладки между проводящими слоями;
- сокращение длины участков шин питания, которые являются общими для токов от различных компонентов;
- снижение скорости изменения импульсных токов в шинах питания с помощью установки помехоподавляющих конденсаторов (как правило, безындуктивных керамических емкостью 0,1–1 мкФ) в непосредственной близости от точек подключения микросхем к шинам питания;
- рациональная топология цепей питания.

С помехами по цепям «земля – питание» тесно связан вопрос размещения компонентов. Например, для улучшения ЭМС в ПП рекомендуется быстродействующие логические схемы располагать ближе к основному соединителю, схемы интерфейса – к соединителю интерфейса, а аналоговые схемы отделять от цифровых.

Цепи «земля – питание» существенно влияют на площадь контуров, по которым протекают различные токи. Как правило, уменьшение контуров понижает электромагнитные помехи. Рост плотности монтажа и быстродействия элементной базы привел к обострению проблемы проектирования системы «земля – питание», которая требует электродинамического анализа распределения токов в этой системе и даже излучаемых эмиссий от нее. Там, где эта проблема особенно актуальна, начинают широко применять совмещенные с ПП специальные слои «земля – питание», разделенные между собой тонким слоем диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью [13].

Уменьшению помеховых связей способствует технология поверхностного монтажа, которая предполагает применение компонентов малых размеров и уменьшение размеров токовых контуров. Это преимущество проявляется при использовании МПП с обязательной установкой слоев питания и заземления. При использовании МПП площадь контуров, образуемая проводниками, сокращается с уменьшением произведения длины проводника на расстояние между сигнальным слоем и слоем земли. Поэтому при решении задач ЭМС применение поверхностного монтажа и использование МПП являются взаимодополняющими решениями. Кроме того, преимущество поверхностного монтажа состоит в повышении степени плотности компоновки, что позволяет существенно уменьшить площадь платы и более эффективно использовать ее, например, для установки элементов фильтрации и ограничителей напряжения.

Как уже отмечалось, помехи могут проникать в аналоговую часть схемы через цепи питания. Для уменьшения таких помех применяются развязывающие (блокировочные) конденсаторы, понижающие сопротивление шин питания.

Наиболее популярным является использование четырехслойной ПП, в верхнем и нижнем слоях которой размещены сигнальные печатные проводники, а два внутренних слоя заняты полигонами земли и питания. Одной из главных задач при проектировании системы распределения питания на ПП – снижение амплитуды колебаний напряжения на кристаллах микросхем до такого уровня, при котором устройство работает надежно. Коле-

бания происходят вследствие импульсного потребления тока микросхемой при ее переключении. Установленный между шинами питания и земли конденсатор выступает в качестве альтернативного пути, который пропускает высокочастотные сигналы на землю, уменьшая шум в цепи.

Развязка питания интегральных схем состоит в применении одного или нескольких конденсаторов, подключенных между выводами питания и земли (рисунок 5.1). Важно, чтобы проводники, соединяющие выводы с конденсаторами, были короткими, иначе собственная индуктивность проводников будет существенной и применение развязывающих конденсаторов будет нецелесообразным [13].

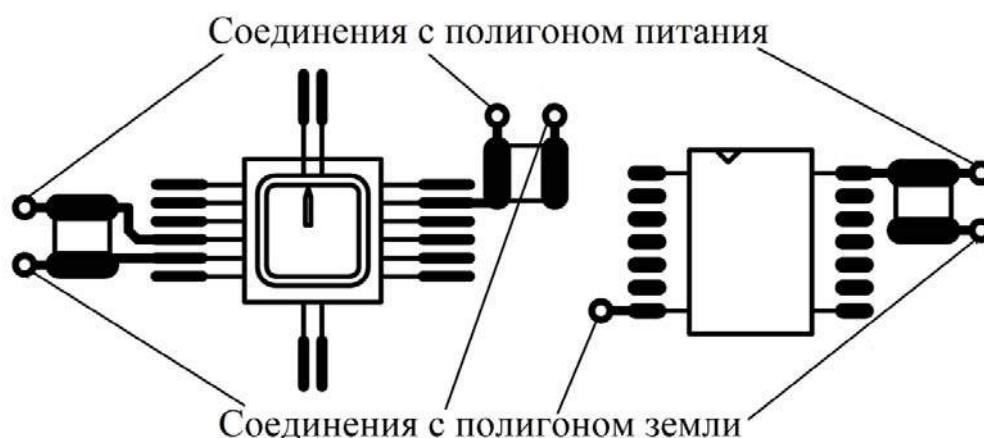


Рисунок 5.1 – Подключение развязывающих конденсаторов

Развязывающий конденсатор должен быть подключен к каждому корпусу микросхемы независимо от того, сколько операционных усилителей (ОУ) находится внутри корпуса. Если на ОУ подается двуполярное питание, то развязывающие конденсаторы необходимо располагать у каждого вывода питания. Питание должно приходить на вывод микросхемы через конденсатор. Значение емкости следует тщательно выбирать в зависимости от типа помех, присутствующих в схеме. При использовании интегральных схем, в которых силовая часть и схема управления встроены в один корпус, один развязывающий конденсатор может выполнять свою функцию и для силовых цепей, и для схемы управления.

В особо сложных случаях может появиться необходимость добавления индуктивности, включенной последовательно с выводом питания. Катушки индуктивности должны располагаться до, а не после конденсаторов.

Другим, более дешевым способом является замена катушки индуктивности резистором с малым сопротивлением (10–100 Ом). При этом вместе с развязывающим конденсатором резистор образует низкочастотный фильтр. Этот способ уменьшает диапазон питания ОУ, который к тому же становится более зависимым от потребляемой мощности [13].

5.3 Способы уменьшения помех в печатных узлах

При проектировании печатных узлов следует руководствоваться практическими правилами [13]:

- использовать ПП только из качественного материала;
- применять схемы, выполненные на МПП, которые на 20 дБ менее восприимчивы к внешним помехам, чем схемы, выполненные на ДПП;
- использовать разделенные, неперекрывающиеся полигоны для различной земли и напряжения питания;
- размещать трассы с потенциальными помеховыми сигналами дальше от чувствительных цепей;
- располагать полигоны земли и питания на внутренних слоях МПП;
- использовать полигон в качестве обратного провода, который наиболее часто подключается в схеме, для упрощения трассировки, уменьшения сопротивления всех подключений, уменьшения помехи;
- выполнять печатные проводники максимально короткими;
- уменьшать ширину проводника, если требуется его большая длина;
- минимизировать площади замкнутых контуров для больших токов и чувствительных цепей;

- не допускать металлизированных участков полигона, не подключенных к какой-либо цепи;
- избегать применения лишних переходных отверстий, так как их собственная индуктивность может привести к возникновению дополнительных помех;
- не проводить печатные проводники под прямыми углами, сглаживать вершины углов, чтобы по возможности уменьшить искажения сигналов;
- увеличивать расстояния между проводниками и уменьшать ширину проводников;
- применять защитные трассы между активной и пассивной линиями передачи;
- покрывать проводники диэлектрическим материалом, что сделает среду более однородной;
- разделять землю на аналоговую и цифровую;
- не располагать проводники, передающие цифровые сигналы, через аналоговую часть платы и наоборот;
- размещать аналоговую схему вблизи соединителя питания;
- учитывать частотные ограничения, вносимые пассивными компонентами и проводниками платы;
- избегать вертикального размещения пассивных компонентов в высокочастотных схемах;
- использовать для высокочастотных схем компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа;
- правильно подключать неиспользуемые выводы активных компонентов;
- применять подходящие типы конденсаторов для подавления помех в цепях питания;
- применять конденсаторы у каждого вывода питания микросхемы, при необходимости использовать несколько конденсаторов для разных частотных диапазонов;
- использовать конденсаторы с меньшим значением емкости, если в схеме происходит возбуждение;
- подключать развязывающие конденсаторы аналогового питания только к аналоговой земле.

Контрольные вопросы

1. Как образуются перекрестные помехи?
2. Какие существуют способы уменьшения перекрестных помех?
3. Назовите способы снижения уровня помех в шинах питания.
4. Где рекомендуется устанавливать развязывающие конденсаторы с целью уменьшения уровня помехи, которая может проникать на микросхему через цепи питания?
5. Почему не допускаются не подключенные к какой-либо цепи металлизированные участки полигона?
6. Как применение компонентов для поверхностного монтажа влияет на размеры токовых контуров?
7. Какие элементы проводящего рисунка ПП играют роль индуктивности?

6 МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Правильный выбор материалов, технологических процессов и элементной базы при изготовлении ПП во многом определяет уровень работоспособности и надежности электронного устройства в целом. При этом необходимо учитывать следующие аспекты:

- назначение электронного устройства: технические условия на изделие, ожидаемый рабочий ресурс, элементная база с характеристиками по быстродействию, выходному сопротивлению, уровню рабочих сигналов, напряжений питания и пр.;
- эксплуатационные требования: возможность обслуживания и ремонта;
- условия окружающей среды в процессе хранения и эксплуатации;
- технологию изготовления: совместимость с действующим производством, степень и характер механизации и автоматизации при заданном объеме производства;
- базовые и вспомогательные материалы: объем возможных поставок, необходимость отбора материалов по специальным требованиям.

Основным отличием, характеризующим возможности того или иного метода изготовления, можно считать реализуемую им плотность межсоединений. При этом необходимо иметь в виду возможное и допустимое число монтажных точек на единицу площади ПП.

Условно все методы изготовления ПП можно объединить в группы: субтрактивные, аддитивные, комбинированные [23].

6.1 Субтрактивный метод

При *субтрактивном (химическом) методе* проводящий рисунок формируется на фольгированном материале путем удаления ненужных участков фольги травлением (рисунок 6.1). Метод

применяется, как правило, при изготовлении ОПП, для которых характерна избирательная защита рисунка проводников.

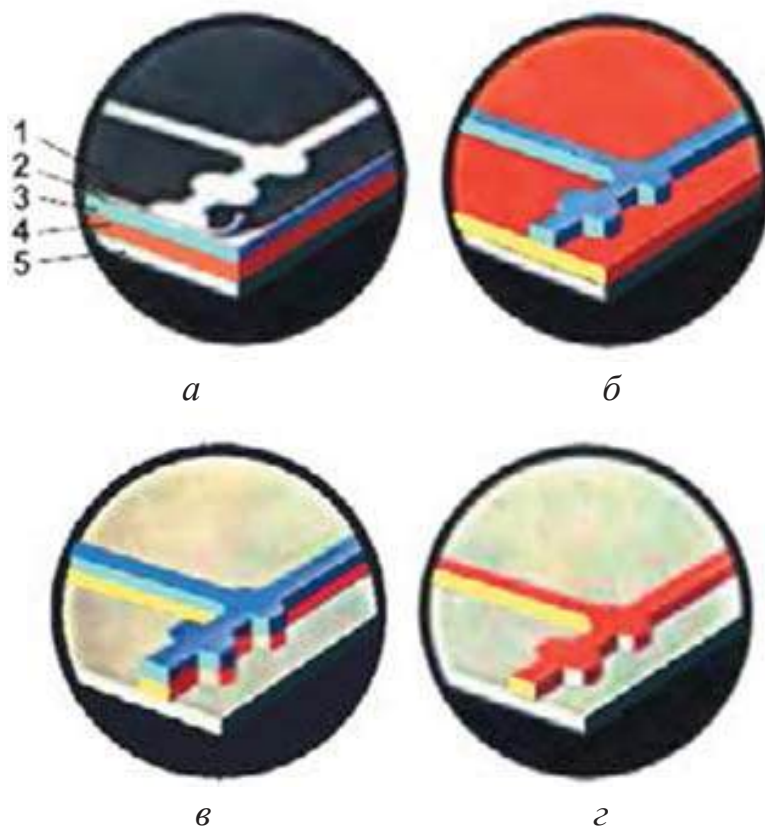


Рисунок 6.1 – Последовательность основных операций при субтрактивном методе: *а* – фотошаблон (1) с защитной пленкой (2) и фоторезистом (3) на основании заготовки (5) с медной фольгой (4); *б* – фоторезист после экспозиции; *в* – плата после травления; *г* – готовая плата

Стандартный субтрактивный метод включает следующие этапы:

- вырубку заготовки из изоляционного материала, фольгированного медью;
- сверление отверстий;
- подготовку поверхности фольги (дезоксидация), устранение заусенцев;
- нанесение фотолитографическим способом изображения печатной схемы с использованием чувствительного к ультрафиолету фоторезиста, фотошаблона и источника ультрафиолетового света (рисунок 6.1, *а*);

- проявление и закрепление фоторезиста после экспозиции (рисунок 6.1, б);

- смывание засвеченного фоторезиста с обнажением медной фольги для травления, при этом незасвеченный фоторезист фиксируется на фольге, защищая ее от травления;

- травление платы (рисунок 6.1, в);

- отмывку и сушку (рисунок 6.1, г);

- нанесение паяльной маски;

- горячее облуживание посредством плавления припоя;

- нанесение маркировки.

При травлении фольги платы медь переводится в растворимые соединения. Для незащищенной фольги чаще всего используется кислотное травление (хлорид железа и хлорид меди) или щелочное (аммиачный раствор).

Достоинства субтрактивного метода:

- высокое качество получаемой схемы;

- высокая производительность;

- экономичность технологического процесса;

- возможность полной автоматизации всего процесса изготовления.

Недостатки:

- образование больших подтравов в результате стравливания фольги сравнительно большой толщины, что делает невозможным изготовление плат по высокому классу точности (с малыми значениями зазоров между элементами проводящего рисунка и малой шириной проводников) (рисунок 6.2);

- необходимость использования фольгированных материалов, которые дороже нефольгированных;

- необходимость удаления дорогостоящей меди;

- воздействие химических материалов на изоляционное основание, приводящее к ухудшению диэлектрических свойств;

- большие объемы отработанных вредных жидкостей.

Подтравливание представляет собой боковую эрозию материала под защитным слоем олова/свинца. Сверху проводники защищены покрытием, нанесенным перед травлением, или фоторезистом, но сбоку они не защищены ничем, что делает возможной

реакцию с раствором травления и, как следствие, уменьшает ширину проводника.

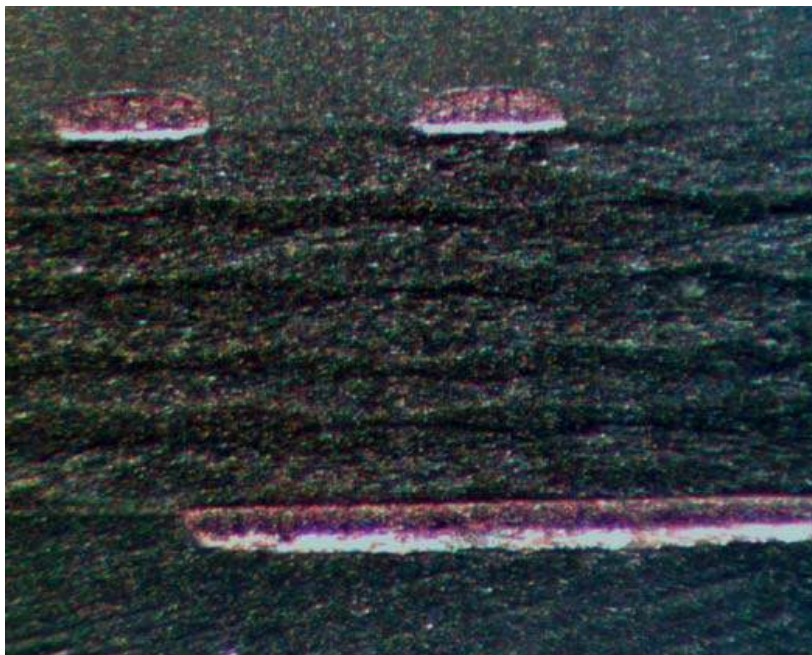


Рисунок 6.2 – Фрагмент печатной платы с боковыми подтравками печатных проводников

6.2 Аддитивные методы

Исходным материалом для *аддитивной технологии* является нефольгированный диэлектрик, на который наносится изображение. При двух основных методах – *фотоаддитивном* и с *приложением фоторезиста* – в самом начале выполняют одинаковые операции: формирование основы, выполнение выемок под металлизацию и обработку всей поверхности катализатором. Фотоаддитивные технологии осуществляются с помощью фотошаблон-негатива, после чего проводятся следующие операции: толсто-слоиное меднение; промывание; сушка; нанесение паяльной маски; обрезка по контуру.

Для приложения фоторезиста используется фотошаблон-позитив и проводятся следующие операции: проявление фоторезиста с оголением участков с катализатором; металлообработка пазов и проводников с образованием толстого слоя; маркировка; фотообрезка. Фоторезист служит защитным покрытием стекло-текстолита.

Достоинства аддитивных методов:

- нанесение тонкого рисунка;
- однородность структуры проводника и отверстий;
- повышенная плотность монтажа;
- упрощение технологического процесса из-за устранения ряда операций;
- экономия материалов;
- уменьшение длительности производственных циклов.

Недостатки:

- длительное воздействие раствора металлообработки на диэлектрик, что требует дополнительных действий по очищению;
- низкая производительность химического процесса осаждения меди.

Существуют и другие аддитивные методы. Один из них – ***нанесение токопроводящих красок или металлонаполненных паст***. Его главные проблемы – трудность создания в проводниках нужной проводимости, желательно соизмеримой с основным металлом; неточное воспроизведение рисунка с хорошим разрешением; сложность обеспечения паяемости.

Проблемы проводимости могут быть решены при условии максимального удаления связующего вещества, разделяющего металлические частицы, из объема краски или пасты. Наилучшим образом это достигается при высоких температурах обработки, которая требует нагревостойких диэлектрических оснований типа стекла, керамики. Нанесение проводников на органические основания менее эффективно из-за их ограниченной нагревостойкости и связанных с этим трудностями в удалении связующего вещества для сближения металлических частиц. Поэтому на органических подложках удается достичь 20 % проводимости от чистого металла.

Итак, чем выше температура обжига, тем лучше условия для обеспечения большей проводимости, силы сцепления с подложкой, паяемости. Наиболее удовлетворительные результаты получены с составами на основе серебра и связующего вещества из мелкодисперсного низкоплавкого стекла (фритта). При обжиге с повышением температуры до 500–800 °С улетучивается растворитель, выгорает органическое связующее вещество и, наконец,

плавится фритта. При охлаждении частички серебра прочно сцепляются в объеме фритты, которая в свою очередь прочно сцепляется с керамической подложкой. Проводимость таких проводников может достигать 95 % проводимости чистого серебра.

Токопроводящую краску обычно наносят методом трафаретной печати, обеспечивая минимальную ширину проводника 0,8 мм при норме 1,5 мм. При этом формирование проводящего слоя в отверстиях связано с большими трудностями.

Горячая запрессовка металлического порошка (тиснение) – нанесение на поверхность подложки тонкодисперсной металлической пудры (порошка) опудриванием, пульверизацией, катафорезом, накатыванием или любым другим способом. Затем нагретым штампом с рельефом, соответствующим топологии схемы, порошок впрессовывается в основание подложки. На пробельных местах порошок не закрепляется и удаляется. Штампом можно одновременно вырубать отверстия и контур плат. Этот метод незаменим для массового производства плат с подложками из дешевых материалов: картона, листовых термопластичных и терморезистивных пластмасс и др.

При **штамповании** медную фольгу покрывают клеящим веществом и подают в автоматический штамповальный пресс. Фольга вырубается и впрессовывается в изоляционный материал острыми кромками штампа по периметру проводников. Нагретый штамп не только впрессовывает края фольги в изоляционный материал, но и расплавляет клеящее вещество, благодаря чему обеспечивается прочное сцепление проводников с основанием. Температура нагрева штампа зависит от используемого клеящего вещества и составляет приблизительно 110 °С для термопластичных и 150 °С для терморезистивных смол. Время выстоя штампа при склеивании термопластичной смолой составляет примерно 2 с. Для терморезистивной смолы оно значительно больше. Поэтому для ускорения процесса, чтобы время выстоя штампа было минимальным, обеспечивают лишь закрепление фольги на подложке. После сверления отверстий, вырубки пазов для разобщения цепей схема вновь нагревается под давлением до окончательного отверждения клеящего вещества.

К аддитивным технологиям можно полноправно отнести и **метод переноса**. Один из перспективных вариантов реализации такого процесса – использование электрохимического осаждения металлов. При переносе проводящий рисунок создается на временных носителях – листах из нержавеющей стали, поверхность которых предварительно покрывается гальванически осажденной медью толщиной 2–5 мкм.

На тонком медном покрытии формируется защитный рельеф фоторезиста. Проводники получают гальваническим осаждением тонкого слоя никеля (2–3 мкм) и меди (30–50 мкм) на рельеф фоторезиста. Затем фоторезист удаляют и проводящий рисунок на всю толщину впрессовывают в диэлектрик. Впрессованный рисунок проводников вместе с медной шиной механически отделяется от поверхности временных носителей. Таким образом его переносят с металлического листа на диэлектрическую подложку. Отсюда название метода.

В слоях без межслойных переходов медная шина стравливается. При изготовлении двухсторонних слоев с межслойными переходами тонкая медная шина служит проводящим подслоем для электрохимического процесса металлизации отверстий.

Проводящий рисунок, утопленный в диэлектрик и сверху защищенный слоем никеля, не подвергается травлению при стравливании меди. Поэтому его форма, размеры и точность определяется рисунком рельефа в фоторезисте, т. е. процессами фотолитографии.

6.3 Комбинированные методы

Комбинированный (полуаддитивный) метод применяется при производстве ДПП (рисунок 6.3).

Комбинированные методы бывают позитивными и негативными с использованием, соответственно, фотошаблонов-позитивов и фотошаблонов-негативов. Они включают следующие этапы:

- нарезку заготовки из изоляционного материала, фольгированного медью;
- очистку поверхности фольги (дезоксидация);
- сверление отверстий;

- активацию поверхности под химическую металлизацию;
- тонкослойную химическую металлизацию (до 1 мкм);
- предварительную тонкую гальваническую металлизацию (до 6 мкм);
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон-позитив и защитную пленку (рисунок 6.3, *а*);

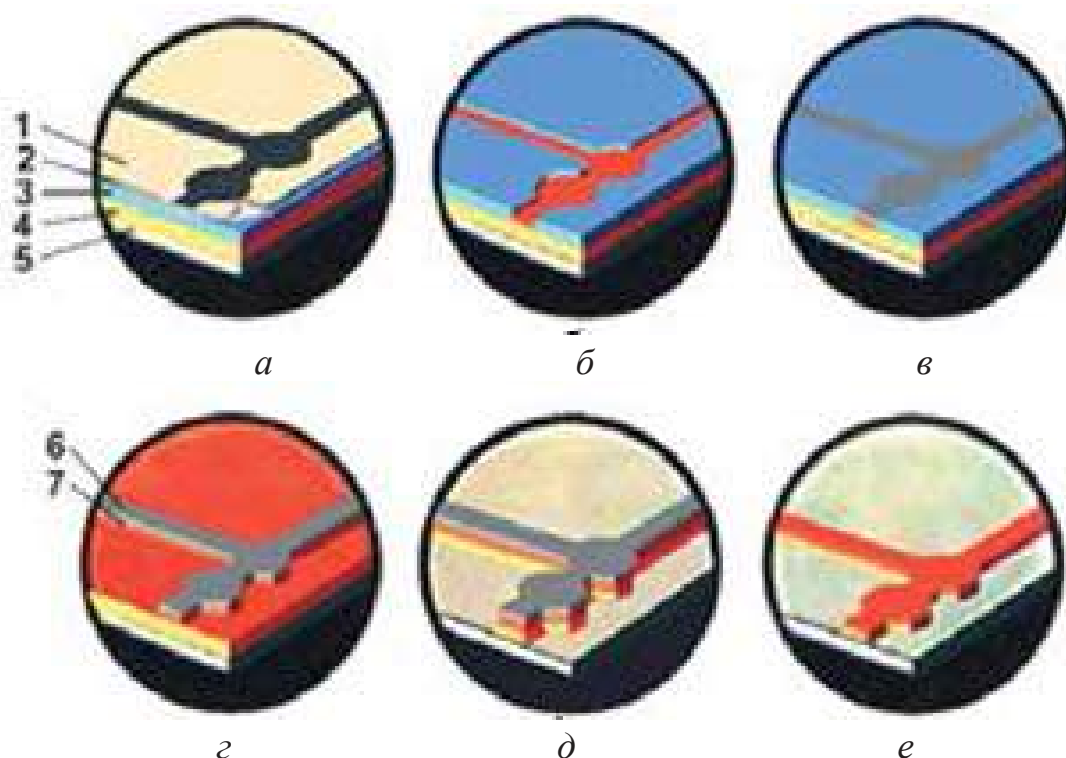


Рисунок 6.3 – Последовательность основных операций при комбинированном позитивном методе:
а – фотошаблон (1) с защитной пленкой (2) и фоторезистом (3), наложенные на основание заготовки (5) с медной фольгой (4);
б – осаждение гальванической меди;
в – нанесение металлорезиста; *г* – металлорезист (6) и гальваническая медь (7) после удаления фоторезиста;
д – травление фольги между элементами проводящего рисунка; *е* – удаление металлорезиста

- осаждение гальванической меди (до 25 мкм толщины меди внутри отверстий) (рисунок 6.3, *б*);
- нанесение металлорезиста (рисунок 6.3, *в*);
- удаление экспонированного фоторезиста, оставление металлорезиста, который защитит рисунок топологии от травления (рисунок 6.3, *г*);

- травление обнаженных участков фольги между элементами проводящего рисунка (рисунок 6.3, *д*);
- удаление металлорезиста (рисунок 6.3, *е*);
- нанесение контактных покрытий на концевые печатные ла-
мели;
- отмывку платы, сушку;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки;
- нанесение маркировки;
- обрезку платы по контуру.

Достоинства комбинированного метода:

- возможность создания печатного рисунка с высокой точно-
стью;
- защита диэлектрического основания фольгой от воздей-
ствия технологических растворов практически на всех этапах
техпроцесса, благодаря чему достигается высокое качество по-
верхности диэлектрика (высокая надежность изоляции);
- хорошая адгезия (прочность сцепления) элементов печатно-
го рисунка и диэлектрического основания платы.

Недостатки:

- наличие операций травления приводит к возникновению
бокового подтравива проводников (при использовании фольги тол-
щиной 18 мкм и более обеспечить зазоры и ширину проводника
на уровне 0,1 мм уже может быть проблематично, так как это за-
трудняет изготовление очень сложных плат);
- травление рисунка по металлорезисту ограничивает свободу
выбора травящих растворов, что влечет за собой рост стоимости
изготовления по сравнению с применением субтрактивных мето-
дов;
- после завершения травления заготовок плат необходимо
удалять металлорезист, что ведет к увеличению расходов на изго-
товление.

Комбинированные методы также используются для изготов-
ления многослойных печатных плат.

Метод попарного прессования основан на выполнении меж-
слойных соединений посредством металлизации отверстий, как и
для обычных ДПП. Для этого применяется комбинированный

(полуаддитивный) метод изготовления заготовок, из которых в дальнейшем и собирается пакет МПП (рисунок 6.4).

Этапы попарного прессования МПП:

– формирование будущей заготовки (внутренний слой) для МПП с помощью комбинированного позитивного метода по приведенной ранее методике. Однако в данном случае для будущих наружных слоев плат рисунок топологии не изготавливается – фольга остается целой. Эти слои будут изготовлены на завершающих этапах, после прессования платы;



Рисунок 6.4 – Вариант структуры многослойной печатной платы, изготовленной методом попарного прессования:

1 – переходное металлизированное отверстие между наружным и внутренним слоем; 2 – сквозное металлизированное отверстие; 3 – проводник наружного слоя; 4 – проводник внутреннего слоя

– спрессовка заготовки с готовыми внутренними слоями. При этом между заготовками размещаются слои прокладочной стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой (СТП-4-0,062, препрег DURAVAR-E Qualitat 104ML, FR-4 БИЗ, ЭМ-4). Выдавленная при прессовании смола заполняет переходные отверстия, защищая их медное гальваническое покрытие от химического воздействия при последующих технологических операциях;

– сверление сквозных отверстий, подлежащих металлизации;
– активация, тонкая химическая металлизация и гальваническая затяжка (как и для ДПП при комбинированном позитивном методе);

– нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон для изготовления внешних слоев;

– основная гальваническая металлизация;

– нанесение металлорезиста;

– удаление экспонированного фоторезиста;

- травление обнаженных участков фольги между элементами проводящего рисунка внешних слоев;
- удаление металлорезиста;
- отмывка платы, сушка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование.

Достоинства метода попарного прессования:

- относительная простота реализации, поскольку метод основан на обычной технологии металлизации отверстий ДПП, хорошо освоенной в промышленности;
- высокая скорость производства плат, так как все заготовки могут изготавливаться одновременно в одном технологическом цикле;
- малое количество брака при изготовлении отдельных заготовок, что значительно увеличивает выход готовой продукции и, следовательно, удешевляет стоимость МПП.

Недостатки:

- необходимость дважды осаждать на внешних слоях МПП гальваническую медь: сначала при металлизации переходных отверстий заготовок, затем при металлизации сквозных металлизированных отверстий. Поэтому толщина меди наружных слоев может достигать в отдельных случаях 130–160 мкм (типовое значение 70–100 мкм);
- неравномерность толщины гальванической меди по плоскости платы не обеспечивает достаточного качества и плотности печатного рисунка. При нанесении паяльной маски и защитных лаковых покрытий сложно обеспечить качество покрытия – лаки стекают с высоких проводников, обнажая их острые кромки. В связи с этим необходимо использовать специальные материалы, которые не дают высокой точности при формировании рисунка маски;
- обеспечение достаточной жесткости заготовок для высокого качества металлизации межслойных переходов и их высокой надежности. Это не позволяет использовать тонкие заготовки, так

как влечет резкое увеличение толщины МПП при большом количестве слоев либо ограничивает количество слоев до четырех-шести при необходимости обеспечения толщины платы 1,5–2 мм;

- потребность в значительном количестве смолы для заполнения пробельных мест в рельефе печатного рисунка между соседними слоями МПП при высокой толщине медных проводников. Это требует использования нескольких достаточно толстых слоев прокладочной стеклоткани, что также обуславливает увеличение суммарной толщины МПП;

- увеличение стоимости техпроцесса и дополнительных расходов на поддержание растворов, так как при комбинировании используются гальваническое осаждение меди и травление остатков медной фольги между проводниками;

- наращивание гальванической меди занимает несколько часов, что удлиняет весь техпроцесс.

Метод попарного прессования широко распространен на предприятиях, специализирующихся на изготовлении двухслойных и несложных МПП.

Метод послойного наращивания заключается в последовательном чередовании слоев изоляционного материала и проводникового слоя. Соединение между проводящими элементами соседних печатных слоев производится гальваническим наращиванием меди в отверстиях изоляционного слоя (рисунок 6.5).

Послойное наращивание МПП включает следующие этапы:

- формирование заготовки – основы МПП с помощью субтрактивного метода (два первых внутренних слоя с проводящим рисунком МПП);

- нанесение необходимого количества изоляционных слоев из прокладочной стеклоткани поверх заготовки с обеих сторон;

- нанесение фольги поверх изоляционных слоев из прокладочной стеклоткани;

- прессование заготовки;

- формирование отверстий (основа микропереходов между внешними и ближайшими внутренними слоями заготовки) с помощью механического сверления (с контролем глубины);

– активацию, тонкую химическую металлизацию и гальваническую затяжку (как для двусторонних ПП при комбинированном позитивном методе);

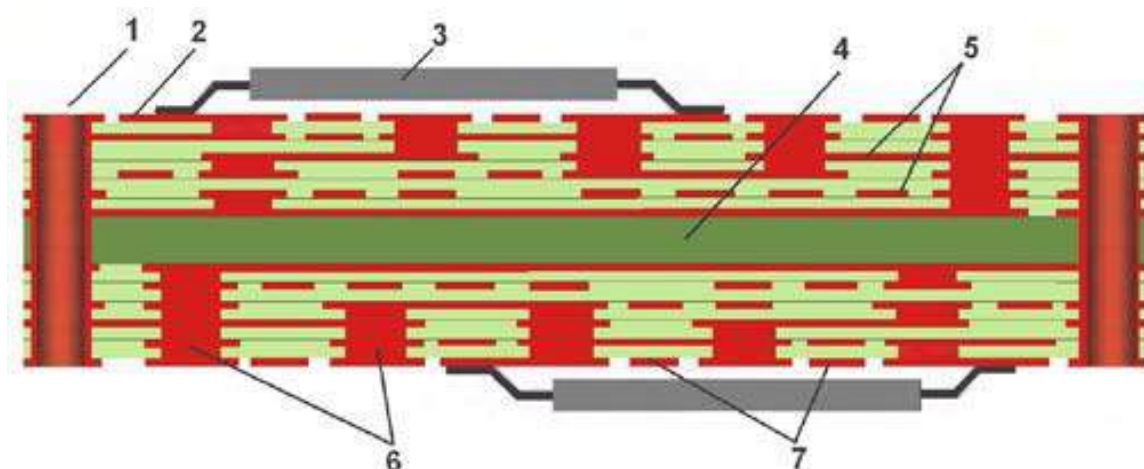


Рисунок 6.5 – Вариант структуры многослойной печатной платы при послойном наращивании:

- 1 – переходное металлизированное отверстие между наружным и внутренним слоем; 2 – проводник наружного слоя с переходом на металлизированное отверстие; 3 – ЭРИ; 4 – основание МПП; 5 – проводники внутренних слоев; 6 – металлизированные отверстия; 7 – проводники наружного слоя

- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон;
- основную гальваническую металлизацию;
- нанесение металлорезиста;
- удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков тонкой фольги между элементами печатного рисунка внешних слоев;
- удаление металлорезиста;
- механическую и химическую очистку, выравнивание поверхности осажденной меди;
- отмывку заготовки, сушку;
- электрическое тестирование, контроль полученной заготовки;
- нанесение необходимого количества изоляционных слоев из прокладочной стеклоткани поверх заготовки с обеих сторон.

После этого все вышеперечисленные этапы повторяются для каждого слоя. Когда все слои собраны, выполняются следующие этапы:

- сверление сквозных переходных отверстий, подлежащих металлизации при формировании внешних слоев МПП после прессования заготовки;
- повторная гальваническая металлизация и травление остатков меди между элементами рисунка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование.

Достоинством данного метода является исключительно высокая плотность монтажа благодаря возможности выполнения межслойных переходов в любой точке платы независимо от трассировки и расположения межслойных соединений любых смежных слоев платы.

Основной недостаток метода – ограниченное число слоев МПП. Как правило, операцию прессования нельзя проводить более пяти раз, поэтому количество слоев такой платы будет не более 12. Это связано с тем, что при каждом следующем прессовании нового слоя диэлектрик внутренних слоев с уже сформированной структурой подвергается тепловому стрессу и большим механическим нагрузкам, так что происходит нарушение этой структуры. В результате при наращивании новых слоев происходит старение и деградация внутренних слоев, что ограничивает слойность платы и уменьшает ее надежность.

Кроме того, при послойном наращивании МПП используются два различных технологических метода, что увеличивает стоимость техпроцесса. При возникновении дефектов в последующих слоях вся заготовка бракуется. Это значительно снижает выход готовой продукции и приводит к удорожанию годных плат. Особенности гальванического осаждения меди в толстых слоях приводят к необходимости тщательной очистки технологических растворов и электролитов на протяжении всего техпроцесса изго-

товления. Для обеспечения стабильных условий такой металлизации необходимо более часто производить химический анализ, корректировку и очистку рабочих растворов.

Сложность послойного наращивания (в сочетании с высокой реализуемой плотностью топологии печатного рисунка и монтажа) обуславливает применение этого метода в основном для изготовления ультрасложных МПП (платы HDI – сверхвысокой плотности размещения элементов печатного рисунка) в опытном производстве с высокой технологической культурой. Внедрение его в серийное производство встречает множество трудностей. По этим причинам применение метода послойного наращивания оправдано только для изготовления уникальной высоконадежной аппаратуры.

Метод металлизации сквозных отверстий похож на метод попарного прессования, но имеет ряд существенных отличий в деталях (рисунок 6.6).

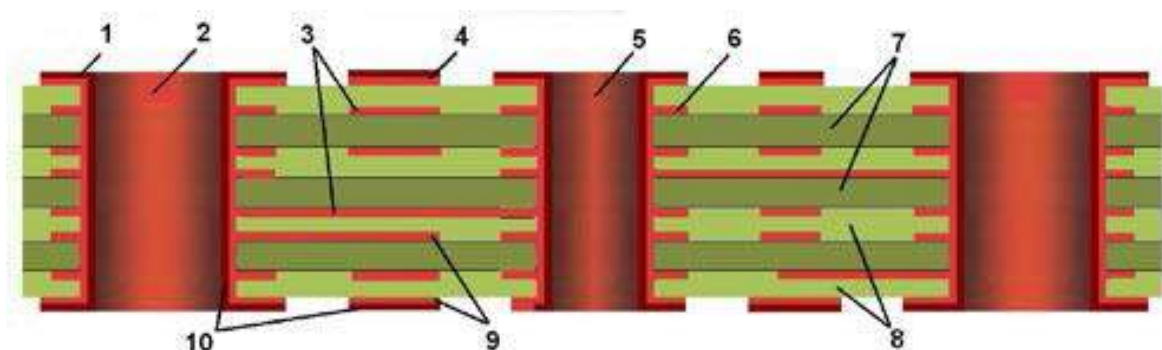


Рисунок 6.6 – Вариант структуры многослойной печатной платы, изготовленной методом металлизации сквозных отверстий:

- 1 – контактная площадка внешнего слоя; 2 – сквозное монтажное металлизированное отверстие; 3 – проводник внутреннего слоя; 4 – проводник внешнего слоя;
- 5 – сквозное переходное металлизированное отверстие;
- 6 – контактная площадка внутреннего слоя; 7 – основание МПП;
- 8 – слой прокладочной стеклоткани; 9 – медная фольга;
- 10 – гальваническая медь

Как и при попарном прессовании, делаются заготовки, на которых выполнен проводящий рисунок будущих внутренних слоев МПП. Однако способ изготовления заготовок субтрактивный,

межслойные микропереходы между слоями одной заготовки не изготавливаются.

Этапы производства МПП методом металлизации сквозных отверстий:

- вырубка заготовок из фольгированного диэлектрика;
- подготовка поверхности фольги (дезоксидация);
- нанесение и проявление фоторезиста, закрывающего не подлежащие вытравливанию участки фольги;
- травление заготовок;
- отмывка и сушка заготовок;
- электрическое тестирование, контроль полученных заготовок;
- подготовка поверхности фольги (активация) для обеспечения лучшего сцепления фольги с препрегами при прессовании;
- прессование заготовок в единый пакет;
- сверление сквозных отверстий, подлежащих металлизации;
- очистка отверстий от наносов смолы;
- активация меди, тонкая химическая металлизация и гальваническая затяжка (как и для ДПП при комбинированном позитивном способе);
- нанесение и экспонирование фоторезиста через фотошаблон для изготовления внешних слоев;
- основная гальваническая металлизация, нанесение металлорезиста и удаление экспонированного фоторезиста;
- травление обнаженных участков фольги между элементами печатного рисунка внешних слоев;
- удаление металлорезиста;
- отмывка платы, сушка;
- нанесение паяльной маски;
- нанесение финишного покрытия на контактные площадки;
- нанесение маркировки;
- обрезка платы по контуру;
- электрическое тестирование.

Метод обладает рядом преимуществ:

- возможность высокой автоматизации процесса изготовления МПП и полной автоматизации изготовления заготовок, по-

сколькx этот процесс основан на обычной субтрактивной технологии, хорошо освоенной в промышленности;

- простота реализации метода, так как все процессы однотипны и просты, не требуют сложной оснастки;

- высокая скорость изготовления плат, поскольку все заготовки могут быть сделаны одновременно в одном технологическом цикле;

- низкая чувствительность к браку и ошибкам при изготовлении отдельных заготовок. Это значительно увеличивает выход годной продукции и, как следствие, удешевляет стоимость МПП;

- высокая повторяемость и скорость изготовления рисунка топологии (особенно при использовании струйного травления) позволяет широко использовать этот метод в крупносерийном производстве;

- использование фольгированных диэлектриков с малой толщиной фольги позволяет уменьшить боковой подтрав и изготавливать проводники малой ширины с высокой точностью;

- применение струйного травления и широкий выбор травящих растворов позволяют изготавливать проводники с высоким качеством и стабильностью параметров шириной до 75 мкм при такой же ширине зазоров на фольге толщиной 18 мкм. Это дает возможность производить МПП высокой сложности с большой плотностью топологии, недостижимой при использовании других методов;

- отсутствие межслойных переходов позволяет применять очень тонкие диэлектрические основания для изготовления заготовок, а малая толщина фольги – использовать тонкие диэлектрические прокладки. Применение же тонких диэлектриков дает возможность изготовления МПП небольшой толщины с большим количеством слоев.

В целом этот метод позволяет изготавливать МПП практически с неограниченным количеством слоев, тем самым компенсируя более низкую плотность размещения топологии и монтажа. По сравнению с другими методами он значительно упрощает топологию, поскольку предоставляет конструктору большую вариативность в размещении трасс, позволяет использовать более короткие линии связи.

Возможность введения дополнительных слоев без существенного увеличения стоимости плат позволяет выполнять в структуре МПП экранирующие слои, отводить под питание отдельные слои. Это приводит к улучшению характеристик быстродействующих сигналов, повышению качества питания компонентов, обеспечивает высокую степень защиты сигналов от внешних и внутренних электромагнитных помех и снижение излучения элементами топологии, что имеет важное значение при проектировании сложных быстродействующих устройств.

Главный недостаток метода – относительно слабая механическая связь металлизации поверхности отверстий с поверхностью контактных площадок внутренних слоев. Это приводит к осложнению изготовления МПП по высоким классам надежности, необходимости применения специальных методов очистки и подготовки поверхности отверстий перед металлизацией. Для обеспечения качественной металлизации следует соблюдать отношение минимального диаметра отверстия к толщине платы не более чем 1:8. Увеличение соотношения до 1:10 и более приводит, как правило, к снижению качества металлизации и надежности платы. Это ограничивает либо минимальный диаметр переходных отверстий МПП, изготовленных по этому методу, либо толщину платы.

Так как переходные отверстия сквозные, то при выполнении перехода с одного сигнального слоя на другой отверстия и контактные площадки к ним будут присутствовать на всех остальных слоях. Это ограничивает эффективную площадь трассировки на всех слоях, размещение компонентов и расположение переходных отверстий. Необходимо точно совмещать печатные слои при изготовлении заготовок, а также заготовки при прессовании. Малейшие неточности совмещения, деформация базовых материалов, а также погрешность фотошаблонов и неточности при сверлении отверстий приводят к нарушению подключений фольги во внутренних слоях к гальванической меди, осажденной в полости отверстий. Особой тщательности требует подбор режимов прессования и контроль качества технологической оснастки прессов для обеспечения прочной адгезии пакета слоев. Не менее важна равномерная полимеризация смолы во всей структуре МПП, что-

бы обеспечить дальнейшую устойчивость платы к температурным воздействиям в процессе группового монтажа.

Существуют и другие причины, которые затрудняют эффективное использование метода металлизации сквозных отверстий для изготовления HDI-структур. Первая – использование микросхем в корпусах с малым шагом выводов, вторая – применение сверхбольших интегральных схем (СБИС) с очень большим количеством выводов.

При использовании микросхем с шагом выводов 0,60 мм и менее необходимо применять переходные отверстия с очень малым диаметром. Например, для микросхем с шагом расположения выводов 0,50 мм следует использовать переходные отверстия диаметром 0,10 мм. Качественную металлизацию таких отверстий можно обеспечить только при относительно небольшой толщине платы – 0,50–0,80 мм. Такое ограничение может не позволить изготовить МПП с необходимым количеством слоев. Кроме того, процесс осаждения меди в каналах сквозных отверстий столь малого диаметра вызывает зачастую непреодолимые технологические трудности, причиной которых становятся капиллярные эффекты внутри таких микроотверстий.

При применении в конструкции устройства СБИС корпусов с количеством выводов 800 и более для трассировки проводников необходимо использовать большое количество слоев (16 и более). Ситуация усугубляется в случае большого потребления тока в цепях питания СБИС и большой рассеиваемой мощности, а тем более при построении согласованных линий передач. В этом случае необходимы дополнительные слои питания, теплоотводящие и экранирующие слои, расположенные между каждой парой сигнальных слоев. Для строгого соблюдения согласования сопротивлений линий передач сигнала регламентируются расстояния между сигнальными и опорными слоями. Все это приводит к необходимости применения очень большого числа слоев в МПП, увеличению ее толщины и повышению требований к точности изготовления элементов печатного рисунка, а также точности совмещения слоев и сверловки. Как следствие, стоимость изготовления МПП существенно возрастает.

При значительном увеличении толщины МПП для обеспечения качественной металлизации необходимо использовать переходные отверстия большего диаметра, что не всегда возможно конструктивно, так как их расположение возле выводов ЭРИ строго регламентировано.

Именно эти причины привели к отказу от использования метода металлизации сквозных отверстий для производства HDI-структур. Для изготовления таких плат обычно используют несколько методов. Чаще всего комбинируют методы металлизации сквозных отверстий и послойного наращивания, что дает наилучшие результаты для получения проводников малой ширины и с малыми зазорами между элементами печатного рисунка. Внутренняя заготовка HDI-структуры, как правило, создается методом металлизации сквозных отверстий. Затем методом послойного наращивания выполняются слои, имеющие переходные микроотверстия между смежными слоями.

Таким же способом можно изготавливать и HDI-структуры с большим количеством различных типов микропереходов на более глубокие слои. Это позволяет значительно снизить количество слоев платы, что положительно сказывается на надежности и стоимости изготовления. Структуры именно такого типа применяются при производстве сложных МПП для мобильных устройств, МПП высокой плотности с ограничениями по размеру и в устройствах с использованием СБИС, а также с большим количеством и малым шагом выводов.

Существуют и более экзотические варианты построения МПП. Однако чрезмерная сложность изготовления, включающая множество технологических процессов, значительно увеличивает стоимость готового изделия. Невозможность высокой автоматизации изготовления ограничивает применение таких структур. Как правило, подобные платы применяются только в исключительных случаях для реализации высокотехнологичных устройств с очень высокой степенью надежности, но не требующих серийного производства.

6.4 Финишные покрытия печатных плат

Завершающей стадией изготовления ПП является нанесение покрытий [23]:

- защитно-декоративные лаковые покрытия;
- лужение;
- гальваническое покрытие фольги инертными металлами;
- декоративно-информационные покрытия.

Защитно-декоративным лаковым покрытием обычно является *защитная паяльная маска*, которая имеет характерный зеленый цвет. Такая маска выполняет следующие функции:

- защита печатных проводников и поверхности основания ПП от воздействия припоя;
- защита элементов проводящего рисунка от замыкания ЭРИ и других конструктивных элементов;
- предотвращение растекания припоя с контактных площадок посадочных мест.

Защитные маски в зависимости от метода нанесения и получения топологии подразделяются на следующие виды:

- сухие пленочные фотопроявляемые;
- жидкие фотопроявляемые;
- жидкие сеткографические.

Сухие пленочные маски не рекомендуется использовать на гибких ПП из-за их несовместимости. Фотопроявляемые жидкие маски используются для обеспечения точности нанесения. Жидкие сеткографические маски более предпочтительны для использования в массовом производстве. При поверхностном монтаже рекомендуется использовать жидкую фотопроявляемую защитную маску, которая наносится непосредственно на медную поверхность проводников.

Защитная маска должна покрывать всю поверхность ПП, кроме следующих мест:

- одиночных контактных площадок и групп контактных площадок под монтаж ЭРИ;
- монтажных, крепежных и фиксирующих отверстий;
- зон концевых печатных контактов (ламель);

– других конструктивных элементов, предназначенных для подключения или подпайки ЭРИ;

– контрольных контактных площадок.

Переходные отверстия диаметром менее 0,6 мм (для сухих пленочных масок) и менее 0,3 мм (для жидких масок) закрываются маской с двух сторон. Проводники и переходные отверстия под корпусами планарно монтируемых элементов должны быть закрыты защитной маской. Для каждого посадочного места ЭРИ создается отдельное окно в защитной маске, форма которого должна соответствовать форме контактной площадки. Разрешается формировать одно окно в защитной маске для группы контактных площадок, расстояние между которыми менее 0,15 мм. При этом не допускается нахождение элементов топологии ПП между этими площадками, а также разных элементов топологии ПП (две контактные площадки, контактная площадка и проводник) или их частей в одном окне. Печатный проводник, проходящий вблизи контактной площадки, должен быть полностью закрыт маской. Минимальное расстояние между проводником, покрытым защитной маской, и краем окна должно составлять 0,1 мм. Не допускаются остатки материала защитной маски на контактной площадке. Защитная маска должна располагаться на расстоянии не менее 0,2 мм от края ПП. Для предотвращения наложения защитной маски на контактную площадку размеры окон в ней должны быть больше размера контактной площадки (рисунок 6.7, таблица 6.1).

При *лужении* ПП на металлические паяемые поверхности платы наносится относительно тонкий слой припоя. Эта операция предназначена для подготовки поверхности к последующей пайке, а также для защиты медных поверхностей от окисления. Лужение выполняется по всей плате после создания проводящего рисунка и нанесения паяльной маски. Припоем покрывается только открытая часть проводящего рисунка. Лужение обычно выполняется погружением в ванну с припоем или волной припоя. Для создания тонкого и равномерного слоя припоя используется выравнивание горячим воздухом. Широко применяется при лужении сплав олово-свинец, так как он же будет использоваться при пайке.

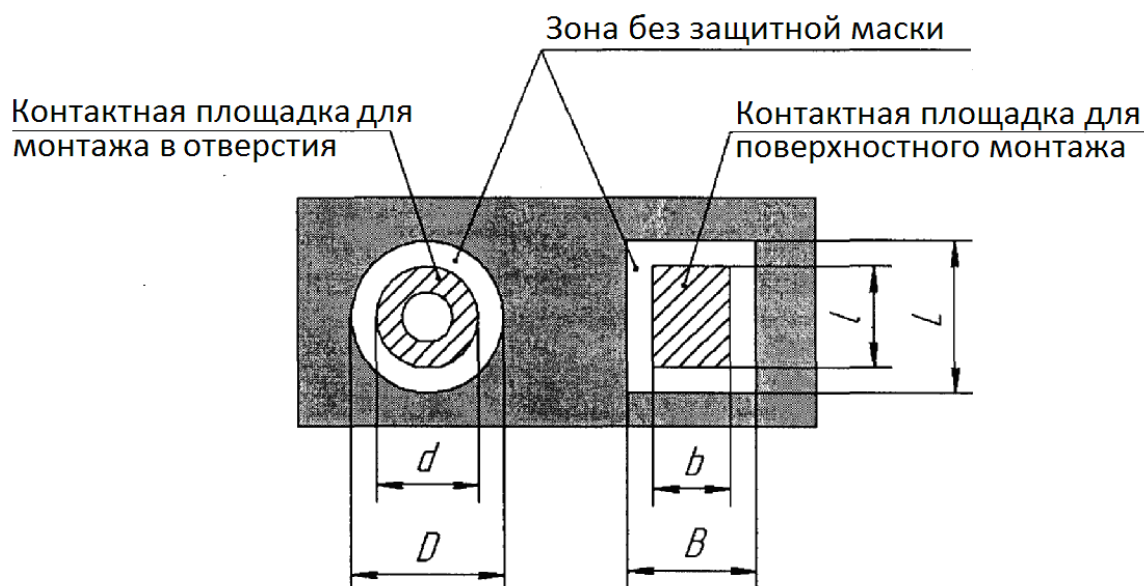


Рисунок 6.7 – Окна в защитной маске на печатной плате

Таблица 6.1 – Размеры окон в защитной маске в зависимости от размеров контактных площадок

Вид контактной площадки	Размеры окон, мм		
	Фотопроявляемая маска		Сеткографическая маска
	жидкая	сухая	
Контактная площадка для монтажа в отверстия	$D > d+0,1$	$D > d+0,2$	$D > d+0,4$
Контактная площадка для поверхностного монтажа	$L > l+0,1$; $B > b+0,1$	$L > l+0,1$; $B > b+0,1$	$L > l+0,4$; $B > b+0,4$
<i>Примечания.</i> 1. Размеры окон могут быть изменены по требованию технолога исходя из результатов изготовления платы. 2. d, b, l – размеры контактной площадки; D, B, L – размеры окон в защитной маске.			

Припой, нанесенный на печатную плату, обеспечивает отличные характеристики паяемости изделия и является наиболее распространенным на сегодняшний день финишным покрытием. Он дешевый, долговременно сохраняет паяемость, создает хороший электрический контакт.

Однако имеются и недостатки: вредность для окружающей среды и обслуживающего персонала вследствие содержания свинца; значительная тепловая нагрузка на плату, вызывающая коробление; жесткий термоудар, который испытывают межслой-

ные соединения МПП при погружении в расплавленный припой; возможность замыкания контактных площадок ЭРИ с малым шагом; неравномерность толщины покрытия на контактных площадках разного размера и ориентации.

Гальванические покрытия фольги инертными металлами применяются для повышения электропроводности (золочение, серебрение), повышения прочности и износостойкости (палладирование). Покрытие разъемов (ламелей) ПП благородными металлами должно проводиться после операции травления меди с пробельных мест. Если в качестве защитного покрытия проводящего рисунка использовался сплав олово-свинец, то перед нанесением благородного металла на ламели сплав должен быть удален с них. При золочении (толщина слоя золота 0,05 мкм) и палладировании ламелей ПП предварительно наносится подслой серебра или никеля (толщина подслоя никеля 3–5 мкм).

Преимущества гальванического покрытия заключаются в получении плоской поверхности равномерной толщины, оно подходит для установки компонентов с малым шагом, для нажимных и скользящих контактов, не влияет на размер металлизированного отверстия, выдерживает многократное термоциклирование.

Недостатки: паяемость существенно зависит от правильного выбора очистителей, флюса и режимов пайки; ПП должны храниться в вакуумной упаковке, в шкафах сухого хранения; покрытие содержит никель, который считается канцерогеном; плохо подходит для СВЧ-сигналов; высокая стоимость.

Декоративно-информационные покрытия включают в себя текстовые или другие специальные обозначения (маркировка, логотипы, штрих-коды).

Маркировка используется в производстве электронной техники для правильного монтажа деталей и наносится с помощью шелкографии, струйным методом или лазером краской поверх маски для упрощения идентификации самой платы и расположения на ней компонентов (рисунок 6.8).

Классический метод – это нанесение маркировочной краски по трафарету ракелем. Струйный метод нанесения краски применяется в мелком и серийном производстве, где используется от-

дельно стоящее оборудование или линия. На высокопроизводительных линиях используют скоростные струйные принтеры.

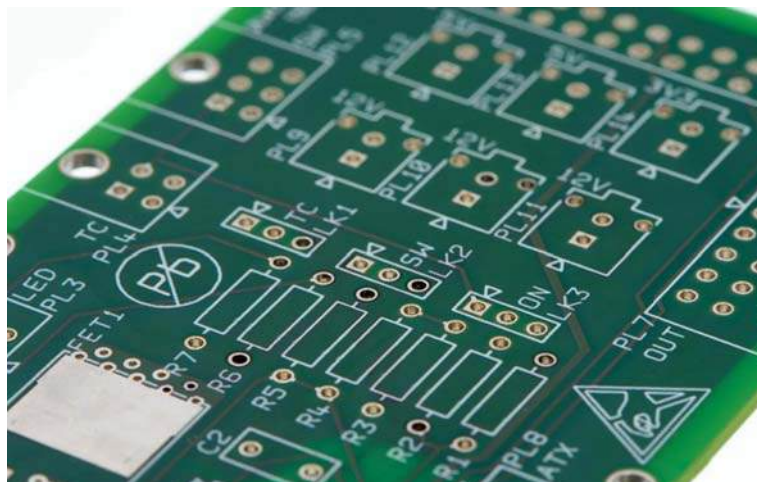


Рисунок 6.8 – Декоративно-информационное покрытие печатной платы

Для среднесерийной и крупносерийной сборки печатных узлов незаменимым инструментом маркировки ПП является автомат лазерной маркировки. Из преимуществ этого способа можно выделить:

- низкую стоимость нанесения маркировки на единицу продукции;
- высокую скорость маркировки;
- возможность нанесения маркировки на изделия с рельефной поверхностью;
- высокую надежность и минимальные расходы на техническое обслуживание.

6.5 Стандартные дефекты печатных плат

Существуют дефекты ПП, возникающие при их изготовлении, которые стали следствием стандартных ошибок, допущенных еще на этапе проектирования.

Самая распространенная ошибка – неправильный выбор размеров отверстий для установки ЭРИ. При расчете диаметра отверстия должен учитываться такой важный параметр, как слой металлизации, после нанесения которого размер отверстия

уменьшается примерно на 5 %. Если не учесть металлизацию, то установить ЭРИ будет сложно, а иногда и вовсе невозможно.

Часто не делается припуск на контур платы. На финальной стадии производства во время механической обработки размеры ПП могут уменьшиться на 2–3 %. При неправильном определении припуска размеры ПП не будут соответствовать требуемым, что усложнит ее установку в готовое изделие.

Большие металлизированные участки могут создать в процессе изготовления ПП избыток меди. В результате контакт может быть залит припоем некачественно, так как медь хорошо отводит тепло. Чтобы исключить такой дефект, необходимо создавать термический зазор (рисунок 6.9).

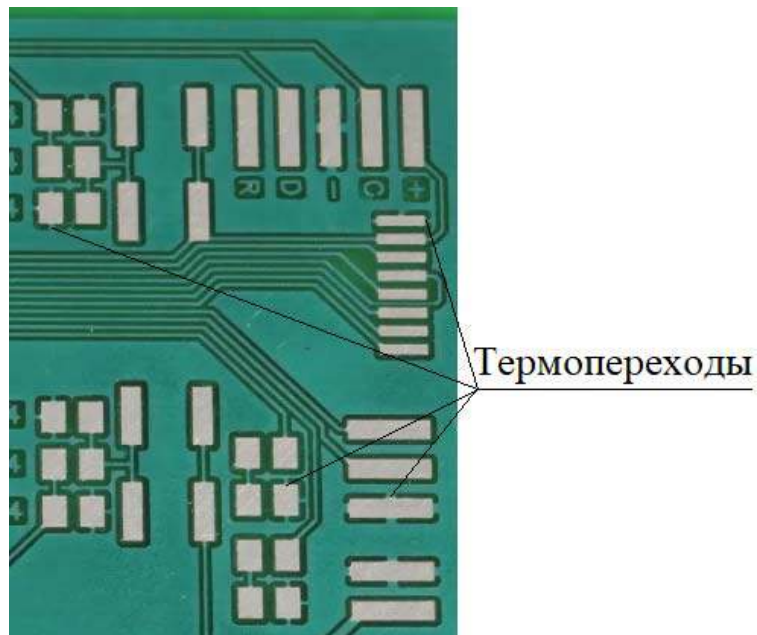


Рисунок 6.9 – Термопереходы между контактными площадками и слоем металлизации

При пересечении печатных проводников под острым углом может возникнуть кислотная ловушка – это дефект, снижающий производительность ПП (рисунок 6.10).

В месте пересечения накапливается раствор, который в дальнейшем разрушает медные проводники и другие материалы и части ПП, что в свою очередь вызывает обрывы, короткие замыкания и прочие дефекты соединений.

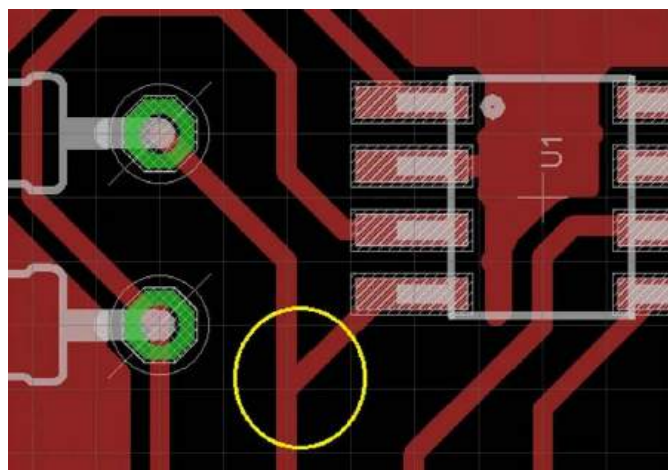


Рисунок 6.10. Кислотная ловушка

Малейший зазор между проводниками или переходными отверстиями и краями платы может привести к тому, что агрессивный раствор просочится к элементам проводящего рисунка. Это серьезная проблема, так как проводники тонкие, а медь легко подвергается коррозии.

Контрольные вопросы

1. На чем основан субтрактивный метод изготовления ПП?
2. На чем основан аддитивный метод изготовления ПП?
3. Какие методы изготовления МПП существуют?
4. Назовите виды финишных покрытий ПП.
5. Какие функции выполняет защитная паяльная маска?
6. С какой целью выполняется лужение ПП?
7. Для чего применяются гальванические покрытия: золочение, серебрение, палладирование?
8. Назовите стандартные ошибки при проектировании ПП, которые проявляются в виде дефектов на готовой плате?

7 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ, ПРЕССОВАННЫХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОСНОВАНИЯМИ

7.1 Требования к выбору материалов

В электронных устройствах широко используются печатные узлы, выполненные на ПП, прессованных с металлическими основаниями. Металлическое основание используется в качестве несущей конструкции, для теплоотвода и корпусного заземления. При выборе материалов следует исходить из физических, тепловых, механических, электрических и других факторов, воздействующих на сборочные единицы в составе изделия в процессе изготовления и при эксплуатации.

При проектировании электронных компонентов разработчик всегда стремится к тому, чтобы конечное электронное устройство было как можно меньших размеров. Однако, поскольку далеко не вся потребляемая электронными устройствами мощность превращается в мощность полезных сигналов, на кристаллах интегральных схем наблюдается значительное выделение тепла. Нарушение теплового режима работы тепловыделяющих интегральных схем приводит к снижению помехоустойчивости, быстродействия и общей надежности электронного устройства. В связи с этим при уменьшении размеров устройства остро встает вопрос об отводе тепла.

Металлическое основание может быть алюминиевым, медным и стальным. Теплопроводность алюминиевого основания составляет около 203,5 Вт/(м·К) (сплав АМгб – 160 Вт/(м·К)), медного – около 400 Вт/(м·К). Однако, несмотря на такую разницу, по большей части платы прессуются на алюминиевое основание, так как это наиболее дешевый вариант изготовления. Сплавы алюминия с магнием (марка АМгб) обладают высокой пластичностью, хорошей коррозионной стойкостью, обрабатываемостью резанием и давлением. Высокое содержание магния (5,8–6,8 %) положительно сказывается на прочности и твердости изделия.

В целях передачи тепла от ЭРИ, устанавливаемых на ПП в сборочных единицах, рекомендуется использовать материалы с максимальным коэффициентом теплопроводности. Температурные коэффициенты линейного расширения материалов по осям X , Y , Z должны иметь одинаковые или близкие значения (таблица 7.1.). В целях снижения деформаций и усреднения этого коэффициента в процессе изготовления сборочной единицы рекомендуется производить охлаждение с заданной скоростью.

Таблица 7.1 – Коэффициенты теплопроводности и температурные коэффициенты линейного расширения материалов для изготовления сборочных единиц

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент линейного расширения, мкм/°С
Алюминий	203,5	22,2
Медь	400	17,0
Сталь	45,4	13,0
Алюминиевые сплавы:		
АМг2	140–160	20,0
АМг6	110–122	20,0
АК9	170–175	22,0
Магниевого сплавы:		
Мл5	75–80	
МА2-1	65–70	26,0
Фольгированный стеклотекстолит	0,23–0,5	12,8

Металлическое основание можно использовать для увеличения жесткости ПП. В этом случае желательно использовать стальное основание. При этом необходимо минимизировать количество фрезерованных и высверленных окон в металлическом основании. Кроме того, стальное основание используется в качестве экрана ПП.

Так как печатная плата, изготовленная из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита, прессована к металлическому основанию, которое является токопроводным, не представляется возможным использовать на плате элементы, монтируемые в от-

верстия (DIP-элементы). На таких платах используются только планарные элементы; отверстия и пазы могут применяться лишь в качестве крепежных элементов.

Материалы для склеивающих и изоляционных прокладок по своим физическим, тепловым, механическим и электрическим свойствам должны быть подобны материалам, из которых изготовлены ПП (таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Материалы для изготовления сборочных единиц

Материал	Рекомендуемая толщина, мм
ПП	
Стеклотекстолит фольгированный: СТФ-1-18, 35, 105; СТФ-2-18, 35, 105 ТУ 2296-003-11436290-02	0,2; 0,25
Стеклотекстолит фольгированный FR-4-18, 35, 105 ТУ 22.29.29-019-250832401-2018	0,2; 0,25
Фольгированный материал DE104 ТУ 5970.001.90152558-2013	0,2; 0,25
Стеклотекстолит фольгированный ЭМ-4-18, 35, 105 ТУ 22.21.42-013-96330920-2019	0,2; 0,25
Склеивающие прокладки	
Материал склеивающий марки САФ ТУ 16-88 И79.0007.002	0,025; 0,062
Пленка клеящая ПКС-171 ТУ 6-06-20	0,050; 0,080
Материалы для изоляционного слоя	
Стеклоткань СТП-4 ТУ 2296-006-11436290-02	0,062
Препрег FR-4 ТУ 22.29.29-030-25082401-2019	0,077
Препрег DE104ML тип 1080 AT01 ТУ 2296-055-39421663-2017	0,060
Препрег ЭМ-4 ТУ 22.29.29-017-96330920-2020	0,055–0,064
Изоляционные прокладки	
СТЭТ ТУ 16-503-118	0,06–0,4
СТ-ЭТФ ГОСТ 12652	0,35–50

Окончание таблицы 7.2

Материал	Рекомендуемая толщина, мм
Металлические основания	
Магнийевый сплав МА2-1 (лист ГОСТ 22635, плита ГОСТ 21990)	2
Литейный магнийевый сплав МЛ-5 ГОСТ 2856	2
Алюминиевые сплавы АМг2, АМцМ, АМг6 и др. (лист ГОСТ 21631, плита ГОСТ 17232)	2
Литейный алюминиевый сплав АК9ч, АК7ч, АК12 ГОСТ 1583	—

7.2 Варианты плат на металлических основаниях

Печатные платы, изготовленные из фольгированных диэлектриков толщиной менее 0,5 мм, самостоятельно не применяются. Таким платам необходимо придать жесткость подпрессовкой дополнительных изоляционных материалов или приклеиванием их к металлическим основаниям.

Если к печатному узлу не предъявляются требования по обеспечению теплоотвода или экранирования, то к ПП толщиной менее 0,5 мм можно подпрессовать несколько слоев изоляционного материала (прокладочная стеклоткань), обеспечив необходимую толщину (рисунок 7.1).

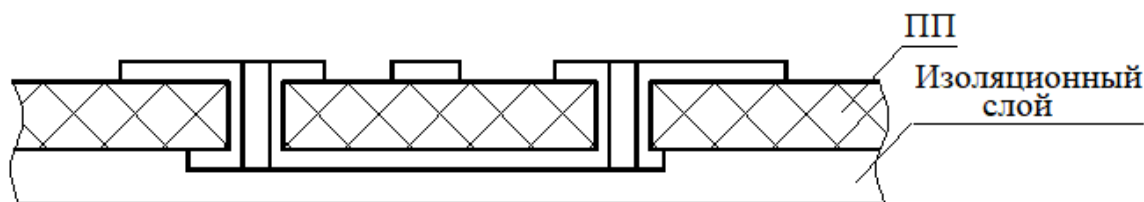


Рисунок 7.1 – Печатная плата с изоляционным слоем

Изоляционный слой включает в себя 3 или 4 прокладки и наносится методом прессования на ту поверхность платы, куда не будут устанавливаться ЭРИ. Плату можно крепить непосредственно на поверхность металлического корпуса, так как под-

прессованный изоляционный слой обеспечивает электрическую прочность изоляции не менее 1000 В между печатными проводниками, расположенными на нижней стороне, и корпусом устройства.

Если на плату ставится ЭРИ, корпус которого должен выходить на другую сторону (кнопка, тумблер и др.), или необходимо соединение платы с корпусом устройства (экраном), то в плате совместно с изоляционным слоем можно выполнить окна, пазы и отверстия (рисунок 7.2).



Рисунок 7.2 – Печатная плата с изоляционным слоем, окнами, пазами, отверстиями

Способ приклеивания ПП к металлическим основаниям зависит от требований, предъявляемых к изделию, и возможностей технологического оборудования. При расположении ПП на основании с двух сторон возможны различные варианты. Приклеивание ПП к основанию должно выполняться за один технологический цикл, при этом не допускается применение разных по своим свойствам склеивающих изолирующих прокладок. Допускается приклеивание ПП клеями холодного отверждения или другими клеящими материалами, обеспечивающими электрическую прочность изоляции и механическую прочность.

Существуют разные варианты конструкций плат с металлическими основаниями. Самая простая – это ПП, изготовленная из двустороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной менее 0,5 мм, спрессованная с изоляционным слоем из прокладочной стеклоткани (3 или 4 прокладки), которая затем прессуется к основанию толщиной не менее 2 мм из алюминиевого или магниевого сплава через склеивающие прокладки (рисунок 7.3). Мате-

риал склеивающих прокладок должен обладать низкой текучестью, их количество должно быть не менее трех. Дополнительные прокладки увеличивают толщину изоляции между печатными проводниками нижней стороны платы и металлическим основанием. Электрическая прочность изоляции между ПП и металлическим основанием не менее 1500 В.

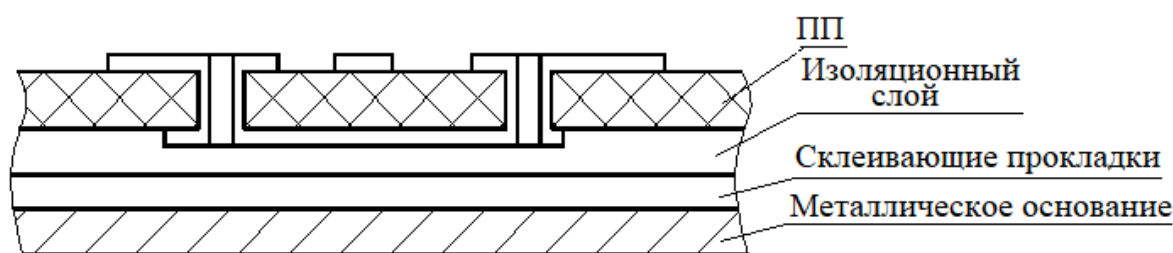


Рисунок 7.3 – Печатная плата с изоляционным слоем, приклеенная к металлическому основанию

Металлическое основание может играть и роль эффективного теплоотвода, если в плате перед прессовкой ее к основанию выполнить окна для установки тепловыделяющих ЭРИ непосредственно на поверхность металла (рисунок 7.4).

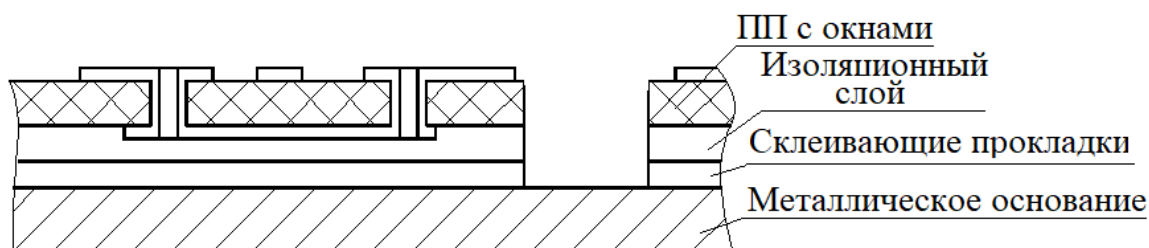


Рисунок 7.4 – Печатная плата с изоляционным слоем и окном, приклеенная к металлическому основанию

Введение дополнительной изолирующей прокладки из нефольгированного стеклотекстолита толщиной 0,2 мм повышает электрическую прочность изоляции между ПП и основанием до 2500 В (рисунок 7.5). Выполнение в такой плате окна для установки тепловыделяющих элементов непосредственно на металл обеспечивает эффективный теплоотвод и высокую электрическую прочность изоляции (рисунок 7.6). Конструкции подобных плат применимы для схем с высоким напряжением.

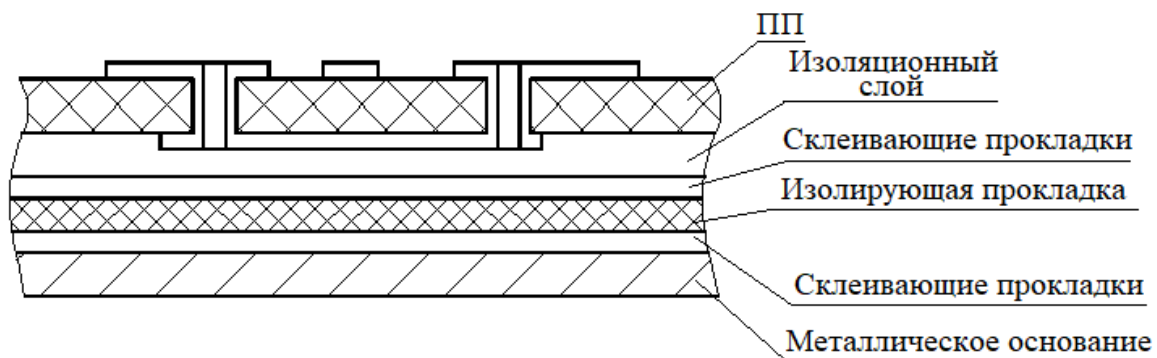


Рисунок 7.5 – Печатная плата с изоляционным слоем, приклеенная к металлическому основанию через изолирующую прокладку

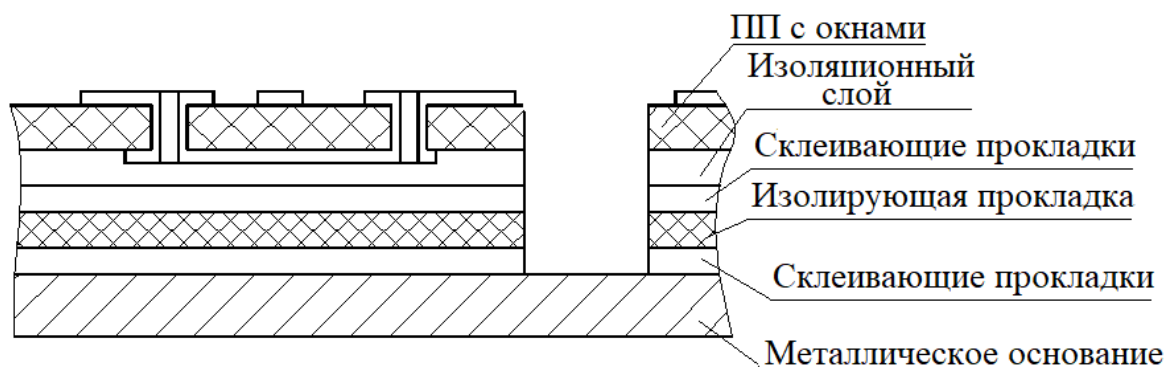


Рисунок 7.6 – Печатная плата с изоляционным слоем и окном, приклеенная к металлическому основанию через изолирующую прокладку

Схемы, чувствительные к электромагнитным воздействиям, необходимо экранировать. Для этого между ПП с изолирующим слоем и металлическим основанием добавляют плату-экран, которая устанавливается прессованием через склеивающие прокладки (рисунок 7.7).

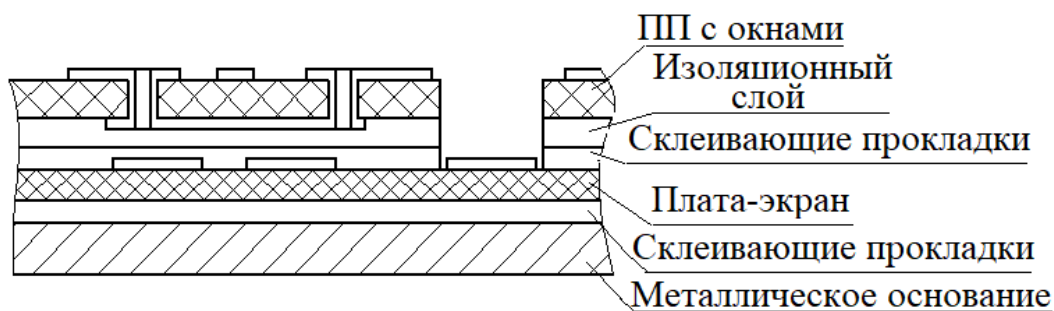


Рисунок 7.7 – Печатная плата с изоляционным слоем и окном, приклеенная к металлическому основанию через плату-экран

Плату-экран выполняют из одностороннего фольгированного стеклотекстолита. В основной плате имеются окна для подключения цепи схемы к экрану навесным проводником.

Если в такой плате выполнить окна для установки тепловыделяющих элементов непосредственно на металл, то ПП обеспечит эффективный теплоотвод (рисунок 7.8).

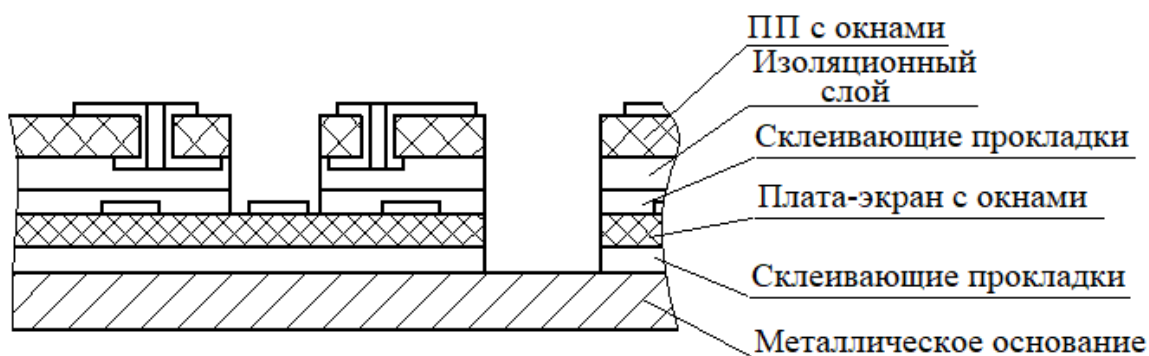


Рисунок 7.8 – Печатная плата с изоляционным слоем и окнами, приклеенная к металлическому основанию через плату-экран с окном

При наличии цепи высокого напряжения необходимо обеспечить прочность изоляции между ПП и платой-экраном не менее 2500 В. Для этого рекомендуется между ними установить дополнительную изоляционную прокладку, в которой должно быть окно для подключения цепи схемы к экрану навесным проводником (рисунок 7.9).

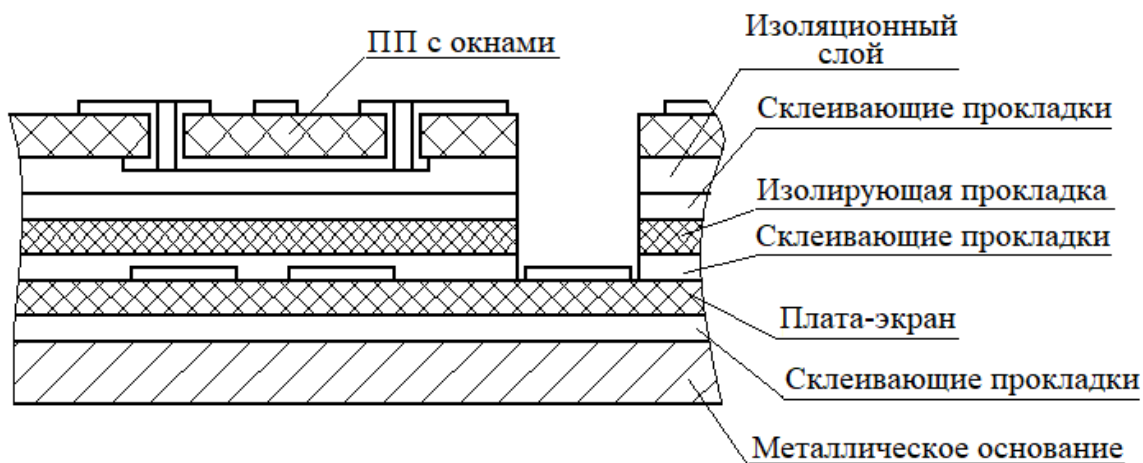


Рисунок 7.9 – Печатная плата с изоляционным слоем и окном, приклеенная к металлическому основанию с платой-экраном через изолирующую прокладку

Если в такой плате выполнить окна для установки тепловыделяющих элементов непосредственно на металл, это обеспечит эффективный теплоотвод и высокую электрическую прочность изоляции (рисунок 7.10). Конструкции таких плат применимы для схем с высоким напряжением.

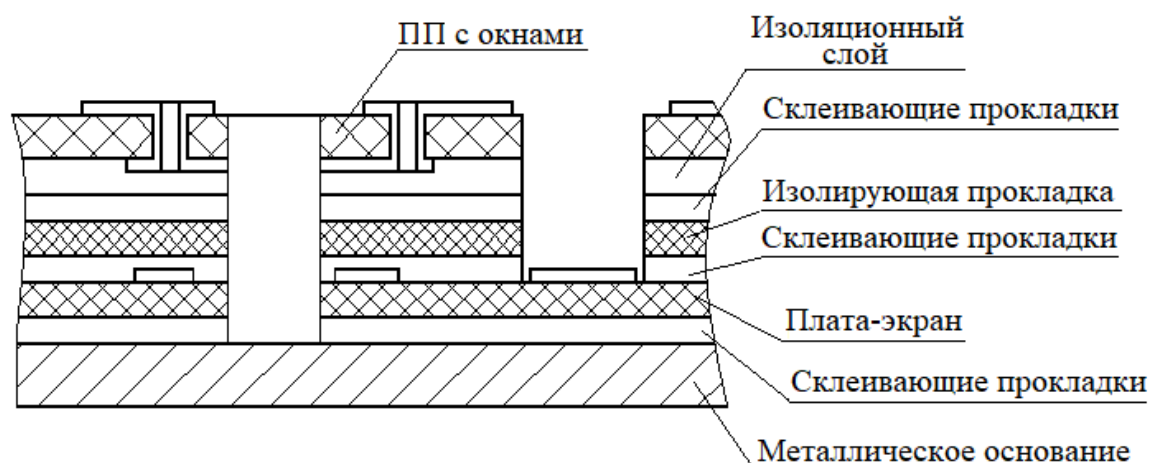


Рисунок 7.10 – Печатная плата с изоляционным слоем и окном, приклеенная к металлическому основанию с платой-экраном с окном через изолирующую прокладку

7.3 Требования к платам на металлических основаниях

Печатные платы должны соответствовать требованиям [18]. В конструкции МПП необходимо предусмотреть формирование внутренних слоев на двустороннем фольгированном диэлектрике с целью уменьшения деформации. Для стабилизации линейных размеров проводящий рисунок ПП должен быть равномерно распределен по ее поверхности. С обеих сторон основания необходимо располагать одинаковое количество слоев и прокладок. С целью исключения деформаций конструкцию сборочной единицы необходимо выполнять симметричной в поперечном сечении и относительно условного центра с большим количеством сигнальных и экранных слоев.

При склеивании с основанием нескольких ПП с двух сторон они должны иметь одинаковые габаритные размеры, толщину, располагаться с каждой стороны в одной плоскости, находиться друг против друга. При склеивании ПП с основанием, имеющим

окна, пазы или отверстия, необходимо учитывать вдавливание склеиваемой платы при прессовании. При этом в зоне 3 мм от края окна, паза или отверстия не следует располагать ЭРИ, установка которых требует плоскостности ПП.

При проектировании сборочной единицы с испытательным напряжением 2500 В и выше в случае двухстороннего расположения проводящего рисунка обязательно наличие изоляционной прокладки. Изоляционные прокладки толщиной не менее 0,2 мм устанавливаются между ПП и основанием или платой-экраном для повышения электрической прочности изоляции.

На склеивающие и изоляционные прокладки разрабатывается чертеж с указанием фиксирующих технологических отверстий. Прокладки должны соответствовать по габаритным размерам и конфигурации приклеиваемой ПП. Количество слоев склеивающих прокладок должно быть минимальным в зависимости от выбранной конструкции, рабочего напряжения. Для обеспечения электрической прочности воздушного зазора между основанием и проводящим рисунком ПП необходимо делать отступление от края платы до металлизированных участков. При этом расстояние с учетом допусков от металлизированного участка до края платы и от края платы до основания должно быть не менее 0,8 мм при испытательном напряжении 500 В и не менее 3 мм при испытательном напряжении 2500 В. Это требование распространяется также и на расположение ЭРИ, имеющих гальваническую связь с проводящим рисунком ПП.

На каждой ПП, склеивающей и изоляционной прокладке должно быть не менее двух фиксирующих технологических отверстий диаметром как минимум 3 мм. На основании должно быть по два фиксирующих технологических отверстия диаметром 3 мм для совмещения с каждой ПП, расположенных в соответствии с отверстиями на приклеиваемой плате.

Сборочная единица должна соответствовать требованиям чертежа, быть механически прочной, сохранять электрические параметры в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изделию. Электрическая прочность изоляции должна обеспечиваться конструкцией и выбранными материалами. После склеивания ПП с основанием поверхность плат должна быть однородна,

равномерно пропрессована, без внутренних пузырей, посторонних включений, влияющих на электрические параметры.

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняет металлическое основание, к которому припрессована ПП?
2. Каким должно быть расстояние от металлизированного участка до края ПП и от края платы до основания при испытательном напряжении 2,5 кВ?
3. За счет чего обеспечивается высокая прочность изоляции между ПП и металлическим основанием?
4. С какой целью в ПП и всех изоляционных слоях выполняются отверстия до поверхности металлического основания?
5. С какой целью в ПП и всех изоляционных слоях выполняются отверстия до металлизированной поверхности платы-экрана?

8 ЗАЗЕМЛЕНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

8.1 Понятие заземления

Одно из важных направлений современной радиоэлектроники – обеспечение ЭМС РЭА – становится все актуальнее из-за непрерывного увеличения числа сложных радиоэлектронных систем и комплексов. Размещенные в непосредственной близости друг от друга, эти системы и комплексы могут оказывать взаимное электромагнитное влияние. Необходимость учета ЭМС при проектировании устройств обусловлена следующими основными причинами [13]:

- повышением быстродействия полупроводниковых приборов и электронных схем;
- снижением амплитуд рабочих сигналов цифровых элементов, с одной стороны, и повышением уровня внешних помех – с другой;
- возрастанием взаимного влияния межсоединений и элементов из-за уменьшения их габаритных размеров и увеличения плотности компоновки, а также их влияния на быстродействие электронных устройств и помехоустойчивость;
- трудоемкостью и большими материальными и временными затратами, связанными с поиском и устранением причин низкой помехоустойчивости электронных устройств.

Конструктор-технолог должен видеть проблему жизнеспособности изделия в целом в условиях его эксплуатации и проектировать изделия помехоустойчивыми. Одним из основных средств уменьшения помех является заземление.

Заземление – это преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством.

В схеме, как правило, выделяют базу с нулевым потенциалом, которую называют землей и относительно которой проводят отсчет всех электрических потенциалов схемы. Конструктивно эта база выполняется проводом, проводником (шиной), металличе-

ской полосой или листом. Термин «земля» был установлен применительно к электротехническому оборудованию, для которого в качестве обратного провода использовали почву. В РЭА в качестве обратного провода применяют не металлический корпус аппаратуры, а общий провод, который из соображений техники безопасности присоединяют к земле. По общему проводу протекают возвратные токи электронных схем, которые вызывают появление разницы в электрических потенциалах на общих выводах (земле) компонентов схемы и помех через общее сопротивление.

Для снижения уровня помех при проектировании выделяют общие провода первичной и вторичной схем электропитания, высокочувствительных низкоуровневых схем, относительно нечувствительных мощных высокоуровневых схем, импульсных схем.

Система заземления – это электрическая цепь, обладающая свойством сохранять минимальный потенциал, являющийся уровнем отсчета в аппаратуре. Следовательно, чтобы снизить разность потенциалов, необходимо ограничить размер системы заземления. Для чувствительных устройств максимальное расстояние между точками заземления не должно превышать $0,05\lambda$, где λ – длина волны наиболее высокочастотного сигнала, м (таблица 8.1) [24].

Таблица 8.1 – Длина волны на различных частотах в воздухе

Частота	Длина волны
50 Гц	6000 км
3 кГц	100 км
30 кГц	10 км
300 кГц	1 км
3 МГц	100 м
30 МГц	10 м
300 МГц	1 м
3 ГГц	10 см
30 ГГц	1 см
300 ГГц	0,1 см

Для непроводящей среды длина волны рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{v}{f},$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны, м/с (в воздухе $v \approx 3 \cdot 10^8$ м/с); f – частота, Гц.

В большинстве устройств бытового назначения допустимо расстояние $0,1\lambda$, а при заземлении нечувствительных устройств это расстояние можно увеличить до $0,15\lambda$. Система заземления должна выполнять следующие функции [25]:

- обеспечивать цепи возврата различных токов в аппаратуре;
- минимизировать нежелательные паразитные связи (емкостные, индуктивные, через общее сопротивление);
- образовывать опорные плоскости для антенн, препятствовать появлению вблизи антенн высокочастотных потенциалов;
- защищать людей и оборудование от неисправностей источников питания;
- снимать статические заряды.

Протекание любого тока в системе заземления приведет к разности потенциалов. Для удовлетворительной работы оборудования необходимо, чтобы эта разность была меньше амплитуды сигналов, поэтому рекомендуется длину заземляющих проводников делать как можно короче.

Все цепи заземления можно разбить на несколько групп (рисунок 8.1):

- сигнальная или схемная земля – цепи возврата сигнальных токов;
- силовая земля – цепи возврата постоянных токов;
- корпусная земля – цепи возврата переменных силовых токов и экранирующие корпуса [12].



Рисунок 8.1 – Стандартные обозначения заземления

8.2 Схемы заземления

Для чрезвычайно чувствительных устройств применяется схема с «плавающим» заземлением (рисунок 8.2). Она требует полной изоляции от корпуса, а иначе оказывается малоэффективной [13]. Можно изолировать друг от друга цепи возврата сигнальных токов, цепи возврата постоянных токов питания, цепи возврата переменных токов питания и построить схему заземления из трех независимых контуров, сходящихся в одной точке. Такой подход позволяет оптимизировать каждую заземляющую цепь в отдельности. Независимые контуры заземления могут не соединяться.

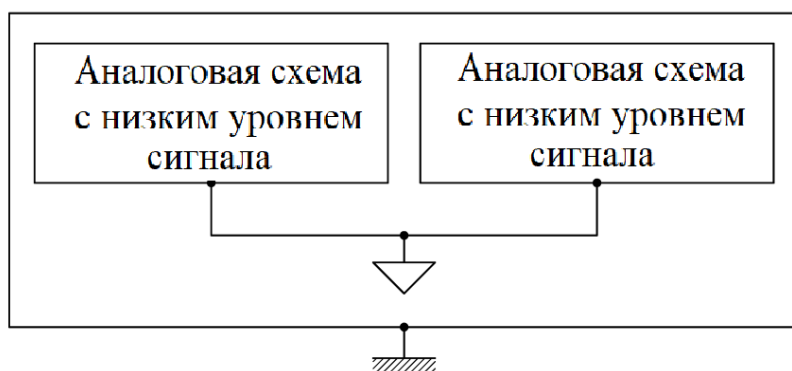


Рисунок 8.2 – Схема с «плавающим» заземлением

Существуют схемы заземления, включающие в себя несколько устройств, каждое из которых имеет свой отвод к общей точке (рисунок 8.3).

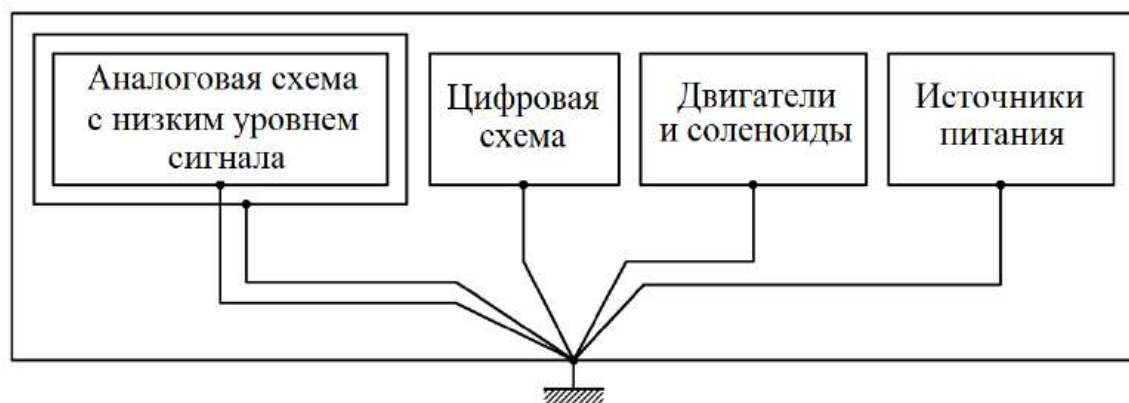


Рисунок 8.3 – Одноточечная схема заземления

Каждое основание или каждая стойка соединяется с монтажной панелью одним проводником. При таком подходе исключается паразитная связь через общее сопротивление и уменьшается вероятность образования паразитных контуров. Однако одноточечная схема заземления часто оказывается конструктивно громоздкой и дорогой, поскольку число проводников и их длина могут быть довольно большими. Заземление в одной точке очень эффективно до частоты 1 МГц, а если схема заземления имеет малый размер, то до 10 МГц. На более высоких частотах, особенно для чувствительных аналоговых схем, ее применение затруднено, поскольку индуктивности заземляющих проводников увеличивают сопротивление земли, а также индуктивные и емкостные связи между ними. Тем не менее в большинстве военных и космических устройств используется подобное заземление в одной точке.

Существуют схемы с близким уровнем помех, в этом случае их можно соединить вместе, причем наиболее чувствительные схемы следует располагать как можно ближе к общей точке (рисунок 8.4). Такой принцип заземления уменьшает общее число проводов, незначительно повышая паразитную связь через общее сопротивление. Когда ПП имеет отдельные заземляющие цепи для аналоговых и цифровых узлов, их следует соединить по встречно-параллельной схеме (диоды) для защиты ПП от статического электричества, когда она не установлена в систему.

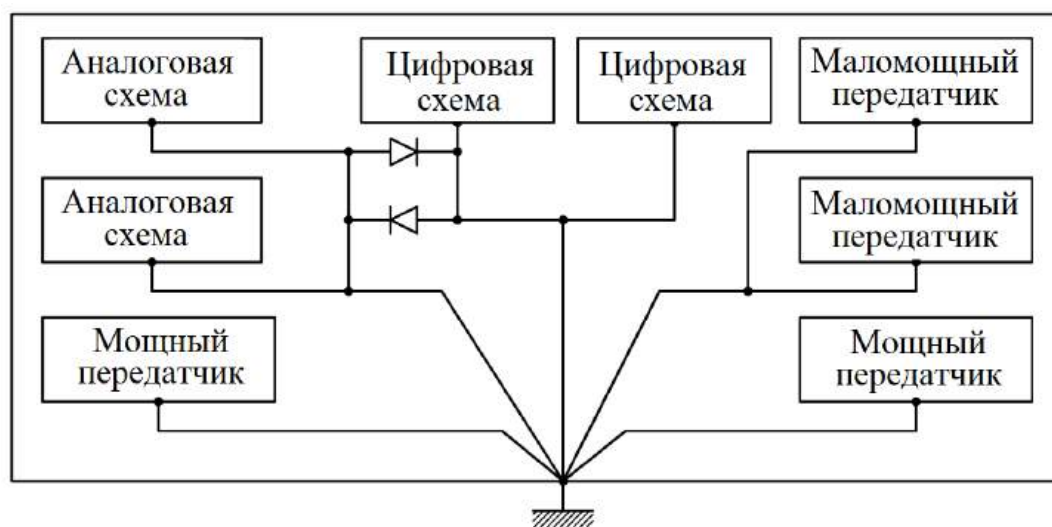


Рисунок 8.4 – Модифицированная одноточечная схема заземления

При многоточечной схеме заземления (рисунок 8.5) отдельные схемы и участки корпуса соединены короткими перемычками, чтобы свести к минимуму стоячие волны. Подобный метод обычно применяют для высокочастотных схем (более 10 МГц) с близким уровнем помех. Такая заземляющая схема требует тщательного контроля, создает многоточечные паразитные контуры, и ее не рекомендуется использовать для чувствительных схем. Однако ее широко используют, подключая функциональные узлы аппаратуры в точках, ближайших к опорной земле, в качестве которой применяется заземляющая поверхность с малым сопротивлением: металлическое шасси, слой МПП, металлизация пластмассового корпуса.

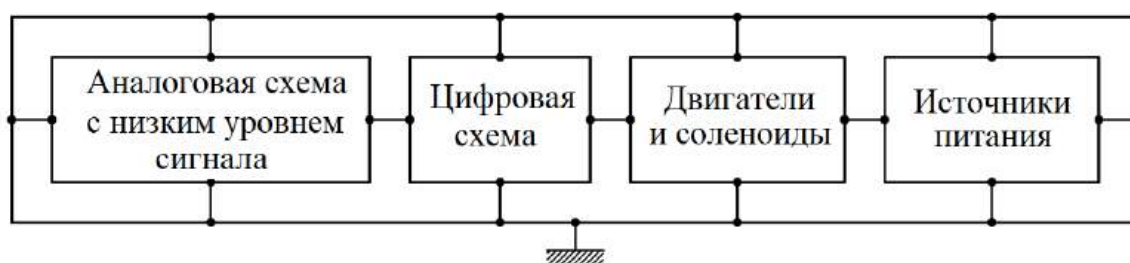


Рисунок 8.5 – Многоточечная схема заземления

Комбинированные заземляющие схемы (рисунок 8.6) представляют собой сочетание одноточечной, многоточечной и «плавающей» заземляющих схем.

Применение катушки индуктивности служит развязкой между высокочастотными схемами и корпусом и одновременно обеспечивает стекание статических зарядов. Использование конденсаторов, отстоящих друг от друга на расстояние $0,1\lambda$ вдоль изолированного кабеля, предотвращает появление высокочастотных стоячих волн и низкочастотных паразитных контуров.

Очень распространенной и в то же время трудоемкой является схема заземления в виде гирлянды (рисунок 8.7). Помехи можно ослабить, если расположить в одной гирлянде цепи в порядке возрастания уровня помех (корпус – в конце), а чувствительные цепи расположить в другой гирлянде в порядке увеличения чувствительности (корпус – в конце).

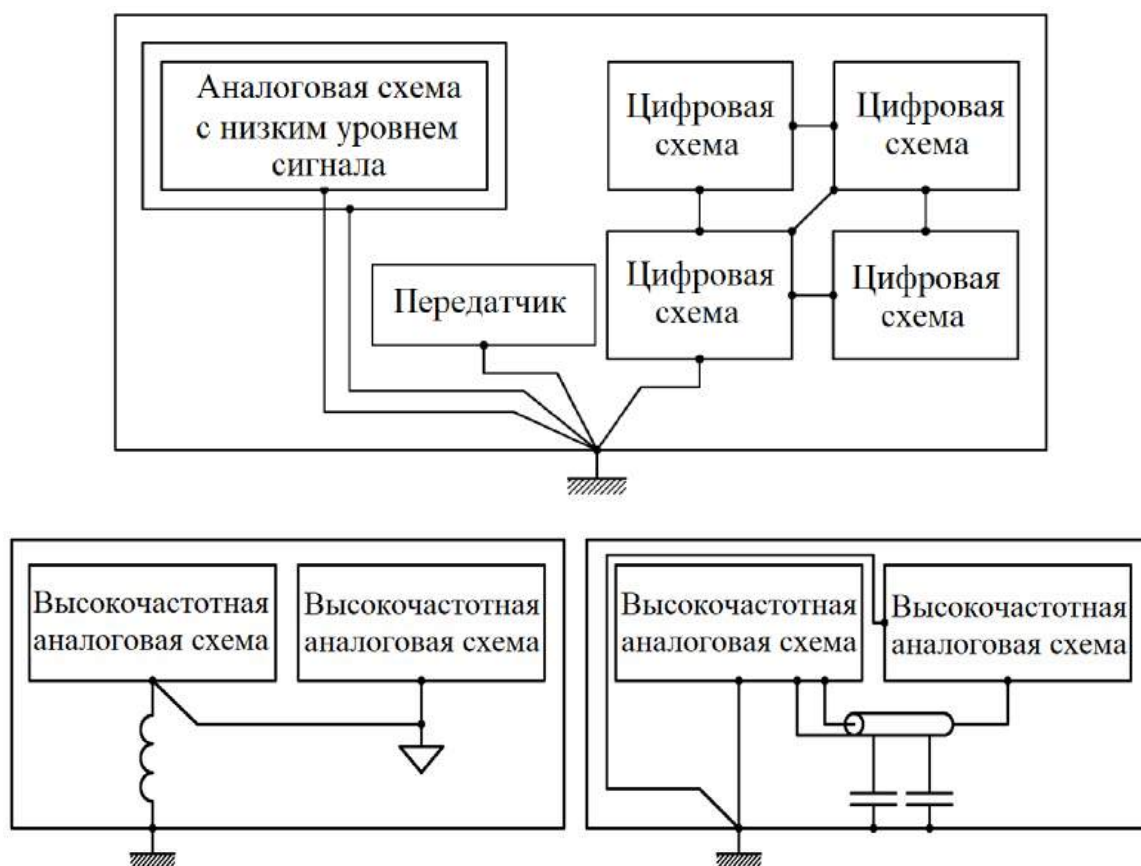


Рисунок 8.6 – Комбинированные схемы заземления



Рисунок 8.7 – Схема заземления в виде гирлянды

8.3 Конструкционные решения заземления

При заземлении чувствительных аналоговых схем необходимо тщательно контролировать токи по цепям заземления. Цифровые схемы не чувствительны к низкочастотным помехам, однако на высоких частотах их заземляющие цепи должны обладать низким сопротивлением. Этому условию вполне соответствуют передающие линии с распределенными параметрами (когда в один и тот же момент времени ток и напряжение непрерывно изменяются при переходе от одной точки линии к другой). Скрученные пары проводов и коаксиальные кабели обеспечивают одну линию

возврата каждого сигнала, тогда как в плоских кабелях по крайней мере каждый пятый или десятый проводник должен использоваться для возврата сигнала. Эти линии возврата следует заземлять вблизи источника сигнала и его приемника [13].

Экраны необходимо заземлять для нейтрализации влияния электрических полей, причем заземляющие проводники следует располагать вблизи входных или выходных контактов сигнальной линии, чтобы уменьшить ток, текущий по экрану. С целью предотвращения паразитных контуров с замыканием на землю экраны вокруг чувствительных схем заземляют только в одной точке, а экраны кабелей – по крайней мере через каждые $0,2\lambda$ для подавления стоячих волн.

Проводники, заземляющие корпус, должны обладать малым сопротивлением при высоком токе и быть доступны для профилактического осмотра. Перемычки заземления на корпусе следует располагать вдалеке от чувствительных схем.

В случае большой удаленности нагрузки от источника при заземлении цепи с обоих концов образуется контур заземления, который может приводить к помехам различного рода. Трансформаторы обеспечивают удовлетворительную развязку до частот 5–10 МГц. Для более надежной развязки следует использовать трансформатор с электростатическим экранированием, причем заземлять экран у нагрузки.

Также разрывать контур заземления можно с помощью оптрона. Схемы такого типа почти полностью снимают проблемы, возникающие из-за разности потенциалов земли, поскольку связь между источником и нагрузкой осуществляется через световой поток. Оптоны широко используются в цифровых схемах [13].

Существует несколько технических способов обеспечения низкоомной цепи заземления:

- использование соединения с широким поверхностным контактом, которое с двух концов имеет достаточно надежную связь с общим выводом;
- использование соединения из большого количества отдельных изолированных друг от друга проводников;

– применение экранированного провода, так как экран является при низких и высоких частотах очень низкоомным соединением;

– применение системы заземления как пути возвратного тока, а не опорного напряжения 0 В;

– заземление короткими выводами.

В РЭА используются временные, постоянные, полупостоянные электрические контакты. К временным следует отнести разъемное и винтовое соединения, к постоянным – сварку, к полупостоянным – паяное соединение, соединение накруткой и опрессовкой.

Разъемные соединения обеспечивают быструю установку и удаление элементов конструкции и используются для повышения ремонтпригодности аппаратуры. Винтовое является основным видом соединения проводов с электрическими машинами и приборами и позволяет коммутировать провода независимо друг от друга (рисунок 8.8).



Винтовое соединение

Рисунок 8.8 – Винтовое соединение
провода заземления и корпуса

Медные проводники малых сечений сгибают в кольцо под винт, а чтобы не расходились жилы многожильных проводов, их

припаивают или спрессовывают кольцевыми наконечниками. Для предотвращения возможного ослабления контактного давления при циклических температурных воздействиях и вибрациях под винт вводится пружинная шайба или шайба-звездочка.

Сварочное соединение обладает высокой механической прочностью, способностью выдерживать циклические температурные воздействия.

Соединение пайкой осуществляется расплавленным припоем с температурой плавления ниже температуры плавления соединяемых проводников. Соединение накруткой получают без разогрева материалов путем накручивания под натягом вокруг жесткого вывода нескольких витков многожильного провода. Материал вывода должен быть достаточно прочным, чтобы противостоять скручивающим усилиям, обладать хорошим сопротивлением к смятию накручиваемым проводом и низким омическим сопротивлением. Подобными свойствами обладают фосфористая и бериллиевая бронзы. В качестве проводника используется относительно мягкий и пластичный материал, сохраняющий форму накрутки. Соединение обеспечивает высокую надежность при жестких механических и климатических воздействиях.

Соединение опрессовкой обеспечивает полный контакт. Форму и размер элементов (наконечники) под опрессовку подбирают по сечению жил провода, материалу, гибкости провода, а также по способу подключения к устройству или оборудованию. Сечение провода – важный аспект: если оно больше, провод не войдет в элемент конструкции под опрессовку, если меньше – обжим будет неплотным. При гибком проводе тоже может получиться неплотное соединение.

Контрольные вопросы

1. Что называется заземлением РЭА?
2. Какие функции выполняет схема заземления?
3. Назовите существующие схемы заземления.
4. Какие существуют способы обеспечения низкоомной цепи заземления?

9 ЭКРАНИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

9.1 Понятие экранирования

Экранирование является основным средством ослабления электромагнитных помех вследствие проникновения поля в определенную область аппаратуры. Конструкции и устройства, реализующие это ослабление, называются *экранами*. Они применяются для отдельных элементов, узлов и блоков, которые могут быть либо источниками, либо рецепторами помех. Обычно экраны устанавливают вокруг элементов и устройств, а также вокруг кабелей и линий передачи энергии и информации. Как правило, это удорожает изделие, поэтому необходимость экранирования должна быть обоснована и рассматриваться только после того, как полностью исчерпаны методы оптимизации компоновки аппаратуры [13].

В решении задач ЭМС, и в частности экранирования, важно правильно определить характер поля источника излучения помех. На практике для характеристики электромагнитной обстановки при работе РЭА используют термины «*электрическое поле*», «*магнитное поле*», «*электромагнитное поле*».

Электрическое поле создается зарядами между двумя проводниками с различными потенциалами и характеризуется *напряженностью электрического поля* E , В/м:

$$E = \frac{U}{r},$$

где U – напряжение между проводниками, В; r – расстояние между проводниками, м.

Величина 1 В/м – это напряженность поля, в котором разность потенциалов между точками, расположенными на расстоянии 1 м друг от друга, равна 1 В. Электрическое поле прямо пропорционально подаваемому напряжению и обратно пропорционально расстоянию между проводниками.

Магнитное поле образуется вокруг проводника, по которому протекает электрический ток, и характеризуется *напряженностью магнитного поля H* , А/м:

$$H = \frac{I}{2\pi r},$$

где I – сила тока в проводнике, А.

Величина 1 А/м равна напряженности магнитного поля на расстоянии $1/2\pi$ от бесконечно длинного прямолинейного проводника бесконечно малого круглого сечения, по которому течет ток 1 А. Магнитное поле прямо пропорционально току и обратно пропорционально расстоянию до проводника. Физические причины существования электромагнитного поля связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле порождает магнитное, а изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое. При этом оба компонента, E и H , непрерывно изменяясь во времени, воздействуют друг на друга и создают электромагнитные волны.

Основным назначением электромагнитных экранов является локализация поля помех, создаваемых источником питания, в местах их возникновения с целью ослабления влияния помех на чувствительные элементы источника питания. Эффективность экранирования SE оценивается в децибелах и определяется формулой [12]

$$SE = 10\lg|P/P_э|,$$

где P – мощность сигнала без экрана; $P_э$ – мощность сигнала с экраном.

Децибел – это логарифмическая единица, которая указывает коэффициент усиления или ослабления и используется для обозначения уровня акустических волн и электронных сигналов.

Сравнение двух сигналов по их мощности не всегда удобно. Во многих случаях проще измерять не мощность, а падение напряжения или протекающий ток, напряженность электрического и магнитного полей, рассчитывая отношение квадратов этих величин. Выражение эффективности экранирования принимает вид

$$SE = 20 \lg |E/E_0|;$$

$$SE = 20 \lg |H/H_0|,$$

где $E(H)$ – напряженность электрического (магнитного) поля в заданной точке без экрана; E_0 (H_0) – напряженность электрического (магнитного) поля в той же точке при наличии экрана.

Номинальное значение эффективности экранирования рассчитывается исходя из требуемого подавления электромагнитных помех и определяется конкретными условиями работы проектируемой аппаратуры. По этому значению определяются материал, геометрические размеры экрана и условия размещения внутри него. В общем случае экран не только локализует, но и искажает поле источника в защищаемой области, а также оказывает побочное влияние на паразитные параметры цепей электропитания, находящихся в зоне действия экрана.

Для определения характера поля источника излучения используются понятия ближней и дальней зон распространения электромагнитной энергии с удалением от источника. Если источник размером l излучает электромагнитное поле с длиной волны λ и расстояние от источника до заданной точки равно r , то при $l \gg \lambda$ граница зон приблизительно равна расстоянию $r = \lambda/2\pi$. Если $2\pi r/\lambda < 1$, можно полагать, что точка находится в ближней зоне; если $2\pi r/\lambda < 2$, то в дальней, а при $1 < 2\pi r/\lambda < 2$ – в промежуточной. Конечно, изменяющиеся электрическое и магнитное поля всегда существуют вместе, но в зависимости от источника и расстояния от него их соотношение, определяемое волновым сопротивлением полей $Z_D = E/H$, может быть разным. Если в источнике протекает значительный ток при малом напряжении, то в ближней зоне преобладает магнитное (низкоомное) поле. Если, наоборот, протекает малый ток при относительно большом напряжении, то в ближней зоне преобладает электрическое (высокоомное) поле. Поле в дальней зоне от любого источника называют электромагнитным, или плоской волной, для него $Z_D = 120\pi \approx 377$ Ом. Таким образом, определение зоны и характера источника поля позволяет принимать более эффективные

меры защиты. Поэтому различают задачи экранирования магнитного поля, электрического поля и плоской электромагнитной волны. Решение этих задач различно, но эффективная система экранирования для плоской волны будет результативна и для экранирования электрического поля [24].

9.2 Экранирование магнитного поля

Магнитное поле создается током заряженных частиц, или изменяющимся во времени электрическим полем, или собственными магнитными моментами. В ближней зоне узлов и элементов РЭА с большими токами и малыми напряжениями создаются электромагнитные поля с преобладанием магнитной составляющей. При этом помехи определяются магнитной индукцией. Преимущественное влияние магнитных полей имеется также в случае, если рецептор не восприимчив к электрической составляющей или последняя много меньше из-за свойств излучателя либо поляризации электромагнитного поля помех. Источниками магнитных помех могут быть, например, индуктивные элементы аппаратуры или силовые кабели с большими токами промышленной частоты. В этих случаях прежде всего следует ослабить влияние магнитной связи следующими мерами:

- компоновать цепи рецепторов помех в плоскости, параллельной направлению воздействующего на рецептор помехонесущего магнитного потока;
- максимально разносить цепи рецепторов и источников помех, что снижает напряженность помехонесущего магнитного поля в местах расположения восприимчивых цепей аппаратуры;
- уменьшать площадь контура рецептора помех;
- применять витые пары прямого и обратного проводников, где компенсируются токи, наводимые магнитным полем в соседних витках.

Если применение указанных мер ограничено, то требуемое ослабление помех достигается магнитным экранированием.

В отличие от электрического поля магнитные поля не могут быть заблокированы или изолированы. Низкочастотные магнит-

ные поля могут быть только перенаправлены, а не удалены. Для этих целей при создании экранов используют сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Экранирование магнитного поля базируется на двух механизмах [26]. Первый заключается в шунтирующем действии магнитного материала с высокой магнитной проницаемостью. Такие материалы притягивают силовые линии магнитного поля и концентрируют магнитный поток, разрезая область около экрана от силовых линий (рисунок 9.1).

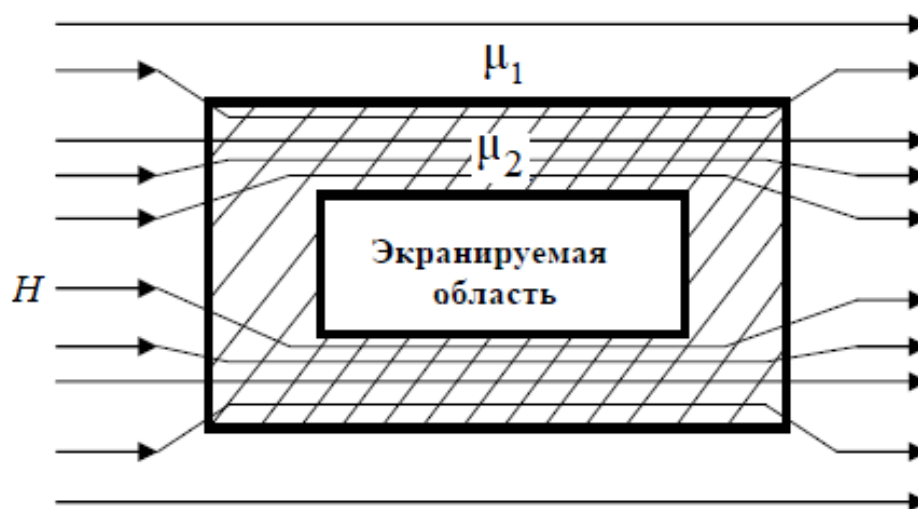


Рисунок 9.1 – Магнитостатическое экранирование

Такой механизм особенно эффективен на низких частотах (примерно до 100 кГц) и при постоянном поле. В этом случае степень ослабления магнитного поля определяется магнитной проницаемостью материала экрана, его геометрической формой и толщиной стенки. Чем выше магнитная проницаемость и толще стенки, тем эффективнее экран. Экран из немагнитного материала (медь, латунь, алюминий) не оказывает на магнитостатическое поле никакого влияния, и поэтому эффективность экранирования будет равна нулю.

К материалам с повышенной магнитной проницаемостью относятся ферромагнетики (железо, никель, кобальт, гадолиний) – вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая существенно изменяется под влиянием внешних воздействий (магнитное поле, деформация, температура). Однако ферромагнитные свойства вещества проявляются только в определенной области температуры.

Температура, при которой материалы теряют свои ферромагнитные свойства, называют точкой Кюри. Если сильно нагреть намагниченный образец, то он потеряет способность притягивать железные предметы. Экран из ферромагнитного материала (пермаллой, сталь) с большим значением магнитной проницаемости замыкает значительную часть магнитного поля на свои стенки, имеющие меньшее магнитное сопротивление, чем воздушное пространство, занятое самим экраном.

В качестве магнитных экранов хорошо зарекомендовали себя следующие материалы:

- пермаллой с содержанием никеля 76–82 %, которые обладают высокой (несколько сот тысяч) относительной магнитной проницаемостью, но сравнительно низкой индукцией насыщения (сплавы железа);

- специальные сплавы на основе железа, имеющие более низкую, чем пермаллой, магнитную проницаемость (несколько тысяч), но большую индукцию насыщения. Их рекомендуется применять при высокой интенсивности воздействующего магнитного поля, в том числе в качестве первого слоя (ближайшего к мощному источнику) многослойных экранов;

- электротехническая (трансформаторная) сталь, которая используется для изготовления простых экранов в виде полых, открытых с обоих торцов цилиндров.

Второй механизм экранирования заключается в компенсации внешнего магнитного поля полями вихревых токов экрана. Наведенные внешним, изменяющимся во времени магнитным полем вихревые токи в стенке экрана создают связанные с ним магнитные поля, направление которых противоположно направлению возбуждающего поля (рисунок 9.2). При этом происходит некоторая компенсация внешнего поля, что определяет эффективность его ослабления. Такой механизм типичен для переменного магнитного поля. В данном случае существенную роль играет проводимость материала, которая должна быть максимальной. Этим свойством обладают серебро, медь. Здесь также важны форма экрана и толщина стенок. Следует иметь в виду, что на частотах в несколько десятков килогерц относительная магнитная проница-

емость большинства магнитных материалов резко снижается, стремясь к единице, но при этом сохраняя относительно низкую проводимость.

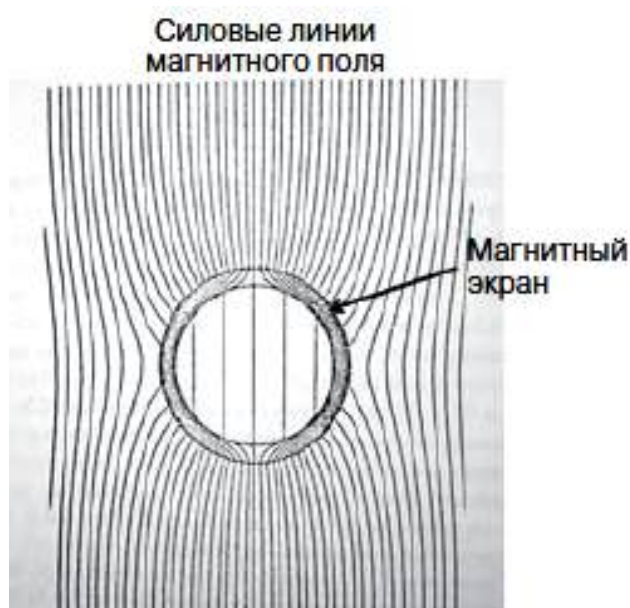


Рисунок 9.2 – Распределение линий магнитного поля в режиме вихревых токов

В целом конструкция магнитного экрана зависит от нескольких критических факторов: максимальной интенсивности магнитного или геомагнитного (постоянный ток) поля (амплитуда и поляризация) в месте установки экрана; геометрии экрана, его площади и толщины стенки; типа материала, магнитной проницаемости, напряженности поля насыщения и количества экранирующих слоев. Следует отметить, что утолщение стенки экрана – не лучший способ повысить его качество. Значительно эффективнее действуют многослойные ферромагнитные экраны с промежутками между составляющими экран слоями. При этом коэффициент экранирования будет равен произведению коэффициентов экранирования отдельных слоев. Соответственно качество экранирования многослойного экрана будет выше, чем от одного слоя такой же толщины.

Эффективность магнитостатического экранирования тем выше, чем выше магнитная проницаемость и толщина экрана, а также чем меньше в нем стыков, швов, разрезов поперек направле-

ния линий магнитной индукции. Поэтому если они есть, то должны быть параллельны этим линиям. Заземление экрана не влияет на эффективность его магнитоэстатического экранирования. Чтобы предотвратить насыщение экрана, желательно между ним и компонентами предусмотреть зазор не менее 6 мм. Если экраны изготовлены из фольги, перекрытие в месте шва должно составлять более 13–20 мм, а радиусы гибки должны вдвое превышать толщину экрана.

Магнитные экранирующие материалы обеспечивают очень высокую проницаемость для линий магнитного поля, направляющих электромагнитную энергию по толщине сплава, не позволяя этому полю проникать в защищаемую зону. Важно, чтобы экран обеспечивал такой замкнутый путь для силовых линий магнитного поля, чтобы они не выходили из экрана в том месте, где будут вызывать непреднамеренные помехи (рисунок 9.3).

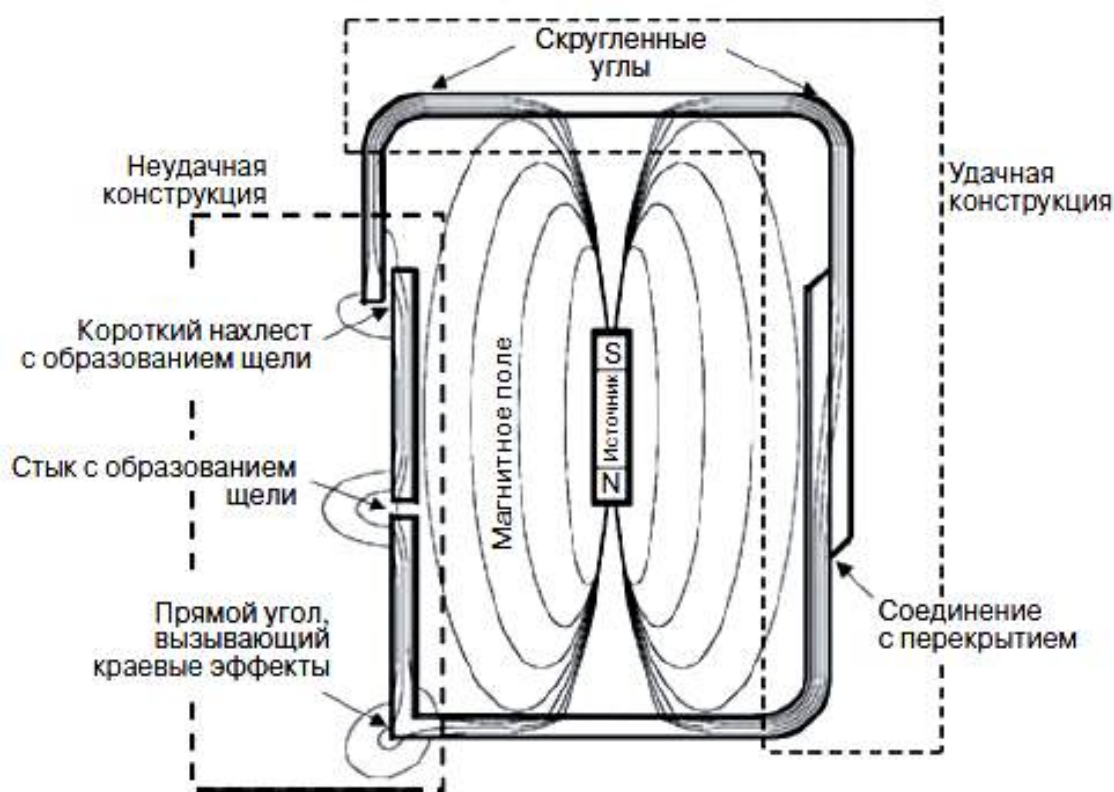


Рисунок 9.3 – Примеры удачных и неудачных конструкций магнитного экрана

9.3 Экранирование электрического поля

Электрическое поле – вид материи, окружающей электрические заряды и проявляющейся в действии на эти заряды. В ближней зоне узлов и элементов РЭА с большими напряжениями и малыми токами создаются электромагнитные поля с преобладанием электрической составляющей (рисунок 9.4, *а*) [27].

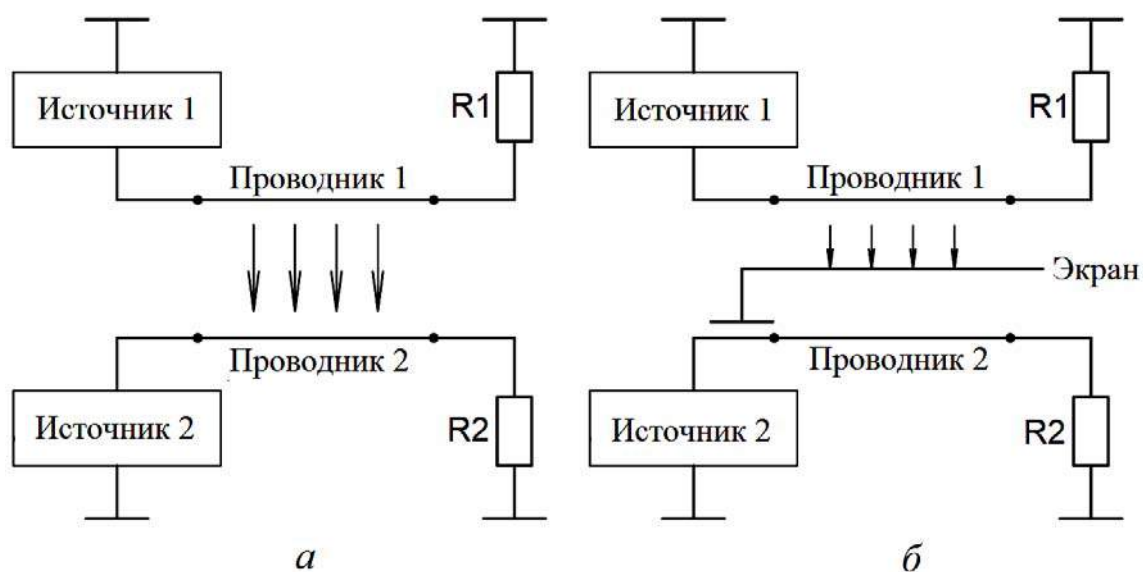


Рисунок 9.4 – Проводники 1 и 2: *а* – без защиты;
б – с защитой электростатическим экраном

Под действием внешнего электрического поля в проводнике происходит поляризации зарядов, в результате чего возникает электрическая индукция, от которой зависят помехи через емкостную связь. Для ослабления этой связи можно:

- максимально разносить цепи рецептора и источника помех;
- компоновать цепи рецептора и источника помех, минимизируя емкость связи (например, располагая помехонесущие и помеховосприимчивые провода перпендикулярно);
- уменьшать размеры цепей рецептора и источника помех;
- применять дифференциальное включение рецептора помех, что позволяет значительно ослабить влияние емкостных синфазных помех;
- компенсировать помехи путем включения дополнительного источника противофазного сигнала помех.

Если при проектировании аппаратуры применение указанных мер ограничено, то для обеспечения требуемого ослабления помех необходимо прибегнуть к экранированию электрического поля (рисунок 9.4, б). Оно основано на замыкании силовых линий помехонесущего электрического поля на металлический экран, соединенный с корпусом аппаратуры или землей.

Если между двумя проводниками образуется паразитная емкость, вследствие чего через нагрузку R_2 проходит переменный ток, создаваемый переменным напряжением источника 1, это нарушает режим работы цепи, в которую включена нагрузка R_2 . Экранирующий эффект заземленного металлического экрана заключается в замыкании большей части емкостной связи между экранируемыми элементами конструкции на корпус прибора. Экран шунтирует часть тока источника 1, тем самым снижается нежелательный ток через нагрузку R_2 . Таким образом, возникает емкостная связь между проводником 1 цепи с нагрузкой R_1 и экраном. Благодаря этому ток в цепи нагрузки R_2 устраняется.

Заземление электростатического экрана, как видно, является необходимым элементом, вытекающим из сущности электростатического экранирования. Без заземления электростатический экран, окружающий источник электрического поля, почти полностью теряет свою эффективность. Обращает на себя внимание тот факт, что при наличии зарядов как на внутренней, так и на внешней поверхности экрана поле внутри него обусловлено только внутренними зарядами и совершенно не зависит от внешних. Однако обратное утверждение было бы неправильным, ибо находящиеся внутри заряды создают поле и вне экрана. Физически это влияние связано с появлением индуцированных зарядов на внешней поверхности, влияние которых может быть нейтрализовано отводом их на землю. Следовательно, с помощью заземления электростатического экрана можно добиться экранирования как внутреннего пространства экрана от внешнего поля, так и внешнего пространства от внутреннего поля [26].

Материалы для электростатических экранов:

– проводящие элементы несущих конструкций (корпус аппаратуры, корпус транспортного средства, экран компонента и т. п.)

любой толщины. Доминирующий фактор в этом случае – высокая проводимость материала. Магнитные материалы для электростатического экранирования применять нецелесообразно;

– фольга, которая может быть необходима в следующих ситуациях: придание экранирующих свойств непроводящим элементам конструкции; локальное оперативное экранирование отдельных узлов, компонентов и проводников; повышение эффективности экранирования уже существующего экрана; создание экранов сложной формы, которые невозможно получить из обычного листа металла.

Не соединенные с системой заземления металлические детали, расположенные вблизи источников или рецепторов, могут привести к усилению их связи. Поэтому необходимо обеспечивать надежный контакт с корпусом всех нетоконесущих деталей устройства. Съёмные детали должны иметь металлическое покрытие, не подверженное коррозии, по всей плоскости соприкосновения. Несъёмные детали следует приварить или припаять. Для систем заземления предпочтительнее использовать следующие разновидности проводников: плоские металлические перемычки; плоские оплетки с плоскими зажимами; плоские оплетки с полюсными наконечниками; многопроволочные перемычки.

9.4 Экранирование электромагнитного поля

Электромагнитное поле взаимодействует с электрически заряженными телами и представляет собой совокупность электрического и магнитного полей, которые могут при определенных условиях порождать друг друга. Главное условие существования электромагнитного поля – ускоренно движущаяся заряженная частица.

В общем случае механически прочный экран обеспечивает защиту от всех видов электромагнитного излучения, кроме магнитных полей низкочастотного диапазона. Эффективную защиту от электрических полей, электромагнитного излучения, а также магнитных полей частотой выше 1 МГц дают медные и алюминиевые экраны. Для экранирования магнитных полей частотой от

10 кГц до 1 МГц следует применять стальную фольгу, а при частоте ниже 10 кГц, когда становятся критичными размер и масса экрана, – сплавы с высокой магнитной проницаемостью (мю-металл, пермаллой) [12].

Степень ослабления электромагнитной волны зависит от трех факторов: первый – отражение электромагнитной волны от экранирующего барьера; второй – поглощение волны по мере ее прохождения через металлический барьер; третий – многократные отражения волны внутри экрана от границ раздела сред металл – воздух и воздух – металл (рисунок 9.5) [24].

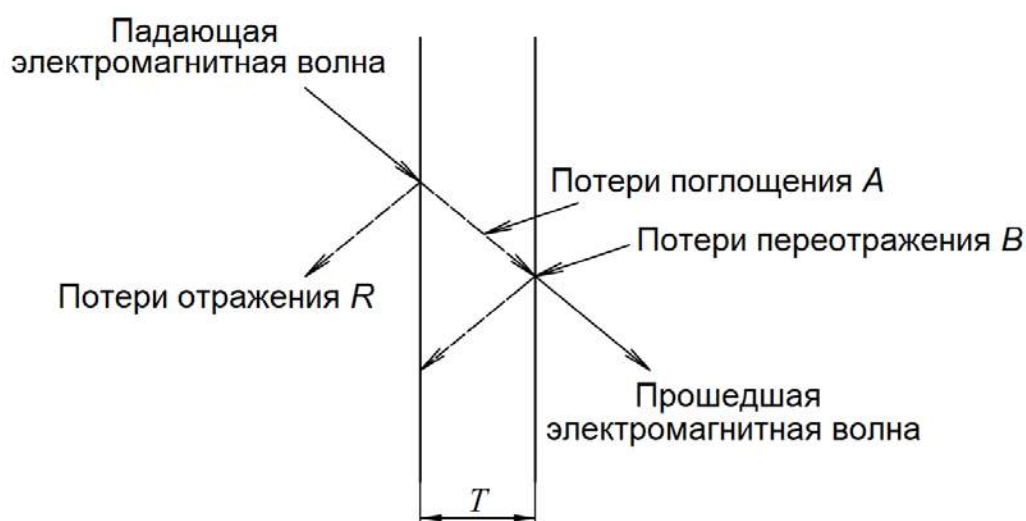


Рисунок 9.5 – Экранирование металлической пластиной

Для оценки возможностей экранирования рассмотрим случай падения электромагнитной волны частотой f и волновым сопротивлением Z_D на экран толщиной T из металла, находящийся на расстоянии r от источника, абсолютная магнитная проницаемость которого

$$\mu = \mu_0 \mu_r \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \mu_r,$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость материала, Гн/м.

При падении волны на границу воздух – металл часть ее отражается, а оставшаяся часть распространяется в металле, ослабляясь при этом из-за потерь. Дойдя до границы металл – воздух, волна снова отражается, часть ее выходит из металла, а отражен-

ная часть распространяется в обратном направлении, испытывая многочисленные переотражения в стенке экрана. Затухание в экранированных полостях, выполненных из однородных металлических пластин, весьма высокое. Эффективность экранирования растет с частотой за счет скин-эффекта, поэтому даже очень тонкие листы эффективны при высоких частотах полей.

В общем случае эффективность экранирования SE , дБ, складывается из трех слагаемых:

$$SE = A + R + B,$$

где A – затухание вследствие поглощения, вызванное тепловыми потерями от возбуждаемых вихревых токов в металле; R – затухание за счет отражения основной волны от границ раздела воздух – металл и металл – воздух; B – затухание за счет многократных внутренних переотражений оставшейся части волны в стенке экрана (это слагаемое отрицательно, поскольку в результате каждого переотражения часть волны все же проникает в экран).

Потери на поглощение зависят от материала экрана и частоты и определяются выражением [18, 23]

$$A = 20 \lg \left(e^{-\frac{T}{\delta}} \right) \approx 8,686 \frac{T}{\delta},$$

где $e \approx 2,718$ – число Эйлера; $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma}}$ – толщина скин-слоя, м;

σ – удельная электрическая проводимость материала экрана, См/м.

Потери на поглощение малы на низких частотах и постепенно возрастают до высоких уровней при повышенных частотах. Эффективность поглощения может быть повышена за счет увеличения толщины экрана или использования металла с высокой магнитной проницаемостью.

Потери на отражение зависят от материала экрана, частоты и характера поля и определяются выражением

$$R = 20 \lg \left| \frac{(Z_D + Z_M)^2}{4Z_D Z_M} \right|,$$

где Z_D – волновое сопротивление электромагнитной волны; Z_M – волновое сопротивление экрана.

Отражение и связанные с ним потери обусловлены разницей волновых сопротивлений падающего поля и экрана. Когда волновое сопротивление поля много больше или меньше сопротивления экрана, потери на отражение очень велики. Высокое волновое сопротивление электрических полей $Z_D \geq 377$ Ом способствует их отражению на границе раздела воздух – экран, поэтому в данном случае очень тонкие экраны оказываются эффективными. Заземляя экраны, можно защитить схемы и от низкочастотных электрических полей. Магнитные поля с низким волновым сопротивлением $Z_D < 377$ Ом легко проникают сквозь границу раздела воздух – экран, но отражаются на границе раздела экран – воздух. При этом часть волны, которая не поглощается в экране после многократных внутренних отражений, в конечном итоге рассеивается. Поэтому экраны, защищающие от магнитных полей, должны быть толстыми (по сравнению с толщиной скин-слоя), иметь высокую магнитную проницаемость и высокую удельную электрическую проводимость.

В зависимости от вида поля источника определяется Z_D :

– электромагнитного поля

$$Z_D = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная;

– магнитного поля

$$Z_D = 2\pi f \mu_0 r;$$

– электрического поля

$$Z_D = \sqrt{\frac{1}{2\pi f \mu_0}}.$$

Волновое сопротивление экрана связано с частотой, магнитной проницаемостью и электрической проводимостью материала.

Для металлов волновое сопротивление существенно ниже волнового сопротивления свободного пространства (377 Ом). Волновое сопротивление экрана вычисляется по формуле

$$Z_M = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}}.$$

Потери на переотражения в стенке экрана определяются как

$$B = 20 \lg \left| 1 - \left[\frac{Z_D - Z_M}{Z_D + Z_M} \right]^2 e^{-2T/\delta} \right|.$$

Если потери на поглощение превышают 6 дБ, то потерями на переотражения можно пренебречь.

Для экранирования катушек индуктивности, трансформаторов и кабелей, а также для заделки соединений в экранах используют алюминиевые и медные ленты. Наибольший экранирующий эффект создают гофрированные медные ленты, далее следуют гофрированные алюминиевые, затем медные и алюминиевые ленты с проводящим склеивающим веществом, гладкие медные и алюминиевые ленты. Обычная алюминиевая фольга толщиной 25 мкм не имеет потерь на поглощение в среде до 10 МГц, но наиболее эффективно экранирует от электрических и магнитных полей частотой более 100 кГц. Тонкий слой фольги легко формировать и сворачивать.

Алюминиевая фольга эффективно используется в качестве экрана в следующих случаях:

- металлизация, в том числе локальная, пластмассовых корпусов;
- оперативное создание экрана около отдельного компонента;
- улучшение уже существующего проводящего покрытия;
- создание экрана сложной формы, которую невозможно получить из листа металла;
- создание дополнительного экрана вокруг проводников.

На низких частотах стальной экран, магнитная проницаемость которого достаточно высока, эффективнее медного. Однако для повышения эффективности приходится увеличивать его толщину. Кроме того, с ростом частоты магнитная проницаемость

всех материалов резко уменьшается, причем тем значительнее, чем больше ее начальное значение. Поэтому материалы с большим значением начальной магнитной проницаемости целесообразно использовать только при частотах около 1 кГц. При больших значениях напряженности магнитного поля из-за насыщения ферромагнетика его магнитная проницаемость падает. Во избежание эффекта насыщения экран делают многослойным, при этом желательно, чтобы каждый последующий слой имел большее начальное значение магнитной проницаемости, чем предыдущий, так как эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в толщу материала обратно пропорциональна произведению магнитной проницаемости его слоев [13].

9.5 Элементы конструкции экранов

В зависимости от назначения экраны представляют собой самостоятельную конструкцию или часть конструкции экранируемой РЭА. Назначение экрана определяет и требования, предъявляемые к нему, поскольку выбор типа и конструкции экрана неразрывно связан с исследованием помех, создаваемых электронным устройством. Очень эффективны сплошные замкнутые экраны в виде кожуха. Однако часто применяют экраны с перфорацией, обладающие небольшой массой и обеспечивающие хороший теплообмен, удобные в сборке и эксплуатации. Кроме того, если в качестве экрана используется стенка устройства и на нее необходимо установить органы управления и кабельные подключения, то в этой стенке выполняются соответствующие отверстия. Экранирующие свойства таких экранов обусловлены в основном эффектом отражения электромагнитного поля [24].

На эффективность экранирования влияет наличие дефектов и отверстий в стенке экрана. В большинстве случаев прохождение полей через экраны обусловлено отверстиями и зазорами, которые уменьшают эффективность экранирования (рисунок 9.6). Поэтому конструкция экрана должна сводить эти нежелательные влияния к минимуму [26].

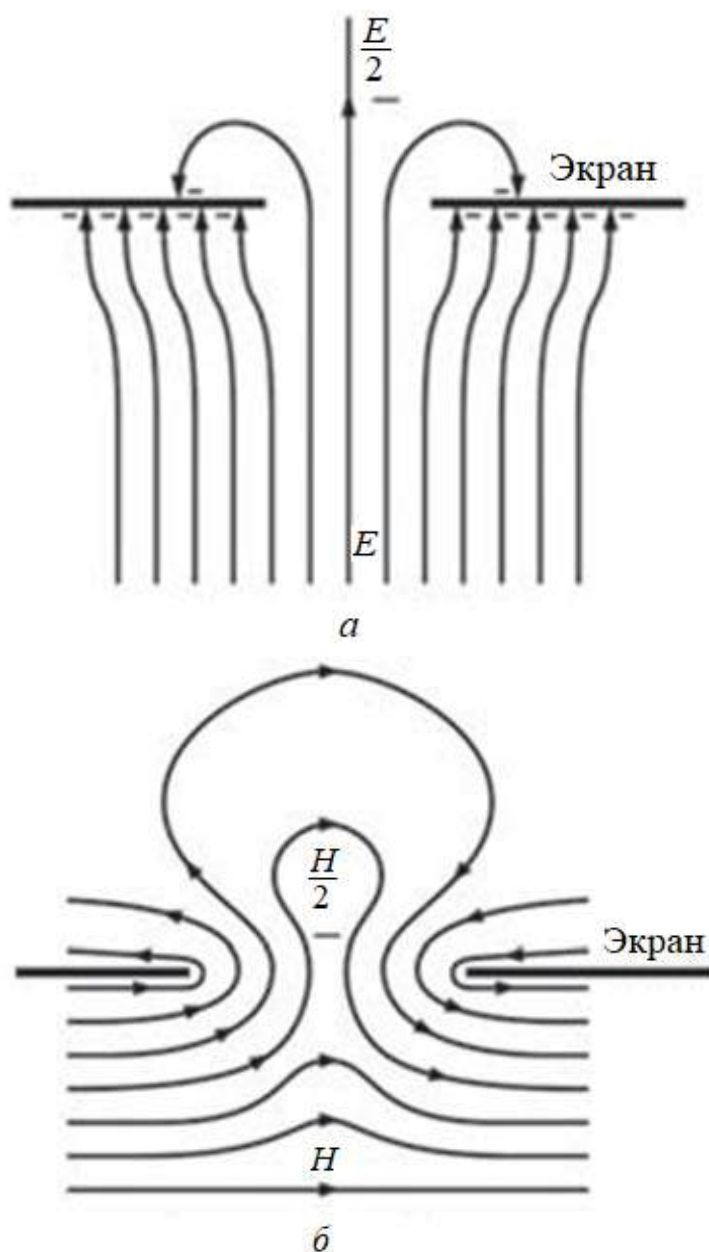


Рисунок 9.6 – Проникновение поля через отверстие:
а – электростатического; *б* – магнитостатического

Влияние утечек через апертуры зависит в основном от следующих трех факторов:

- 1) максимального линейного размера сечения, а не площади апертуры;
- 2) волнового сопротивления электромагнитного поля;
- 3) частоты поля.

Тот факт, что максимальный линейный размер апертуры, а не площадь определяет интенсивность утечки, можно рассмотреть, используя следующее качественное пояснение. Падающая элек-

электромагнитная волна индуцирует ток в экране, и этот ток затем генерирует поле, которое компенсирует воздействующее поле в каждой локальной области. Для максимальной компенсации индуцированный ток в экране должен протекать без препятствий. Если апертура вынуждает индуцированный ток отклоняться от естественного пути, то сгенерированное поле не будет полностью компенсировать воздействующее поле и эффективность экранирования уменьшится. Чем длиннее путь совершают наведенные токи в экране для обтекания неоднородностей, тем сильнее снизится эффективность экранирования.

Если размеры щели в экране $W \times P$, м ($W \geq P$) (рисунок 9.7, а), а толщина экрана T , м, то эффективность экранирования в децибелах волны длиной $\lambda > 2(W + P)$, м, можно рассчитать по формуле

$$SE = -20 \lg \left[(WP)^{1/2} / 0,24\lambda \right] - \\ - 20 \lg \left\{ \exp \left\{ -(\pi T/W) \left[1 - (2\omega\lambda)^2 \right]^{1/2} \right\} \right\} \approx \\ \approx -20 \lg \left[(WP)^{1/2} / 0,24\lambda \right] + 27,3(T/W).$$

Если в экране выполнено круглое отверстие (рисунок 9.7, б) диаметром D , м, то эффективность экранирования волны в децибелах длиной $\lambda > \pi D$, м, можно рассчитать по формуле

$$SE = -20 \lg (D/0,3\lambda) - \\ - 20 \lg \left\{ \exp \left\{ -(\pi T/1,707D) \left[1 - (1,707D/\lambda)^2 \right]^{1/2} \right\} \right\} \approx \\ \approx -20 \lg (D/0,3\lambda) + 32(T/D).$$

Первое слагаемое в этих формулах описывает влияние отверстий, а второе – эффект запердельного волновода. В общем случае диаметр отверстия или ширина щели не должны превышать $0,05\lambda$ [12].

Высокочастотные установки можно экранировать, используя принцип запердельного волновода (рисунок 9.8). Прямоугольная или круглая трубка, длина которой в два-три раза превышает ее ширину или диаметр, ослабляет воздействие электромагнитного

поля. Поэтому для обеспечения надежного соединения переключателей или кнопок с панелью устройства достаточно приварить или припаять к панели длинную трубку и поместить в нее ручку переключателя или нажимной механизм кнопки из непроводящего материала. Вентиляционные отверстия необходимо выполнять в виде волновода ($l_w \geq 3D$) – отверстий, вытянутых внутрь устройства [24].

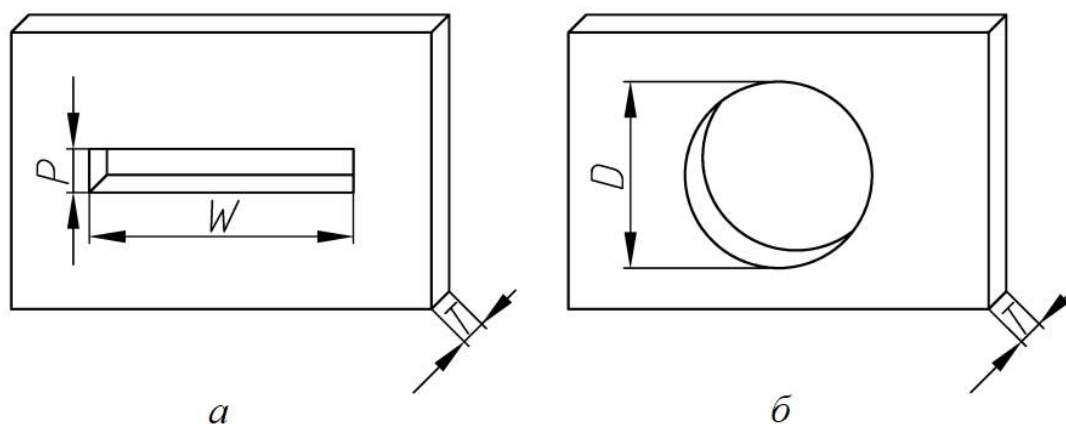


Рисунок 9.7 – Экран с отверстием:
а – прямоугольным; б – круглым

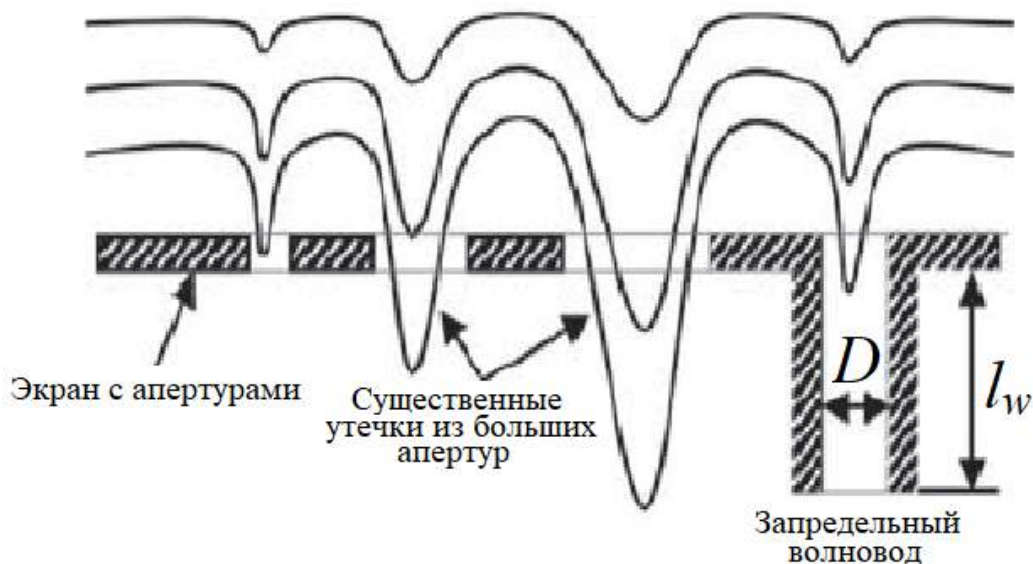


Рисунок 9.8 – Проникновение поля
через различные по размерам отверстия

Эффективность экранирования (в децибелах) круглого волновода определяется по формуле

$$SE = 32l_w/D,$$

для прямоугольного –

$$SE = 27,2l_w/W.$$

Эффективность экранирования перфорированными экранами (рисунки 9.9, 9.10) выражается формулой [26]

$$SE = A_a + R_a + B_a + K_1 + K_2 + K_3,$$

где A_a – потери на поглощение одиночного отверстия, дБ; R_a – потери на отражение одиночного отверстия, дБ; B_a – поправочный коэффициент отражения одиночного отверстия, дБ; K_1 – поправочный коэффициент числа отверстий, дБ; K_2 – поправочный коэффициент близости отверстий на низких частотах, дБ; K_3 – поправочный коэффициент близости отверстий на высоких частотах, дБ.

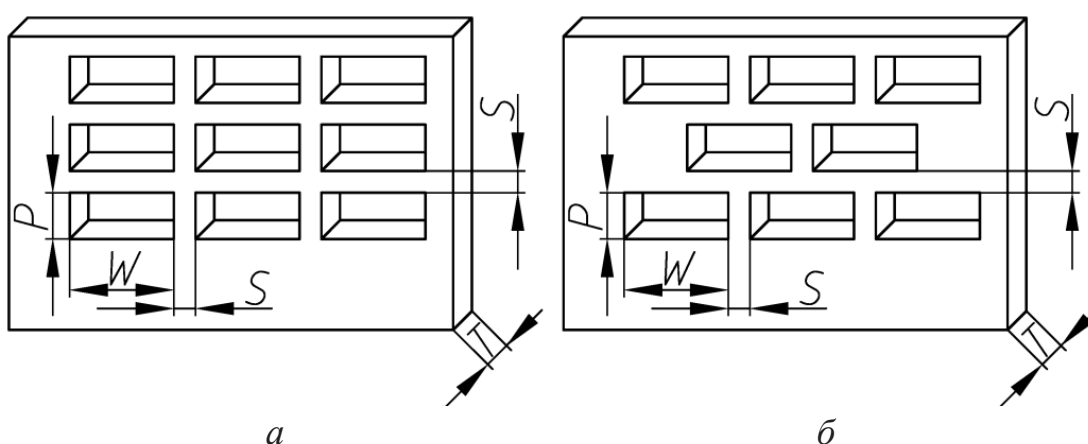


Рисунок 9.9 – Экраны с прямоугольными отверстиями, расположенными: *a* – ровными рядами; *б* – в шахматном порядке

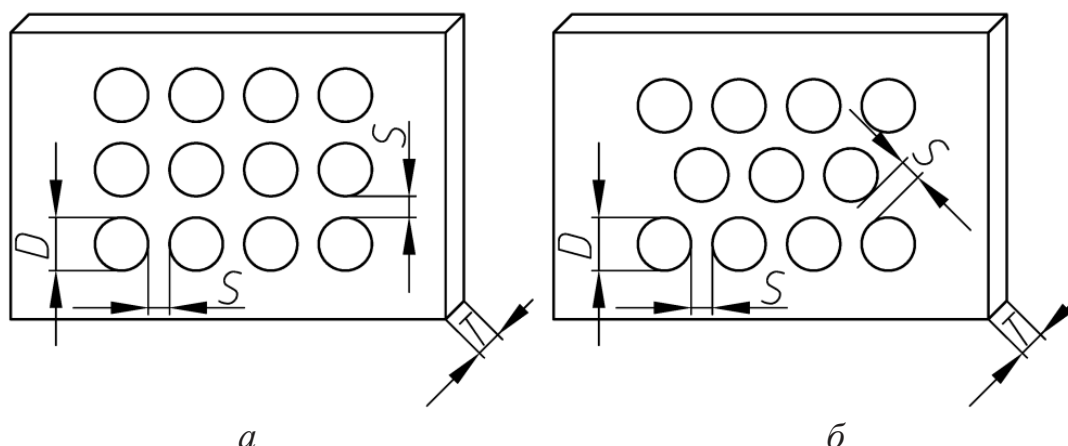


Рисунок 9.10 – Экраны с круглыми отверстиями, расположенными: *a* – ровными рядами; *б* – в шахматном порядке

В свою очередь потери в экране с различными отверстиями рассчитываются следующим образом [26]:

– для прямоугольных отверстий

$$A_a = 27,3 \frac{T}{W}, \quad R_a = 100 - 20 \lg(Wf) + 20 \lg \left(1 + \ln \left(\frac{W}{P} \right) \right);$$

– для круглых отверстий

$$A_a = 32 \frac{T}{D}, \quad R_a = 102 - 20 \lg(Df);$$

– для отверстий в виде волновода прямоугольного сечения

$$A_a = 27,2 \frac{l_w}{W_w},$$

где W_w – наибольший линейный размер поперечного сечения волновода;

– для отверстий в виде волновода круглого сечения

$$A_a = 32 \frac{l_w}{D}.$$

При расчете потерь на отражение одиночного отверстия учитывается теневой эффект. Он возникает при отражении электромагнитной волны, прошедшей в экранируемую область, от внутренних поверхностей экрана.

Поправочный коэффициент отражения одиночного отверстия определяется по формуле

$$B_a = 20 \lg \left(1 - 10^{-A_a/10} \right).$$

Поправочный коэффициент нескольких отверстий

$$K_1 = 10 \lg(an),$$

где a – площадь одного отверстия; n – число отверстий на 1 см^2 .

Произведение an соответствует доле в относительных единицах площади отверстий на единицу площади экрана. Коэффициент K_1 имеет отрицательный знак, и $an < 1$. Это отражает снижение эффективности экранирования при увеличении суммарной площади отверстий. Коэффициент определяется, если расстояние от источника электромагнитной волны существенно больше диа-

метра отверстия или его максимального размера. В противном случае $K_1 = 0$.

Поправочный коэффициент близости отверстий на низких частотах

$$K_2 = -20 \lg(1 + 35 p^{-2/3}),$$

где $p = \frac{S}{\delta}$ – коэффициент, учитывающий относительный размер скин-слоя в промежутке проводящего материала между отверстиями S .

Поправочный коэффициент близости отверстий на высоких частотах

$$K_3 = 20 \lg \left(\operatorname{cth} \frac{A_a}{8,686} \right) = 20 \lg \left(\frac{e^{0,23 A_a} + 1}{e^{0,23 A_a} - 1} \right).$$

В случае проволочных сеток следует пользоваться выражениями для экрана с прямоугольными отверстиями, приняв за толщину экрана T диаметр проволоки и $K_1 = 0$, а в случае экрана с шестигранными отверстиями – выражения для экрана с круглыми отверстиями, приняв диаметр D и промежуток S соответственно за расстояние между гранями и толщину стенок.

Для повышения эффективности экранирования перфорированных экранов рекомендуется:

- располагать отверстия в зонах со слабыми электромагнитными полями;
- не располагать отверстия около чувствительных элементов схемы;
- уменьшать диаметр отверстий, увеличивая их количество с учетом площади перфорации и исходя из конструктивных соображений;
- обеспечивать расстояние между отверстиями не меньше размера наибольшего отверстия;
- выполнять отверстия в виде прямоугольных щелей, располагая их длинные стороны вдоль линии токов, наведенных в стенках экрана (перпендикулярно силовым линиям магнитного поля);

– в диапазоне сверхвысоких частот выполнять отверстия в виде запердельных волноводов.

Если в экранах необходимо выполнить швы, то они должны быть максимально плотными. Наилучшими являются сплошные сварные швы. Им уступают по качеству точечно сваренные швы с перекрытием не менее 10 мм. Желательно, чтобы расстояние между точечными контактами не превышало 13 мм.

Крышки и экранирующие панели могут быть съемными. Плоские крышки обычно слегка отходят от корпуса, образуя щели. Наличие специальных козырьков на крышках, выполненных из гнутых листовых материалов (рисунок 9.11, *а*) и из прокатов с выступами (рисунок 9.11, *б*), делает их более жесткими и уменьшает щели.

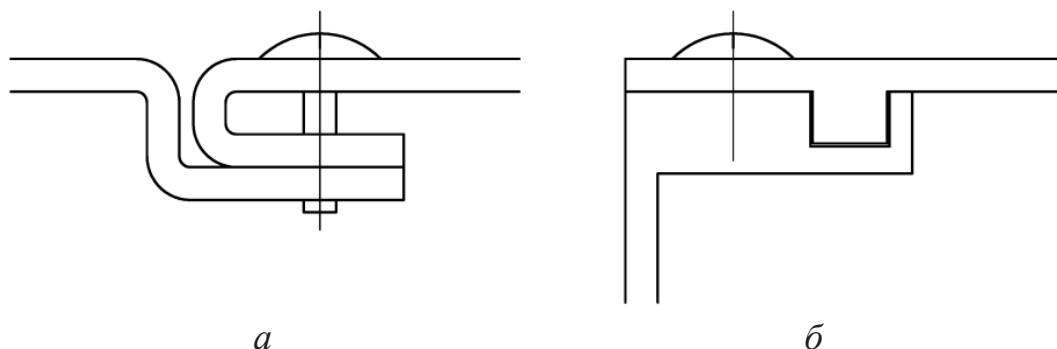


Рисунок 9.11 – Конструктивные лабиринты для электромагнитных волн: *а* – из гнутых листовых материалов; *б* – из прокатов с выступами

Схемы, являющиеся источником помех, и чувствительные схемы следует располагать вдали от краев крышки. Для уплотнения соединения крышки с корпусом следует использовать заземляющие перемычки, металлические ленточные контакты или проводящие прокладки (рисунок 9.12).

Прокладки используются для уплотнения сопрягаемых поверхностей, например корпуса и крышки (рисунок 9.13). Их

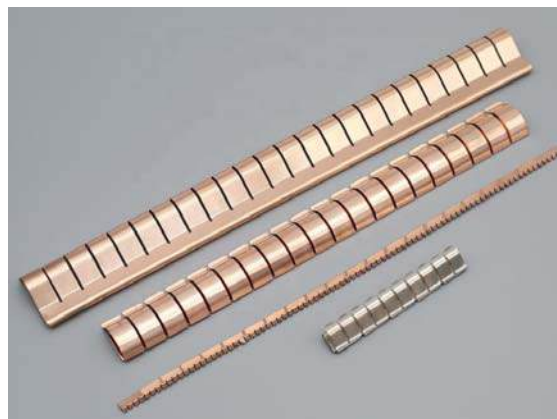


Рисунок 9.12 – Металлические прокладки

следует располагать вокруг стягивающих болтов между перекрывающимися участками экрана для предотвращения рассеяния через отверстия под болты (рисунок 9.13, *а, б*). Конструкция соединения должна оказывать на прокладку равномерное давление и исключать скольжение сопрягаемых деталей. Если совместно с проводящей прокладкой используется обычное уплотнение, то оно должно защищать прокладку от внешних воздействий. Проводящие прокладки можно фиксировать с помощью специальных элементов конструкции (рисунок 9.13, *в–д*), приклеивать, используя проводящие склеивающие вещества. Материал проводящих прокладок должен быть эластичным, обладать коррозионной стойкостью и низким удельным сопротивлением. Основными видами прокладок являются обычные и витые полоски, а также выпуклые и скользящие контакты (рисунок 9.13, *е*) [13].

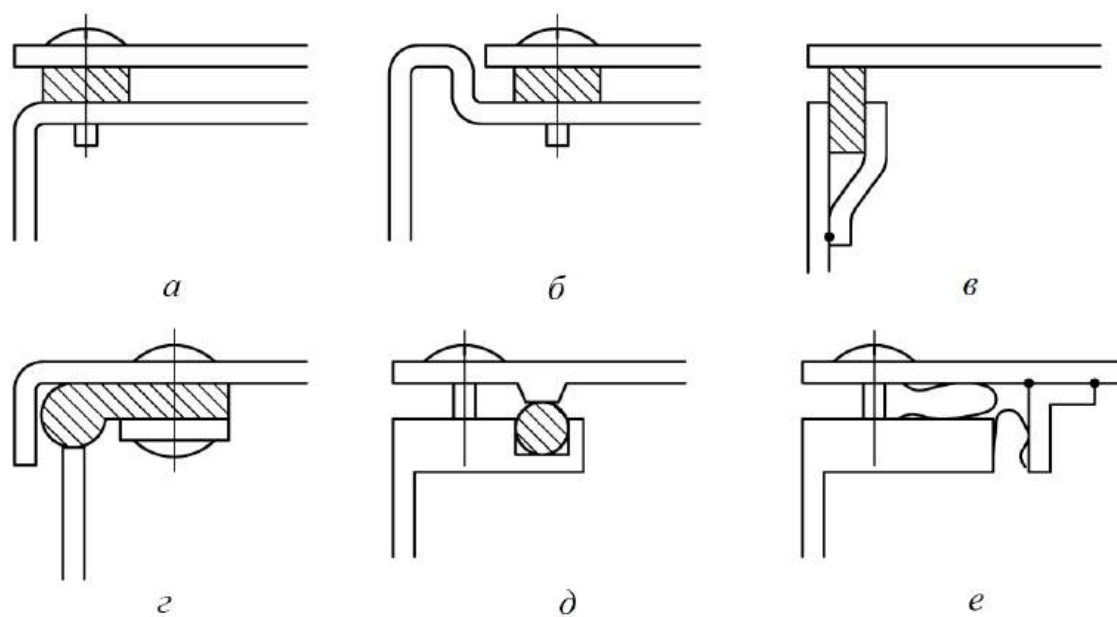


Рисунок 9.13 – Уплотнение разборных соединений с помощью прокладок: *а, б* – вокруг крепежных деталей; *в, г, д* – в элементах конструкции; *е* – скользящие контакты

Толщина прокладки зависит от того, как часто будет разбираться соединение и каков максимальный зазор между сопрягаемыми деталями. В неразборных соединениях толщина прокладки должна превышать зазор в два раза, а в соединениях дверей и съемных панелей – в три раза.

Широко используются спиральные проводящие прокладки, укладываемые для предотвращения их деформации или смещения в специальные канавки корпуса (рисунок 9.14). Спирали изготавливаются из витков покрытой оловом бериллиевой меди или нержавеющей стали. Первая обеспечивает хорошее экранирование и коррозионно совместима с алюминиевым сплавом. Вторая используется, если необходима коррозионная стойкость или снижены требования к гибкости, экранирующим свойствам и предпочтителен более дешевый вариант.

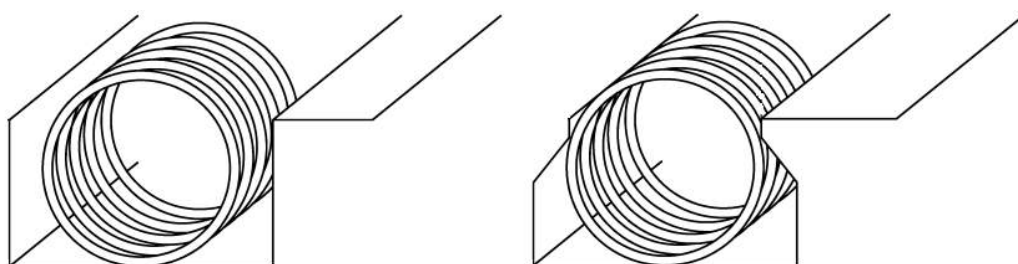


Рисунок 9.14 – Установка спиральных прокладок в канавки корпуса

Для установки спирали не в канавке, а в произвольном месте корпуса к ней прикрепляется полоска твердого или вспененного эластомера с липким слоем. Основными особенностями спиральных прокладок являются высокая эффективность защиты на частотах до 100 ГГц, постоянство формы и множество контактов металл – металл, простота установки, малая прижимная сила, малое остаточное сжатие, высокие электропроводность и теплопроводность, широкий температурный диапазон.

Повышенные требования предъявляются к сопротивлению проводящих прокладок при постоянном токе. Чем меньше сопротивление, тем большую эффективность экранирования обеспечит установка прокладки в канавку при сопряжении поверхностей корпуса.

Существуют экранирующие изделия из электрически проводящих эластомеров. Они состоят из силиконовой или флюоросиликоновой основы и серебряного наполнителя (рисунок 9.15). Наполнителем могут также служить покрытые серебром медные или алюминиевые частицы, никель, никель с графитом. Эластомерные прокладки обеспечивают затухание электромагнитного

поля до 50–120 дБ в зависимости от материала и длины волны, а также защищают от пыли и влаги.

Также используются сеточные прокладки – деформируемые электромагнитные экраны из вязаного провода в виде мелкой сетки (рисунок 9.16). Они бывают прямоугольного и круглого поперечного сечения, сплошные и с полями, имеют отличную эластичность, обеспечивают хороший контакт и экранирование.



Рисунок 9.15 – Силиконовые проводящие прокладки



Рисунок 9.16 – Сеточные прокладки

Эффективность экранирования определяется размерами экранированной области, размерами ячеек сетки и технологией ее изготовления. Она увеличивается при уменьшении размера ячеек и увеличении слоев сетки, которые должны быть изолированы друг от друга и соединены только в одной точке заземления. Материа-

лом сеточных прокладок, как правило, являются монель (медно-никелевый сплав), стальной провод с медным слоем, покрытым оловом, нержавеющая сталь, алюминий или бериллиевая медь.

Кроме металлических, существуют деформируемые экранирующие прокладки, состоящие из улучшающего эластичность и контакт круглого или прямоугольного стержня из вспененного неопрена или силикона, на который надета обеспечивающая электропроводность одно- или двухслойная оплетка из вязаного провода. Помимо экранирования, такие прокладки обеспечивают пыле- и влагозащиту.

Конечную эффективность экранирования будут определять завершенная конструкция экрана, его форма и применяемые материалы, наличие отверстий, вводов кабелей и других неоднородностей. Предельное значение эффективности, которое может быть достигнуто на практике, составляет 140–160 дБ, что может значительно отличаться от теоретически рассчитанного только при учете свойств материалов [26].

9.6 Проводной монтаж

Проводной монтаж обеспечивает разводку цепей питания, заземления и передачу сигналов между различными компонентами, конструктивными узлами, системами. Напряжения сигналов могут колебаться от нескольких вольт до нескольких киловольт, токи – от микроампер до сотен ампер, частоты – от нуля до десятков гигагерц, причем предполагается, что электромонтаж не вносит искажения в распространяющиеся в системе сигналы. Для этого монтаж должен быть соответствующим образом рассчитан и собран [13].

Из-за своей длины провода и кабели более эффективно взаимодействуют с внешней электромагнитной обстановкой, чем корпус аппаратуры, ПП и другие элементы конструкции. Уменьшение влияния магнитного поля достигается свиванием прямого и обратного проводов нагрузки (рисунок 9.17). При высокоомных нагрузках доминирует влияние электрического поля, поэтому свивание проводов на него не действует, а компенсирует помехи в

соседних витках витой пары от магнитного поля. Там, где сопротивление нагрузки меньше, магнитная связь больше, а свивание проводов уменьшает помеху. При преобладании связи по магнитному полю уменьшение шага витков витой пары и точный подбор четного числа витков могут дать существенное уменьшение помехи (до 40 дБ).

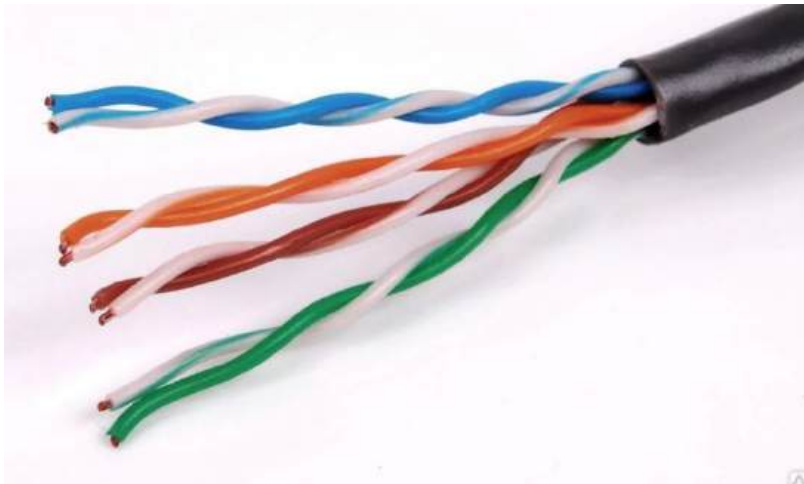


Рисунок 9.17 – Витые пары

Прежде всего сигналы, распространяющиеся по проводам, классифицируются по их напряжениям, токам и частотам. Соответственно проводной монтаж обычно разделяют на шесть видов:

- 1) электропитание переменного тока, корпусная земля, низкочастотные звуковые сигналы;
- 2) электропитание постоянного тока, постоянного опорного напряжения;
- 3) цифровые сигналы;
- 4) высокочастотные сигналы, создающие помехи;
- 5) схемы, чувствительные к наводкам высокочастотных сигналов;
- 6) антенные сигналы.

Для того чтобы минимизировать перекрестные помехи внутри кабеля, сигналы, которые передаются по нему, должны быть приблизительно равны как по току, так и по напряжению. Кабели, несущие высокочастотные токи помех, должны быть удалены от других кабелей, даже внутри экранированных корпусов, поскольку возмущения могут быть причиной возникновения помехоэмис-

сии общего вида. Все возвратные токи должны быть непосредственно связаны со своими сигнальными линиями или шинами питания, желательно путем свивки, что позволяет снизить связь между цепями за счет магнитного поля. Возвратные токи не должны быть общими для цепей питания и сигнальных линий.

С целью обеспечения ЭМС при проектировании РЭА следует избегать параллельного расположения сигнальных и силовых кабелей, использовать сигнальные кабели и соединители с правильным экранированием, согласовывать линии, несущие высокочастотные сигналы, а также нагрузку.

Во многих случаях необходимо использовать экранированные кабели и провода. Обычно исключением являются силовые кабели, подводящие питание к фильтру источника питания, которые могут, благодаря собственным параметрам, обеспечить помехоустойчивость к переходным процессам и радиочастотам.

Для передачи высокочастотных сигналов широко используются коаксиальные кабели (рисунок 9.18). Одним из важных параметров ЭМС кабеля является коэффициент экранирования, характеризующий степень влияния внешнего электромагнитного поля на сигнал, распространяющийся в кабеле, или, наоборот, излучение части энергии этого сигнала. Коэффициент экранирования существенно зависит от внешней металлической оплетки кабеля. Чем выше плотность оплетки, тем лучше экранирование, а добавление к оплетке экрана из фольги еще больше улучшает экранирование (особенно на высоких частотах).



Рисунок 9.18 – Коаксиальный кабель

Важное значение имеет подключение экрана коаксиального кабеля. Лучше всего, если оно осуществляется с минимальным нарушением целостности экрана, т. е. через коаксиальный соединитель. Часто это затруднительно, поэтому экран подсоединяют к земле источника или нагрузки проводами. Удлинение неэкранированной части кабеля увеличивает помеху на высоких частотах, а при высокоомных нагрузках – на низких [13].

Для прокладки кабелей необходимо использовать металлические кабелепроводы (рисунок 9.19). Чем больше взаимная индуктивность оплетки (экрана) кабеля и кабелепровода, тем ближе по значению токи в них. Поскольку направления этих токов противоположны, то происходит компенсация их магнитных полей.



Рисунок 9.19 – Провода в кабелепроводе

Силовые кабели, идущие к схемам с высоким уровнем помех, должны быть экранированы, экраны следует подсоединять к корпусу у концов кабелей. Экраны должны контактировать с корпусом или соединителем по всему периметру, чтобы контактное сопротивление не превышало 0,5 мОм. Для защиты от помех наиболее чувствительных сигналов могут потребоваться отдельные экраны, которые следует изолировать во избежание случайного заземления. Провода, по которым проходят чувствительные сигналы, и их экраны должны подсоединяться к соседним выводам соединителя. Если ток экрана искажает рабочий сигнал, экран следует заземлять в одной точке – у источника для уменьшения излучаемых помех или у нагрузки для снижения уровня воспринимаемых помех.

Оптимальное экранирование требует различных способов соединения при возмущениях, воздействующих на низких частотах

(до нескольких сотен килогерц) и радиочастотах. Эти два способа могут быть взаимоисключающими – хорошим примером является часто встречающееся требование заземления экрана только с одного конца, которое может быть корректно для низких частот, но некорректно для высоких [21]. Такое заземление (рисунок 9.20, *а*) обеспечивает хорошее экранирование при емкостной связи, но не защищает от воздействия магнитных помех, которые наводят напряжения помех в контуре, сформированном при заземленных источнике сигнала и нагрузке. Для экранирования магнитного поля должны быть заземлены оба конца экрана (рисунок 9.20, *б*). Это позволяет току I_s протекать в экране и компенсировать ток, наведенный в центральном проводнике [13].

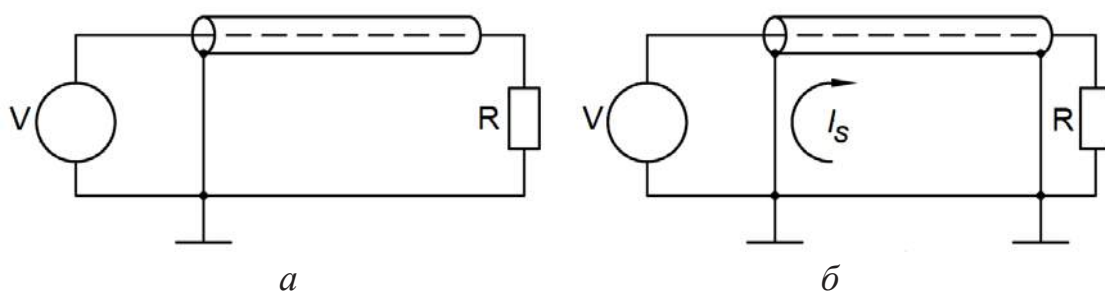


Рисунок 9.20 – Заземление экрана кабеля:
а – с одного конца; *б* – с двух концов

Характеристики экранов зависят от их конструкции. Для наиболее ответственных кабельных соединений применяются специальные экраны с многослойным переплетением, которые обеспечивают наиболее высокое качество экранирования. Можно использовать неэкранированный кабель, расположенный в экранированном кабелепроводе.

Существует несколько типов экранов кабелей [24]:

- экран, выполненный из проводов, обвитых внахлест. Отличается большой гибкостью, но имеет малую эффективность экранирования;

- экран в виде однослойной оплетки. Содержит переплетенные провода и представляет собой металлическую плетенку, покрывающую кабель, обеспечивает перекрытие 80–95 % и рекомендован для применения на высоких частотах (рисунок 9.21);

– металлизированная лента или фольга с дренажным проводом. Обеспечивает полное покрытие, но обладает высоким сопротивлением и поэтому умеренной эффективностью экранирования (рисунок 9.22). Заделка этого провода затруднена. Возвратный ток будет стремиться протекать в основном по дренажному проводу, делая экран непригодным для защиты от магнитных полей, однако высоко его экранирующее свойство для электрического поля;

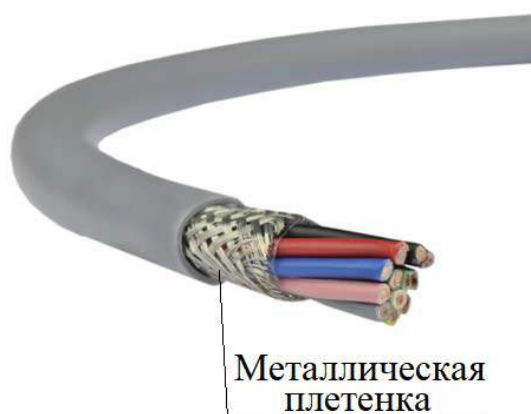


Рисунок 9.21 – Экран провода в виде плетенки



Рисунок 9.22 – Экран провода в виде металлизированной ленты с дренажным проводом

– комбинированный экран. Содержит металлическую ленту и одиночную оплетку, что обеспечивает оптимальные свойства на высоких частотах (рисунок 9.23). Такая многослойная экранирующая оплетка обладает лучшими характеристиками, чем одиночная, поскольку позволяет отдалить друг от друга внутренние и внешние токи и применить экран для различных цепей.

Важнейшим требованием при заделке экрана кабеля является обеспечение минимального полного сопротивления при непосредственном соединении экрана с металлическим шасси или

корпусом. Это гарантирует, что помеховые токи в экране будут протекать к земле без прохождения через другие цепи или без связи с ними.

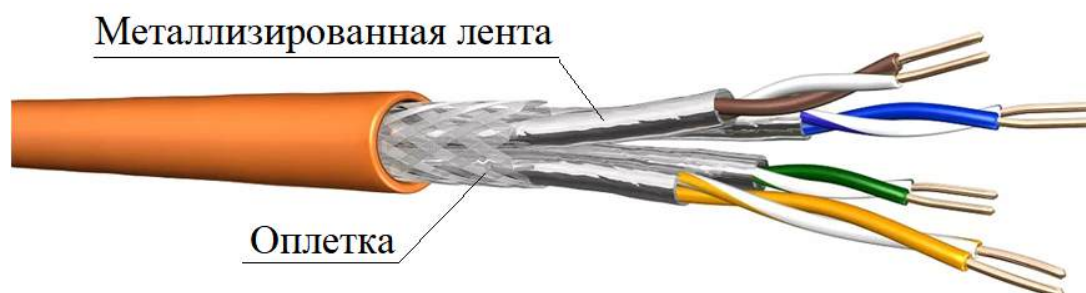


Рисунок 9.23 – Экран провода в виде металлизированной ленты и оплетки

Наилучшим считается охват соединителя экраном на 360° . При соединении «косичкой» экран отделяется от оплетки и используется в виде проводника, который через контакт заземления подсоединяется к системе заземления, что не обеспечивает должного качества соединения на высоких частотах из-за индуктивности «косички». Такое соединение должно быть выполнено как можно более коротким; также «косичка» должна быть симметрично продублирована, чтобы ее индуктивность делилась пополам.

Таким образом, для обеспечения хорошего экранирования необходимо:

- определить тип и размеры экрана, исходя из диапазона частот;
- располагать особо чувствительные цепи в качественных экранах;
- избегать больших отверстий в экране;
- выполнять сплошное соединение швов;
- располагать кабели дальше от отверстий в экранах и ближе к заземленным элементам конструкции;
- подсоединять экран кабеля, избегая длинных неэкранированных участков.

Контрольные вопросы

1. Что называется экраном?
2. Назовите причину возникновения магнитного поля.
3. Какие металлы применяются для экранов от магнитных полей на низких и высоких частотах?
4. Что является причиной возникновения электрического поля?
5. Какие материалы могут служить экранами от электрических полей?
6. Назовите причину возникновения электромагнитного поля.
7. Как влияет наличие дефектов и отверстий в стенке экрана на эффективность экранирования?
8. Как рекомендуется располагать отверстия в стенках экрана и чувствительные схемы относительно отверстий для повышения эффективности экранирования?
9. Какие конструктивные меры применяются для исключения щелей между корпусом и крышкой прибора?
10. Как следует прокладывать неэкранированные силовые и информационные кабели?
11. Как влияет удлинение неэкранированной части коаксиального кабеля на уровень помех, воспринимаемых прибором?
12. Назовите типы экранов кабелей (проводов).

10 ФИЛЬТРАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

10.1 Помехоподавляющие фильтры

Основным средством ослабления кондуктивных помех, создаваемых цепями питания и коммутации постоянного и переменного токов аппаратуры, является фильтрация. Предназначенные для этого помехоподавляющие устройства (фильтры) позволяют ограничивать кондуктивные помехи по частоте и амплитуде до значений, заданных требованиями по обеспечению ЭМС как от внешних, так и от внутренних источников. Фильтр электромагнитных помех – электронный компонент, который обеспечивает подавление данных помех для электронных устройств. Электромагнитные помехи могут привести к ухудшению рабочих характеристик любого электрического оборудования в пределах допустимого диапазона, вызывая нежелательные токи и напряжения в его сетях.

В зависимости от области применения фильтры могут быть сконструированы на основе RL -, RC - или RLC -элементов в различных комбинациях. Пассивные фильтры используют резонансные характеристики последовательных и параллельных комбинаций конденсаторов и индуктивностей. Результирующее реактивное сопротивление уменьшает помехи путем снижения большого полного сопротивления последовательно с токами помех и/или шунтированием этих токов на землю через малое полное сопротивление. Можно выделить несколько типов фильтров:

фильтры нижних частот – пропускают низкие частоты и ослабляют высокие;

фильтры верхних частот – пропускают высокие частоты и ослабляют низкие;

полосовые фильтры – пропускают частоты определенного диапазона и ослабляют частоты вне этого диапазона;

режекторные фильтры – ослабляют частоты определенного диапазона в пределах полосы не пропускания и пропускают все остальные.

Функциональные задачи фильтров [24]:

- предотвращение внешнего отрицательного воздействия на устройства путем ограничения помех на входе;
- уменьшение ЭМП в силовых цепях путем ограничения помехоэмиссии, создаваемой кабелями и другими устройствами.

Фильтры должны отвечать следующим требованиям:

- обеспечение заданной эффективности фильтрации в требуемом частотном диапазоне;
- ограничение допустимого падения напряжения на фильтре при максимальном токе нагрузки;
- ограничение по требованиям техники безопасности допустимого значения реактивной составляющей тока на основной частоте;
- обеспечение допустимых нелинейных искажений питающего напряжения, определяющих требования к линейности фильтра.

Выбор необходимого типа фильтра зависит от электрической характеристики системы, в которую он должен быть установлен, требований по эффективности подавления помех, требований условий эксплуатации и реальных ограничений по установке фильтра в аппаратуре. Наиболее распространены фильтры нижних частот (рисунок 10.1) [13].

Эффективность фильтрации существенно зависит от сопротивлений источника и нагрузки. В связи с этим структура фильтра определяется исходя из следующих соображений. Первым элементом фильтра при малом сопротивлении источника выбирается катушка индуктивности, а при большом – конденсатор. Аналогично выбирается и последний элемент фильтра, предшествующий нагрузке.

Во многих случаях достаточно подключить конденсатор малой емкости или катушку индуктивности (рисунок 10.1, *а, б*) вблизи помехосоздающих или чувствительных схем. Фильтр С-типа (рисунок 10.1, *а*) обладает малой индуктивностью и работает как проходной конденсатор, шунтирующий помеху на землю. Он эффективен при высоких сопротивлениях источника и нагрузки.

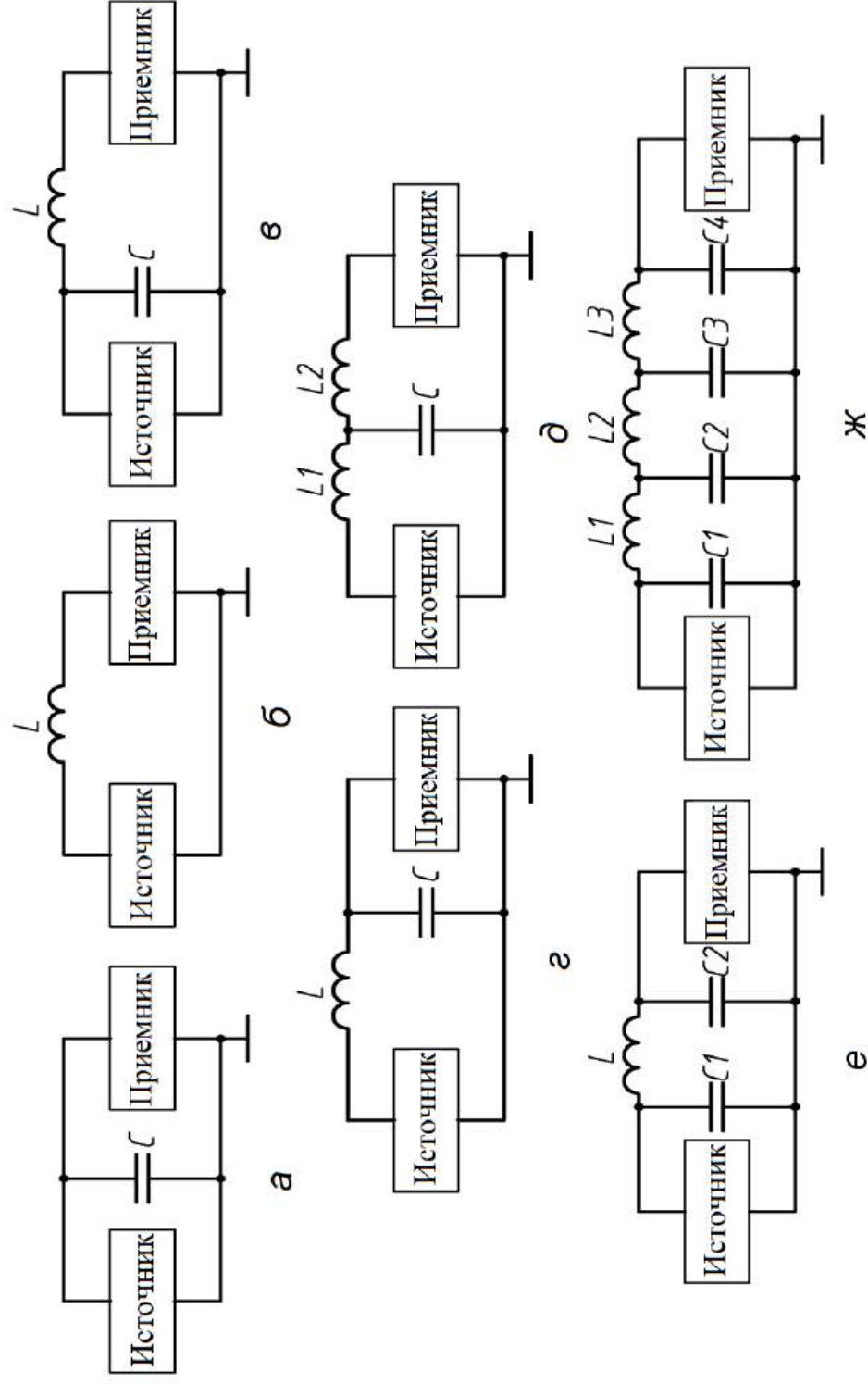


Рисунок 10.1 – Схемы помехоподавляющих фильтров нижних частот:

а – емкостная; *б* – индуктивная; *в* – емкостно-индуктивная;
г – индуктивно-емкостная; *д* – Т-образная; *е* – П-образная; *ж* – многозвенная

Фильтр Г-типа (рисунок 10.1, в, з) следует применять в случаях, когда сопротивления источника и нагрузки существенно различаются, при этом индуктивность должна быть обращена к низкоомной цепи.

Конструкция катушек индуктивности проще, дешевле и надежнее при малых токах, а конструкция конденсаторов – при малых напряжениях. Поэтому при большом токе и малом напряжении следует применять в фильтре катушки с малыми индуктивностями и конденсаторы с большими емкостями, при высоком напряжении и малом токе – конденсаторы с небольшими емкостями и катушки с максимально допустимыми индуктивностями.

Наилучшую защиту от выбросов и других переходных процессов обеспечивает Т-образный фильтр (рисунок 10.1, д). Индуктивности в нем пропускают низкочастотные или даже постоянные сигналы, но блокируют нежелательные высокочастотные сигналы. Конденсаторы обычно направляют высокочастотный шум вследствие низкого сопротивления обратно к заземлению источника питания или заземлению системы.

Фильтр П-типа (рисунок 10.1, е) имеет два проходных конденсатора, шунтирующих помеху на землю, и индуктивность между ними. Такой фильтр обеспечивает высокое сопротивление как для источника, так и для нагрузки и больше всего подходит для применения в цепях с высокими, относительно равными по величине сопротивлениями источника и нагрузки.

Фильтры 2П- и 2Т-типа (рисунок 10.1, ж) применяются в сходных условиях, что и фильтры П- и Т-типа, – в случае если предъявляются более высокие требования к характеристикам фильтра или требуется эффективное подавление помех в нижней части рабочего диапазона частот до 10 кГц. Они представляют собой многосвязные фильтры из индуктивностей и проходных конденсаторов. Большая крутизна характеристики вносимого затухания в таких фильтрах требуется для того, чтобы не допустить вносимого затухания на частотах сетей электропитания, а также в фильтрах, предназначенных для телефонных линий и линий передачи данных.

Структуры С, П и 2П обеспечивают более высокое вносимое затухание при сопротивлении источника и нагрузки более 50 Ом, а структуры Т и 2Т – при сопротивлении менее 50 Ом.

Для использования фильтра в сети переменного тока необходимо учитывать максимально допустимый ток утечки, а в цепи постоянного тока – его соответствие напряжению. При вероятности возникновения перенапряжений, выбросов тока и других нестационарных процессов на кабелях электропитания рекомендуется на входе фильтра ставить индуктивность (см. рисунок 10.1, *з, д*), которая будет ослаблять возможные выбросы напряжений, обеспечивая защиту конденсатора как более чувствительного к нестационарным процессам элемента.

Ослабление помех при фильтрации достигается шунтированием их на землю, отражением обратно к источнику, рассеиванием – превращением их энергии в тепловую. Первые два способа применяются в случаях, если сопротивления фильтра и источника или нагрузки (приемника) почти равны. В большинстве случаев эти сопротивления зависят от частоты, поэтому необходимо стремиться обеспечить практически прямое прохождение рабочих сигналов и практически разомкнутую (или замкнутую накоротко на землю) цепь для помех.

При конструировании дросселей важное значение имеет выбор ферромагнитного материала сердечника, который, для обеспечения большой индуктивности, не должен насыщаться. Учитывая широкий диапазон частот, в котором должны работать дроссели, и возможность их установки в цепях с большим током, рекомендуется применять ферромагнитные материалы со сравнительно высокой магнитной проницаемостью – никель-цинковые ферриты ($\mu = 100\text{--}600$).

Плохое заземление увеличивает общее полное сопротивление, которое уменьшается с ростом частоты, связь на высоких частотах усиливается из-за локального пути заземления через фильтр. Общий монтаж входа/выхода способствует этому посредством паразитной емкости или взаимной индуктивности. Выполнять фильтр необходимо таким образом, чтобы его точка заземления непосредственно соединялась с низкоомной землей РЭА (как

правило, корпусом, шасси), а контакты входа/выхода должны быть разнесены и по возможности экранированы друг от друга [13].

Расположение элементов внутри фильтра также играет существенную роль. Компоненты входа и выхода должны быть разнесены для минимальной емкостной связи, все сигнальные проводники и особенно проводники заземления – по возможности короче и большего сечения (рисунок 10.2). Если применяются индуктивные компоненты, то они должны быть спроектированы и расположены таким образом, чтобы магнитная связь между ними через поля рассеяния была минимальна. Наилучшим решением в этом случае является применение тороидальных сердечников.

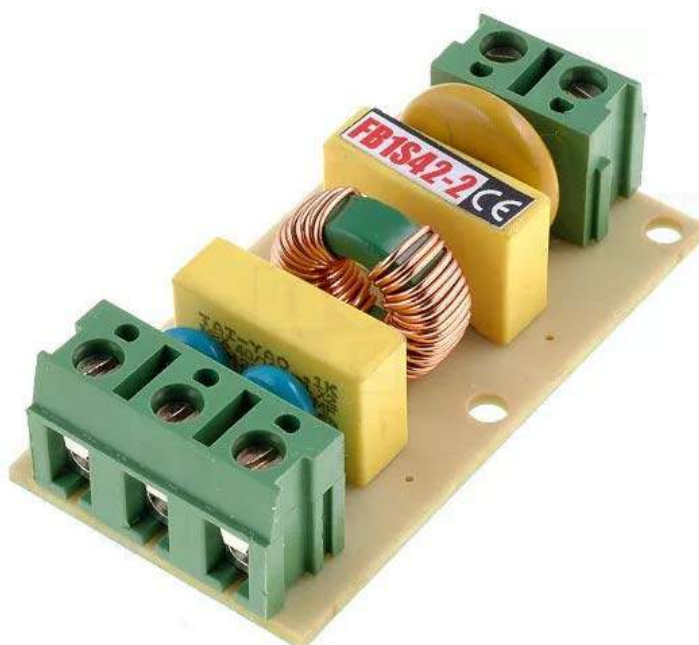


Рисунок 10.2 – Помехоподавляющий фильтр

Фильтр должен размещаться непосредственно на выходе сетевого кабеля питания из изделия или на входе устройства, к которому подведено питание, а источник вторичного питания – как можно ближе к фильтру. Это уменьшает влияние эмиссий, излучаемых внутри изделия, на кондуктивные эмиссии от него, а также помехи в обратном направлении.

10.2 Синфазные дроссели

В теории ЭМС широко используются понятия синфазного и противофазного токов, которые помогают определить причину помех и выработать пути их уменьшения. Например, по паре проводников протекают токи I_1 и I_2 (рисунок 10.3) [13].

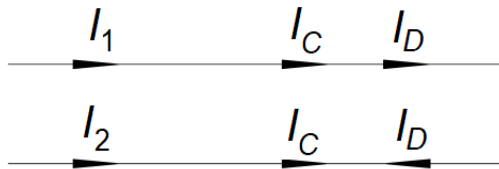


Рисунок 10.3 – Разложение тока на синфазный и противофазный

Эти токи можно разложить на синфазные I_C и противофазные I_D :

$$I_1 = I_C + I_D;$$

$$I_2 = I_C - I_D.$$

Получим выражения синфазного и противофазного токов:

$$I_D = (I_1 - I_2)/2;$$

$$I_C = (I_1 + I_2)/2.$$

Результирующая напряженность электрического поля в одной точке наблюдения складывается из полей, создаваемых каждым из этих токов. Так как противофазные токи противонаправлены, то создаваемые ими электрические поля также противонаправлены и будут взаимно вычитаться и компенсироваться. Поскольку проводники не совпадают и расстояние от каждого из них до точки наблюдения разное, то поля от них не будут компенсироваться полностью. С другой стороны, поскольку синфазные токи в проводниках сонаправлены, то создаваемые ими поля будут складываться, давая в результирующее поле больший вклад, чем противофазные токи. Таким образом, даже малый синфазный ток может создать такой же уровень излучаемого электрического поля, как и большой противофазный. Поэтому основной причиной излучения

электрических полей является протекание в их проводниках синфазных токов.

Одним из самых эффективных способов уменьшения синфазных токов является использование синфазных дросселей. Если два провода намотаны на ферритовое кольцо, образуя две идентичные обмотки, и весь магнитный поток сосредоточен в сердечнике, т. е. поток одной обмотки полностью пронизывает другой, то, следуя теории разложения тока на синфазный и противофазный, дроссель может эффективно блокировать синфазные токи (рисунок 10.4). Для этого провода должны наматываться по отдельности на сердечник так, чтобы потоки в сердечнике от двух синфазных токов складывались, а от противофазных – вычитались. На практике часто наматывают два провода совместно [13].



Рисунок 10.4 – Синфазный дроссель

10.3 Ферриты с потерями

Ферриты представляют собой сплав оксида железа с оксидом другого ферромагнитного металла: меди, цинка, кобальта, никеля и т. д. Ферритовые поглощающие материалы широко распространены, так как дают простое, удобное решение проблемы радиочастотных помех в кабелях и соединителях. Они обеспечивают подавление нежелательных высокочастотных колебаний, не ослабляя сигналов постоянного тока или низкой частоты. Контроля помех излучения от проводников можно достичь правиль-

ным размещением ферритового сердечника, вносящего потери. Для удовлетворения большой потребности промышленности в области ЭМС разработаны разрезанные пополам ферриты, фиксируемые вокруг проводки.

Ферритовый фильтр – пассивный электрический компонент, изготовленный из феррита, использующийся в качестве фильтра для подавления высокочастотных помех (рисунок 10.5). Ферритовое кольцо увеличивает индуктивность проходящего через него участка провода в несколько сотен раз, что обеспечивает требуемый эффект. Чаще всего ферритовые фильтры имеют форму цилиндров или параллелепипедов. Они используются как дополнительные внешние фильтры для устройств, имеющих длинные соединительные кабели.



Рисунок 10.5 – Ферритовые кольца

Текущий по проводнику ток создает вокруг него магнитное поле. Передача энергии между током и магнитным полем зависит от индуктивности проводника. Расположение магнитных материалов, таких как феррит, вокруг проводника увеличивает плотность магнитного потока, что приводит к увеличению магнитного поля, и поэтому индуктивность проводника увеличивается. Магнитная проницаемость феррита обусловлена содержанием различных оксидных компонентов, входящих в его состав. Ферриты эффективны в подавлении электромагнитных помех из-за изменения их потерь в зависимости от частоты. Через феррит, установленный как подавитель, более низкие частоты пройдут без суще-

ственных потерь. На высоких частотах взаимодействие сигнала и феррита усиливается и сопротивление участка с ферритом становится значительно больше по сравнению с остальной частью цепи. Именно это сопротивление позволяет ферриту подавлять многочисленные сигналы [13].

Для усиления вносимых потерь в цепи с высоким сопротивлением можно увеличить объем феррита, что повышает сопротивление почти пропорционально объему, или увеличить число витков либо проходов через феррит, что повышает сопротивление пропорционально квадрату этого числа, но уменьшает частоту максимального затухания.

Ферриты размещают на кабеле вблизи его выхода из корпуса изделия (рисунок 10.6, *а, б*), которое может быть источником высокочастотных кондуктивных помех. Если кабель соединяет изделия, каждое из которых может быть источником помех, то ферриты могут потребоваться на каждом конце кабеля (рисунок 10.6, *в*) [26].

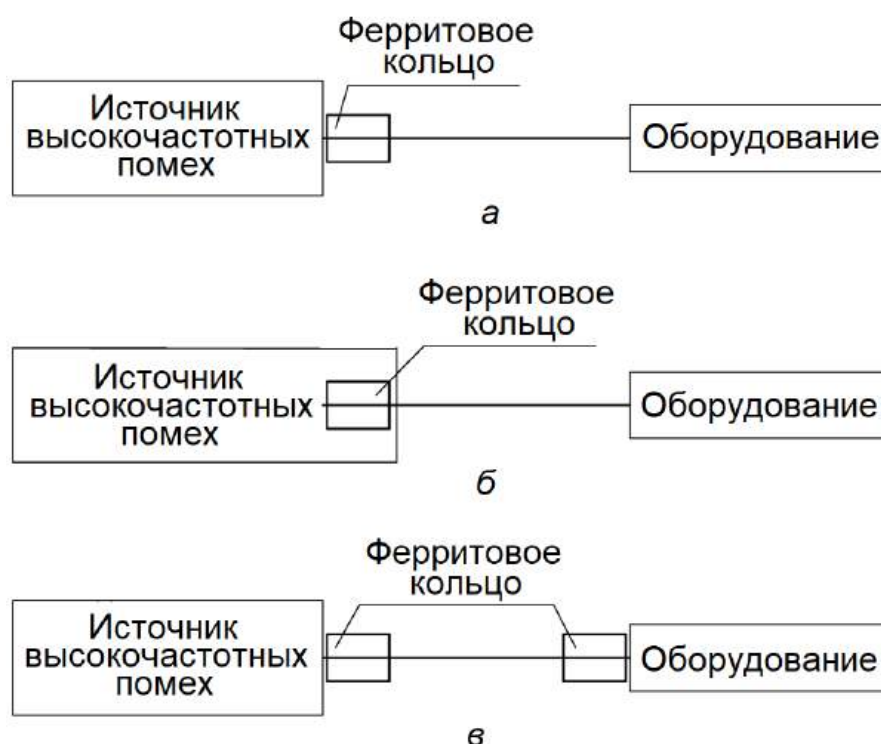


Рисунок 10.6 – Размещение ферритовых колец на кабеле:
а, б – вблизи выхода из корпуса;
в – на разных концах кабеля

Обычно ферритовые кольца обеспечивают удовлетворительное функционирование схемы при постоянном токе не более 5 А, однако это предельное значение можно увеличить, если в кольце выполнить небольшие воздушные зазоры. Очень эффективным способом фильтрации является пропускание сквозь ферритовые кольца всех сигнальных и силовых линий, подходящих к корпусу.

При выборе ферритовых колец следует учесть, что более длинное кольцо (втулка) предпочтительнее, чем толстое, а его габариты должны быть максимальными.

Намотка провода на ферритовые кольца играет важную роль для обеспечения эффективности устройства. Неправильная намотка может привести к ухудшению снижения помех и даже к увеличению шумов. Поэтому важно придерживаться некоторых правил:

- 1) количество витков провода на кольце должно быть оптимальным для данной частоты помех, недостаточное количество витков может привести к слабому подавлению помех, а избыточное количество вызвать резонансные явления;

- 2) провод должен быть аккуратно и плотно намотан на ферритовое кольцо, чтобы избежать взаимного перемещения витков и улучшить эффективность подавления помех;

- 3) провод не должен пересекаться сам с собой во избежание образования петель и нежелательных электромагнитных полей.

Рекомендации к конструкции и монтажу фильтров:

- 1) необходимо уделять большое внимание экранированию входных и выходных цепей фильтра, включая входной и выходной конденсаторы;

- 2) входные и выходные проводники должны находиться с противоположных сторон как можно дальше. Экранирующая оплетка или труба (если она есть) должна иметь надежный контакт с корпусом фильтра по всему периметру отверстия для ввода (вывода) провода;

- 3) следует избегать расположения элементов фильтра на съемных частях корпуса;

- 4) обычные конденсаторы лучше монтировать проходным способом, т. е. помехонесущий провод необходимо крепить непосредственно к выводу конденсатора. Соединение выполнять ко-

ротким проводом длиной не более 10–15 мм и диаметром не менее 2 мм;

5) крепление конденсаторов и дросселей должно быть прочным и вибропрочным;

6) помехоподавляющие элементы необходимо размещать так, чтобы был обеспечен доступ для осмотра и замены;

7) конденсаторы, которые при отключении аппаратуры от сети питания могут быть заряжены, должны иметь разрядное сопротивление со временем разряда не более 10 с;

8) кроме основных параметров (частота, затухание, рабочий диапазон, ток нагрузки, ток утечки, габариты, вес, конструктивные особенности и др.), необходимо руководствоваться и условиями эксплуатации фильтра, так как от этого зависит не только его работоспособность, но и удельно-объемная и удельно-весовая характеристики.

Контрольные вопросы

1. Что называется фильтром?
2. Каким требованиям должны отвечать фильтры?
3. Где должен располагаться фильтр в устройстве?
4. Как конструктивно выполнен синфазный дроссель?
5. Как влияет расположение магнитного материала (феррита) вокруг проводника на плотность магнитного потока?

11 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

11.1 Актуальность обеспечения тепловых режимов

В процессе эксплуатации электронных устройств температура электронных компонентов, входящих в их состав, изменяется – как по причине изменения температуры окружающей среды, так и вследствие выделения тепловой энергии самими компонентами.

Со временем материалы, из которых состоит изделие, теряют свои свойства вследствие химических реакций и физических процессов, т. е. происходит их старение. Как правило, под действием высокой температуры материалы стареют быстрее, так как увеличивается вероятность протекания нежелательных химических реакций. Материалы по-разному устойчивы к высокотемпературному старению. Особенно чувствительны к температуре материалы сложного строения – полупроводники, клеи, резины, реактопласты (эпоксидная, фенолформальдегидная смолы и составы на их основе); наименее чувствительны металлы, минеральные соединения. Промежуточное положение между металлами и реактопластами занимают термопласты (полимеры, пластики, пластмассы). Старение материала приводит к так называемому постепенному отказу, т. е. через некоторое время изделие перестает удовлетворительно выполнять свои функции. Если в результате старения материала выходит из строя какой-либо компонент устройства, то происходит внезапный отказ. Экстремальный нагрев может привести не только к старению, но и к непосредственному разрушению материала. Например, при нагреве полупроводника перестает работать p - n -переход.

У аналоговых схем, где имеет значение каждый десяток микровольт, а отклонение сигнала от нормы в несколько милливольт – катастрофа, тепловая стабильность элементов крайне важна. Ведь с колебаниями температуры могут меняться и дрейфовать пороги компараторов, коэффициенты усиления операционных усилителей и транзисторов, меняются номиналы резисторов и конденсаторов. Кроме того, «плывут» уровни сигналов

обратной связи, нарастают тепловые шумы и снижается разрешающая способность преобразователей.

В цифровой технике влияние температуры не столь выражено, но и для нее колебания температуры опасны. Ведь цифровой элемент – элемент пороговый, т. е. также содержит в себе своеобразный компаратор. Даже простейший логический элемент типа И-НЕ несет его в себе. Смещение порогов переключения и, как следствие, изменение скважности импульсов в периодических сигналах, появление «резаных» импульсов, сбои, дрейф частоты генераторов тактовых сигналов, опасность теплового пробоя транзисторов – таковы основные проблемы цифровой схемы, связанные с выходом за пределы разрешенного температурного диапазона. Также снижается точность измерений временных параметров сигналов, таких как длительность или период колебания импульсов.

В устройствах комбинированного типа, таких как АЦП и ЦАП, погрешности, вызванные тепловыми шумами, накладываются друг на друга и в конце концов становятся одной из основных причин, ограничивающих их точность.

Но наибольшую опасность рост температуры компонентов и окружающей среды представляет для силовой электроники. Вследствие пренебрежения тепловыми параметрами схемы или неправильной их оценки полностью выходит из строя источник питания и нарушается работа потребляющих блоков. Поэтому отвод лишнего тепла так важен при разработке питающей аппаратуры или выборе готового источника питания для РЭА. Следует помнить, что с ростом температуры на каждые 10 °С время безотказной работы аппаратуры сокращается в среднем в два раза.

Конструкция электронного устройства должна обеспечивать такой тепловой режим, в котором электронные компоненты будут работать стабильно и с приемлемой надежностью. При определении теплового режима электронного устройства для случая установившегося термодинамического равновесия (состояние системы, при котором остаются неизменными во времени температура, давление, объем этой системы в условиях изолированности от окружающей среды) нужно учитывать следующие факторы:

- нагрев материалов не должен превышать заданные значения во избежание преждевременного старения;
- электронные компоненты не должны нагреваться до недопустимых температур, чтобы исключить их выход из строя;
- фактические режимные и максимальные параметры электронных компонентов, которые будут работать в наихудшем тепловом режиме, не должны быть меньше тех, которые были приняты для расчета на этапе проектирования электронной схемы.

11.2 Виды теплопередачи

Теплопередача – это способ изменения внутренней энергии тела при передаче энергии от одной части тела к другой или от одного тела к другому без совершения работы. Существуют три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение.

Теплопроводность – это процесс передачи энергии от одного тела к другому или от одной части тела к другой благодаря тепловому движению частиц. Важно, что при теплопроводности не происходит перемещения вещества.

Вещества обладают разной теплопроводностью. Хорошими проводниками теплоты являются металлы, хуже проводят тепло жидкости, еще хуже – газы. Это объясняется особенностями строения веществ, которые, независимо от их агрегатного состояния, состоят из молекул или атомов, находящихся в постоянном колебании. Если температура повышается, то энергия колебательного движения молекул возрастает. Молекулы газов находятся на больших расстояниях друг от друга, чем молекулы твердых тел, и значительно реже сталкиваются. Поэтому передача энергии от одних молекул к другим в газах происходит не столь интенсивно, как в твердых телах.

Рассмотрим пример перемещения тепловой энергии. Если нагревать один край металлического прутка, его температура начнет повышаться, а температура другого края сначала останется неизменной (рисунок 11.1). Из-за разницы температур тепловая энергия начнет перемещаться из более теплого края в более холодный, т. е. возникнет тепловой поток.

Скорость этого перемещения зависит от характеристики материала и определяется коэффициентом теплопроводности λ , Вт/(м·°С) или Вт/(м·К) (таблица 11.1):

$$\lambda = \frac{Pl}{\Delta TS},$$

где P – тепловой поток, Вт; l – длина теплопроводящего элемента, м; ΔT – разница температур между краями теплопроводящего элемента, °С; S – площадь теплопроводящего элемента, м².

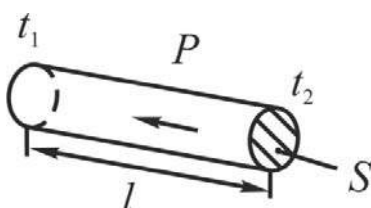


Рисунок 11.1 – Возникновение теплового потока из-за разности температур

Таблица 11.1 – Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Медь	401
Алюминий	202–236
Латунь	97–111
Сталь	17–53
Эласил	1,6–1,8
Стекло	1–1,15
Вода	0,6
Эпоксидная смола	0,59
Стеклотекстолит	0,3
Воздух	0,022
Вакуум	0

Теплопроводность металлов в сотни раз выше, чем диэлектриков. Это связано с тем, что тепловые колебания в упорядоченной кристаллической решетке происходят гораздо более слаженно, чем в некристаллических веществах.

Чтобы температура какого-либо объекта повысилась, ему нужно передать определенное количество энергии, зависящее от

материала. Количество энергии Q , Дж, которое нужно передать одному килограмму вещества, чтобы нагреть его на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, зависит от **удельной теплоемкости вещества** (таблица 11.2) и вычисляется по формуле

$$Q = C_{\text{уд}} m \Delta T,$$

где $C_{\text{уд}}$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); m – масса, кг; ΔT – разница между начальной и конечной температурами, °C.

Таблица 11.2 – Удельная теплоемкость некоторых материалов

Материал	Удельная теплоемкость $C_{\text{уд}}$, Дж/(кг·°C)
Латунь	378
Медь	383
Сталь	460–500
ПВХ	880
Алюминий	897
Стеклотекстолит	950
Воздух	1009
Эпоксидная смола	1110
Полистирол	1110
Оргстекло	1270
Этиленвинилацетат (термоклей)	2400
Вода	4200

Конвекция – вид теплопередачи, при котором энергия передается слоями жидкости или газа. Конвекция связана с переносом вещества, поэтому она не может происходить в твердых телах. Путем конвекции происходит теплообмен между нагретым твердым телом и жидкой или газообразной средой. Наглядным примером является батарея, нагревающая воздух в квартире. Нагретые, менее плотные слои воздуха под действием выталкивающей силы поднимаются вверх, а более холодные движутся вниз и занимают их место. Текучая среда, которая переносит тепло, называется в этом случае теплоносителем.

Конвекция может быть естественной или принудительной. **Естественная конвекция** – это движение масс текучей среды за

счет разницы плотностей более горячих и более холодных областей вещества. В случае когда для теплоотвода применяют **принудительную конвекцию**, теплоноситель приводится в движение с помощью насоса или вентилятора. Теплопередача конвекцией подчиняется закону Ньютона – Рихмана:

$$P = \alpha S \Delta T,$$

где P – тепловой поток, переносимый конвекцией, Вт; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К); S – площадь поверхности теплоотдачи, м²; ΔT – разница температур между твердым объектом и текучей средой, К.

Теплопередача конвекцией прямо пропорциональна площади поверхности теплоотдачи. Чтобы при минимальном объеме и массе увеличить эту площадь, радиаторы охлаждения изготавливают с разветвленным оребрением. Также тепловой поток пропорционален разности температур между радиатором и окружающей средой.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией зависит от ряда параметров, таких как теплопроводность материала радиатора, геометрическая форма, степень шероховатости его поверхности, скорость движения конвективного потока теплоносителя. Существуют методики оценки коэффициента теплоотдачи конвекцией, основанные на расчете физических процессов тепломассопереноса, однако точная его величина может быть определена только экспериментально (таблица 11.3).

Таблица 11.3 – Ориентировочные значения коэффициента теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К)

Охлаждающая среда	Естественная конвекция	Принудительная конвекция
Воздух	2–25	10–100
Вода	200–600	1000–6000
Кипящая вода	500–40 000	500–40 000

Излучение – перенос энергии в виде электромагнитных волн. Носителями лучистой энергии являются электромагнитные колебания с длиной волны от малых долей микрона до многих кило-

метров. В зависимости от длины волны выделяют разные виды излучения (таблица 11.4).

Таблица 11.4 – Классификация излучений

Длина волны	Вид излучения
$0,05 \cdot 10^{-6}$ мкм	Космическое
$(0,5-1,0) \cdot 10^{-6}$ мкм	Г-излучение
$1,0 \cdot 10^{-6}-20,0 \cdot 10^{-3}$ мкм	Рентгеновское
$20,0 \cdot 10^{-3}-0,4$ мкм	Ультрафиолетовое
$0,4-0,8$ мкм	Видимое
$0,8-0,8$ мм	Тепловое (инфракрасное)
$0,2$ мм и более	Радиоволны

В нагретых телах часть внутренней энергии вещества может превращаться в энергию излучения, поэтому такие тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Световые и инфракрасные лучи с длиной волны приблизительно $0,4-800$ мкм, возникновение которых определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела, называют **тепловыми**, а процесс их распространения – **тепловым излучением**. При этом тепловая энергия

$$Q = hf,$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж·с; f – частота колебаний эквивалентного электромагнитного поля, Гц.

Лучистый теплообмен (радиационный теплообмен) – процесс переноса энергии, обусловленный превращением части внутренней энергии вещества в энергию излучения (испусканием электромагнитных волн или фотонов), ее излучением в пространстве со скоростью света и поглощением веществом (обратным превращением энергии электромагнитных волн во внутреннюю энергию). При этом излучение в материальной среде может сопровождаться поглощением и рассеянием, а также собственным излучением среды. Однако для лучистого теплообмена наличие материальной среды между телами не является необходимым, что принципиально отличает его от других видов теплообмена. Передача теплоты излучением может происходить в различных областях спектра (в зависимости от температуры).

Опыты показывают, что черные тела хорошо поглощают и излучают энергию, а белые или блестящие – наоборот. Поэтому летом носят светлую одежду, а на юге дома предпочитают красить в белый цвет. Путем излучения энергия передается от Солнца к Земле: поскольку пространство между этими телами представляет собой вакуум, то энергия не может передаваться ни путем теплопроводности, ни путем конвекции. Таким образом, для передачи энергии путем излучения не требуется наличия какой-либо среды.

Любой объект, температура которого не равна абсолютному нулю, излучает инфракрасные волны. Если окружающая среда прозрачна для инфракрасного излучения, волны покидают объект, унося с собой часть его тепловой энергии. В свою очередь волны от других объектов, падая на поверхность материала, могут поглощаться ею, в результате чего поверхность нагревается. Если разница между температурой объекта и температурой окружающей среды не превышает нескольких градусов, то тем теплом, которое передается излучением, можно пренебречь. В некоторых же случаях этим теплоотводом (или, наоборот, нагревом) пренебрегать нельзя.

Прежде всего следует учитывать, что не всякая среда, прозрачная для видимого света, будет прозрачна для инфракрасных лучей. Прозрачные жидкости чаще всего не пропускают инфра-

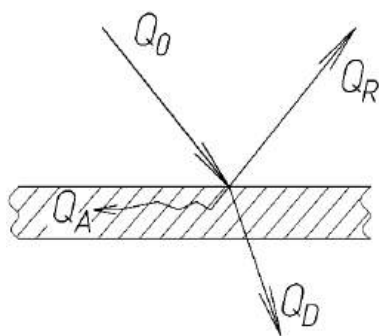


Рисунок 11.2 – Схема распределения падающей лучистой энергии

красные волны, а поглощают их. Поэтому лучистый теплообмен происходит только в газовой среде или вакууме.

При попадании на другие тела часть энергии поглощается, часть отражается, а часть проходит сквозь тело (рисунок 11.2).

Все количество энергии Q_0 , падающей на тело, состоит из поглощаемой Q_A , отражающейся Q_R и проходящей сквозь тело Q_D :

$$Q_0 = Q_A + Q_R + Q_D.$$

Разделив обе части этого равенства на Q_0 , получаем

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0} = 1$$

или

$$A + R + D = 1.$$

Если $A = 1$, то $R = 0$ и $D = 0$, и это означает, что падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются **абсолютно черными**.

Если $R = 1$, то $A = 0$ и $D = 0$, и это означает, что падающая лучистая энергия полностью отражается телом. Такие тела называются **зеркальными**.

Если $D = 1$, то $A = 0$ и $R = 0$, и это означает, что падающая лучистая энергия полностью проходит сквозь тело. Такие тела называются **прозрачными**.

Абсолютно черное тело – это тело, поглощательная способность которого равна единице для всех частот или длин волн и любой температуры.

Мощность тепловой энергии $P_{\text{л}}$, Вт, которую излучает объект в окружающее пространство, описывается законом Стефана – Больцмана:

$$P_{\text{л}} = S\varepsilon\sigma T^4,$$

где S – площадь поверхности теплоотвода, м^2 ; ε – степень черноты (для абсолютно черного тела $\varepsilon=1$, для реальных объектов $\varepsilon<1$); $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана – Больцмана; T – температура, К.

Излучаемая мощность прямо пропорциональна площади объекта и зависит от температуры. Степень черноты характеризует способность поверхности материала поглощать излучение (теоретически количество излучаемой энергии равно количеству поглощенной) (таблица 11.5). Это сложный параметр, который невозможно точно рассчитать, однако поверхности темного цвета действительно лучше излучают (но и лучше поглощают) тепловую энергию.

Таблица 11.5 – Степень черноты поверхностей

Материал и состояние поверхности тела	T, K	ε
Полированный алюминий	323–773	0,04–0,06
Сильно окисленный алюминий	323–773	0,2–0,3
Дюралюминий Д16	323–623	0,37–0,41
Шлифованная медь	293	0,03
Эмалевые краски	293–373	0,92
Картон, бумага, ткань	293–573	0,93

По закону Стефана – Больцмана можно оценить, какую абсолютную мощность излучает объект и как она зависит от температуры. Однако следует учесть, что если рассматриваемый объект находится не в космосе, то он одновременно поглощает тепловую энергию, излучаемую окружающими объектами. Если объект имеет такую же температуру, что и окружающая среда, обмен излучением будет находиться в состоянии равновесия.

Часто теплообмен излучением ничтожно мал по сравнению с конвекцией и теплопроводностью. Чтобы определить, стоит ли учитывать теплоотвод излучением, можно поступить следующим образом. Определим суммарную величину рассеиваемой мощности P_{Σ} . Далее по закону Стефана – Больцмана вычислим абсолютную величину излучаемой энергии $P_{\text{л}}$ без учета поглощаемой лучистой энергии. Следует иметь в виду, что излучающей является только наружная поверхность радиатора. Площадь пластин, обращенных друг к другу, учитывать не нужно, поскольку они не отдают лучистую энергию во внешнее пространство, а передают друг другу. Теперь сравним между собой суммарную мощность и излучаемую. Если $P_{\text{л}} < 0,1P_{\Sigma}$, то излучаемой мощностью можно пренебречь. Если же значения этих мощностей соизмеримы, учитываем разницу между температурой радиатора и температурой окружающей среды. В случае когда температуры отличаются друг от друга не более чем на 40–60 °С, скорее всего, большая часть излучаемой энергии будет компенсироваться поглощаемой лучевой энергией от окружающих объектов. Если же разница температур более существенна (например, когда при низкой температу-

ре окружающей среды теплоотводящий элемент нагревается до высоких температур), то необходимо составлять уравнения лучевого теплообмена на основе закона Стефана – Больцмана и оценивать, какая часть энергии будет передаваться за счет излучения.

11.3 Классификация систем охлаждения

Продолжительная и устойчивая работа приборов возможна лишь при необходимых температурных условиях. Как правило, температурные условия работы теплонагруженных приборов обеспечиваются системами охлаждения. Все системы охлаждения приборов по методу действия можно разделить на две основные группы: пассивные и активные. Для первых характерен естественный путь отвода тепла при помощи теплопроводности, конвекции и излучения. Для вторых – принудительный теплоотвод с применением вентиляторов, омывающих жидкостей и термоэлектроохладителей. В зависимости от степени нагрева компонентов, наличия места и допустимой рабочей температуры выбирается нужная система охлаждения.

Отвод тепла от нагретых поверхностей элементов конструкции может производиться контактным способом (за счет теплопроводности), естественным и принудительным воздушным охлаждением, жидкостным охлаждением, испарением жидкости, за счет эффекта Пельтье и за счет излучения.

11.3.1 Контактное охлаждение

Самый простой и потому часто применяющийся способ – пассивный теплоотвод с применением радиаторов (**контактный способ охлаждения**). Он основан на теплопроводности материалов и естественной конвекции, а также использовании базовой детали, например шасси или корпуса, к которой крепят другие теплонагруженные детали. Однако обеспечить хороший теплообмен удастся лишь при небольших размерах и малых мощностях рассеивания (менее 20 Вт). Размеры полупроводникового кристалла слишком малы, чтобы конвекция была достаточной для его охлаждения. Площадь поверхности охлаждаемой детали можно увеличить, если корпус полупроводникового прибора прикрепить

к массивному металлическому радиатору. Благодаря теплопроводности тепло от корпуса микросхемы или транзистора передается радиатору.

Радиаторы различаются по материалу, способу изготовления и конструкции. Предпочтительнее радиаторы, выполненные из цветных металлов – алюминия, меди, их сплавов, поскольку эти материалы обладают наибольшей теплопроводностью. Лучше их только благородные металлы – золото, серебро и т. п., но они дорогие. По конструктивному исполнению различают игольчатые, пластинчатые и ребристо-пластинчатые радиаторы (рисунок 11.3).

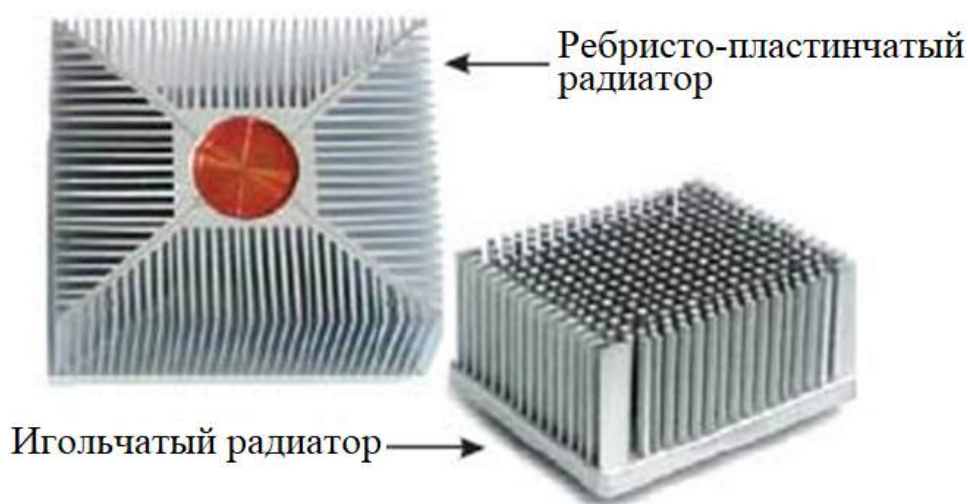


Рисунок 11.3 – Радиаторы

Игольчатые лучше работают при естественной конвекции, другие типы предпочтительнее при принудительном обдуве воздухом.

11.3.2 Воздушное охлаждение

Воздушное охлаждение находит очень широкое применение в РЭС ввиду своей простоты и экономичности. Различают как естественное, так и принудительное воздушное охлаждение. Охлаждение при естественной конвекции обеспечивает плотность теплового потока, отводимого от прибора, до 200 Вт/м^2 . Естественное охлаждение отводит теплоту в окружающую среду, затрачивая при этом минимум электрической энергии, – это самый эффективный способ с точки зрения расхода энергии, однако он

не позволяет охладить теплоноситель ниже температуры источника естественного охлаждения. Как только теплофизическое равновесие достигнуто, дальнейшее охлаждение тела невозможно. Для реализации естественного теплообмена применяются следующие меры:

- перфорируется кожух корпуса, что позволяет за счет естественной вентиляции снизить температуру в приборе на 20–30 % по сравнению с герметичным корпусом;

- используется ребрение корпуса для увеличения площади теплоотдающей поверхности;

- обеспечивается тепловой контакт всех теплонагруженных элементов с корпусом для повышения эффективности отвода тепла от элементов конструкции внутри прибора;

- нагретые элементы устанавливаются на боковые стенки и верхнюю крышку, так как дно прибора в процессе теплообмена почти не участвует.

Отвод тепла на массивный радиатор – лишь частичное решение проблемы охлаждения полупроводникового прибора. Если сам радиатор остывает за счет естественной конвекции, то при затрудненном обмене воздуха и малой разнице температур между радиатором и окружающей средой возможен перегрев кристалла, следовательно, требуется усиленная принудительная конвекция. Обдув радиатора воздушной струей от вентиляторов решает эту проблему и значительно усиливает теплоотвод.

Принудительное воздушное охлаждение применяется в случае, когда требуется отводить плотность тепловых потоков до 2–3 кВт/м². Эффективность такого охлаждения тем больше, чем ниже температура обдувающего воздуха и чем больше его скорость. Принудительные потоки воздуха создаются специальными вентиляторами, компрессорами, которые энергозатратны. Нагретый воздух может быть предварительно охлажден специальными устройствами. Необходимо предусмотреть хорошую обтекаемость воздухом теплонагруженных узлов и блоков. Охлаждение может осуществляться двумя способами:

- обдувом внешней поверхности корпуса;

- продувом воздуха через внутренний объем.

Второй способ предпочтителен, так как обеспечивает непосредственный отвод тепла от теплонагруженных элементов.

Для общего отвода тепла из каркасной аппаратуры применяются вентиляторы, которые по типу питания делятся на устройства постоянного и переменного тока, а по конструктивным особенностям и принципу действия – на осевые, радиальные, диагональные.

Вентиляторы могут различаться еще по ряду признаков – прежде всего, по производительности или, как еще говорят, «по расходу». Под этим понимается величина воздушного потока – объем перемещаемого вентилятором воздуха за единицу времени (литры в секунду, кубометры в час и т. п.). С объемным показателем неразрывно связано статическое давление. Эта величина измеряется в миллиметрах водяного столба и показывает разность между давлением воздушного потока, формируемого вентилятором, и давлением в окружающей среде (атмосферное давление). Другие важные характеристики – габаритные размеры вентилятора, напряжение питания, потребляемая мощность, наличие встроенных схем управления и защиты, тип выходного статусного сигнала, уровень шума, тип и число подшипников и т. д.

Наиболее востребованы **осевые** вентиляторы (рисунок 11.4). Создаваемый ими воздушный поток движется параллельно оси



Рисунок 11.4 – Осевой вентилятор

вращения крыльчатки. Основное назначение данных вентиляторов – охлаждение полупроводниковых приборов, расположенных внутри приборного каркаса. Это достигается путем установки вентилятора снаружи или внутри корпуса для нагнетания прохладного воздуха снаружи или откачивания разогретого газа из шкафа. Осевые вентиляторы создают большие воздушные потоки, но не способны

создавать большое статическое давление. В таких вентиляторах воздух выталкивается всеми частями пропеллера. Некоторые молекулы газа выталкиваются оконечной, наиболее быстро двигаю-

щейся частью крыльчатки, другие – той частью лопасти, которая расположена ближе к оси вращения и имеет низкую скорость кругового движения. При большом сопротивлении воздушной среды часть потока отрывается от основной струи – возникает турбулентность, при которой часть воздуха движется по небольшому кругу. Как правило, при этом наблюдается повышенный шум и падает эффективность системы охлаждения.

Радиальные вентиляторы (рисунок 11.5) всасывают воздух через центральное (осевое) впускное отверстие и выталкивают его радиально по всей окружности крыльчатки. Воздух выбрасывается лопастями рабочего колеса в момент, когда он разогнан до максимальной круговой скорости. Спирально расширяющийся корпус-воздуховод преобразует высокую скорость движения потока в высокое статическое давление воздуха на выходе вентилятора.



Рисунок 11.5 – Центробежные радиальные вентиляторы

Диагональные вентиляторы занимают промежуточное положение между осевыми и радиальными и являются своеобразным гибридом этих двух типов. В них реализованы как эффект «зачерпывания» воздуха лопастями, так и принцип центробежного ускорения. В результате они создают поток почти как осевые вентиляторы и вместе с тем обеспечивают высокое статическое давление.

Отличительная черта диагонального вентилятора – коническая ступица ротора (рисунок 11.6). Сердцевина ротора, сделанная в форме усеченного конуса, имеет маленькое сечение в зоне входа и увеличенный диаметр на стороне выброса. Более высокая круговая скорость движения кончиков лопастей придает более сильное центробежное ускорение воздуху. При тех же габаритных размерах, что и у осевого вентилятора, молекулам воздуха здесь передается бóльшая энергия, благодаря чему можно повысить статическое давление. Вихреобразование минимизировано благодаря конической форме колеса вентилятора. Еще одно преимущество диагональных вентиляторов – низкий уровень шума.



Рисунок 11.6 – Диагональный вентилятор (в разрезе)

С появлением высокопроизводительных чипов, например процессоров компьютеров, цифровых процессоров для обработки сигналов и специализированных видеопроцессоров, потребляемая мощность которых может превышать 50 Вт (мощность среднего паяльника!), встала проблема локального охлаждения полупроводниковых приборов. В свою очередь совершенствование технологий в электротехнике привело к созданию миниатюрных электродвигателей. В результате стало возможным появление вентиляторов очень малых размеров. Сегодня серийно производятся вентиляторы, имеющие самые разные размеры, вплоть до «малышей» размерами 15×15×6 мм или 17×17×8 мм. Такие

крохи вполне сравнимы с размерами охлаждаемых ими чипов. В большинстве случаев маленькие вентиляторы устанавливаются на радиаторы, примыкающие к поверхности охлаждаемого компонента.

11.3.3 Жидкостное охлаждение

Воздух, как известно, обладает крайне низкой теплоемкостью и теплопроводностью. По этим причинам в ряде случаев даже при сочетании обоих видов вентиляции не удастся добиться приемлемой температуры тепловыделяющих элементов. Намного успешнее с задачей справляются жидкости, теплоемкость которых существенно выше.

Жидкостные системы охлаждения подразделяются на термосифонные и с принудительной циркуляцией теплоносителя. Жидкость циркулирует по специальным каналам, имеющим хороший тепловой контакт с теплонагруженными элементами. В термосифонных системах циркуляция жидкости обеспечивается за счет ее различной плотности на входе в аппарат и выходе из него. Жидкость охлаждается в специальном резервуаре за счет испарения и теплообмена его корпуса с окружающей средой. Эффективность термосифонных систем сравнительно невелика. В зависимости от теплофизических свойств жидкости плотность теплового потока составляет 1–10 кВт/м².

В системах с принудительной циркуляцией жидкость прогоняется насосами. Ее охлаждение производится в специальном теплообменнике. Эти системы работают, как правило, по замкнутому циклу. Жидкость в данном случае является промежуточным теплоносителем между теплонагруженными элементами и теплообменником (рисунок 11.7). В качестве теплообменника чаще всего используются радиаторы. Системы охлаждения с принудительной циркуляцией теплоносителя весьма эффективны. Плотность теплового потока, снимаемого с нагретой поверхности, достигает до 500 кВт/м². Такие системы применяются как в наземной РЭА, так и в самолетах и морских судах.

При расчетах параметров систем жидкостного охлаждения принимают во внимание гидродинамические условия развития процесса теплопередачи. Необходимо учесть передачу тепла ос-

нованию, а затем охлаждающей жидкости, которая заключена либо в трубах, либо в каналах основания. При принудительном движении жидкости внутри трубы различают два режима течения: ламинарный и турбулентный [28].

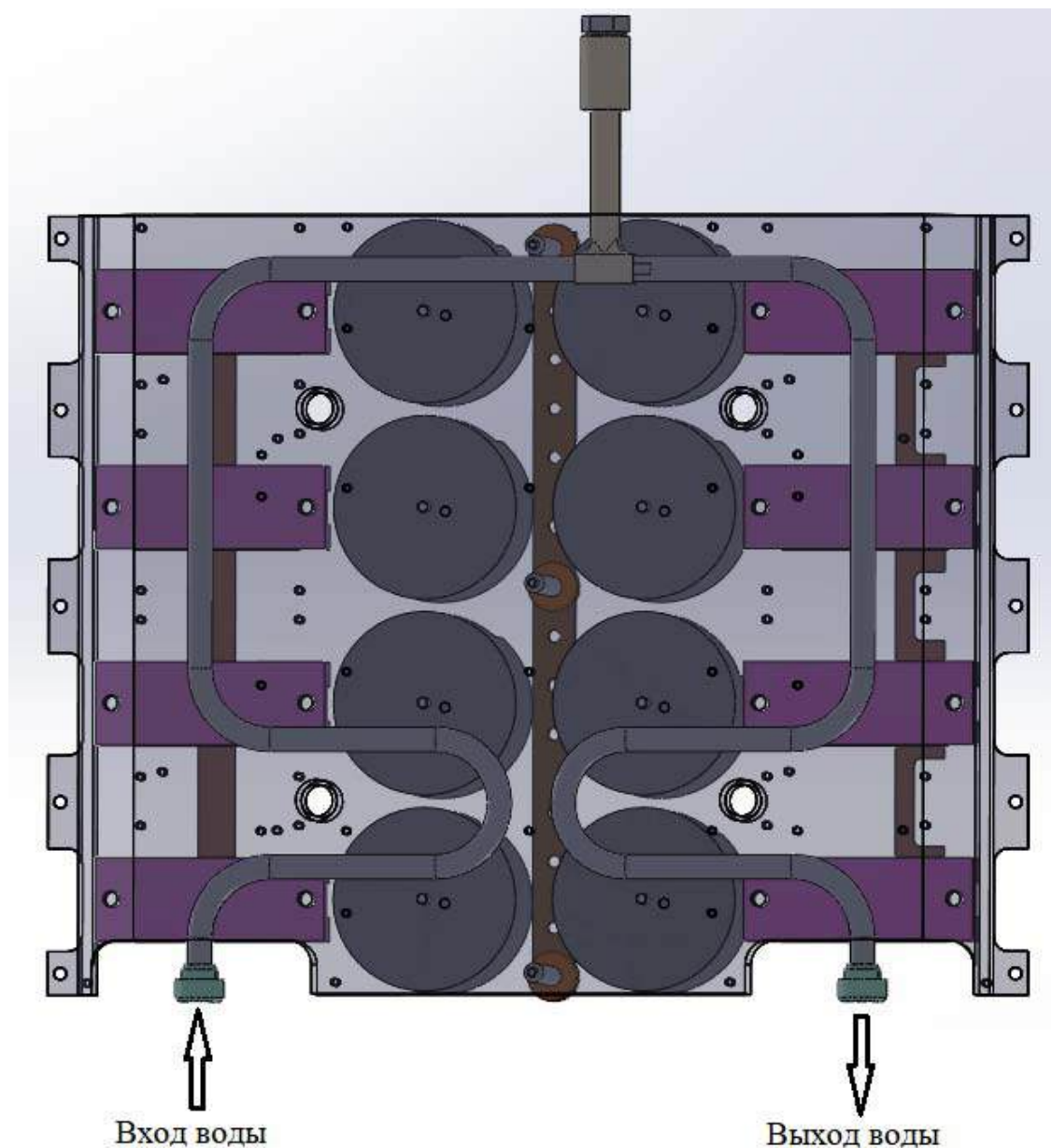


Рисунок 11.7 – Система жидкостного охлаждения

Режим течения жидкости определяется по числу Рейнольдса

$$Re = \frac{wd}{\nu},$$

где w – скорость потока жидкости, м/с; d – внутренний диаметр трубы, м; ν – кинематический коэффициент вязкости жидкости,

м²/с (определяется по справочным таблицам). Если $Re < 2 \cdot 10^3$, то режим течения ламинарный, если $Re > 1 \cdot 10^4$, то турбулентный, если $2 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1 \cdot 10^4$ – режим течения переходный.

При **ламинарном режиме** перенос теплоты от одного слоя жидкости к другому в направлении нормали к стенке осуществляется путем теплопроводности (рисунок 11.8).

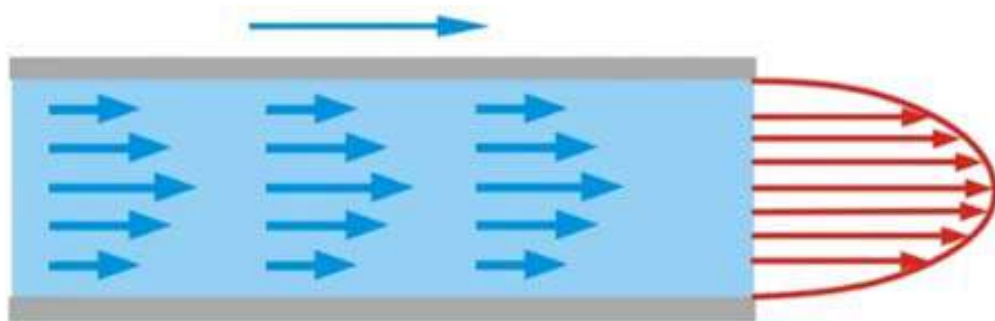


Рисунок 11.8 – Ламинарный режим течения жидкости

В то же время каждый слой имеет в общем случае различную скорость продольного движения. Поэтому наряду с поперечным переносом теплоты путем теплопроводности происходит также ее конвективный перенос в продольном направлении. Вследствие этого теплообмен при ламинарном режиме зависит от гидродинамической картины движения.

По мере движения потока между жидкостью и стенкой трубы происходит теплообмен и температура жидкости постепенно изменяется. Вначале (вблизи от входного сечения трубы) изменение температуры происходит лишь в тонком слое около поверхности. Затем, по мере удаления от входного сечения, все большая часть потока вовлекается в процесс теплообмена. На некотором расстоянии l от входа трубы тепловые пограничные слои смыкаются, и далее в процессе теплообмена участвует весь поток. Расстояние l может быть приближенно оценено по зависимости

$$l \approx 0,05d \cdot Re \cdot Pr,$$

где Pr – число Прандтля, которое является теплофизической характеристикой теплоносителя и вычисляется по формуле

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a};$$

μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·°С); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); a – коэффициент температуропроводности, м²/с (характеризует скорость изменения температуры в теле). Эти величины – справочные.

Значительное влияние на интенсивность теплоотдачи может оказывать зависимость физических свойств жидкости, в первую очередь вязкости, от температуры. Изменение температуры по сечению трубы приводит к изменению вязкости, причем чем больше перепады температур, тем сильнее меняются вязкость, теплопроводность, теплоемкость по сечению трубы. При охлаждении жидкости ее температура у стенки ниже, а вязкость выше, чем в центре потока. При нагревании – наоборот. На практике обычно профили скорости и температуры на входе близки к равномерным. Для этих условий расчет среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ при ламинарном режиме течения жидкости в трубах может проводиться по формуле числа Нуссельта, которое характеризует интенсивность процесса конвективного теплообмена:

$$Nu = 1,4 \left(Re_{\text{ж}} \frac{d}{l} \right)^{0,4} Pr_{\text{ж}}^{0,33} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} = \frac{\bar{\alpha} d}{\lambda_{\text{ж}}},$$

где $Re_{\text{ж}}$ – число Рейнольдса для жидкости; $Pr_{\text{ж}}$ – число Прандтля для жидкости; $Pr_{\text{с}}$ – число Прандтля для стенки трубы; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); $\lambda_{\text{ж}}$ – коэффициент теплопроводности жидкости.

После вычисления среднего коэффициента теплоотдачи определяется количество передаваемой теплоты P , Вт:

$$P = \pi d l \bar{\alpha} \Delta t.$$

При **турбулентном режиме** перенос теплоты внутри жидкости осуществляется в основном путем перемешивания (рисунок 11.9).

При этом процесс перемешивания протекает настолько интенсивно, что по сечению потока температура жидкости практически постоянна. Резкое изменение температуры наблюдается

лишь внутри тонкого слоя у поверхности стенки. Для расчета средней теплоотдачи применяется зависимость

$$Nu = 0,021 Re_{\text{ж}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,43} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}} \right)^{0,25} \varepsilon_l,$$

где ε_l – коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы. Если $l/d > 50$, то $\varepsilon_l = 1$. При $l/d < 50$ необходимо учитывать влияние начального теплового участка. Значения ε_l выбираются из справочных таблиц.

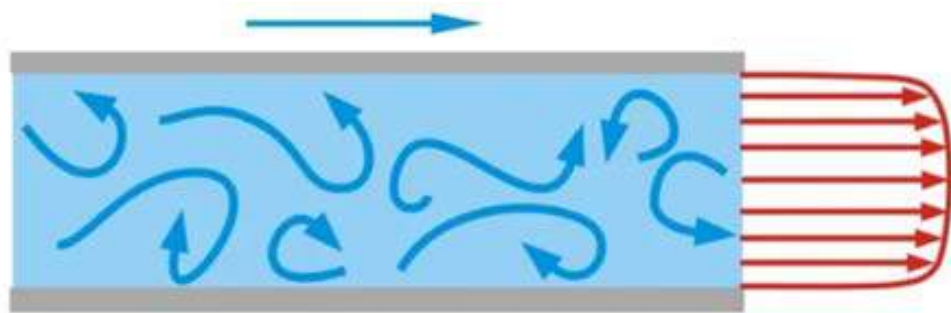


Рисунок 11.9 – Турбулентный режим течения жидкости

При движении жидкости в изогнутых трубах неизбежно возникает центробежный эффект. Поток жидкости прижимается к внешней стенке, и в поперечном сечении возникает вторичная циркуляция. С увеличением радиуса кривизны влияние центробежного эффекта уменьшается, а в прямолинейной трубе совсем исчезает. В результате возрастания скорости и вторичной циркуляции и, как следствие, увеличения турбулентности потока значение среднего коэффициента теплоотдачи в изогнутых трубах выше, чем в прямых.

Расчет теплоотдачи в изогнутых трубах производится по формулам для прямых труб с последующим введением в качестве множителя поправочного коэффициента ε_R , который для змеевиковых труб определяется соотношением

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 \frac{d}{R},$$

где R – радиус змеевика, м.

В поворотах и отводах центробежное действие имеет лишь местный характер, но его влияние распространяется и дальше. За счет увеличения турбулентности потока в следующем за поворотом прямом участке трубы теплоотдача всегда выше, чем в прямом участке до поворота.

Приведенные соотношения относятся к условиям, когда влияние подъемных сил не проявляется. Подъемная (архимедова) сила вызывает конвективное движение среды. При значительном изменении температуры по сечению и длине трубы в разных точках потока оказываются различными плотности жидкости или газа. Вследствие этого в жидкости возникают подъемные силы, под действием которых на вынужденное движение теплоносителя накладывается свободное движение. В итоге изменяются картина движения жидкости и интенсивность теплоотдачи.

Так, в вертикальных трубах при совпадении направления течения жидкости с направлением подъемной силы (течение снизу вверх при нагреве жидкости или сверху вниз при охлаждении) скорость течения жидкости у стенки увеличивается, поэтому интенсивность теплоотдачи повышается по сравнению со случаем, когда влияние свободной конвекции отсутствует. При взаимно противоположном направлении принудительного движения и подъемных сил в вертикальных трубах вначале влияние свободной конвекции приводит к уменьшению скорости движения жидкости у стенки и некоторому снижению теплоотдачи. Однако при дальнейшем увеличении роли свободного движения такое течение становится неустойчивым, в потоке возникает и развивается перемешивание теплоносителя и интенсивность теплоотдачи существенно увеличивается.

В горизонтальных трубах направление подъемных сил и вынужденного движения взаимно перпендикулярно. При нагревании жидкости более теплые слои поднимаются вверх, при охлаждении в нижней части трубы накапливается более холодная жидкость. Происходит поперечная циркуляция жидкости, в среднем по сечению интенсивность теплообмена увеличивается.

Когда требуется снимать с нагретой поверхности тепловой поток более 500 кВт/м^2 , используются *жидкостно-испаритель-*

ные системы охлаждения, в которых для отвода тепла используется процесс кипения жидкости. Прогоняемая через аппарат жидкость при контакте с нагретой поверхностью закипает. Парожидкостная смесь попадает в сепаратор, где происходит разделение жидкости и пара. Пар поступает в конденсатор (теплообменник), образующийся конденсат стекает вниз, откуда вместе с жидкостью сепаратора вновь поступает на охлаждение РЭС (рисунок 11.10).

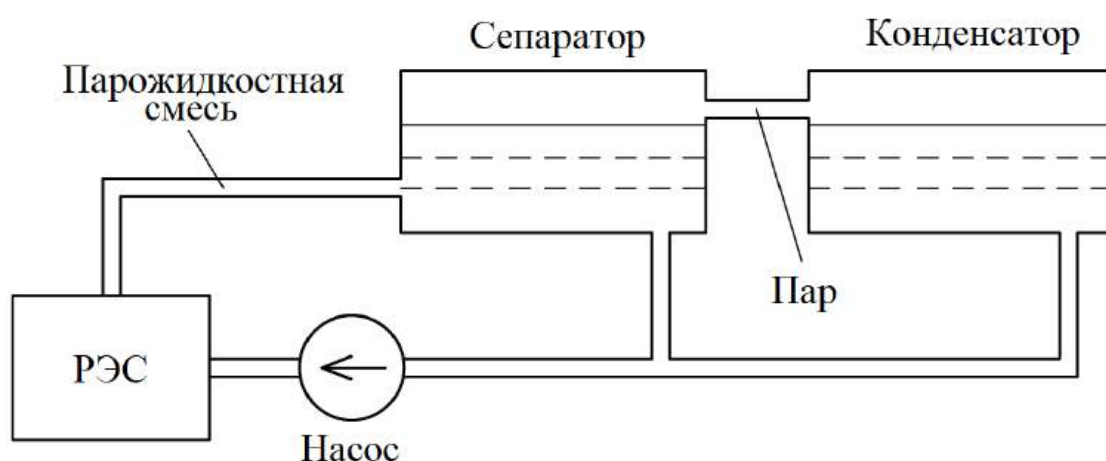


Рисунок 11.10 – Жидкостно-испарительная система охлаждения

Кроме жидкостно-испарительных, применяются **газоиспарительные системы**, в которых испарение нагретых поверхностей производится принудительным потоком газа, содержащим мелкие капли жидкости. Охлаждение при этом осуществляется конвекцией и испарением капель жидкости, осевшей на нагретой поверхности.

Конструктивное исполнение жидкостных и испарительных систем охлаждения может быть различным. В ряде случаев элементы систем охлаждения составляют единое целое с конструкцией РЭА.

Особый тип жидкостной системы охлаждения – **тепловые трубки**, которые всегда включают в состав других систем для повышения эффективности теплопередачи. Такие конструкции применяются в случае, когда необходимо эффективно передать тепло на некоторое расстояние.

Трубка, запаянная с обоих концов, выполняется из материалов с высокой теплопроводностью и внешне не отличается от обычных медных трубок. Внутри она полая, а ее стенки покрыты пористым материалом – фитилем (рисунок 11.11). Трубка заполнена газом или некоторым веществом – так называемым рабочим телом, в качестве которого используется жидкость, которая закипает при невысокой температуре, например около 50 °С.

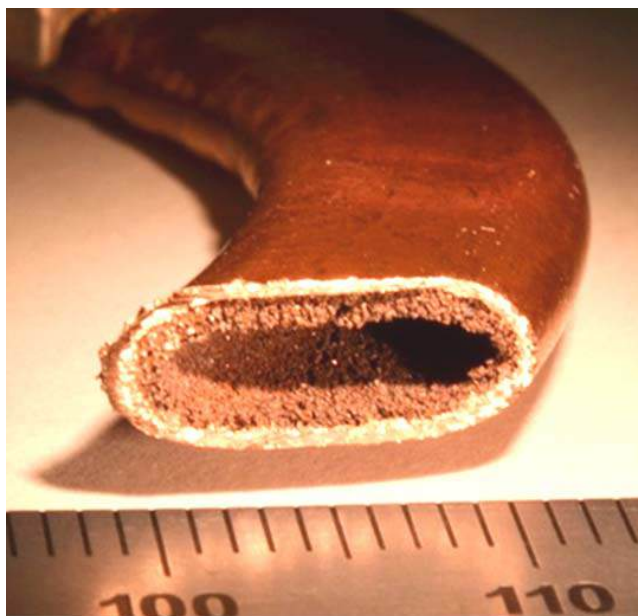


Рисунок 11.11 – Тепловая трубка в разрезе

Один край тепловой трубки располагают на нагреваемом объекте, от которого необходимо отводить теплоту. Другой край контактирует с охлаждающей системой, например с кулером. Принцип работы тепловой трубки заключается в следующем (рисунок 11.12).

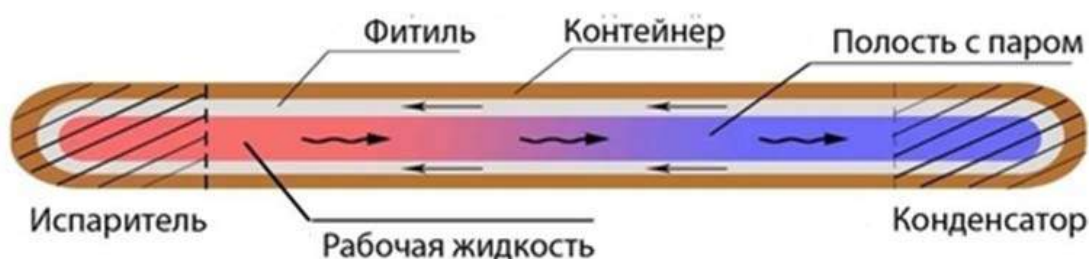


Рисунок 11.12 – Принцип действия тепловой трубки

Когда один край трубки нагревается до температуры кипения рабочего тела, жидкость испаряется и превращается в газ, эффек-

тивно забирая тепловую энергию от источника. Пар перемещается внутри трубки в направлении холодного края. Там парообразное рабочее тело отдает теплоту стенкам трубки, охлаждается и конденсируется на этих стенках, впитываясь в фитиль. Внутри фитиля за счет капиллярных сил жидкое рабочее тело начинает распределяться, дрейфуя в направлении сухого фитиля, т. е. нагреваемого края тепловой трубки. Таким образом, рабочее тело циркулирует между горячим и холодным краями трубки, перенося при этом теплоту.

Для того чтобы обеспечить движение жидкости в трубке при любой ее ориентации в пространстве, нужно преодолеть силу тяжести. Покрывая стенки пористым материалом с капиллярной структурой, удастся достичь подъема жидкости даже против действия сил притяжения, без насосов и помп. Тепло переносится из нагретого места по герметичной трубке без шума и потребления энергии. Широкому распространению данной технологии препятствует малая длина трубок (не более 30 см). Чаще всего тепловые трубки встраивают в радиаторы, что позволяет им более эффективно отводить тепло от разогретой поверхности (рисунок 11.13). В результате удастся немного повысить общую эффективность системы охлаждения при сокращении габаритных размеров радиатора.

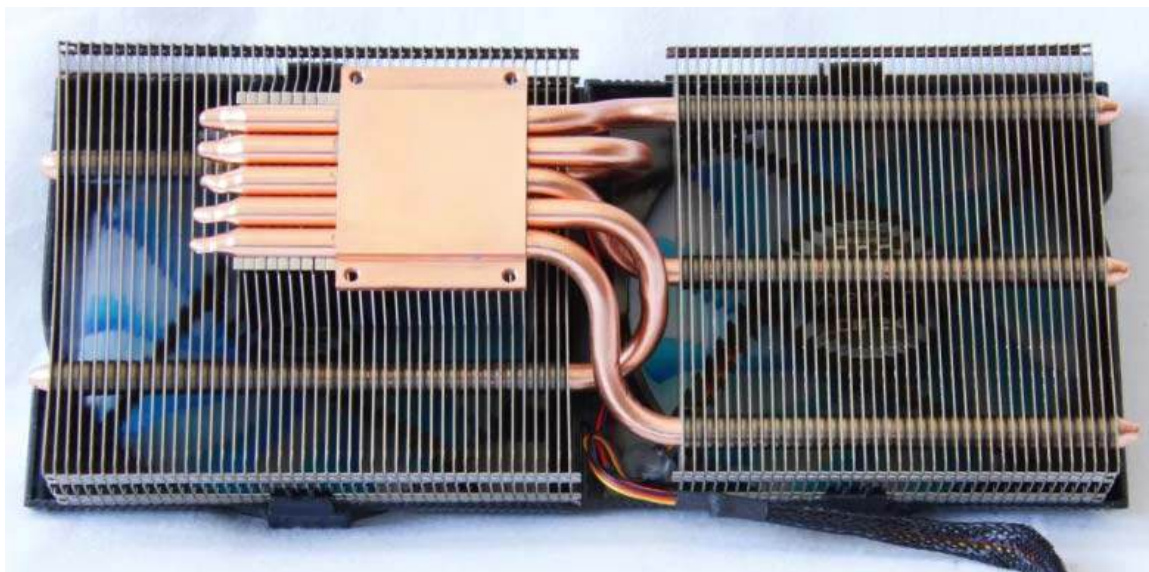


Рисунок 11.13 – Тепловые трубки в радиаторе

Например, тепловые трубки применяются в системах охлаждения процессора большинства ноутбуков и персональных компьютеров. Трубки забирают тепло с процессора и других микросхем и переносят его к кулеру, расположенному у края корпуса. Применение тепловых трубок в этом случае обусловлено жесткими требованиями к габаритным размерам. В ноутбуках невозможно разместить кулер непосредственно на процессоре в отличие от системных блоков.

При эксплуатации тепловых трубок важно, чтобы температура горячего края была выше, чем температура кипения рабочего тела, а температура холодного края – ниже. Только тогда тепловая трубка способна эффективно передавать теплоту, поскольку иначе теплоноситель либо не будет испаряться, либо не будет конденсироваться, что нарушит процесс массопереноса.

Тепловые трубки имеют большой диапазон рабочих температур, скорость передачи тепла превышает скорость звука, а ресурс работы составляет более 20 000 ч, что делает их высокоэффективной и надежной технической системой.

11.3.4 Охлаждение за счет эффекта Пельтье

Согласно второму закону термодинамики тепловая энергия всегда передается от более горячего объекта к более холодному. В пассивных системах охлаждения используется именно этот принцип. Например, нагревающийся транзистор или процессор устанавливается на радиатор, и теплота переходит сначала от компонента к радиатору, а затем от радиатора в окружающую среду. Это возможно лишь в том случае, когда температура компонента выше, чем температура окружающей среды. Очевидно, если температура охлаждающего элемента высока, охладить компонент не удастся. Существуют, однако, технические системы, которые нарушают этот закон.

Еще одна современная технология охлаждения – применение термоэлектроохладителей, действие которых основано на **эффекте Пельтье** – термоэлектрическом явлении переноса энергии при прохождении электрического тока в месте контакта (спая) двух разнородных проводников, от одного проводника к другому. Суть явления заключается в том, что при подаче постоянного тока

в цепь, составленную из двух разнородных проводников, в местах контактов, в зависимости от направления тока, будет выделяться или поглощаться тепло. Количество теплоты зависит от свойств материалов и величины тока.

Изменение температуры проводников при протекании по ним электрического тока наблюдается при контакте различных пар материалов с разными типами проводимости и, соответственно, с разными уровнями энергетических зон. Если через контакт протекает электрический ток, то контактное поле будет либо способствовать, либо препятствовать прохождению тока. Если ток идет против контактного поля, то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется при контакте, что приведет к его нагреву. Если же ток идет по направлению поля, то он может поддерживаться данным полем, которое совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия передается от вещества, что приводит к охлаждению его в этом месте.

В полупроводниках взаимосвязь энергии электронов и температуры проводника выражена более сильно. Полупроводники отличаются уровнями энергий электронов в зоне проводимости. При прохождении электрона через место контакта материалов он приобретает энергию, чтобы суметь перейти в более высокоэнергетическую зону проводимости другого полупроводника пары. При поглощении электроном этой энергии происходит охлаждение места контакта полупроводников. При протекании тока в обратном направлении происходит нагревание места контакта (рисунок 11.14). В элементах Пельтье, чтобы отдалить друг от друга места выделения и поглощения тепла, полупроводники соединяют через металлическую пластину.

В реальном преобразователе Пельтье между двумя керамическими подложками установлены несколько параллелепипедов из теллурида висмута и твердого раствора кремния и германия, спаянных между собой в последовательную цепочку (рисунок 11.15). Эти пары полупроводников *n*- и *p*-типа соединены проводящими перемычками, которые и контактируют с керамическими подложками. Каждая пара образует контакт для прохождения тока от полупроводника *n*-типа к полупроводнику *p*-типа с одной стороны

элемента Пельтье и от полупроводника *p*-типа к полупроводнику *n*-типа с другой стороны.

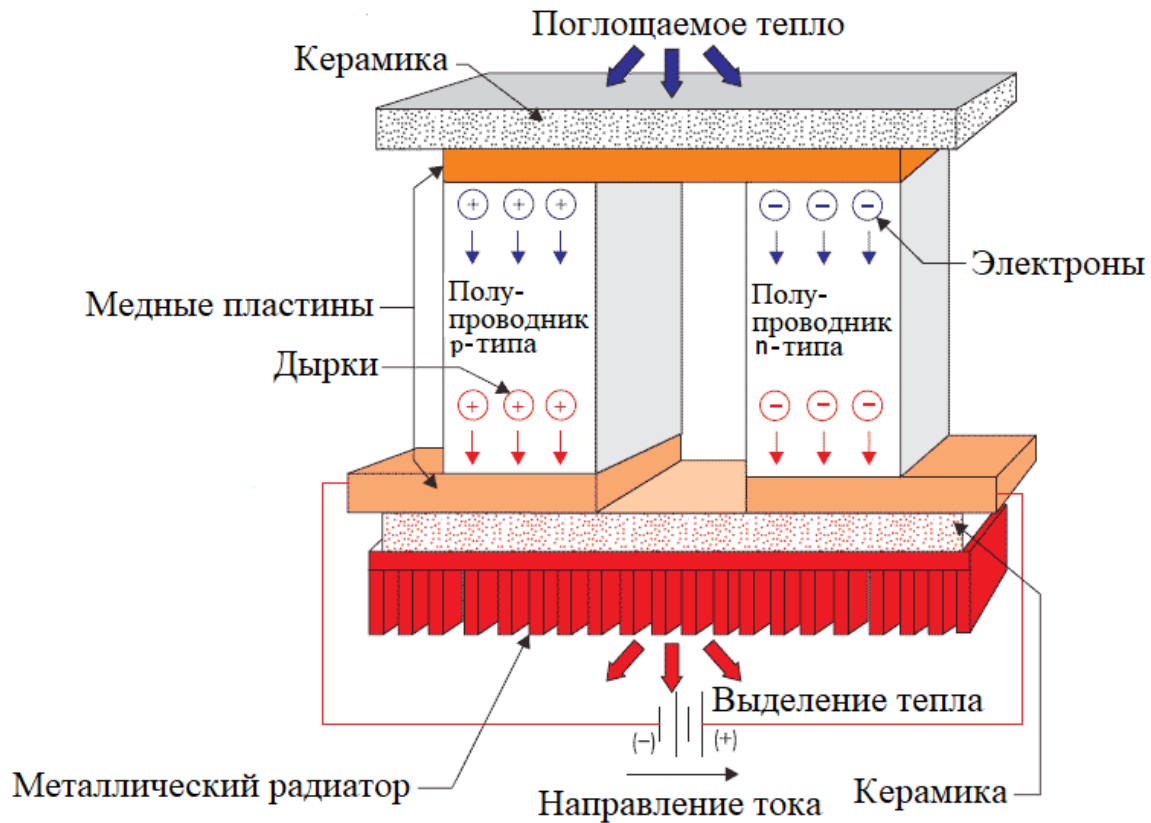


Рисунок 11.14 – Устройство элемента Пельтье

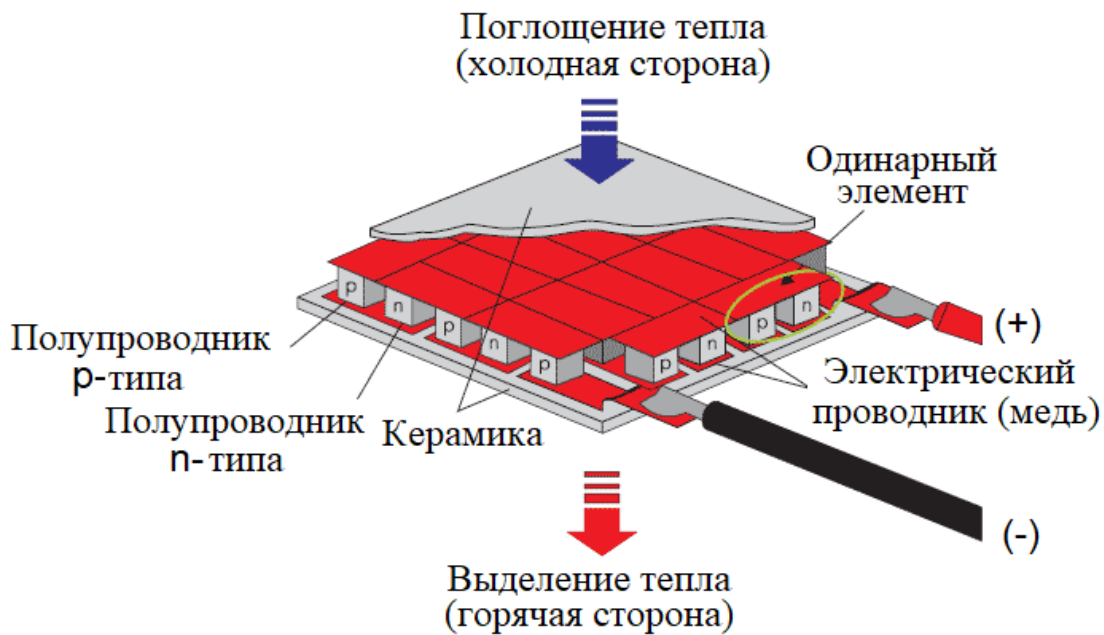


Рисунок 11.15 – Устройство типового термоэлектромодуля

Когда ток проходит через все последовательно соединенные параллелепипеды, то с одной стороны все контакты охлаждаются, а с другой – нагреваются. Если полярность источника изменить, то стороны поменяются. Таким образом, тепло переносится с одной стороны изделия на противоположную, при этом создается разность температур.

Величина перемещенной энергии Q и направление переноса зависят от вида контактирующих веществ и от направления протекающего электрического тока:

$$Q = \Pi I \tau,$$

где Π – коэффициент Пельтье, мВ (справочная величина); I – сила тока, А; τ – время протекания тока, с.

В некоторых случаях для достижения большей эффективности теплоотвода модули каскадируются. Тогда на горячую поверхность первого модуля устанавливается второй чуть большего размера. Иногда собирается целая пирамида модулей (рисунок 11.16). С ее помощью можно достичь разницы температур в 70–75 °С при температуре окружающей среды 25 °С.



Рисунок 11.16 – Каскадный термоэлектромодуль

Существуют элементы Пельтье в виде прямоугольных пластин толщиной 3–6 мм, имеющих длину и ширину в несколько сантиметров (рисунок 11.17). Такие элементы имеют холодопро-

изводительность от нескольких десятков до нескольких сотен ватт.

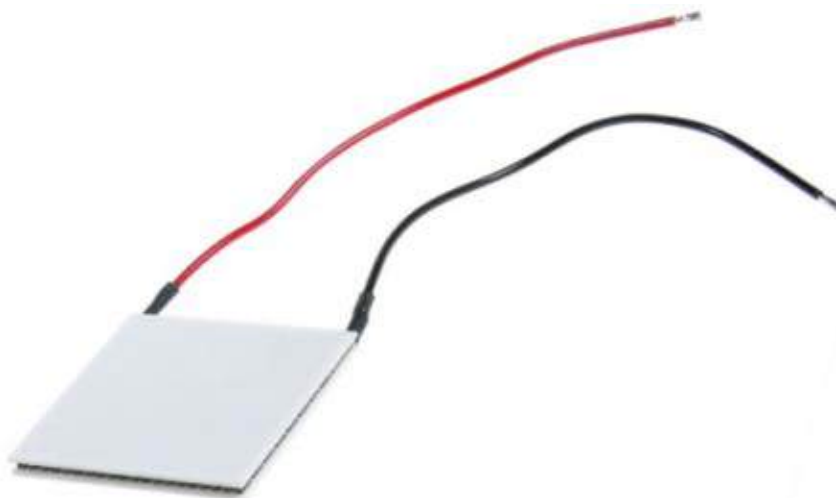


Рисунок 11.17 – Элемент Пельтье в виде пластины

Холодопроизводительность – это мощность тепловой энергии, поглощаемая на «холодной» стороне элемента Пельтье. Стоит помнить, что КПД этого элемента не очень высок. На «горячей» стороне будет выделяться тепловая мощность, которая приблизительно в 3 раза превышает тепловую мощность, поглощаемую на противоположной стороне.

У этого способа охлаждения очень широкие перспективы, так как он лишен многих недостатков, присущих другим способам. Но, пожалуй, главным достоинством его технологии является возможность применения термоэлектромодулей не только для системы охлаждения, но и для стабилизации температуры объекта, поскольку модуль Пельтье одновременно может служить системой охлаждения и нагрева. Достаточно лишь переключить полярность источника питания.

Элементы Пельтье используются в преобразователях тепловой энергии в электрическую: термоэлектрогенераторах, тепловых насосах (охлаждающие устройства, термостаты, кондиционеры), измерительных системах и системах управления в качестве датчиков температуры, теплового потока.

11.3.5 Охлаждение за счет излучения

Тепловое излучение испускают нагретый металл, радиаторы охлаждения на космических аппаратах, аноды электронных ламп, масляные и инфракрасные обогреватели. Вещество излучает электромагнитные волны, поскольку состоит из заряженных частиц и пронизано электромагнитными полями. В частности, при столкновении молекул происходит их ударное возбуждение с последующим высвечиванием.

Известно, что температура характеризуется скоростью теплового движения частиц тела, среды: чем больше скорость, тем выше температура. На Земле при комнатной температуре молекулы воздуха движутся со скоростью около 500 м/с и очень часто сталкиваются между собой. По мере уменьшения плотности воздуха его молекулы сталкиваются реже (длина их свободного пробега возрастает), их скорость становится выше, а следовательно, увеличивается и температура. В атмосфере Земли происходят сложные процессы, и температура ее слоев не прямо пропорциональна плотности воздуха (таблица 11.6) [29].

Таблица 11.6 – Изменение температуры в зависимости от высоты

Высота, км	Давление, кгс/см ²	Концентрация частиц, см ³	Средняя температура, °С
0	1	$2,5 \cdot 10^{18}$	+15
10	0,27	$4,5 \cdot 10^{18}$	–50
20	0,05	$2 \cdot 10^{18}$	–56,5
30	0,01	$4 \cdot 10^{17}$	–46,6
47	10^{-3}	$3 \cdot 10^{16}$	–2,5
60	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{15}	–26
80	10^{-5}	10^{14}	–74,5
102	10^{-8}	10^{12}	–60
200	10^{-10}	10^{10}	+630
800	10^{-13}	10^6	+3040
6500	10^{-16}	1000	+1000...+10 000
Более 22 000	10^{-17}	10–100	+1000...+100 000

До высоты 10 км температура уменьшается и остается далее постоянной до 20 км. На этих высотах сильное влияние на состояние частиц оказывает конвекционное и лучистое равновесие движущихся воздушных масс. Поглощение атмосферным озоном энергии солнечного излучения в ультрафиолетовой части спектра приводит к увеличению температуры вплоть до высоты около 50 км. При больших высотах (до 80 км) в связи с уменьшением концентрации озона происходит некоторое снижение температуры частиц, а при еще бóльших высотах наблюдается возрастание температуры из-за ионизации кислорода под действием ультрафиолетового излучения Солнца. Получается, что космос «горячий» – следовательно, надо принимать меры по защите космического аппарата от высоких температур.

В то же время из-за малой плотности частиц в космическом пространстве они очень редко сталкиваются с помещенными в эту среду предметами и в результате, несмотря на свою высокую температуру, не могут передать им такое количество энергии, которое необходимо для существенного повышения температуры поверхности. Сам предмет не является аккумулятором тепла – это тепло будет посредством излучения сброшено в космос. Соответственно, если поместить какой-либо предмет в пространстве так, чтобы на него не поступали никакие тепловые потоки, то температура предмета с течением времени окажется близкой к абсолютному нулю – значит космос «холодный».

На корпусе космического аппарата обычно располагаются различные устройства. Их тепловой режим может определяться также некоторыми дополнительными источниками тепла (солнечный тепловой поток, отраженный от корпуса, от солнечных батарей). Тепловой режим космических аппаратов в существенной степени определяется и их внутренними источниками тепла (приборы, энергетические установки и пр.).

Конструктор должен решать одновременно две противоположные задачи: предохранять космический аппарат от переохлаждения и от перегрева. Решить первую задачу можно довольно просто – утеплить корпус аппарата своего рода космической «шубой» и, кроме того, подогревать отдельные части его конструкции

(хотя последнее приводит к излишним затратам энергоресурсов). Вторая задача более коварна – охлаждение требует более серьезных усилий.

Улучшить отвод тепла в космос можно двумя способами. Во-первых, с помощью обработки излучающей или, как ее еще принято называть, радиационной поверхности. Широкое распространение получило, например, нанесение на эту поверхность специальных лакокрасочных покрытий. Во-вторых, можно отказаться от полной теплоизоляции одной из сторон прибора (т. е. уменьшить отношение воспринимающей и излучающей тепловой поток площадей). Тогда тепло будет поступать на прибор с одной стороны, а излучаться – с двух.

Таким образом, с помощью сравнительно простых мер можно добиться того, чтобы средняя температура оболочки космического аппарата, нагреваемой солнечными лучами, была довольно низкой. Однако космический аппарат, как уже отмечалось, нагревается не только Солнцем, но и теплом, выделяемым его бортовой аппаратурой. Отвести это избыточное тепло можно путем увеличения площади радиационной поверхности.

11.4 Контактное тепловое сопротивление

Передача тепла внутри твердого тела происходит за счет тепловых колебаний молекул, т. е. теплопроводности материала. Если два объекта соприкасаются, то между ними также будет происходить обмен тепла. При этом каждый объект будет оказывать тепловому потоку сопротивление, зависящее от теплопроводности материала. Однако в этой ситуации появляется еще один компонент – **контактное тепловое сопротивление**. Оно возникает потому, что два разнородных объекта всегда прилегают друг к другу неидеально плотно. Вследствие наличия шероховатости у любого реального материала их поверхности контактируют лишь частично. Из-за возникновения контактного сопротивления между контактирующими поверхностями образуется разность температур (рисунки 11.18, 11.19).

Величина контактного теплового сопротивления зависит от ряда факторов, таких как степень шероховатости поверхности, наличие мелких посторонних объектов в местах контакта (попадание пыли, мелкой стружки), степень прижатия поверхностей, степень чистоты (загрязнения) поверхностей. В электронике для уменьшения теплового сопротивления на контакте радиаторов и охлаждаемых компонентов используют термопрокладки, теплопроводящие пасты, клеи, компаунды.

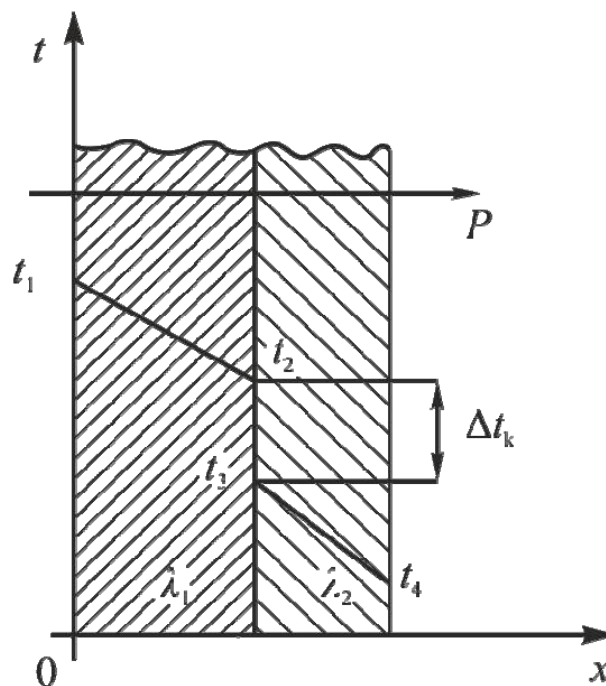


Рисунок 11.18 – Разность температур между контактирующими поверхностями

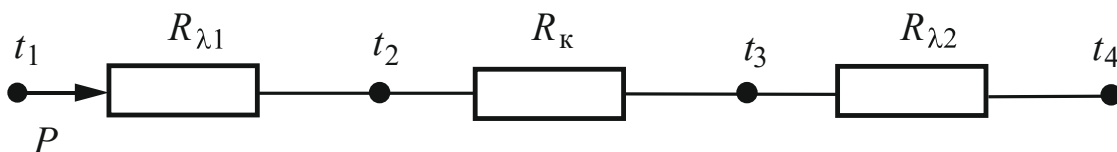


Рисунок 11.19 – Тепловая схема распределения температур между контактирующими поверхностями

Термопрокладки – это пластичный и универсальный материал, предназначенный для охлаждения тех узлов, где не требуются высокие требования по эффективности. Основным преимуществом термопрокладки является ее способность заполнять любые пустоты за счет своей эластичности, при этом она сохраняет возможность проводить тепло.

Теплопроводящая паста (термопаста) – одно из наиболее распространенных средств уменьшения теплового контактного сопротивления. Она требует минимального зазора между охлаждаемым элементом и системой охлаждения. Принцип ее работы заключается в заполнении свободного пространства между поверхностями контакта. Таким образом термопаста вытесняет воздух и повышает теплопроводность контакта. Недостаток термопасты в том, что при нагревании она разжижается и со временем может вытечь из места теплового контакта, в результате чего сопротивление теплового контакта возрастет.

Термоклей в отличие от термопасты сохраняет пластичность только некоторое время после нанесения на поверхность. После истечения этого времени клей схватывается и образует крайне прочное соединение, способное удерживать вес радиатора без дополнительной фиксации. Недостаток термоклей – прочность фиксации не позволяет легко снять радиатор с охлаждаемого элемента. Велик риск в процессе снятия повредить элемент.

Тепловое сопротивление в месте контакта тепловыделяющего элемента с поверхностью охлаждения можно рассчитать. Например, при наличии на радиаторе транзистора тепловое сопротивление можно определить, составив предварительно тепловую схему (рисунок 11.20).

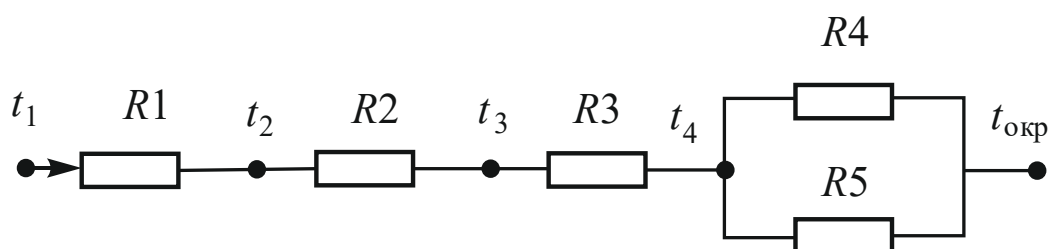


Рисунок 11.20 – Тепловая схема транзистора на радиаторе

На рисунке обозначено: t_1 – температура $p-n$ -перехода; R_1 – термодинамическое сопротивление $p-n$ -переход – корпус; t_2 – температура корпуса транзистора; R_2 – термодинамическое сопротивление контакта транзистор – радиатор; t_3 – температура внутренней поверхности радиатора; R_3 – термодинамическое сопротивление радиатора от места контакта с транзистором до наружной поверхности оребрения; t_4 – температура наружной по-

верхности радиатора; R_4 – термодинамическое сопротивление конвективной теплоотдачи радиатора; R_5 – термодинамическое сопротивление лучевой теплоотдачи радиатора; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Сделаем следующие оговорки. Во-первых, если транзистор закреплен на радиаторе через диэлектрическую прокладку, что часто бывает, это увеличивает контактное переходное сопротивление. Для более точного учета можно ввести в схему дополнительные компоненты – сопротивление прокладки и сопротивления контакта с обеих ее сторон. Во-вторых, термодинамическое сопротивление радиатора, как правило, сравнительно низкое, в результате разница температур наружной и внутренней поверхностей радиатора незначительна. Если высокой точности расчетов не требуется, сопротивлением R_3 можно пренебречь, считая температуру радиатора одинаковой во всех точках. В-третьих, если лучевой теплоотдачей радиатора можно пренебречь, то сопротивление R_5 также исключается из схемы.

Теперь по аналогии с законом Ома составим уравнение для полученной схемы:

$$\Delta t = (t_1 - t_{\text{окр}}) = P \left(R_1 + R_2 + R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right),$$

где Δt – разница температур между кристаллом и окружающей средой, К; P – мощность тепловыделения ЭРИ, Вт.

Тепловое сопротивление каждого материала, составляющего тепловую схему, рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda S},$$

где δ – толщина материала, м; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); S – площадь, занимаемая материалом, м².

Температура кристалла будет превышать температуру окружающей среды:

$$t_1 = t_{\text{окр}} + \Delta t.$$

Расчет ведется для наихудшего случая, поэтому учитывается максимальная температура окружающей среды. Она должна быть

известна исходя из условий эксплуатации устройства. Максимально допустимая температура кристалла оговаривается в нормативном документе на ЭРИ.

Как правило, основная теплоотдача идет за счет конвекции. Из уравнения конвективной теплоотдачи $P = \alpha S \Delta T$ получаем значение термодинамического сопротивления конвективной теплоотдачи радиатора:

$$R_4 = \frac{1}{\alpha S}.$$

Задав коэффициент конвективной теплоотдачи, можно определить площадь радиатора S , обеспечивающую эффективный теплоотвод от нагретого ЭРИ.

Контрольные вопросы

1. Какие виды теплопередачи существуют?
2. Из каких материалов изготавливаются радиаторы?
3. Какие меры применяются для реализации естественного воздушного охлаждения?
4. Какие меры применяются для реализации принудительного воздушного охлаждения?
5. Как работают тепловые трубки?
6. За счет какого эффекта можно охладить нагретое тело до температуры ниже температуры теплоносителя?
7. По какой причине возникает контактное тепловое сопротивление?
8. Как можно уменьшить контактное тепловое сопротивление?

12 ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

12.1 Виды механических воздействий

Все виды РЭА подвергаются воздействию внешних механических нагрузок, которые передаются к каждой детали, входящей в конструкцию.

На транспортируемую РЭА в процессе ее эксплуатации воздействуют вибрации, ударные нагрузки и линейные ускорения. **Вибрации** характеризуются частотой, амплитудой и ускорением. **Ударные нагрузки** – числом одиночных ударов или их серий (обычно оговаривается максимальное число ударов), длительностью ударного импульса и его формой, мгновенной скоростью при ударе, перемещением соударяющихся тел. **Линейные ускорения** описываются ускорением, длительностью, знаком воздействия ускорения.

Причинами механических воздействий могут быть вибрации движущихся частей двигателя, перегрузки при маневрировании, стартовые перегрузки, воздействие окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы, взрывная волна и т. п.), небрежность обслуживающего персонала и другие причины. При транспортировке РЭА вибрация возникает из-за периодического биения колес о стыки рельс, неровностей и швов на дорогах. Частота вибраций может достигать сотен и тысяч герц. Вибрационные нагрузки на судах обусловлены работой винтов и двигателей. Частота и амплитуда вибраций зависят от типа судна, его машинного оборудования и места расположения РЭА, но обычно не превышает 150 Гц.

При перевозке сухопутным транспортом возникают удары, толчки и тряска, особенно во время торможения и маневрирования на большой скорости по грунтовым дорогам, на уклонах и подъемах. На судовом транспорте ударные механические нагрузки создаются во время шторма при ударах волн и качке судна.

Количество переданной энергии определяет уровень и характер конструкции. Допустимые уровни механического изменения конструкции определяются ее прочностью и устойчивостью к механическим воздействиям. Под **прочностью конструкции** понимается способность аппаратуры выполнять функции и сохранять параметры после приложенного механического воздействия. **Устойчивость конструкции** – способность РЭА выполнять свои функции и параметры в процессе механического воздействия.

Откликом, или реакцией конструкции на механические воздействия, называют трансформацию и преобразование энергии механического возбуждения. Механические воздействия могут приводить к взаимным перемещениям деталей и узлов, деформации крепежных, несущих и других элементов конструкций, их соударению. При незначительных механических воздействиях в элементах конструкций возникают упругие деформации, не сказывающиеся на работоспособности аппаратуры. Увеличение нагрузки приводит к появлению остаточной деформации и при определенных условиях – к разрушению конструкции. Разрушение может наступить и при нагрузках, много меньших предельных значений статической прочности материалов, если эти нагрузки знакопеременные. В результате воздействия ударов, вибраций и линейных ускорений могут иметь место следующие повреждения РЭА:

- нарушение герметизации из-за повреждения паяных, сварных и клеевых швов и появление трещин в металлостеклянных спаях;
- полное разрушение корпуса или отдельных его частей от механического резонанса и усталости;
- обрыв монтажных связей;
- отслаивание печатных проводников;
- расслаивание многослойных ПП;
- поломка керамических подложек интегральных схем;
- выход из строя разъемных и неразъемных электрических контактов;
- смещение положения органов управления и настройки;

– выход из строя механических узлов (подшипники, зубчатые зацепления, крепеж и т. п.).

Отказы аппаратуры бывают восстанавливаемыми (после снятия или ослабления механического воздействия – изменение параметров компонентов, возникновение электрических шумов) и невосстанавливаемыми (обрыв и замыкание электрических соединений, отслаивание проводников ПП, нарушение элементов крепления, разрушение несущих конструкций).

12.2 Вибрации

Наибольшее разрушающее воздействие на конструкцию РЭА оказывают вибрации. Как правило, конструкция аппарата, выдержавшая воздействие вибрационных нагрузок в определенном частотном диапазоне, выдерживает ударные нагрузки и линейные ускорения с большими значениями параметров [30].

Вибрация – это колебание твердых тел. В более узком смысле это механические колебания, оказывающие ощутимое влияние на лабораторный прибор. Также вибрация представляет собой механическое движение вокруг точки равновесия. Другими словами, это механическое явление, когда к конструкциям прилагается динамическая внешняя сила, вызывающая колебательное движение, которое повторяется через определенный промежуток времени. Низкочастотная вибрация не ощущается во время повседневной деятельности, но может отрицательно влиять на высокопроизводительные полупроводниковые метрологические инструменты и приборы, производство дисплеев, электронной микроскопии. Под вибрацией аппаратуры понимают механические колебания ее элементов или конструкции в целом. Вибрация может быть периодической и случайной. Периодическая вибрация делится на гармоническую и полигармоническую.

Гармоническая вибрация сравнительно редко встречается в реальных условиях, но широко используется при лабораторных испытаниях и анализе динамических характеристик конструкций, а также для определения реакции системы при более сложных

формах вибрации. Параметрами воздействия гармонической вибрации являются частота, амплитуда и ускорение.

Виброперемещение $Z(t)$ при гармонической вибрации (рисунок 12.1) описывается выражением

$$Z(t) = S \sin(\omega t + \varphi),$$

где S – амплитуда виброперемещения; ω – угловая частота; t – время; φ – начальная фаза колебания.

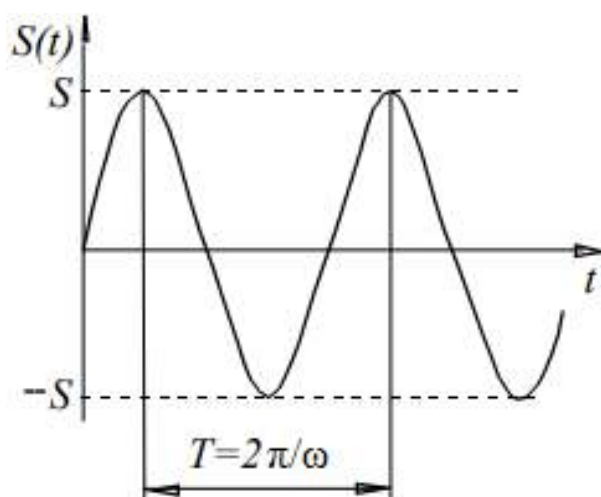


Рисунок 12.1 – Гармоническая вибрация (форма)

Виброскорость $\dot{Z}(t)$ и виброускорение $\ddot{Z}(t)$ находят путем последовательного дифференцирования выражения виброперемещения:

$$\dot{Z}(t) = \omega S \cos \omega t; \quad \ddot{Z}(t) = \omega^2 S \sin \omega t,$$

где ωS – амплитуда виброскорости; $\omega^2 S$ – амплитуда виброускорения.

Гармоническая вибрация характеризуется коэффициентом виброперегрузки

$$n_b = \frac{S_0}{g} = \frac{S\omega^2}{g} = \frac{Sf^2}{250},$$

где f – частота, Гц.

На практике РЭА подвергается влиянию целого спектра частот вибрации, т. е. вибрация сложная периодическая – **полигар-**

моническая. Таковую вибрацию создают электродвигатели, вентиляторы и другие электромеханические устройства, имеющие несбалансированные быстровертающиеся массы. Ее можно разложить на сумму гармонических составляющих (рисунок 12.2).

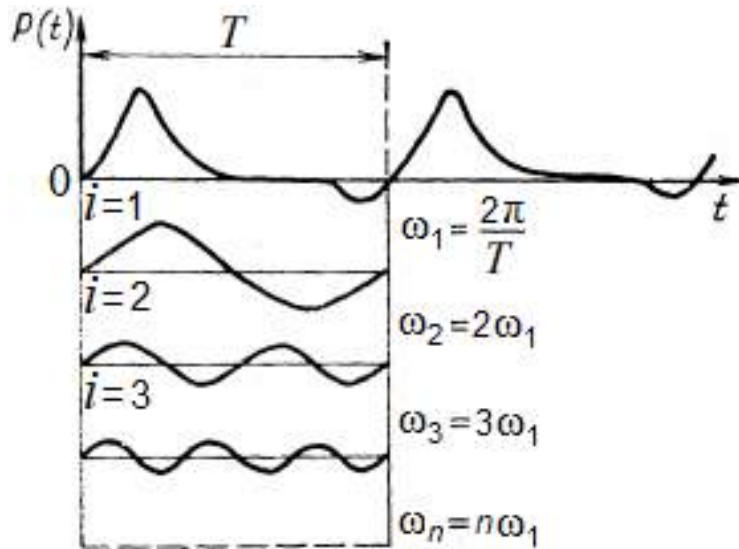


Рисунок 12.2 – Разложение периодической кривой в гармонический ряд

Аналитически это разложение может быть представлено рядом Фурье

$$P(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos \omega_i t + b_i \sin \omega_i t),$$

где $\omega_i = i\omega$. В свою очередь $\omega = 2\pi/T$ – основная частота, соответствующая периоду изменения возмущающей силы.

Коэффициенты разложения a_i и b_i определяются по формулам

$$a_i = \frac{2}{T} \int_0^T P(t) \cos i\omega t dt; \quad b_i = \frac{2}{T} \int_0^T P(t) \sin i\omega t dt$$

и представляют собой амплитуды косинусных и синусных составляющих каждой из гармоник. Амплитуда S_i и начальная фаза φ_i каждой i -й гармоники с частотой $\omega_i = i\omega$ определяются по формулам

$$S_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_i = \frac{b_i}{a_i}.$$

Совокупность частот $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, расположенных в порядке их возрастания, называется частотным спектром, а совокупность амплитуд $S_1, S_2, \dots, S_n$ – амплитудным спектром данного периодического возмущения (рисунок 12.3).

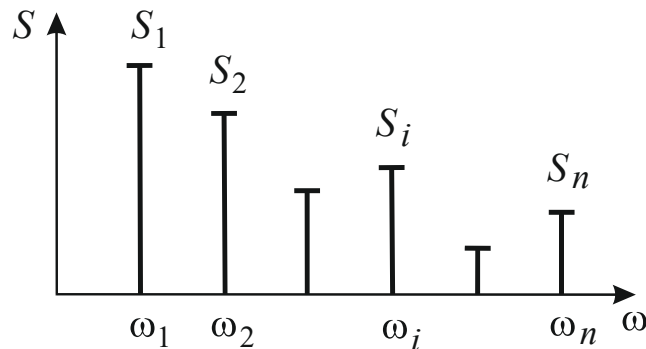


Рисунок 12.3 – Амплитудный спектр периодического процесса

Из-за ограниченных энергетических возможностей источников вибрации высшие гармоники имеют малую амплитуду. Поэтому, а также из-за трудностей учета всех гармоник, рассматривают главным образом низкочастотную часть спектра и в первую очередь гармоники с относительно большими амплитудами.

Вибрация, параметры которой (амплитуда виброперемещения, частота и др.) изменяются во времени случайным образом, называется *случайной*. Она может быть стационарной и нестационарной. У стационарной вибрации математическое ожидание виброперемещения равно нулю, математическое ожидание виброскорости и виброускорения постоянно, корреляционная функция не зависит от начала отсчета. У нестационарной вибрации статистические характеристики не постоянны. К такому виду можно отнести вибрацию, возникающую при движении транспортных средств, при работе реактивных двигателей.

Вибрации характеризуются диапазоном частот и ускорением в g . Свойство радиоэлектронной аппаратуры противодействовать их влиянию характеризуется вибропрочностью и виброустойчивостью. **Вибропрочность** – способность конструкции РЭА про-

тивостоять разрушающему воздействию вибрации в нерабочем состоянии и продолжать нормально работать после включения и снятия вибрационных нагрузок. **Виброустойчивость** – способность РЭА выполнять заданные функции во включенном состоянии при воздействии вибраций.

12.3 Удары

Аппаратура может подвергаться ударным воздействиям, возникающим при транспортировке, монтаже или эксплуатации, при действии ударной волны и т. д.

Удар – кратковременное (длительностью менее 0,1 с) и непериодическое силовое воздействие на элементы конструкции со стороны объекта-носителя. Удар характеризуется длительностью импульса (от долей до десятков миллисекунд), ускорением (от десятков до тысяч g) и числом ударов (одиночные и многократные удары). Интенсивность ударного воздействия зависит от формы, амплитуды и длительности ударного импульса. При ударах возможно разрушение деталей и узлов в местах крепления. Формой ударного импульса называется зависимость ударного ускорения от времени (рисунок 12.4).

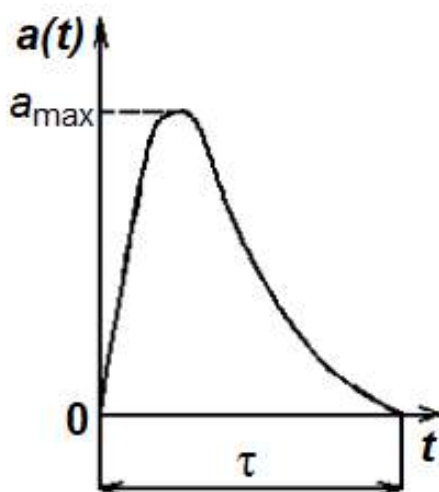


Рисунок 12.4 – Графическое изображение ударного импульса

Для упрощения при расчетах форму ударного импульса идеализируют, заменяя ее подходящей более простой формой, например полусинусоидальной, прямоугольной, треугольной (рисунок 12.5). При замене реального импульса идеализированным особое внимание обращается на крутизну фронта и среза, так как от них зависит «жесткость» удара. Амплитудой импульса называют максимальное значение ударного ускорения A , а длительностью – интервал времени действия импульса τ . Эти характеристики задаются обычно для расчета ударных воздействий и конструирования средств защиты.

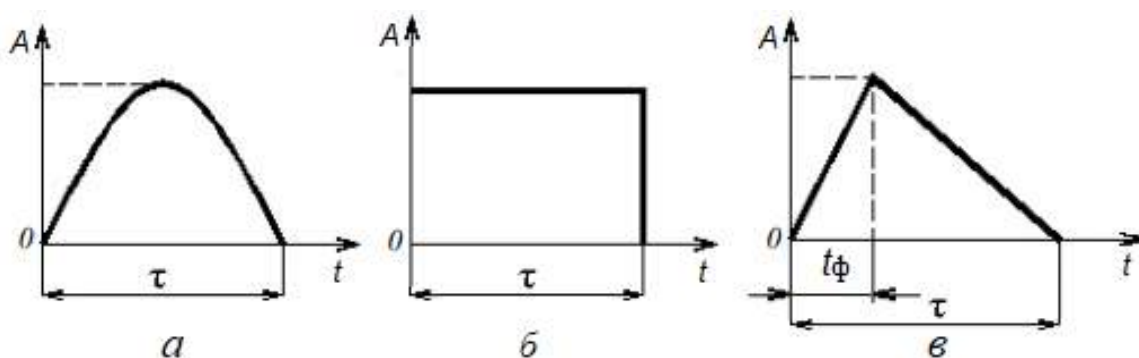


Рисунок 12.5 – Формы ударных импульсов:
 a – полусинусоидальная; $б$ – прямоугольная;
 $в$ – треугольная

Величину коэффициента перегрузки от удара можно описать формулой

$$n_{\text{уд}} \approx 0,05 \frac{V_{\text{уд}}}{S},$$

где $V_{\text{уд}}$ – изменение скорости за время удара, м/с; S – перемещение тела во время удара, м.

В процессе эксплуатации аппаратура может подвергаться действию не только одиночных, но и многократных ударов. В этом случае нормируется количество ударов и минимальный период их следования.

Ударные воздействия возникают также при падении блока с некоторой высоты, например из-за его небрежной перестановки на новое место, при погрузочно-разгрузочных работах.

12.4 Линейные ускорения

Линейные ускорения присущи всем объектам, движущимся с переменной скоростью (например, при разгоне, торможении), и характеризуются ускорением в g (например, $5g$, $7g$ и т. д.), а также длительностью воздействия. Влияние линейных ускорений на детали конструкций и ЭРИ обусловлено инерционными силами, которые могут достигать силы тяготения и во много раз превышать ее. Эти ускорения возникают обычно на этапах взлета и посадки летательных аппаратов. По характеру действия на аппаратуру линейное ускорение эквивалентно статическому нагружению.

При расчетах аппаратуры, работающей в условиях линейных ускорений, последние обычно считаются равными максимальному их значению за все время действия либо изменяющимися по ступенчатому или линейному закону. Линейное ускорение часто задается в виде перегрузки – отношения действующего ускорения к ускорению свободного падения:

$$n = \frac{a}{g}.$$

Значение перегрузки показывает, во сколько раз дополнительная сила больше силы тяжести, действующей на РЭА. Величина перегрузки при линейном ускорении описывается формулой

$$n_{\text{лн}} = \frac{\Delta V}{\Delta t g},$$

где ΔV – изменение скорости за время перегрузки, м/с; Δt – время перегрузки, с.

При движении объекта по криволинейной траектории, например по дуге окружности радиусом R , элементы конструкции аппарата будут испытывать центробежное ускорение

$$a = m\Omega^2 R = \frac{mV^2}{R},$$

где m – единичный вектор, направленный от данной точки траектории к центру ее кривизны; Ω – угловая скорость движения от-

носителем кривизны траектории; V – линейная скорость движения объекта.

Центробежная перегрузка определяется по формуле

$$n_{цб} = 0,004 R f_{об}^2,$$

где R – радиус движения объекта, м; $f_{об}$ – частота совершаемых оборотов по этой траектории, Гц.

В технических условиях на аппаратуру часто задают значение изменения ускорения во времени $a(t)$ и длительность его действия τ (рисунок 12.6) в виде ступенчатой функции.

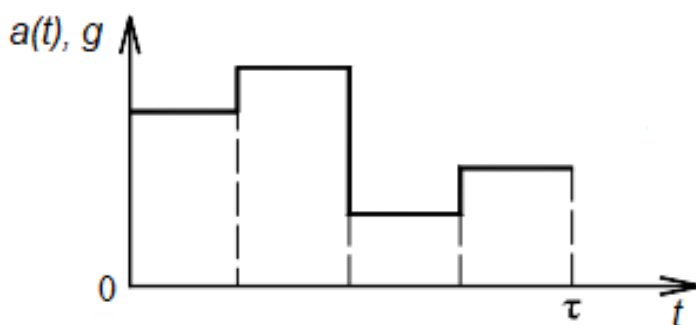


Рисунок 12.6 – Изменение линейного ускорения

Трудность борьбы с влиянием линейных перегрузок заключается в том, что они практически не поддаются ослаблению. Обеспечение работоспособности элементов конструкции может быть достигнуто только за счет увеличения их жесткости или прочности, что ведет к увеличению массы. Так как силы инерции являются нагрузкой для элементов, то повышение их прочности может быть достигнуто за счет применения материалов с более высоким отношением $[\sigma]/\rho$, где $[\sigma]$ – допустимое напряжение; ρ – плотность.

Жесткость конструкции есть отношение действующей силы к деформации конструкции, вызванной этой силой. Под **прочностью** понимают нагрузку, которую может выдержать конструкция без остаточной деформации или разрушения. Повышение прочности конструкции РЭА связано с усилением ее конструктивной основы, применением ребер жесткости, стопорением болтовых соединений и т. д.

Особое значение имеет повышение прочности несущих конструкций и входящих в них узлов методами заливки и обволакивания. Заливка пеноматериалом позволяет сделать узел монолитным при незначительном увеличении массы.

12.5 Методы защиты конструкции от механических воздействий

Задача конструктора РЭА состоит в обеспечении таких свойств устойчивости и прочности конструкции, которые требуются по техническому заданию на изделие. Механическая энергия в результате механических воздействий поступает на рассматриваемый объект по определенной схеме (рисунок 12.7).

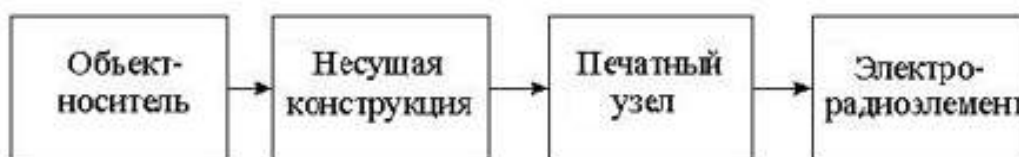


Рисунок 12.7 – Схема распространения механической энергии в РЭА

Таким образом, защитить объект от разрушающей энергии можно, используя следующие принципы:

- изоляция объекта от источника энергии;
- повышение защитных свойств самого объекта;
- комбинация предыдущих принципов.

Для первого принципа необходимо наличие специальных элементов, второй же принцип не требует этих элементов. Для изоляции объекта от источника механической энергии можно использовать эффекты отражения и/или поглощения энергии, которыми обладают два типовых элемента – пружина и демпфер. На практике используют специальные элементы – **амортизаторы** (рисунок 12.8). Поглощение энергии называется **демпфированием**. Оно обусловлено рассеянием энергии в результате трения в материале амортизатора (резина), в сочленениях (сухой демпфер), в среде (воздушный и жидкостный демпфер). Для уменьшения

воздействия вибраций и ударов аппаратуру устанавливают на амортизаторы или применяют демпфирующие материалы [31].



Рисунок 12.8 – Демпферы для РЭА:
а – ножки; б – амортизаторы

Любая конструкция представляет собой колебательную систему, обладающую **собственной частотой**, на которой система резонирует или колеблется, когда на нее не воздействует внешняя сила. Более высокая жесткость и меньшая масса указывают на высокую собственную частоту, а меньшая жесткость и большая масса – на низкую. Резонанс возникает в случае, если вынужденная частота совпадает с собственной частотой системы, что приводит к большим колебаниям. Частота, при которой амплитуда отклика является относительным максимумом, известна как **резонансная частота**. Такие материалы, как эластомеры и пружины, часто используемые для виброизоляции, могут фактически усилить вибрацию полезной нагрузки, если их собственная или резонансная частота близка к частоте вибрации, которую необходимо ослабить [31].

Частота собственных колебаний системы зависит от ее конструктивных параметров. Во избежание резонансных явлений резонансные частоты ЭРИ должны быть в 2–3 раза больше, чем у печатных узлов, а резонансные частоты печатных узлов и остальных частей конструкции должны в 2–3 раза превышать верхнюю частоту спектра входных воздействий. При невозможности вы-

полнить последнее требование за счет изменения свойств только перечисленных частей конструкции, РЭА должна быть установлена на амортизаторы, что приведет к уменьшению верхней частоты спектра входных воздействий непосредственно на нее. Сами же несущие конструкции устройства (шасси, стойки) выполняются достаточно жесткими, с большой резонансной частотой, вследствие чего колебания передаются к печатным узлам без изменения амплитудно-частотного спектра.

Таким образом, для защиты радиоэлектронной аппаратуры от механических воздействий существует несколько способов:

- повышение резонансных частот конструкции с целью выхода их за пределы частотного спектра входной вибрации;
- применение вибропоглощающих материалов для уменьшения коэффициента передачи колебаний при резонансе (отношение амплитуд колебаний на выходе и входе механической системы при заданной частоте) и, следовательно, уменьшения вибронагрузок на конструкцию;
- использование амортизаторов, уменьшающих верхнюю частоту спектра вибрации.

Собственные частоты прямоугольных пластин постоянной толщины, состоящих из упругого однородного материала (монтажные платы, крышки и др.), определяются по формуле

$$f_0 = 10^4 \frac{ch}{a^2},$$

где c – коэффициент, зависящий от способа закрепления платы, соотношения сторон и материала платы; h – толщина пластины, см; a – длина пластины, см.

Для упрощения расчета многослойную пластину, неоднородную по толщине (ПП), приводят к однородной однослойной пластине. Очевидно, что для повышения резонансной частоты можно менять конструктивные характеристики и материалы элементов. В частности, повысить резонансную частоту поперечных колебаний ПП можно следующими способами:

- применить более жесткое закрепление краев ПП (например, рамочную конструкцию с приклеиванием краев);

- уменьшить размеры ПП или применить квадратную конфигурацию;
- увеличить толщину ПП;
- применить материал основания ПП с большим модулем упругости (например, вместо гетинакса – стеклотекстолит);
- сделать дополнительное крепление центра ПП к шасси блока;
- применить ребра жесткости и т. д.

Наибольшую опасность представляют поперечные колебания ПП, так как их резонансная частота значительно ниже, чем продольных. Различают точечное закрепление ПП в конструкции блока и сплошное. В первом случае плата крепится винтами в нескольких точках (рисунок 12.9).

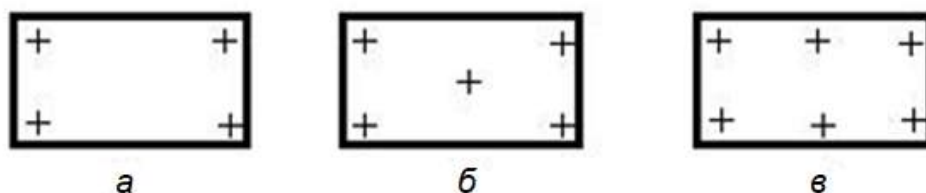


Рисунок 12.9 – Точечное закрепление печатной платы:
а – четырехточечное; *б* – пятиточечное;
в – шеститочечное

При сплошном закреплении фиксируется одна или несколько сторон платы целиком. Различают следующие случаи сплошного закрепления сторон ПП: зажатый край (или жесткое защемление), опертый край (или шарнирное опирание) и свободный край (рисунок 12.10).

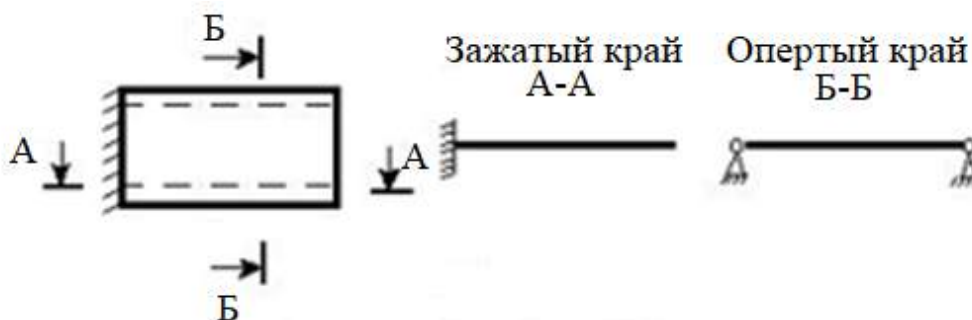


Рисунок 12.10 – Способы сплошного закрепления
 сторон печатной платы

Реальные способы закрепления могут отличаться от предложенных в зависимости от компоновки РЭА. Так, закрепление сторон платы в направляющих блока РЭА принимают за шарнирное опирание. Зажатым считается край платы с многоконтактным электрическим соединителем и жесткими выводами.

Для повышения резонансной частоты ПП необходимо выбирать пяти- или шеститочечное закрепление либо зажатие по периметру платы. Для повышения резонансной частоты ЭРИ существуют два способа:

- уменьшение длины выводов;
- приклеивание ЭРИ к ПП.

При установке ЭРИ на клей резонансная частота определяется только собственными колебаниями выводов и поэтому в вибропрочных конструкциях их длина должна быть минимальной.

Повышение резонансной частоты конструктивных элементов позволяет лишь исключить резонанс, но не предотвращает воздействие на элемент внешней механической энергии.

В случае невозможности вывода резонансной частоты конструкции за пределы диапазона воздействующих частот необходимо уменьшить коэффициент передачи энергии. Известно, что коэффициент передачи колебаний ПП на резонансной частоте обычно пропорционален коэффициенту механических потерь. Для увеличения этого коэффициента и, следовательно, уменьшения резонансных явлений в конструкции используют полимерные вязкие компаунды с большим коэффициентом механических потерь (рисунок 12.11).

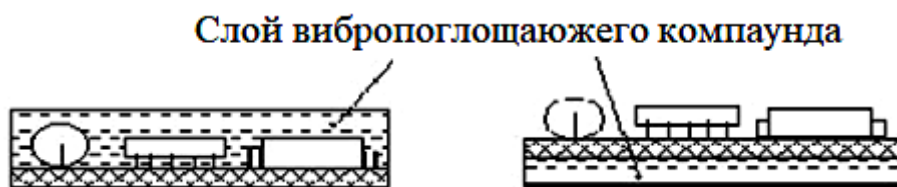


Рисунок 12.11 – Заливка платы
вибропоглощающим компаундом

Наиболее часто используют следующие способы:

- приклеивание электрорадиоизделия к плате вибропоглощающим компаундом;

- заливка платы вибропоглощающим компаундом;
- склеивание слоев МПП вибропоглощающим компаундом.

Принцип **виброизоляции** заключается в размещении между местом установки и РЭА специальных устройств – амортизаторов (виброизоляторов), которые поглощают и отражают механическую энергию. **Виброизоляция** – это изоляция объекта от источников вибрации. Ее цель заключается в том, чтобы сделать собственную частоту системы ниже, чем вынужденная частота, и подавить резонанс на собственной частоте системы.

Демпфирование – это уменьшение или ограничение механических колебаний путем рассеивания энергии, накопленной в колебательной системе. Примером демпфера является незатухающая пружина, которая приводит к пикам амплитуды колебаний на резонансной частоте. С другой стороны, демпфированная пружина уменьшает амплитуду колебаний при резонансе. Наиболее эффективно использование этого подхода при защите от вибрационных нагрузок. Виброизолятор представляет собой колебательную систему с низкой резонансной частотой и малым коэффициентом передачи колебаний в зарезонансной области. За счет этого уменьшается частотный спектр вибрации, передаваемой от основания к блоку [31].

Важнейшая характеристика амортизирующего крепления, определяющая его эффективность, – это частота свободных колебаний, или собственная частота системы амортизации. Частота свободных колебаний определяет наибольшее допустимое перемещение амортизируемого оборудования относительно фундамента при вибрационном воздействии – чем она ниже, тем больше амплитуда этого перемещения при резонансе. Основные характеристики колебательной системы – частоты свободных поступательных колебаний в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а также поворотных колебаний относительно осей инерции оборудования (рисунок 12.12). Они зависят от жесткости системы и массы оборудования.

Эффективность системы амортизации оборудования оценивается **коэффициентом амортизации** – безразмерной величиной, которая определяется как отношение амплитуды перемещения

амортизируемого оборудования к амплитуде перемещения фундамента, на котором оно установлено (рисунок 12.13).

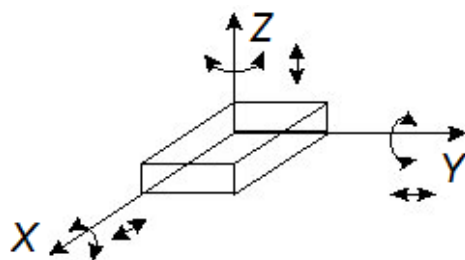


Рисунок 12.12 – Формализованное описание механической системы и процесса распространения энергии

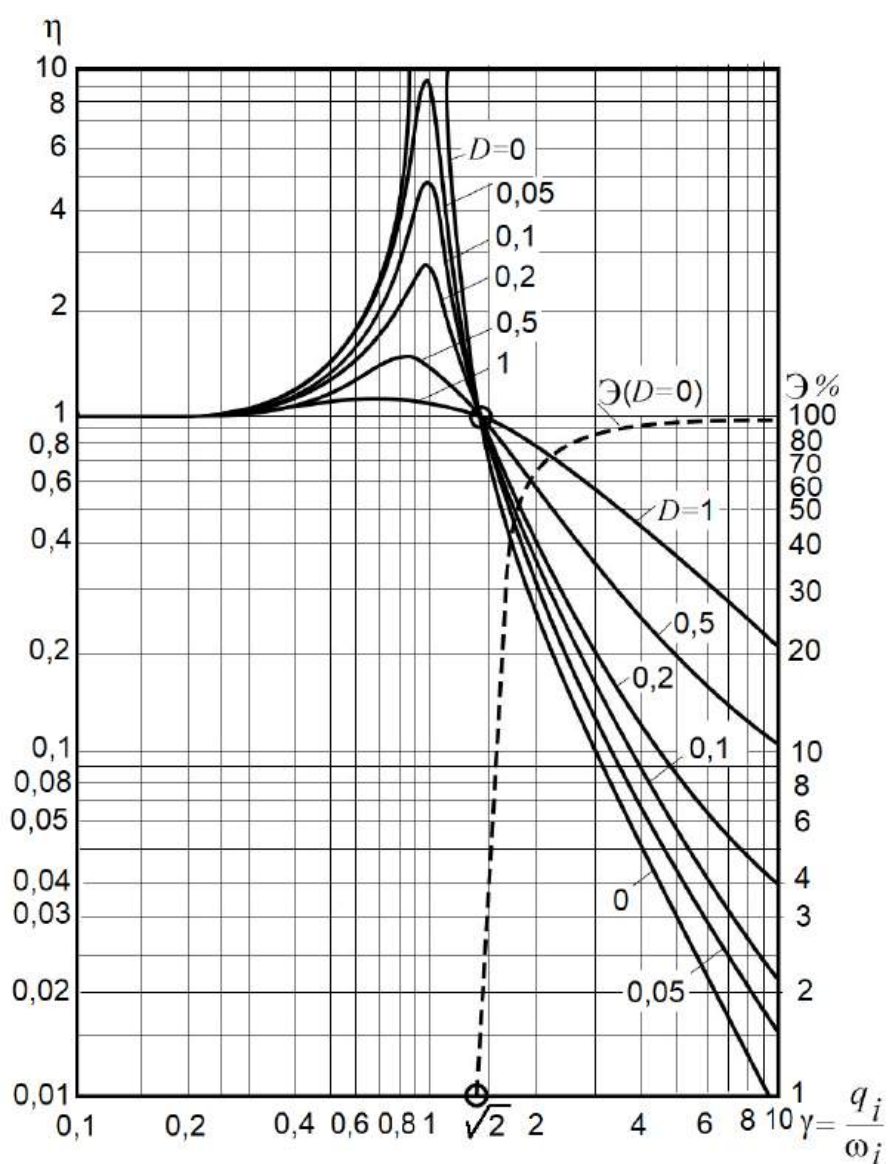


Рисунок 12.13 – Зависимость коэффициента амортизации и КПД от соотношения между частотой возбуждения и собственной частотой системы при различных значениях демпфирования

Пунктиром обозначена кривая эффективности (КПД) амортизации, построенная по формуле

$$\Xi = (1 - \eta) \cdot 100 \%$$

при значениях коэффициента амортизации η , соответствующих нулевому демпфированию ($D = 0$).

Реакция системы амортизации оборудования при вибрационном воздействии в диапазоне частот называется амплитудно-частотной характеристикой. О характере влияния массы амортизированного оборудования на частоты свободных колебаний системы можно судить по форме этой характеристики, которая имеет три области: дорезонансную, резонансную и зарезонансную [31].

Характер кривых (см. рисунок 12.13) позволяет сделать следующие заключения о виброизоляции. Если частота возбуждения q мала по сравнению с частотой собственных колебаний амортизируемого оборудования ω , то коэффициент η незначительно отличается от единицы и применение амортизаторов в этом случае нецелесообразно. Когда отношение частот γ приближается к единице, т. е. собственная частота амортизируемого оборудования близка к частоте возбуждения, коэффициент η возрастает и при малом демпфировании амплитуды колебаний имеют большие значения (резонанс). При всех значениях демпфирования колебания амортизируются, если $\gamma > \sqrt{2}$. С увеличением числа γ значение η приближается к нулю – эффективность амортизации Ξ повышается. Начиная с $\gamma \approx 5$ наклон кривой уменьшается, так что нет существенного улучшения эффективности амортизации. Рациональная виброизоляция стационарного оборудования с периодическим возбуждением заключается в установке его на амортизаторы с нормированным демпфированием, при этом желательно, чтобы отношение частот было в пределах $\gamma = 2,5-5$.

При коэффициенте амортизации менее единицы система амортизации дает положительный эффект. В этой области коэффициент амортизации снижается за счет уменьшения амплитуды колебаний амортизированного оборудования. В свою очередь снижение частоты свободных колебаний при постоянной массе

амортизируемого оборудования достигается посредством уменьшения жесткости упругих элементов амортизаторов.

Большое значение имеет взаимное расположение центра масс амортизированного оборудования и центра жесткости системы амортизации – геометрической точки, в которой условно сосредоточена общая жесткость всех амортизаторов. Колебательная система, возникшая в результате установки абсолютно твердого тела на амортизаторы, имеет три частоты линейных колебаний (поступательных вдоль осей X , Y , Z) и три частоты поворотных колебаний. При колебаниях упругой системы ее деформируют силы инерции, возникающие при движении масс. В общем случае любое из шести свободных колебаний совершается с участием шести обобщенных координат, из которых три линейных перемещения амортизированного объекта вместе с его центром масс и три его поворота вокруг главных центральных осей инерции всякий раз оказываются связанными друг с другом.

Таким образом, свободные колебания амортизируемого оборудования являются в общем случае многосвязными. Каждое из поступательных колебаний по каждой из трех осей связано с изменением трех координат центра масс, при каждом из трех поворотных колебаний будут изменяться углы поворота вокруг трех координатных осей.

В большинстве случаев центр масс амортизируемого оборудования и центр жесткости системы его амортизации не совпадают (рисунок 12.14).

Оборудование в виде шкафов, стоек амортизируется следующим образом. Снизу устанавливаются опорные амортизаторы с жесткостью $C_{оп}$, наверху сзади – упорные с жесткостью $C_{уп}$. В этом случае центр жесткости системы амортизации оборудования расположен на линии длиной L . А его положение можно определить из равенства

$$\sum_{i=1}^n C_{опi} l_1 = \sum_{i=1}^n C_{упi} l_2,$$

где n – количество амортизаторов; l_1 – расстояние между центрами жесткости опорных амортизаторов и системы амортизации;

l_2 – расстояние между центрами жесткости упорных амортизаторов и системы амортизации.

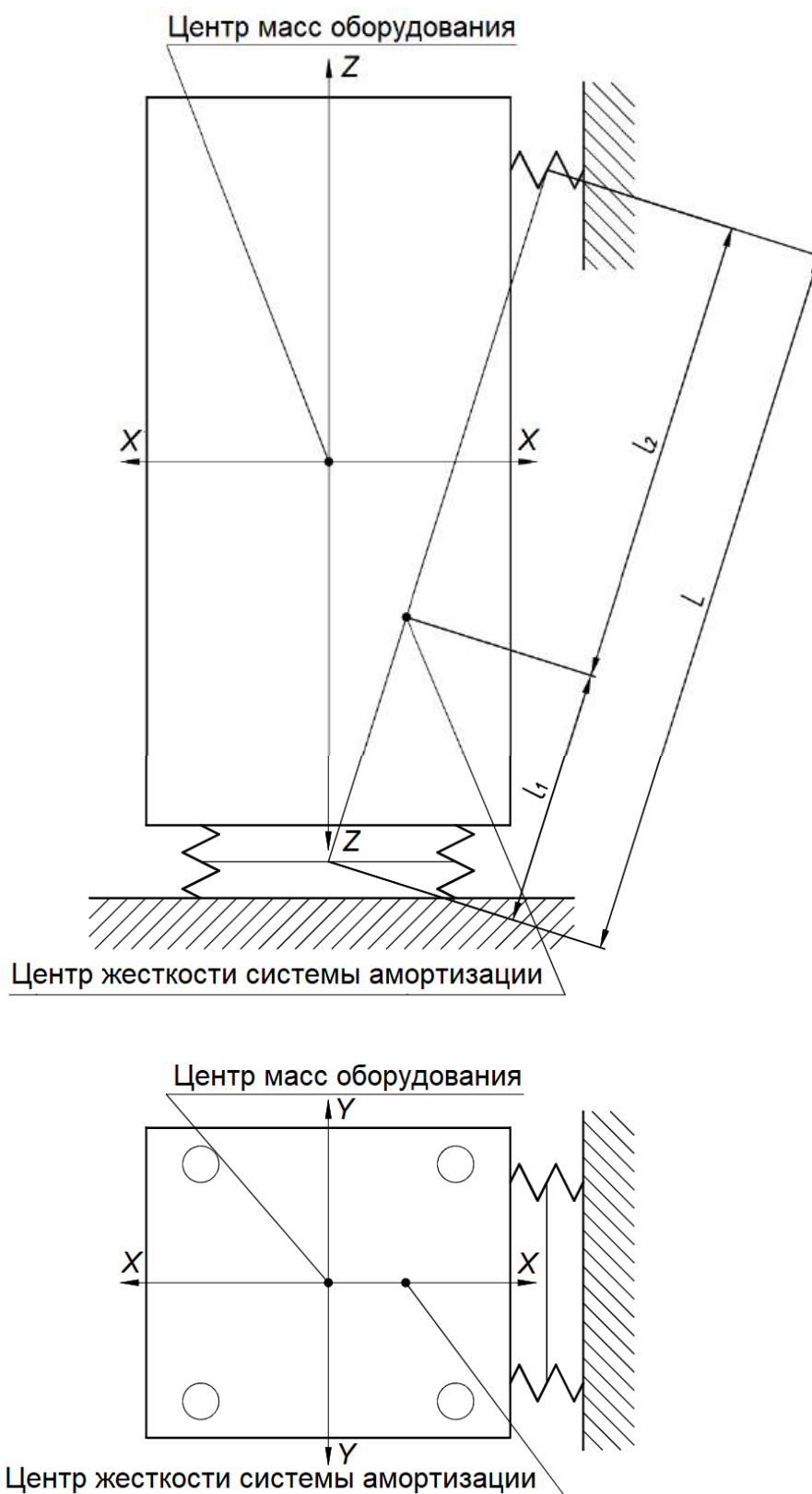


Рисунок 12.14 – Амортизация оборудования
в виде шкафов, стоек

Из равенства следует:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{упi}}{\sum_{i=1}^n C_{опi}}.$$

Совпадение центра жесткости амортизирующего крепления с центром масс оборудования приводит к разделению поступательных и поворотных колебаний на односвязные (рисунок 12.15).

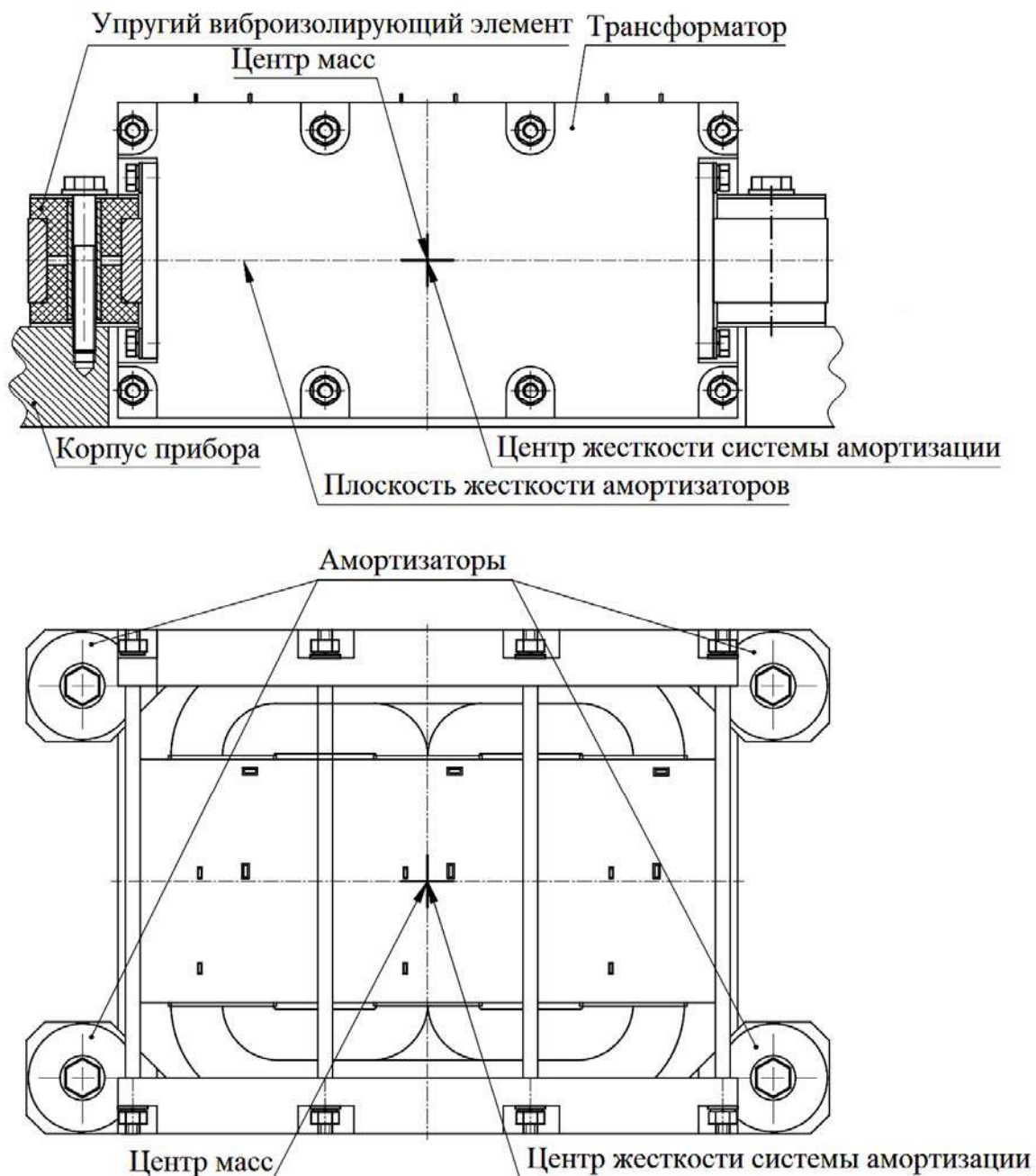


Рисунок 12.15 – Эскиз трансформатора с амортизаторами

Это имеет значение не только для упрощения системы расчетных уравнений. Существенно, что могут значительно уменьшиться или исчезнуть поворотные колебания, а значит, при расчетах ими можно пренебречь. Кроме того, совмещение центра масс амортизируемого оборудования и центра жесткости системы амортизации приводит к равномерному распределению нагрузки на опорные и упорные амортизаторы.

Воздействие линейных ускорений эквивалентно увеличению массы аппаратуры и при значительной длительности требует повышения прочности конструкции. Амортизаторы от линейных перегрузок практически не защищают. Повышение защитных свойств самого объекта реализуется множеством способов, но в основе их лежит оптимизация компоновки и выбор соответствующих материалов [31].

12.6 Типы амортизаторов

При выборе амортизаторов часто возникает противоречие между обеспечением защиты РЭА от вибраций и требованиями защиты от ударов и линейных ускорений. Дело в том, что малая жесткость (низкая собственная частота) и ход амортизаторов в случае удара приводят к их чрезмерной деформации (в предельном случае до упора), вызывая значительные перегрузки. Проблему решают применением амортизаторов с нелинейной характеристикой, у которых демпфирование изменяется в зависимости от статической нагрузки [31].

Основными параметрами амортизаторов, таким образом, являются их собственная частота (при номинальной статической нагрузке), статическая нагрузка, коэффициент демпфирования и показатели климатических воздействий. По частоте собственных колебаний все амортизаторы делятся на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные.

В зависимости от типа упругого элемента и способа демпфирования различают следующие группы амортизаторов:

– резинометаллические (АКСС, АПС, АРМОО и др.);

– пружинные с демпфированием (АД, АФД, АПН, РПП, ППА и др.);

– цельнометаллические (ДК, АЦМ, АЦП, АТ и др.).

Преимуществами **резинометаллических амортизаторов** являются простота изготовления и возможность установки под любым углом. Среди данной группы широко используются амортизаторы типа АКСС (рисунок 12.16).

Однако они имеют недостатки:

– сравнительно высокую частоту собственных колебаний (11–33 Гц);

– старение резины под воздействием температуры, солнечных лучей, агрессивных сред (пары топлива, масла, морская вода), длительных приложений статических нагрузок;

– ограниченный рабочий температурный диапазон ($-45 \dots +80$ °С). При температуре -30 °С амортизаторы из обычной резины начинают затвердевать, их упругость уменьшается на 50 %, жесткость возрастает, частота собственных колебаний увеличивается. При температуре -60 °С они полностью затвердевают и делаются непригодными для виброизоляции.



Рисунок 12.16 – Амортизатор типа АКСС

Амортизатор типа АПС (рисунок 12.17) представляет собой резинометаллическое пневматическое изделие со штуцером для поддува воздуха. Эти амортизаторы рассчитаны на нагрузку 2, 3, 5, 7 и 14 кН и рабочие температуры окружающей среды от -5 до $+70$ °С. Кроме того, они обладают низкой собственной частотой (6,5–11,5 Гц).

Низкой собственной частотой (9–15 Гц) обладают и амортизаторы типа АРМОО (рисунок 12.18).



Рисунок 12.17 – Амортизатор типа АПС



Рисунок 12.18 – Амортизатор типа АРМОО

Если в резинометаллических амортизаторах резиновый массив работает и как упругий элемент, и как демпфирующий, то в **пружинном амортизаторе** эти функции разделены, так как пружина не обладает заметным внутренним трением. Поэтому требуется использовать дополнительный воздушный (амортизаторы типа АД), фрикционный (амортизаторы типов АФД, АПН) или поролоновый демпфер (амортизаторы типов РПП, ППА). Воздушный демпфер в амортизаторах типа АД выполнен в виде резинового баллончика с калиброванным отверстием. Трение, возникающее при проходе воздуха через отверстие, обеспечивает необходимое демпфирование. Максимальный интервал рабочих температур: $-60...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Частота собственных колебаний 8–30 Гц. Собственная частота амортизаторов типа АПН находится в пределах 10–20 Гц.

Цельнометаллические амортизаторы полностью изготавливают из металла, что обеспечивает интервал рабочих температур $-50...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Амортизаторы хорошо противостоят агрессивным средам, радиации, ударной нагрузке. К этой группе относятся амортизаторы типов ДК, АЦМ, АЦП, АТ.

Упругие элементы марки ДК изготавливают из проволоки диаметром 0,1–0,2 мм марки ОВС или аналогичной (рисунок 12.19). Заготовкой для упругих элементов является спираль диаметром 1–2 мм из проволоки, навиваемой вплотную, виток к витку. Из спирали делают путанку в виде клубка, которую затем на специальном приспособлении обжимают в форме колокольчика. Частота собственных колебаний амортизаторов ДК составляет 10–15 Гц.



Рисунок 12.19 – Амортизатор типа ДК

Цельнометаллический амортизатор АЦП представляет собой опорную цилиндрическую конструкцию, в которой упругая система выполнена из металлической путанки и дополнительной цилиндрической витой пружины. Цилиндрическая пружина несколько короче структурного элемента, что создает предварительное его поджатие. Частота собственных колебаний 8–10 Гц. Амортизатор удовлетворяет эксплуатационным требованиям при максимальном ускорении 15g и длительности ударного импульса 10 мс.

Амортизаторы типа АРМ обладают свойством регулирования резонансной частоты и предназначены для защиты бортовой аппаратуры летательных аппаратов от вибрации. Амортизаторы работают в диапазоне частот 5–1500 Гц при амплитудах до 25 мм на низких частотах и ускорениях до 30g на высоких частотах. Собственная частота 10–25 Гц.

Упругим элементом тросового амортизатора типа АТ являются отрезки тросов. Это среднечастотный амортизатор. Работает при любом направлении приложения сил, нет ограничений по температуре, большой динамический диапазон. Тросовый амортизатор (рисунок 12.20) предназначен для защиты от вибраций в диапазоне частот 20–300 Гц при ускорении до 6g и амплитуде вибраций до 1 мм, от удара при ускорении до 15g и длительности 10 мс. Собственная частота при номинальной нагрузке равна 14–16 Гц. Тросовые амортизаторы обеспечивают защиту от механических перегрузок, действующих во всех направлениях.



Рисунок 12.20 – Тросовый амортизатор

Амортизаторы выбираются исходя из следующих данных:

- параметры механических воздействий на носителе;
- параметры внешней среды;
- конструктивные параметры РЭА;
- допустимые механические воздействия на РЭА;
- статические и динамические характеристики.

Для эффективного использования амортизаторов необходимо выполнение следующих условий:

- все амортизаторы должны иметь одинаковую жесткость;
- центр тяжести устройства должен совпадать с центром жесткости амортизаторов или находиться в одной плоскости крепления амортизаторов;
- должны располагаться симметрично относительно центра тяжести устройства;

- должны иметь ограничители для защиты от случайного обрыва;
- нагрузка на амортизаторы должна быть меньше, чем указано в технических условиях.

12.7 Виды вибро- и шумопоглощающих покрытий

Существуют вибро- и шумопоглощающие покрытия для вибро- и звукоизоляции в машиностроении (авиа-, судо-, вагоностроение, ракетно-космическая отрасль, автомобилестроение, станкостроение и пр.). Эти покрытия можно использовать для устройств, входящих в состав РЭА и их частей. Вибро- и шумопоглощающие покрытия наносятся на металлические и стеклопластиковые конструкции или используются в качестве внутренних прослоек в составе металлических, стеклопластиковых и металло-стеклопластиковых конструкций изделий с целью снижения их вибрации, обусловленной вибрацией шума.

Наиболее эффективным является вибропоглощающее покрытие «Випоком». Оно выдерживает температуры $-40...+70$ °С. Используется в качестве защиты от вибраций тонкостенных металлических конструкций, для повышения стойкости к воздействию агрессивных сред, уменьшения неблагоприятного влияния вибраций и шума на организм человека. Преимущества: высокая адгезионная стойкость, низкая коррозионная активность, высокая прочность при растяжении и сжатии, допустимость воздействия воды, в том числе морской, устойчивость к ультрафиолетовому излучению.

Также широко применяется мастика «Адем», которая представляет собой однокомпонентную высоковязкую пасту, предназначенную для получения вибродемпфирующих покрытий с целью снижения вибраций и обусловленного ими шума. Применяется для виброзащиты фундамента, шумоизоляции межпанельных швов, поглощения вибрации оборудования, демпфирования внутрикорпусных конструкций, защиты от шума и вибрации прочих машин и механизмов. Достоинства: диапазон рабочих темпе-

ратур покрытия $-60...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$; при повышенных температурах не выделяет дыма, токсичных и взрывоопасных продуктов; относится к группе трудногорючих материалов с умеренной дымообразующей способностью и медленным распространением пламени; отсутствие коррозии – образует монолитное покрытие, характеризующееся высокой водо-, масло- и бензостойкостью.

Вибро- и шумопоглощающие покрытия обладают большим внутренним трением в полимерном вязкоупругом слое и ослабляют энергию колебаний конструкций, превращая ее в теплоту, рассеиваемую в окружающее пространство. Поэтому они могут успешно применяться для повышения усталостной прочности вибронпряженных тонкостенных элементов конструкций.

Контрольные вопросы

1. Какие виды механических воздействий существуют?
2. Чем характеризуются вибрация, удары, линейные ускорения?
3. Что понимается под прочностью и устойчивостью конструкции?
4. Что называется вибропрочностью и виброустойчивостью?
5. Назовите существующие методы защиты от механических воздействий.
6. Как можно повысить резонансную частоту поперечных колебаний ПП?
7. Что называется виброизоляцией?
8. К чему приводит совпадение центра масс устройства с центром жесткости амортизирующего крепления?
9. Назовите существующие группы амортизаторов.

Заключение

В учебном пособии рассмотрены основные вопросы проектирования радиоэлектронной аппаратуры. Представлены обоснования и рекомендации по формированию внешнего вида устройства, его эстетическому оформлению. От функциональности и области применения устройства зависит тип корпуса – специальный или базовый конструктив.

Особое внимание уделено проектированию с учетом ЭМС. Надежность работы РЭС обусловлена их защищенностью от внешних и внутренних помех. От правильного решения задач компоновки устройства, трассировки ПП, прокладки проводных соединений зависит нормальное функционирование устройства в процессе эксплуатации.

Сбои в работе устройства, а иногда и выход его из строя, могут быть вызваны тепловыми и механическим воздействиями. Причем повышение температуры РЭС может быть вызвано как нагревом ЭРИ, входящих в их конструкцию, так и внешней средой. Поэтому важно обеспечить нормальный тепловой режим радиоэлектронных средств за счет проектирования эффективной системы охлаждения. В качестве защиты от механических воздействий используется амортизационная система оборудования.

Построение качественной защиты от помех, перегрева и механического разрушения оборудования представляет собой весьма непростую задачу и требует соответствующего опыта. Для достижения требуемого результата необходимо при проектировании закладывать все необходимые средства защиты. Предложенные правила проектирования РЭС являются базовыми и ориентированы на студентов конструкторских специальностей и разработчиков.

Литература

1. ГОСТ Р 52084-2003. Приборы электрические бытовые. Общие технические условия. М. : Издательство стандартов, 2003. 14 с.
2. ГОСТ 21552-84. Средства вычислительной техники. Общие технические требования, приемка, методы испытаний, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. М. : Издательство стандартов, 2003.
3. Медведев В.А. Конструирование и технология производства электронных устройств : учеб. пособие. Тольятти : Изд-во Том. гос. ун-та, 2013. 70 с.
4. ГОСТ 26883-86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2008. 10 с.
5. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М. : Стандартинформ, 2010.
6. ГОСТ 14254-2015. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP). М. : Стандартинформ, 2019. 39 с.
7. ГОСТ Р 51623-2020. Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Система построения и координатные размеры. М. : Стандартинформ, 2020.
8. Основы конструирования электронных устройств : учеб. пособие / С.М. Мартемьянов, Ю.В. Шульгина, М.А. Костина, А.А. Бомбизов. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. 145 с.
9. Березкина Л.В., Кляуззе В.П. Эргономика. Минск : Вышэйшая школа, 2013. 432 с.
10. ГОСТ 23000-78. Система «Человек–машина». Пульты управления. Общие эргономические требования. М. : Издательство стандартов, 1987. 12 с.
11. ГОСТ 22615-77. Система «Человек–машина». Выключатели и переключатели типа «Тумблер». Общие эргономические требования. М. : Издательство стандартов, 1993.

12. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами / пер. с англ. В.А. Исаакяна. М. : Мир, 1990. 240 с.
13. Кузнецова-Таджибаева О.М. Основы проектирования помехозащищенной радиоэлектронной аппаратуры. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. 151 с.
14. Кечиев Л.Н. Справочник по расчету электрической емкости, индуктивности и волнового сопротивления в электронной аппаратуре : инженерное пособие. М. : Грифон, 2021. 280 с.
15. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М. : Грифон, 2017. 426 с.
16. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М. : Технологии, 2005. 354 с.
17. ГОСТ Р 53386-2009. Платы печатные. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2009.
18. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М. : Стандартинформ, 2018.
19. Справочник конструктора РЭА: Компоненты, механизмы, надежность / Н.А. Барканов [и др.] ; под ред. Р.Г. Варламова. М. : Радио и связь, 1985. 384 с.
20. Монтажная плата : пат. 2013032 Рос. Федерация, МПК Н 05 К 1/02. № 4921967/21 (025008) / Базенков Н.И., Газизов Т.Р. ; заявитель Томский институт систем управления и радиоэлектроники ; заявл. 25.03.91 ; опубл. 15.05.94, Бюл. № 9.
21. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М. : Группа ИДТ, 2007. 616 с.
22. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z : пер. с англ. СПб. : КОРОНА-ВЕК, 2014. 256 с.
23. Печатные платы : справочник. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. К.Ф. Кумбза. М. : Техносфера, 2011.
24. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М. : Группа ИДТ, 2007. 478 с.
25. Кечиев Л.Н. Проектирование систем распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. М. : Грифон, 2016. 402 с.

26. Кечиев Л.Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие. М. : Грифон, 2019. 722 с.
27. Газизов Т.Р. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие. Томск : Томск. межвуз. центр дистанционного образования, 2005.
28. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учеб. для вузов по спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры». М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
29. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М. : Издательство стандартов, 2004.
30. Беляковский Н.Г. Конструктивная амортизация механизмов приборов и аппаратуры на судах. Л. : Судостроение, 1965. 524 с.
31. Кузнецова-Таджибаева О.М., Целищев Г.П. Расчет упругих элементов резинометаллических амортизаторов. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. 56 с.

Оглавление

Предисловие	3
1 КАТЕГОРИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ, ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЕЕ КОНСТРУКЦИЮ	
1.1 Категории электронной техники	6
1.2 Требования, влияющие на конструкцию электронной техники	8
1.3 Условия эксплуатации электронной техники	11
Контрольные вопросы	16
2 БАЗОВЫЕ НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭРГОНОМИКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ	
2.1 Задачи и методы компоновки электронной техники	17
2.2 Базовые несущие конструкции	19
2.3 Эргономика и техническая эстетика в проектировании электронной техники	22
Контрольные вопросы	29
3 ВИДЫ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ	
3.1 Емкостная, индуктивная и гальваническая паразитные связи	30
3.2 Электростатический разряд	37
Контрольные вопросы	50
4 ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ПУТИ ВОЗВРАТНЫХ ТОКОВ В НИХ	
4.1 Виды печатных плат	51
4.2 Линии передачи в печатных платах	58
4.3 Путь возвратного тока в линиях передачи	60
4.4 Путь возвратного тока в аналого-цифровых платах	66
Контрольные вопросы	73
5 ПОМЕХИ В СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ И ШИНАХ ПИТАНИЯ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ	
5.1 Перекрестная помеха в связанных линиях передачи	74
5.2 Помехи в шинах питания	77
5.3 Способы уменьшения помех в печатных узлах	82
Контрольные вопросы	84
6 МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	
6.1 Субтрактивный метод	85
6.2 Аддитивные методы	88

6.3 Комбинированные методы	91
6.4 Финишные покрытия печатных плат	105
6.5 Стандартные дефекты печатных плат	109
Контрольные вопросы	111
7 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ, ПРЕССОВАННЫХ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ОСНОВАНИЯМИ	
7.1 Требования к выбору материалов	112
7.2 Варианты плат на металлических основаниях	115
7.3 Требования к платам на металлических основаниях	120
Контрольные вопросы	122
8 ЗАЗЕМЛЕНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	
8.1 Понятие заземления	123
8.2 Схемы заземления	126
8.3 Конструкционные решения заземления	129
Контрольные вопросы	132
9 ЭКРАНИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	
9.1 Понятие экранирования	133
9.2 Экранирование магнитного поля	136
9.3 Экранирование электрического поля	141
9.4 Экранирование электромагнитного поля	143
9.5 Элементы конструкции экранов	148
9.6 Проводной монтаж	159
Контрольные вопросы	166
10 ФИЛЬТРАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	
10.1 Помехоподавляющие фильтры	167
10.2 Синфазные дроссели	173
10.3 Ферриты с потерями	174
Контрольные вопросы	178
11 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ	
11.1 Актуальность обеспечения тепловых режимов	179
11.2 Виды теплопередачи	181
11.3 Классификация систем охлаждения	189
11.3.1 Контактное охлаждение	189
11.3.2 Воздушное охлаждение	190
11.3.3 Жидкостное охлаждение	195
11.3.4 Охлаждение за счет эффекта Пельтье	204
11.3.5 Охлаждение за счет излучения	209
11.4 Контактное тепловое сопротивление	211

Контрольные вопросы	215
12 ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	
12.1 Виды механических воздействий	216
12.2 Вибрации	218
12.3 Удары	222
12.4 Линейные ускорения	224
12.5 Методы защиты конструкции от механических воздействий	226
12.6 Типы амортизаторов	237
12.7 Виды вибро- и шумопоглощающих покрытий	242
Контрольные вопросы	243
Заключение	244
Литература	245

Учебное издание

Кузнецова-Таджибаева Ольга Михайловна

**ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебное пособие

Подписано в печать 28.06.24. Усл. печ. л. 14,65.

Формат 60х84/16. Тираж 100 экз. Заказ № 114.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования

«Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Тел. (3822) 533018