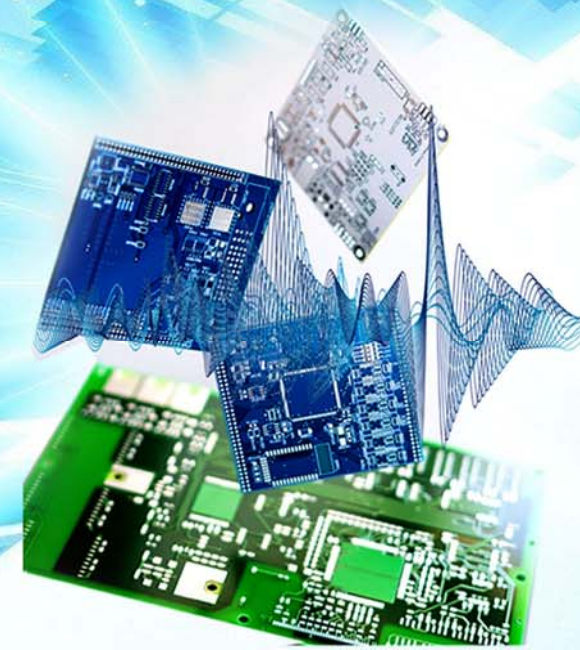


О. М. Кузнецова-Таджибаева

Основы
проектирования
помехозащищенной
радиоэлектронной
аппаратуры



Акционерное общество
«Научно-производственный центр «Полус»

О. М. Кузнецова-Таджибаева

Основы проектирования помехозащищенной
радиоэлектронной аппаратуры

Томск
Издательство Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники
2022

УДК 621.396.6.019.4.001.63
ББК 32.811.7
К891

Рецензент
Газизов Т. Р., д-р техн. наук

Кузнецова-Таджибаева, Ольга Михайловна

К891 Основы проектирования помехозащищенной радиоэлектронной аппаратуры : моногр. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 151 с.

ISBN 978-5-86889-978-2

Рассмотрены аспекты проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) с учетом обеспечения электромагнитной совместимости. Даны объяснения причин возникновения электромагнитных помех. Описаны способы повышения помехозащищенности РЭА на уровне схемотехнических и конструкторских решений. Предложены научно обоснованные рекомендации по проектированию корпусов и печатных узлов.

Для разработчиков и конструкторов РЭА, студентов технических учебных заведений.

УДК 621.396.6.019.4.001.63
ББК 32.811.7

ISBN 978-5-86889-978-2

© Кузнецова-Таджибаева О.М., 2022

© Акционерное общество

«Научно-производственный
центр «Полюс», 2022

© Оформление. Изд-во Томск. гос. ун-та
систем упр. и радиоэлектроники, 2022

Введение

Радиоэлектронные средства (РЭС) – технические средства (ТС), предназначенные для приема и передачи радиоволн, состоящие из одного или нескольких передающих и приемных устройств либо комбинации таких устройств, включающие в себя вспомогательное оборудование. В основу работы РЭС положено взаимодействие электрорадиоизделий (ЭРИ) и электрических цепей в виде межсоединений. Для физической реализации электронного устройства необходимо разработать две его основные составные части – схемотехническую и конструкторскую. Схемотехническая часть определяет типы используемых компонентов и ЭРИ и пути их взаимодействия, а конструкторская – методы физической реализации устройств. Процесс конструирования РЭС является творческим и в то же время требует наличия знаний из разных областей науки и техники. При современном развитии электронных устройств, когда одновременно требуются миниатюризация, высокая надежность, эргономичность и т.д., процесс конструирования приобретает особую важность.

Одно из важных направлений современной радиоэлектроники – обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) РЭС становится все актуальнее из-за непрерывного увеличения числа сложных радиоэлектронных систем и комплексов. Системы и комплексы, размещенные в непосредственной близости друг от друга, оказывают электромагнитные взаимовлияния на свою работоспособность. Если функционирование ТС ухудшается при воздействии электромагнитных помех, то ТС называются *восприимчивыми*. Важно создавать оборудование, невосприимчивое к электромагнитным помехам. *Электромагнитная восприимчивость* – это неспособность ТС функционировать без ухудшения качества при наличии электромагнитных помех [1]. Невыполнение требований ЭМС может иметь достаточно серьезные последствия в различных сферах деятельности человека и техники.

Актуальность задач проектирования с учетом ЭМС на современном этапе развития электроники обусловлена следующими основными причинами:

- 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 габаритных размеров активных элементов и межсоединений, а также увеличения плотности их компоновки на быстродействие электронных устройств и помехоустойчивость;
- трудоемкостью и большими материальными и временными затратами, связанными с поиском и устранением причин низкой помехоустойчивости электронных устройств [2].

Конструктор-технолог должен видеть проблему жизнеспособности изделия в целом в условиях его эксплуатации с учетом реальной среды, в которой оно должно функционировать. В процессе разработки и производства изделия требования к обеспечению его ЭМС должны учитываться на всех этапах и в такой же степени, как и требования к миниатюризации или надежности аппаратуры. Поиск конструкторских решений часто носит интерактивный характер (параллельно с непрерывным анализом полученных результатов и корректировкой), и поэтому новое решение должно приниматься обязательно с учетом необходимости обеспечения ЭМС разрабатываемого изделия. Среди ТС особое место занимает радиоэлектронная аппаратура (РЭА) – изделие, предназначенное для передачи и приема информации на расстояние по радиоканалу при помощи электромагнитных сигналов. Разработка РЭА приводит к расширению круга профессиональных задач конструктора-технолога. Прежде всего это обязательный учет конструкторско-технологических требований обеспечения ЭМС на этапах разработки и производства РЭА.

Направлению ЭМС посвящено много литературы, которая представлена книгами, журналами, трудами симпозиумов и пр. Из числа отечественных научных публикаций по этой проблематике следует выделить издание Князева А. Д., Кечиева Л. Н. и Петрова Б. В. [3], которое используется в качестве учебника по ЭМС. Отечественным специалистам известна книга Волина М. Л. [4].

Весьма полезен для знакомства с отечественными нормами и стандартами по ЭМС справочник Бадалова А. Л. и Михайлова А. С. [5]. Существенный вклад в исследования вопросов ЭМС сделан учеными Томского университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Основоположником этого направления стал Базенков Н. И. [6]. Проблемам ЭМС посвящен труд Тихомирова А. А. и Ефанова В. И. [7], большой вклад внес Газизов Т. Р. [8–10].

Важно быть в курсе последних исследований в области ЭМС, знакомиться с результатами новейших достижений ученых и разработчиков. Самым известным международным научным журналом по ЭМС является «IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility». Практической направленностью отличается журнал «EMC Technology». Регулярно выходит отечественное издание «Технологии ЭМС», включенное в перечень ВАК.

В монографии охвачены основные направления проектирования РЭА, представлено большое количество практических примеров и рекомендаций: межсоединения, печатные платы, аналоговые и цифровые схемы, экранирование, заземление, фильтрация. Особое внимание уделено причинам возникновения помех, в том числе такому довольно опасному виду, как электростатический разряд. Представленная работа поможет принять проектировщикам эффективные меры, когда они выявят причины возникновения помех и определят способы их устранения.

1 ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Электромагнитная совместимость – способность ТС функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых помех другим ТС [1]. В современном понимании ЭМС – это совместимость оборудования и систем между собой и с окружающей электромагнитной средой или обстановкой. В свою очередь, *электромагнитная обстановка (ЭМО)* – совокупность электромагнитных явлений, существующих в данном месте. Понятие ЭМС распространяется на методы и средства защиты РЭА от влияния электромагнитных помех и ослабления таких помех в их источниках и (или) среде распространения.

В настоящее время существуют стандарты, регламентирующие амплитудные и частотные характеристики помех и реакцию ТС на их воздействие в месте размещения. Не для всех объектов, на которых устанавливаются ТС, возможно учесть все факторы, влияющие на качество ЭМО. Поэтому актуально повышение надежности функционирования самих ТС в условиях воздействия электромагнитных помех, электростатических разрядов и т. д., которое должно решаться производителями этих ТС при их проектировании и производстве.

С повышением быстродействия и плотности компоновки элементов электронных устройств проблемы обеспечения помехоустойчивости и их ЭМС становятся важнейшими при проектировании РЭА в целом. *Помехоустойчивость ТС* – это способность сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров [1]. При конструкторской реализации любой электронной схемы неизбежно вносятся дополнительные паразитные параметры, которые могут в недопустимых пределах ухудшить ее быстродействие и помехоустойчивость в реальной конструкции, а в некоторых случаях привести к полной потере работоспособности схемы.

Особое внимание уделяется правилам электронного конструирования, позволяющим без особых затрат свести к минимуму влияние *электромагнитных помех (ЭМП)* – любых электромагнитных явлений, которые могут ухудшить качество функционирования ТС [1]. При анализе воздействия ЭМП особое внимание уделяется причинам их возникновения, путям распространения, особенностям воздействия на различные объекты, а также мерам, методам и средствам защиты и подавления ЭМП.

Лучший способ решить проблему помехоустойчивости РЭА – исключить в начале конструирования схемы причины, порождающие помехи. Очень важно понять, какие виды помех могут появиться в схеме (*сетевая помеха* – ЭМП, передаваемая ТС по проводам, соединяющим его с электрической сетью; *кондуктивная* – ЭМП, энергия которой передается по одному или нескольким проводникам; *излучаемая* – ЭМП, энергия которой передается в пространстве в виде электромагнитных волн) [1], и в результате этого создать схему, которая предотвратит возникновение как можно большее число помех или уменьшит вероятность их появления.

Следующий важный процесс – выбор и размещение печатных плат, кабелей и других конструктивных систем таким образом, чтобы исключить причины, вызывающие помехи, и обеспечить возможность подсоединения подавляющих помехи компонентов. И, наконец, необходимо отладить систему последовательно, переходя от узла к узлу и убеждаясь в том, что каждый узел смонтирован надлежащим образом, штатно функционирует, помехи в нем отсутствуют. Изначально верно сконструированная система позволит сократить время ее изготовления и уложиться в выделенную смету затрат, исключив множественные доработки. Соблюдение правил экономит время, затрачиваемое на наладку ТС, а также снижает производственные затраты и обеспечивает создание более надежных устройств.

Из опыта работы можно сказать, что в 90 % случаев помехи обусловлены неправильным электромонтажом. Это приводит к генерации паразитных колебаний в цифровых интегральных схемах, электромагнитному излучению печатных плат, превышающему допустимые уровни, переключению логических уровней

под действием электростатических разрядов, нарушению стабилизации выходного напряжения в источниках электропитания и др. Чтобы выявить причины перечисленных нежелательных явлений, необходимы значительные временные трудозатраты. Кроме того, еще потребуется время на их устранение. Практически всегда этих трудностей можно избежать, если при разработке схемы рассматривать электромонтаж как ее составную часть.

Чтобы обеспечить ЭМС РЭА, реализуют комплекс организационных и технических методов. Первые из них относятся, главным образом, к уровню межсистемной ЭМС и заключаются в рациональном выборе частот радиоканалов для различных радиослужб, установлении частотно-пространственного разнесения между устройствами с конкретными характеристиками ЭМС, определении места размещения средств и т.д. При этом выполняются соответствующие расчеты с учетом функциональных характеристик устройств и характеристик ЭМС, применяемых при проектировании.

Технические методы делятся на конструкторско-технологические и схемотехнические. Первые из них реализуются в основном на уровнях внутрисистемной и внутриаппаратурной ЭМС, вторые – на всех уровнях обеспечения ЭМС систем и устройств. Такие методы могут быть аналитическими (анализ, расчеты, прогнозирование) и практическими на всех уровнях с учетом реальной ЭМО, в которой функционирует РЭА и ее элементы.

ЭМС делится на межсистемную, внутрисистемную, внутриаппаратную и внутрикомпонентную. Когда имеется в виду межсистемная ЭМС, рассматривается взаимное влияние различных радиосистем и ЭМО на функционирование систем. Внутрисистемная же охватывает задачи проектирования ТС от узлов аппаратуры до завершенных объектов, учитывая влияния между отдельными блоками, входящими в состав системы. Внутриаппаратная ЭМС рассматривает вопросы совместимости между отдельными элементами прибора или блока, внутрикомпонентная ЭМС – совместимость в микроэлектронных устройствах типа «система в корпусе» и «система на кристалле». В компетенции конструктора РЭА находится решение задач обеспечения ЭМС

только для внутрисистемной и внутриаппаратной групп конструкций.

Основные проблемы обострения ЭМС РЭА – рост их числа и плотности размещения, а также техническое несовершенство передатчиков и приемников. Так как РЭА оказываются на малом расстоянии друг от друга, то взаимное влияние бывает особенно сильным. Техническое несовершенство передатчиков проявляется в том, что в спектрах их излучений, кроме основного, могут присутствовать нежелательные излучения, помехи [11]. *Помеха* – это электрическое и (или) магнитное явление, созданное любым источником в пространстве либо проводящей среде. Оно нежелательно влияет (может оказать нежелательное влияние) на полезную информацию, носителями которой являются постоянные либо изменяющиеся во времени значения напряжения, тока, электрического заряда или магнитного потока [12].

По происхождению электромагнитные помехи бывают *естественные* (природные) и *искусственные*, причем последние могут быть *непреднамеренные* (индустриальные) и *преднамеренные* (организованные). Естественные электромагнитные помехи образуются электромагнитными явлениями и процессами, которые происходят в различных оболочках Земли и в космосе и непосредственно не связаны с деятельностью человека. Искусственные непреднамеренные помехи обусловлены электромагнитными явлениями в различных ТС, созданных человеком. Они возникают из-за особенностей физического процесса, несовершенства ТС и предпринятых организационных технических мер. Преднамеренные помехи специально создаются для нарушения функционирования ТС.

По типу распространения выделяют *пространственные* и *кондуктивные* помехи. Пространственные характеризуются воздействием через излучаемое и распространяющееся в пространстве электромагнитное поле, а кондуктивные проникают в аппаратуру по проводниковым каналам связи и электропитания. Источник помех может оказывать воздействие на воспринимающее устройство (рецептор) посредством излучаемых электромагнитных полей или по проводам (кондуктивное воздействие). Аналогичным образом и рецептор может быть чувствительным как к

воздействию электромагнитных полей (восприимчивость к излучению), так и к помехам, поступающим по проводам (кондуктивная восприимчивость). Распространение помех происходит по таким трактам, как сигнальные цепи, цепи питания и управления, линии передачи данных, а также через открытое пространство. Приемником и рецептором помех являются любые системы или составляющие их части (элементы и компоненты), на которые сказывается воздействие помех.

По месту расположения источника помех различают *внешние* (внесистемные, внеблочные), *внутренние* (внутрисистемные) и *собственные* помехи. Очевидно, что внешние помехи вызваны процессами в других устройствах, внутренние возникают как электромагнитные явления и связи, не предусмотренные схемой и конструкцией устройства, а собственные помехи представляют собой шумы компонентов, связанные с функционированием самого устройства.

По характеру протекания процесса во времени различают помехи *гармонические*, *импульсные* и *шумы*. *Гармоническая помеха* – это аддитивная помеха, спектр которой сосредоточен в узкой полосе частот. Такие помехи могут вызываться источниками питания. *Импульсные помехи* представляют собой последовательность отдельных импульсов или переходных процессов в тракте устройства [1]. *Шум* – это процесс, обусловленный дискретной природой электрического тока и представляющий собой последовательность очень коротких импульсов, образующихся хаотически в большом количестве. Шумами могут являться естественные, промышленные частотные шумы. *Естественный шум* – это электромагнитный шум, источником которого является природное явление, а не устройства, созданные человеком. Источником *промышленного шума* является ТС, а *частотный шум* (радишум) – это электромагнитный шум, спектральные составляющие которого находятся в полосе радиочастот [1].

В проблеме ЭМС РЭА рассматриваются главным образом влияния импульсных помех. Под импульсной подразумевается помеха, представляющая собой одиночный импульс либо последовательность импульсов произвольной формы, амплитуда и длительность которых достаточны для изменения состояния запоми-

нающих или формирующих элементов РЭА [12]. Существуют помехи, называемые наводками. *Наводка* – это помеха, возникающая вследствие не предусмотренной схемой и конструкцией рассматриваемого объекта передачи по паразитным связям напряжения, тока, заряда или магнитного потока из источника помехи в часть объекта. Под паразитной связью следует понимать связь по электрическим и магнитным цепям, появляющуюся независимо от желания конструктора. Помеха по рассогласованию представляет собой нежелательный переходный процесс в рассматриваемой электрической цепи объекта, содержащей участки с распределенными и сосредоточенными параметрами, возникающий вследствие рассогласования между неоднородными участками.

Задача обеспечения ЭМС РЭС имеет комплексный характер и на различных иерархических уровнях (элементов, узлов и блоков, устройств, РЭС и комплексов РЭС) решается с помощью конструкторско-технологических, схемотехнических, системотехнических и организационных мер. ЭМС на уровне цепей и узлов обеспечивают главным образом конструкторско-технологическими мерами, включающими выбор элементной базы, рациональную компоновку элементов, постановку экранов и фильтров, исключающих нежелательное проникновение излучений от цепи к цепи, от узла к узлу и негативное воздействие внешних излучений на цепи и узлы. ЭМС на уровне устройств обеспечивают схемотехническими мерами (выбором элементной базы, схем, режимов), следуя принципу – не излучать и не принимать ничего лишнего. ЭМС РЭС и комплексов РЭС обеспечивают, комбинируя развязки источников и объектов воздействия помех: частотные (изменение частоты источника и приемника), амплитудные (пространственное разнесение источника и приемника), временные (временная селекция, сокращение времени излучения, применение импульсных режимов работы).

2. ВИДЫ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ

В любом РЭС наряду с предусмотренными схемой межсоединениями всегда существуют многочисленные побочные пути распространения электрических, в том числе опасных, сигналов. Эти пути создаются в результате паразитных связей и наводок. Первопричиной паразитных связей и наводок являются поля, создаваемые электрическими зарядами и токами в цепях РЭС и действующие на элементы и цепи других устройств и систем. Известны три вида паразитных связей: емкостная, индуктивная и гальваническая (иное название – связь через общее сопротивление) [2].

Емкостная связь образуется в результате воздействия электрических полей между любыми элементами схемы (проводами, печатными проводниками, радиоэлементами 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 печатных плат (МПП). 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 значительные площади, вызывая увеличенный уровень помехоэмиссии и восприимчивости к воздействию внешних полей. Вследствие емкостной связи могут возникать перекрестные помехи в линиях передачи (явления, при которых сигнал, передаваемый по одной цепи в системе передачи, создает амплитудные и фазовые искажения в другой цепи), а также электростатические разряды (ЭСР) при зарядке материалов конструкции РЭА. Паразитная емкость пропорциональна диэлектрической проницаемости среды, диаметру проводов и обратно пропорциональна расстоянию между проводами.

Точные теоретические решения существуют для некоторых вариантов емкостей, обладающих, как правило, симметрией сечения. Если эти варианты не всегда имеют практическое значение, они полезны для получения более глубокого представления о взаимосвязи между параметрами объекта и его емкостью. Один из таких вариантов – это емкость между двумя концентрическими сферами, расположенными одна в другой [13],

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{rr_b}{r_b - r},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; r – радиус внутренней сферы, м; r_b – радиус внешней сферы, м.

Если радиус внешней сферы в 10 раз больше внутренней, то емкость считается по приближенной формуле

$$C = 4\pi\epsilon_0 r,$$

которая может трактоваться как собственная емкость объекта, т.е. емкость растет пропорционально размерам объекта.

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 проводнике. Разность потенциалов V_{ab} между проводниками также пропорциональна заряду, но отношение заряда к разности потенциалов не изменяется. Это отношение называют емкостью конденсатора:

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

Емкость между двумя проводниками иногда называют конденсаторной емкостью. 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 печатных платах без встроенного слоя земли. Волновое сопротивление Z в свободном пространстве определяют две фундаментальные величины: магнитная посто-

янная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и диэлектрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м [14]:

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

Основное свойство электрической емкости заключается в том, что она зависит только от геометрических параметров проводников и диэлектрической проницаемости окружающей среды, т.е. от конструкторских параметров. Принимая решения по выбору материалов, геометрии и физических размеров 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. Это означает, что емкость более широких проводников будет больше емкости узких. Увеличение диэлектрической проницаемости среды, например нанесением лакового покрытия на поверхность проводника за счет вытеснения воздуха, также приводит к увеличению емкости.

В ряде случаев можно провести оценку емкостных параметров для произвольных конструкций, которые отличаются размерами, конфигурацией и типом диэлектрика. Для оперативной инженерной оценки параметров некоторых конфигураций проводников существуют приближенные расчеты [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 (ЭДС) в смежном проводнике, расположенном в непосредственной близости (например, в жгуте или на печатной плате). 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 одиночного провода и взаимную индуктивность между проводами по формуле [13]

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

где L_1, L_2 – индуктивность провода 1 и провода 2 соответственно, Гн; M – взаимная индуктивность между проводами, Гн.

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 индуктивность одиночного провода 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 двух проводов одинакового радиуса поперечного сечения M (мкГн) 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

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

Можно провести оценку индуктивных параметров произвольных конструкций, которые отличаются размерами и конфигурацией. Для оперативной инженерной оценки параметров некоторых конфигураций проводников также существуют приближенные расчеты [13].

Индуктивная связь является функцией площади контура тока, поэтому уменьшение площади контура цепей источника и приемника помех является одним из способов уменьшения связи по магнитному полю. Паразитная индуктивная связь зависит от

взаимного расположения и конфигурации проводников [13], параметров протекающих по ним токов и 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 при ортогональной ориентации магнитных полей источника и рецептора взаимодействие между ними практически отсутствует. Кроме того, следует учитывать, что близость материалов с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$ (например, железа, стали, никеля, феррита, пермаллоя) к цепям источника и рецептора может значительно увеличить или уменьшить паразитную взаимную индуктивность между ними в зависимости от конструкции. Для уменьшения индуктивности необходимо минимизировать длину межсоединений.

Индуктивная паразитная связь сказывается 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 схем, по которым течет большой ток (нечувствительных). Такая же ситуация часто встречается в печатных платах с общей землей.

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 ЭДС, вызванная токами от этих контуров. Помехи такого типа называются помехами переключения или коммутационными. *Наиболее важно для снижения уров-*

ня коммутационных помех уменьшить взаимную индуктивность между контурами. Это может быть достигнуто разнесением контуров или изменением их взаимной ориентации. Взаимная индуктивность между контурами не может быть больше, чем собственная индуктивность меньшего контура. Поэтому для снижения взаимной индуктивности необходимо снижать собственную индуктивность контуров.

Рекомендованы следующие способы снижения индуктивности проводников: уменьшение длины и увеличение площади их сечения, выполнение проводников плоскими (чем шире плоский проводник, тем меньше его индуктивность) [15].

Гальваническая связь – наиболее часто встречаемый вид паразитной связи, осуществляемый через внутреннее сопротивление и межсоединения источников питания. Через цепь источника питания 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.

На частотах более 100 кГц общее сопротивление Z зависит в основном от индуктивного сопротивления соединительных проводов и емкости фильтра питания [13]:

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

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

Любую проводящую среду (контактную площадку на печатной плате, сплошной слой земли, проводник и т.д.) можно представить в виде отрезка линии передачи (рис. 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. Проводники линии всегда обладают сопротивлением (омическим, активным), они нагреваются, когда по ним

проходит электрический ток. Нагрев может быть незначительным, составлять доли градуса.

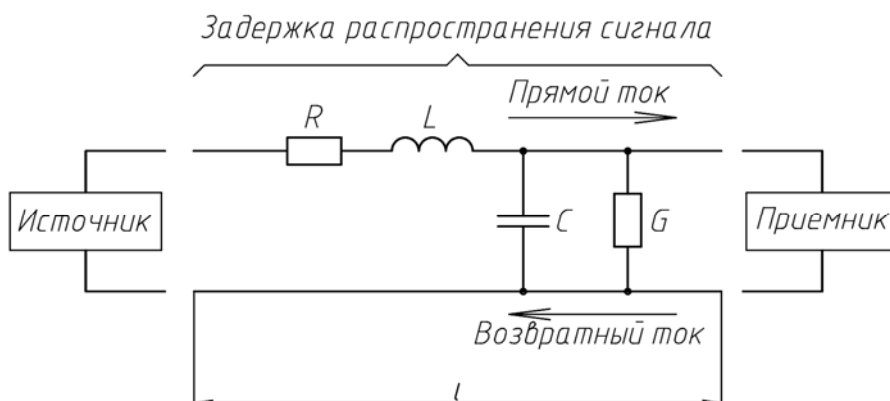


Рис. 1. Модель элементарного отрезка линии передачи

Но если линия длинная, то токи слабеют и мощность становится меньше. Второй источник потерь – это несовершенная изоляция между проводниками линии, где всегда существуют токи утечки, которые вызывают выделение тепла в изоляции, вызывающие поглощение мощности. Таким образом, сопротивление характеризует активные потери в линии. Оно содержит две составляющие. Первая представляет собой сопротивление постоянному току или токам низкой частоты. Вторая определяется сопротивлением на высоких частотах, на которых начинается проявляться скин-эффект. Чем выше частота, тем сильнее концентрируется ток в тонком поверхностном слое проводника. В этом случае ток протекает по скин-слою и понятие «высокая частота» относится к частотам, при которых толщина скин-слоя будет меньше толщины проводника. Толщина скин-слоя уменьшается пропорционально квадратному корню из частоты [16]. Чем неравномернее распределен ток, тем большая часть его энергии теряется на единицу длины проводника. Потери в изоляции между проводниками также растут с частотой тока. Для токов низких частот многие материалы являются хорошими изоляторами, для токов же высоких частот в этих материалах велики потери. Поэтому чем выше частота тока, тем больше его затухание в линии передачи.

Индуктивность определяется конструкцией линии и применяемыми материалами. Для снижения индуктивности линии в ней

не должны применяться магнитные материалы, что может привести к нежелательному снижению скорости распространения электромагнитной волны в линии.

Электрическая емкость определяется также конструкцией линии и применяемыми материалами. Для шин питания эта емкость должна быть по возможности больше, а для сигнальных линий – по возможности меньше.

Проводимость определяется утечками в диэлектрическом материале линии. Токи утечки современных материалов, которые применяются при создании печатных плат и проводов, малы, что позволяет ими пренебречь до определенных частот. Однако на высоких частотах (более 100 МГц) потери в диэлектрике становятся заметными и начинают влиять на целостность сигнала.

Мгновенный ток в линии всегда пропорционален напряжению, то есть 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, каждый из которых полностью определяется конструкцией линии, а именно ее сечением, определяющим емкость, и диэлектрическими свойствами 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 [17]

$$|Z| = \frac{V}{I} = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2},$$

где V – 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 увеличении частоты индуктивное сопротивление увеличивается, а емкостное уменьшается. Следовательно, всегда имеется одна частота, на которой индуктивное и емкостное сопротивления равны [16], т.е. полное сопротивление Z имеет наименьшее значение, равное активному 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 индуктивности и емкости в ней вообще нет.

В линии передачи, у которой в продольном направлении неизменны поперечное сечение и электромагнитные свойства заполняющих сред, называемой регулярной линией [18], сопротивление не изменяется по ее длине. В этом случае мгновенное полное сопротивление линии является волновым сопротивлением. Это один из самых важных электрических параметров линии передачи. Если линия передачи нерегулярна (линия, в которой отсутствует хотя бы одно из условий регулярности) [18], т.е. ее параметры изменяются по длине, для нее нет единого значения волнового сопротивления. Оно может быть определено только для отдельных регулярных сегментов линии передачи. Изменяя размеры элементов сечения, можно изменить емкость и индуктивность линии и тем самым ее волновое сопротивление, значение которого может быть практически любым и ограничиваться только технологическими условиями. Расчет волнового сопротивления двухпроводной линии передачи Z (Ом) при условии, что диаметры проводников равны, можно выполнить по формуле [13]

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{r}\right),$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; D – расстояние между осями проводников, мм; r – радиус сечения проводника, мм.

В случае разных диаметров двух проводников волновое сопротивление Z рассчитывается по формуле

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{r_1 r_2}\right),$$

где r_1, r_2 – радиус сечения проводника 1 и проводника 2 соответственно, мм.

Волновое сопротивление 50 Ом линий передачи на печатных платах является стандартом де-факто и определяется компромиссом между быстродействием и помехозащищенностью: при росте волнового сопротивления растет и быстродействие (крутизна фронта сигнала), а при снижении – уменьшается уровень перекрестных помех и помехоэмиссии. Перекрестная связь между проводниками обусловлена взаимодействием магнитных и электрических полей близко расположенных линий передачи. Связь линий обуславливает перекрестные помехи, которые генерируются в пассивной линии и вызваны переключением сигналов в активной линии. Перекрестной связью линии управляют надлежащим размещением проводников и заданием соответствующих расстояний между ними.

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 в пространстве вокруг проводников линии передачи. Скорость v (м/с) распространения фронта сигнала в произвольной среде определяется по формуле

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{2,99 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}},$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала.

Время задержки распространения сигнала τ (с) в зависимости от длины линии передачи вычисляется как

$$\tau = \frac{l}{v},$$

где l – длина линии передачи, м.

Предполагается, что поперечный размер линии передачи много меньше ее длины, поэтому эти линии представляются в виде нитей тока бесконечно малого сечения. Следует различать погонную длину линий, которую можно измерить инструментом,

и электрическую длину. Это понятие характеризует модели и режимы работы линии. Различают электрически короткие и электрически длинные линии передачи, режимы работы которых имеют принципиальные различия, и для их анализа применяются различные модели.

Максимальный частотный компонент $f_{\max}$ (Гц) в спектре сигнала определяет минимальную длину $\lambda_{\min}$ (м) электромагнитной волны в диэлектрической среде линии передачи:

$$\lambda_{\min} = \frac{v}{f_{\max}}.$$

Электрически короткой называется линия, у которой погонная длина l_{sl} будет существенно меньше минимальной длины волны $l_{sl} \ll \lambda_{\min}$. У электрически длинной погонная длина l_u будет не меньше минимальной длины волны $l_u \geq \lambda_{\min}$. Для надежной оценки вводят коэффициент запаса 0,1–0,2, что позволяет более строго определять электрически короткую линию как

$$l_{sl} \leq (0,1 - 0,2)\lambda_{\min},$$

а длинную линию как

$$l_u > (0,1 - 0,2)\lambda_{\min}.$$

Напряжения и токи во всех точках по длине короткой линии в определенный момент времени имеют одинаковые значения. Короткие линии моделируются сосредоточенными идеальными элементами, и их типовые модели представляют собой сосредоточенную электрическую емкость или индуктивность.

На практике часто приходится иметь дело с цепями (линиями передачи), где электромагнитное поле и потери равномерно или неравномерно распределены вдоль всей цепи. В результате напряжения и токи на различных участках даже неразветвленной цепи отличаются друг от друга, т.е. являются функциями времени и пространственной координаты. Такие цепи называются цепями с распределенными параметрами. Смысл данного названия заключается в том, что у цепей данного вида каждый бесконечно малый элемент их длины характеризуется сопротивлением и индуктивностью, а между проводниками – емкостью и проводимо-

стью. Это характерно для длинной линии, которая может быть представлена в виде проводника с распределенными параметрами или в виде набора элементарных звеньев. В простейшем случае такими элементарными звеньями являются LC-звенья, набор которых моделируют линии с распределенными параметрами без потерь.

В короткой линии время задержки распространения сигнала от передатчика к дальнему концу меньше половины времени нарастания или спада фронта сигнала. Кратковременные импульсные помехи отражения успевают вернуться к передатчику до завершения процесса изменения сигнала и исчезают на нарастающих или спадающих фронтах. В длинной линии время задержки превышает половину времени нарастания или спада фронта сигнала. Различные помехи отражения появляются в линии после окончания фронтов сигналов и могут серьезно нарушить работу схемы.

3 ВИДЫ СХЕМ

Все схемы можно разделить на три вида: аналоговые, цифровые, схемы сопряжения [2].

Большинство *аналоговых* схем оперирует слабыми сигналами, поэтому они наиболее чувствительны к помехам. При разработке аналоговых схем, предназначенных для работы в линейном режиме, необходимо предусмотреть минимальный коэффициент усиления и минимальную рабочую полосу частот. Восприимчивость к помехам можно снизить, используя дифференциальные сигналы и поддерживая сопротивление схемы на выходе ниже 1 кОм, а сопротивление нагрузки выше 300 Ом.

В аналоговых схемах необходимы эффективные шунтирование и монтаж для ограничения восприимчивости схем к помехам, попадающим через шины питания. Каждая шина питания должна иметь шунтирующий электролитический конденсатор емкостью 1–10 мкФ. В свою очередь каждый операционный усилитель (ОУ) должен быть снабжен керамическими шунтирующими конденсаторами, соединяющими его выводы питания с линией обратного тока выходного сигнала. Эти конденсаторы должны иметь емкость 0,1 мкФ. Недостаточно эффективное шунтирование часто приводит к паразитным колебаниям или к характерному дребезгу.

Цифровые схемы могут как создавать помехи, так и воспринимать их извне. При переключении уровня сигналов выходное напряжение изменяется со скоростью dV/dt (В/нс), что приводит к перекрестным помехам (любые явления, в которых сигнал, переданный по одной линии связи, создает нежелательный эффект в другой линии) и импульсам заряда, текущего от источника питания через переключающий элемент к земле. Значение этого импульса заряда, измеряемое в пикокулонах, определяется амплитудой цифрового сигнала и емкостью нагрузки и линии связи. Для предотвращения выбросов длина несогласованных линий связи не должна превышать $l_c = 0,5t_r/t_u$, м, где l_c – критическая длина линии связи, м; t_r – время нарастания фронта импульса, с; t_u – погонная задержка распространения сигнала в линии связи, с/м.

Для уменьшения помех, возникающих в цифровых схемах, необходимо работать с сигналами, имеющими большие значения времен нарастания и спада, т.е. необходимо уменьшить скорость перепада тока, снизить до возможного предела крутизну фронта сигнала, которая отвечает требованию быстродействия системы, согласовать линии передачи, ограничить число близко расположенных выводов источников и рецепторов, применять эффективные методы шунтирования и заземления [19]. Шунтирующие конденсаторы являются источниками импульсного тока, потребляемого цифровыми схемами при переключении, уменьшают падение напряжения в цепях питания и заземления и способствуют фильтрации помех, создаваемых источниками питания и заземления. Традиционно шунтирующий конденсатор большой емкости устанавливается вблизи источника питания. Около каждой интегральной схемы у выводов питания находится конденсатор. Каждая схема, передающая сигналы за пределы печатной платы, на которой она находится, или принимающая сигналы из-за пределов печатной платы, имеет также шунтирующий конденсатор между источником питания и линией обратного тока сигнала [2].

Сопряжение электронной системы с внешними устройствами обычно является главным источником помех. Схемы сопряжения применяются везде, где требуется передача данных от одного устройства к другому. Они служат для передачи цифровой и аналоговой информации, поэтому могут быть полностью цифровыми, полностью аналоговыми или сочетать в себе и то и другое. Такие схемы выполняют функции связи между электромеханическими устройствами ввода, управления, датчиками командных импульсов и элементами функциональной схемы блока вычислительного устройства.

Устройства ввода/вывода часто далеко отстоят от основной системы и соединяются с ней посредством длинных кабелей. Многие из устройств содержат переключатели, реле, двигатели, которые работают с большими мощностями и создают большие выбросы напряжения и тока. Для уменьшения помех следует проектировать цепи сопряжения с ограниченными токами и напряжением. Используя мощные схемы с низким быстродействием,

подавляющие выбросы и исключаящие возникновение дугового разряда, необходимо стремиться к тому, чтобы они были как можно более компактными [2].

Выходные схемы следует проектировать таким образом, чтобы создаваемые ими высокие переходные токи могли гаситься подсоединенными к ним нагрузками. Так, например, при включении лампы накаливания ток переходного процесса может превышать рабочий ток в 10–15 раз, трансформатора – в 100 раз, двигателя – в 25 раз, реле – в 15 раз. Такие выбросы тока способствуют появлению сильных помех и могут привести к сплавлению контактов или выходу из строя полупроводниковых приборов. Для предотвращения этих выбросов следует воспользоваться RC-цепями. При этом значение сопротивления резистора в данной цепи должно быть минимально. Все компоненты помехоподавляющих схем должны располагаться близко к контактам переключателей, а все выводы должны быть как можно короче.

4 РАЗБИЕНИЕ СХЕМЫ СИСТЕМЫ

На первом шаге проектирования необходимо разбить систему на отдельные части. Разбиение делит систему с позиции ЭМС на критические и некритические схемы. Критическими называются схемы, которые содержат источники излучений, или схемы, особенно чувствительные к внешним помехам: микропроцессорные цепи и низкоуровневые аналоговые цепи. Некритические схемы по уровню сигналов и функциям цепи не восприимчивы к внешним возмущениям. Разбиение схемы на отдельные функционально законченные узлы и их компоновка определяют, что и где должно быть размещено в электронной системе. Проблемы возникновения помех и наводок можно свести к минимуму, изолировав паразитные индуктивные и емкостные связи, связи через общее сопротивление и антенные эффекты. Для этого необходимо располагать:

- маломощные (чувствительные) схемы поблизости от источников сигналов;
- мощные схемы, в которых велика вероятность возникновения помех, вблизи нагрузок;
- маломощные и мощные схемы как можно дальше друг от друга.

При этом следует добиваться, чтобы проводники были как можно короче, а площадь контура прохождения токов была минимальной.

Все электронные схемы можно разделить на пять основных групп [2], две из которых зависят от величины импеданса (меры сопротивления электрической схемы переменному току, которая отличается от обычного сопротивления дополнительным учетом влияния на переменный ток реактивных элементов схемы: катушек индуктивности, конденсаторов – комплексным сопротивлением между двумя узлами цепи):

- 1) чувствительные схемы с высоким импедансом ($|Z| \geq 376,7 \text{ Ом}$), в которых высока вероятность возникновения паразитной емкостной связи;

2) чувствительные схемы с низким импедансом ($|Z| \leq 376,7 \text{ Ом}$), где весьма вероятно возникновение паразитной индуктивной связи;

3) схемы умеренной чувствительности или схемы, рассчитанные на умеренный уровень потребляемой мощности;

4) высоковольтные схемы;

5) схемы, рассчитанные на высокий ток.

Аналоговые схемы обычно попадают в первые две группы, цифровые относятся к третьей группе, а схемы сопряжения и источники питания – к двум последним. Можно комбинировать схемы, принадлежащие к одной и той же группе, и составлять из них подсистемы, однако схемы с высоким импедансом следует располагать подальше от высоковольтных, а с низким импедансом не следует помещать рядом со схемами, рассчитанными на высокий ток. В общем случае при объединении схем, принадлежащих к различным группам, поступающие на них сигналы должны обладать достаточной устойчивостью к помехам и умеренным уровнем мощности.

Схемы, составляющие одну подсистему, должны обладать общими свойствами по входу и выходу и сравнимым уровнем помех. Такие условия приводят к тому, что большинство систем приходится подразделять на аналоговые и цифровые подсистемы, источники питания и подсистемы, содержащие электромагнитные приборы или переключатели. Желательно также, чтобы высокочастотные и низкочастотные схемы входили в разные подсистемы. Каждая подсистема должна быть более компактной и снабжена собственными средствами подачи питания и заземления. Проводники в подсистемах должны иметь низкий импеданс, а контуры прохождения тока должны быть минимальными.

В схемах управления силовой электроники, в состав которых входят высоковольтные схемы, необходимо выполнять гальваническую развязку, т.е. электрическую изоляцию рассматриваемой электрической цепи относительно других цепей, присутствующих в устройстве.

Гальваническая развязка обеспечивает независимость сигнальной цепи. При этом решается ряд проблем ЭМС, улучшается помехозащищенность. Изолированный вход или выход устрой-

ства всегда способствует лучшей его совместимости с другими устройствами в сложной ЭМО. По способу организации гальванические развязки разделяются на трансформаторные, оптоэлектронные (оптопары, оптоволоконные линии связи, фотогальванические элементы), акустические (через звуковой канал), емкостные (на высоких частотах через разделяющие конденсаторы малой емкости), развязки на коммутируемых конденсаторах, с преобразователями на эффекте Холла, электромеханические (реле, генераторы).

Напряжение электрического пробоя между низковольтной и высоковольтной частями схемы имеет стандартные значения 1,5; 2,5 и 4 кВ. Если устройство работает с сетевым напряжением, напряжение развязки 1,5 кВ будет достаточным. Если предполагается взаимодействие человека с устройством через кнопки или другие органы управления, то рекомендуется применять изоляцию напряжением не менее 2,5 кВ.

Через силовые трансформаторы возможна передача большой мощности. Для передачи информации обычно используют миниатюрные импульсные и высокочастотные трансформаторы. Иногда для электробезопасности применяют разделительные силовые трансформаторы (обычно понижающие, где напряжение вторичных обмоток ниже напряжения первичной). Электрорадиоизделия и печатные проводники части схемы, относящиеся к первичной и вторичной обмоткам, располагаются около соответствующих выводов. При этом зона гальванической развязки должна быть освобождена от элементов проводящего рисунка с целью обеспечения электрической изоляции (рис. 2). Для высоковольтных преобразователей (напряжение свыше 600 В) используется трансформаторная гальваническая развязка.

В преобразовательной технике, например, успешно применяется микросхема 1308EУЗ (аналог IR2113), которая представляет собой драйвер полумоста с развязкой верхнего ключа с электрической прочностью изоляции 600 В. Для полной гальванической развязки схемы управления от силовой схемы, которая обязательна для высоковольтных схем, эта микросхема не подходит, так как в ней нижний ключ не изолирован от схемы управления. Необходимы микросхемы развязки, обеспечивающие прочность

изоляции не менее 1000 В, а оптимально – около 2000 В. В низковольтных преобразователях (пиковое напряжение до 600 В) начиная с 1980-х годов широко используется для этих целей оптопара 249ЛП8, прочность изоляции которой 1500 В (рис. 3).

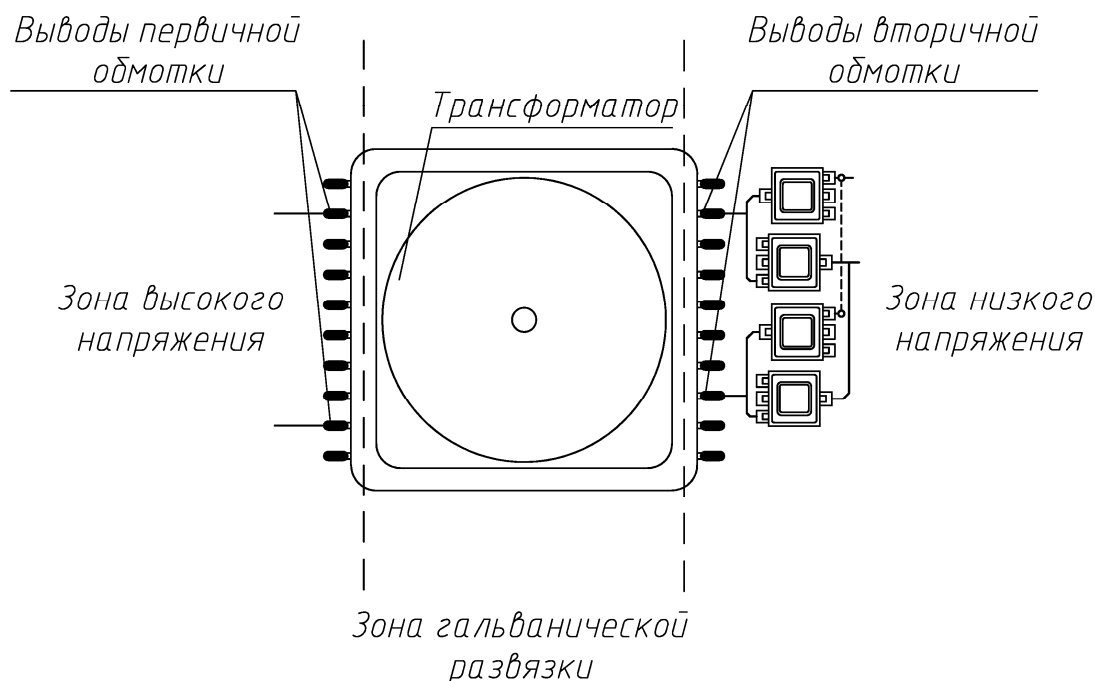


Рис. 2. Гальваническая развязка через трансформатор

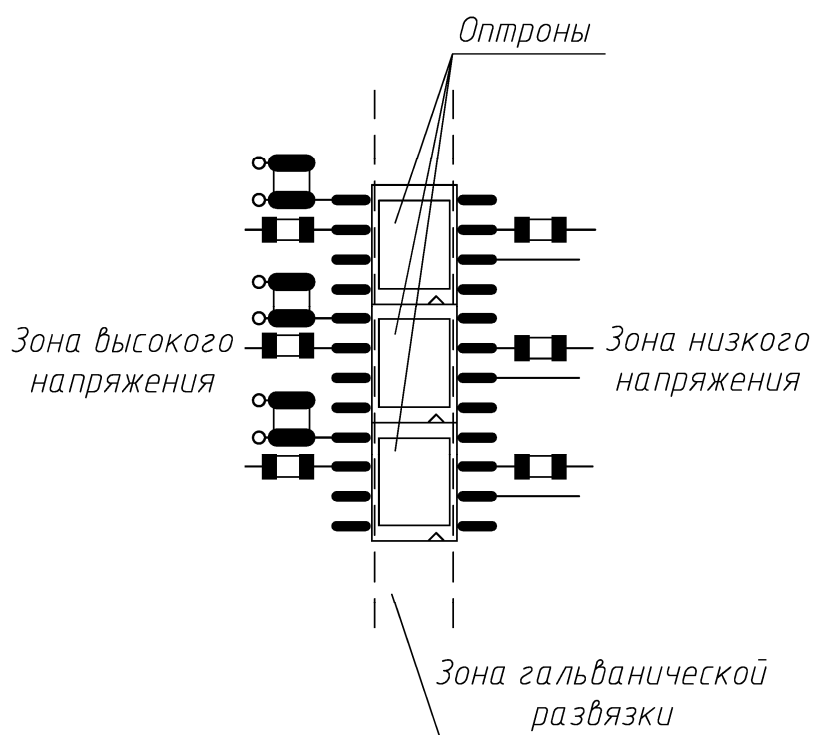


Рис. 3. Гальваническая развязка через оптроны

В устройствах этого типа сигнал передается с помощью оптического излучения, которое используется исключительно для передачи информационных сигналов, так как через такие развязки трудно и технически нецелесообразно передавать большую мощность.

При монтаже трансформаторов и других электромагнитных устройств следует проследить, чтобы их магнитные поля были направлены перпендикулярно друг другу, а сами устройства находились на значительном удалении от кабелей. При проектировании кабельной разводки необходимо обеспечивать минимум длины, минимальный импеданс и наименьшую площадь контура. Чувствительные схемы с их кабелями следует располагать как можно дальше от других участков, используя в качестве естественных экранов элементы корпуса системы. Заземляющие цепи подсистем должны соединяться только в одной точке, а вокруг высоковольтных схем и схем с высоким импедансом следует установить заземленные экраны [2].

5 НЕИДЕАЛЬНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ

Важным вопросом в ЭМС является неидеальное поведение пассивных и активных компонентов [10]. Существует представление, что поведение компонентов идеально, но для эффективного учета ЭМС при проектировании необходимо учитывать их неидеальность. Например, идеальный резистор имеет импеданс, не зависящий от частоты. Однако у данного резистора есть два вывода, влияние которых можно описать последовательно соединенными индуктивностью L_B и паразитной емкостью C_{Π} между ними, включенной параллельно сопротивлению R (рис. 4).

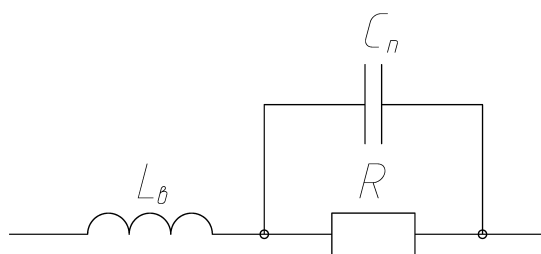


Рис. 4. Эквивалентная схема реального резистора

Это существенно меняет поведение импеданса резистора, которое остается резистивным только на низких частотах, становясь затем емкостным, а после частоты собственного резонанса – индуктивным (рис. 5).

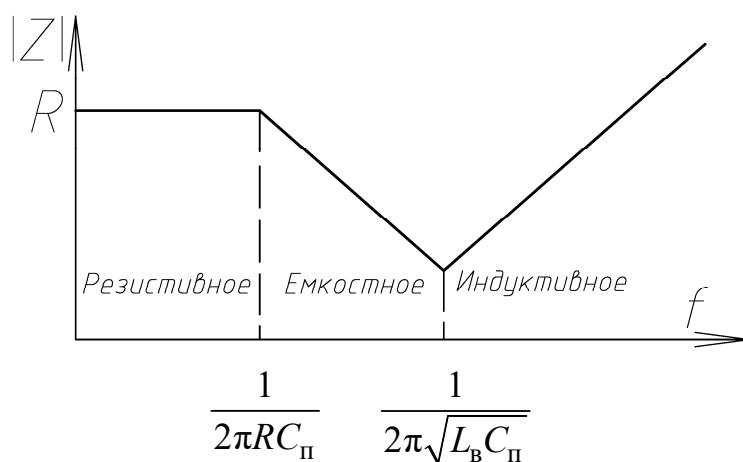


Рис. 5. Приближенная частотная зависимость модуля импеданса резистора

Измерив и вычислив значения элементов эквивалентной схемы реального резистора, можно получить более точные частотные характеристики. Для предотвращения резких изменений импеданса в общем случае желательно, чтобы резонансная частота резистора существенно превышала рабочую частоту схемы.

Конденсатор имеет обкладки и выводы, влияние которых описывается индуктивностью $L_{\text{в}}$ и сопротивлением $R_{\text{п}}$, включенными последовательно емкости C (рис. 6). Это существенно меняет поведение импеданса конденсатора, которое остается емкостным только до частоты собственного резонанса, а после нее становится индуктивным (рис. 7).

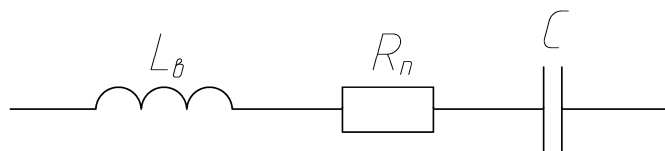


Рис. 6. Эквивалентная схема реального конденсатора

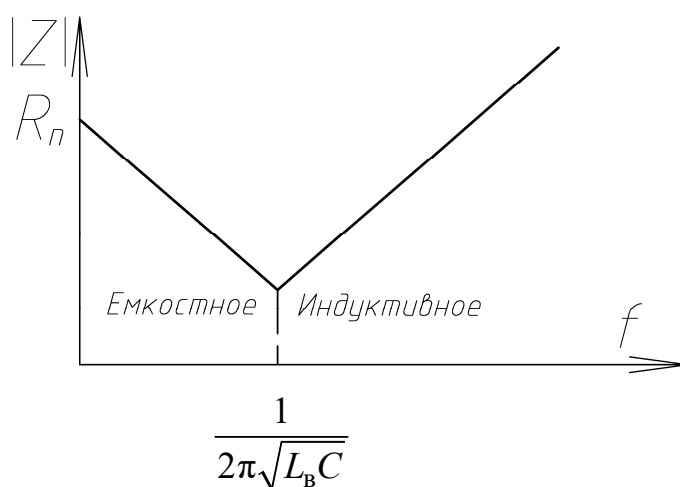


Рис. 7. Приближенная частотная зависимость модуля импеданса конденсатора

Необходимо отметить, что неидеальное поведение конденсаторов может давать неожиданные результаты после изменения номинала, длины выводов, частоты сигнала. Как правило, резонансная частота конденсатора должна существенно превышать рабочую частоту схемы. Одно из простых и широко используемых решений этой задачи заключается в подсоединении

небольших конденсаторов параллельно крупным конденсаторам. Такой метод способствует компенсации возрастания последовательного сопротивления по мере старения оксидного конденсатора и тем самым поддержанию фильтрующей эффективности схемы.

В реальных конструкциях катушки индуктивности могут существенно сказываться резистивные потери в проводнике, описываемые включением последовательно индуктивности L и сопротивления потерь R_{Π} . Кроме того, близкое расположение многочисленных витков проводника описывается паразитной емкостью C_{Π} (рис. 8). Это существенно изменяет результирующий импеданс, который растет и остается индуктивным только до частоты собственного резонанса идеальной индуктивности, а затем становится емкостным и уменьшается (рис. 9).

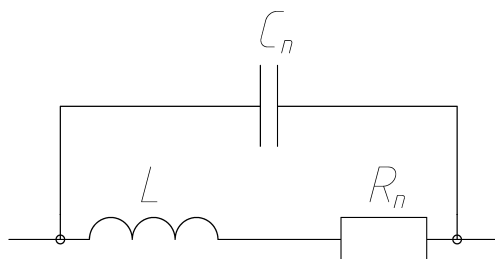


Рис. 8. Эквивалентная схема реальной индуктивности

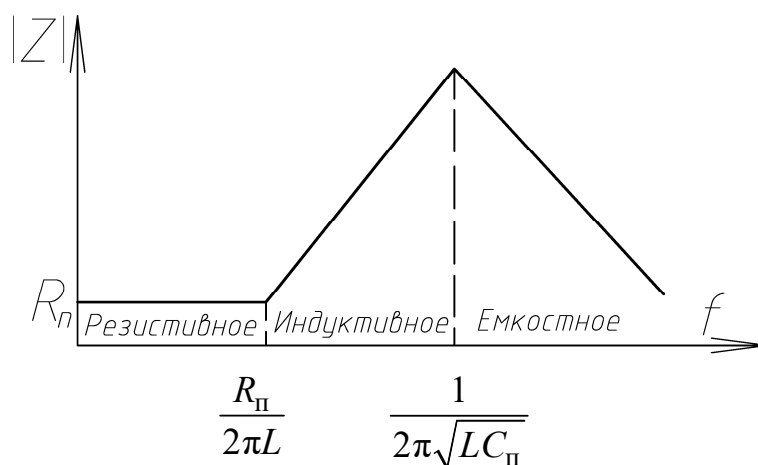


Рис. 9. Приближенная частотная зависимость модуля импеданса индуктивности

Проявления неидеальности поведения индуктивных компонентов связаны и с сердечником. Например, неэкранированные катушки индуктивности с незамкнутым магнитопроводом сердечника являются антеннами для магнитных полей. Большие токи насыщают сердечник, что приводит к выбросам напряжения и генерации гармоник сигнала. Причина этого состоит в нелинейной зависимости магнитной индукции сердечника от напряженности магнитного поля. Это эквивалентно изменению магнитной проницаемости сердечника, а значит, индуктивности катушки. Необходимо учитывать, что магнитная проницаемость сердечников из разных материалов, а также их потери существенно зависят от частоты. Кроме того, проницаемость зависит от температуры, а при нагреве до точки Кюри материал теряет свои магнитные свойства, то есть его относительная магнитная проницаемость падает до единицы.

Широко используются компоненты, в состав которых входят механические контакты – выключатели, реле, кнопки, коммутаторы и др. При размыкании электрической цепи возникает электрический разряд, сопровождающийся свечением воздуха и треском (тлеющий разряд). С увеличением напряжения тлеющий разряд переходит в искровой, а при достаточной мощности искровой разряд может проявляться в виде электрической дуги. Для появления дуги необходимо, чтобы напряжение на контактах было выше 10 В при токе в цепи более 0,1 А. При значительных напряжениях и токах температура внутри дуги может достигать 3 000–15 000 °С, в результате чего плавятся контакты и токоведущие части.

Процесс образования электрической дуги может быть представлен следующим образом. При расхождении контактов уменьшаются контактное давление и контактная поверхность, увеличиваются переходное сопротивление, плотность тока и температура, в результате чего на отдельных участках площади контактов начинаются местные перегревы, которые в дальнейшем способствуют термоэлектронной эмиссии, когда под воздействием высокой температуры увеличивается скорость движения электронов и они вырываются с поверхности электрода. В момент расхожде-

ния контактов, т.е. разрыва цепи, на контактной промежутке быстро восстанавливается напряжение. Поскольку при этом расстояние между контактами мало, возникает электрическое поле высокой напряженности, под воздействием которого с поверхности электрода вырываются электроны. Они разгоняются в электрическом поле и при ударе в нейтральный атом отдают ему свою кинетическую энергию. Если этой энергии достаточно, чтобы оторвать хоть один электрон в оболочке нейтрального атома, то происходит процесс ионизации. Образовавшиеся свободные электроны и ионы составляют плазму ствола дуги, т.е. ионизированного канала, в котором горит дуга и обеспечивается непрерывное движение частиц. При этом отрицательно заряженные частицы движутся в одном направлении, а атомы и молекулы газов, лишенные одного или нескольких электронов (положительно заряженные частицы), – в другом. В створе дуги проходит большой ток и создается высокая температура, которая приводит к термоионизации – процессу образования ионов вследствие соударения молекул и атомов, обладающих большой кинетической энергией при высоких скоростях их движения. Интенсивная термоионизация поддерживает высокую проводимость плазмы, поэтому падение напряжения по длине дуги невелико.

Механическими контактами управляются индуктивные нагрузки, размыкание таких цепей часто приводит к прерывистому разряду. Параллельно индуктивной нагрузке всегда включена паразитная емкость (рис. 10). При замкнутом ключе через индуктивность протекает установившийся ток $I = V/R$. Когда ключ размыкается, индуктивность стремится сохранить этот ток, и он протекает через емкость, заряжая ее до напряжения обратной полярности. Напряжение, приложенное к ключу, становится равным $V_k(t) = V_c(t) + V$ и, следовательно, возрастает, т.е. может превысить напряжение пробоя ключа. Емкость разряжается через ключ с током разряда, ограниченным сопротивлением и индуктивностью ключа. Если ток ключа превышает минимальный ток для установления дугового разряда, дуга держится; если нет, то дуга гасится и емкость начинает заряжаться вновь. Со временем запасенная сначала энергия рассеивается и напряжение на емкости

сводится к нулю ($V_K(t) = V$). Таким образом, наблюдается искрение, вызванное повторяющимся процессом нарастания и быстрого спада напряжения между контактами ключа.

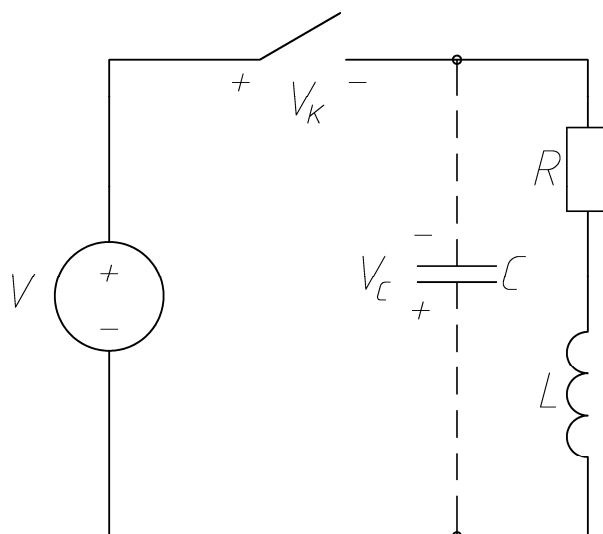


Рис. 10. Схема ключа с индуктивной нагрузкой

Спектр токов при искрении довольно широк, поэтому могут возникнуть проблемы с ЭМС. Проводники, по которым протекают токи, вызывают излучения и создают помехи, распространяющиеся непосредственно по проводникам. При этом появляются опасные воздействия, поскольку уровни сигнала могут составлять несколько вольт. Кроме того, дуга разрушает контакты ключа. Осознание этих проблем привело к использованию различных мер подавления искрения в механических ключах. Основная цель в этом случае – предотвратить формирование дуги. Существуют два способа: не допускать превышения напряжения в ключе более напряжения разряда, а тока – более тока разряда. Первый не дает дуге сформироваться, а второй – удерживаться.

Например, чтобы не дать дуге сформироваться, можно замедлить нарастание напряжения на ключе и уменьшить его пиковое значение. Для этого параллельно ключу или индуктивной нагрузке включают конденсатор достаточно большой емкости (рис. 11, а). Для ограничения тока разряда конденсатора через ключ при его замыкании последовательно конденсатору включается резистор небольшого сопротивления (рис. 11, б). Подавление

искрения в ключе может осуществляться как на самом ключе, так и на индуктивной нагрузке (или обоими способами) [10].

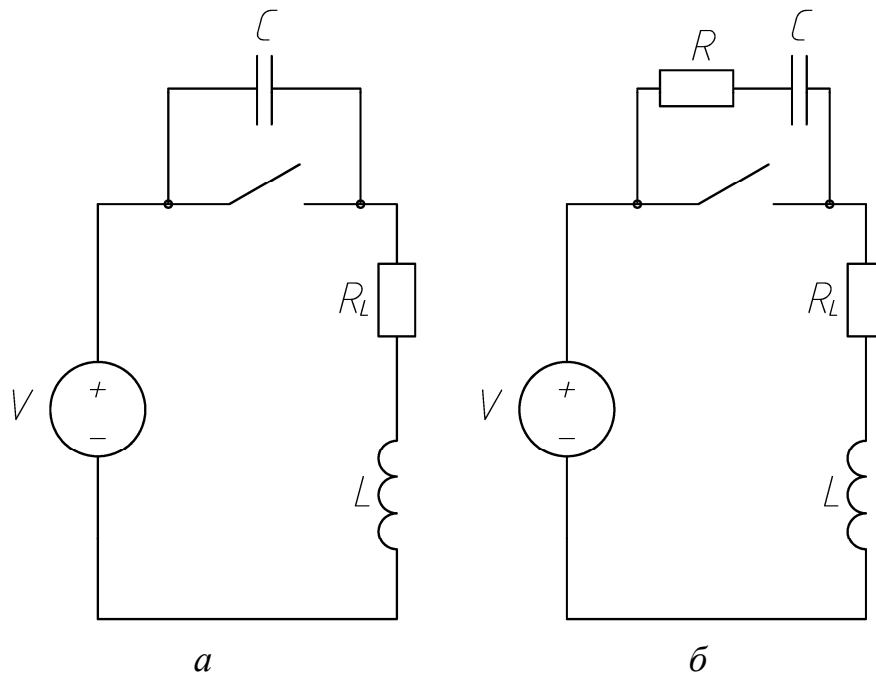


Рис. 11. Схемы защиты контактов ключа от искрения

Очень важен способ монтажа компонентов схем защиты. Поскольку через компоненты могут протекать большие и высокочастотные токи, они могут эффективно излучать. Поэтому надо минимизировать площадь контуров протекания этих токов. Для этого желательно размещать компоненты схем защиты в непосредственной близости к источнику помеховых токов.

6 ЗАЗЕМЛЕНИЕ

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

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. 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 [19]:

- сохранять минимальный потенциал, являющийся уровнем отсчета в конкретной аппаратуре;
- обеспечивать цепи возврата различных токов в аппаратуре;
- минимизировать нежелательные паразитные связи;
- образовывать опорные плоскости для антенн, препятствовать появлению вблизи антенн высокочастотных потенциалов;
- защищать людей и оборудование от неисправностей источников питания;
- снимать статические заряды.

Заземление – обладающая низким импедансом цепь возврата тока [20]. Протекание любого тока в системе заземления приведет к разности потенциалов. Для удовлетворительной работы оборудования необходимо, чтобы разность потенциалов была невелика по сравнению с амплитудой сигналов. Очевидно, что выполнение этого условия будет легче, если длина заземляющих проводников будет как можно короче. При проектировании системы заземления необходимо: поддерживать импеданс (комплексное сопротивление между двумя узлами цепи) на как можно более низком уровне; контролировать токи, протекающие между различными источниками и нагрузками, особенно через общие

участки системы заземления; не создавать замкнутых контуров заземления, чувствительных к магнитному полю [2].

Все цепи заземления можно разбить на несколько групп (рис. 12):

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



Рис. 12. Стандартные обозначения заземления

В очень редких случаях независимые контуры заземления могут не соединяться. Такая схема с «плавающим» заземлением применяется для чувствительных электрических схем (рис. 13).

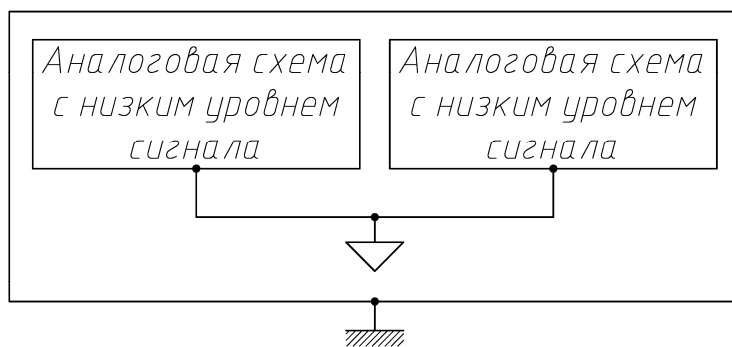


Рис. 13. Схема с «плавающим» заземлением

Она требует хорошей изоляции от корпуса (высокого сопротивления и низкой емкости), а иначе оказывается малоэффективной. 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. Сигналы должны поступать и покидать схему через транс-

форматоры или оптроны. Иногда точки сигнального и корпусного заземления соединяют высокоомным резистором, по которому стекают статические заряды.

Каждая отдельная схема и каждый экран имеют свой отвод к общей точке (рис. 14).

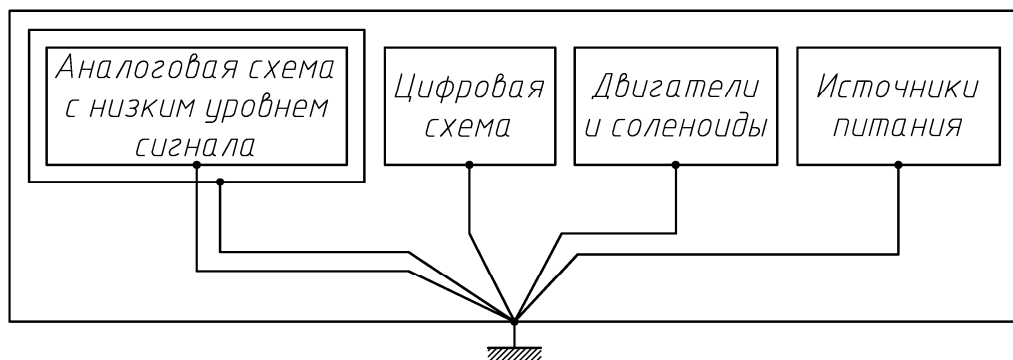


Рис. 14. Одноточечная система заземления

Каждое основание или каждая стойка соединяются с монтажной панелью с помощью одного проводника. При таком подходе исключается паразитная связь через общее сопротивление и уменьшается вероятность образования паразитных контуров. Однако одноточечная система 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 система 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 используются подобные заземления 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 (рис. 15). Такой принцип заземления уменьшает общее число проводов, незначительно повышая паразитную связь через общее сопротивление. Когда печатная плата (ПП) имеет отдельные за-

земляющие 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.

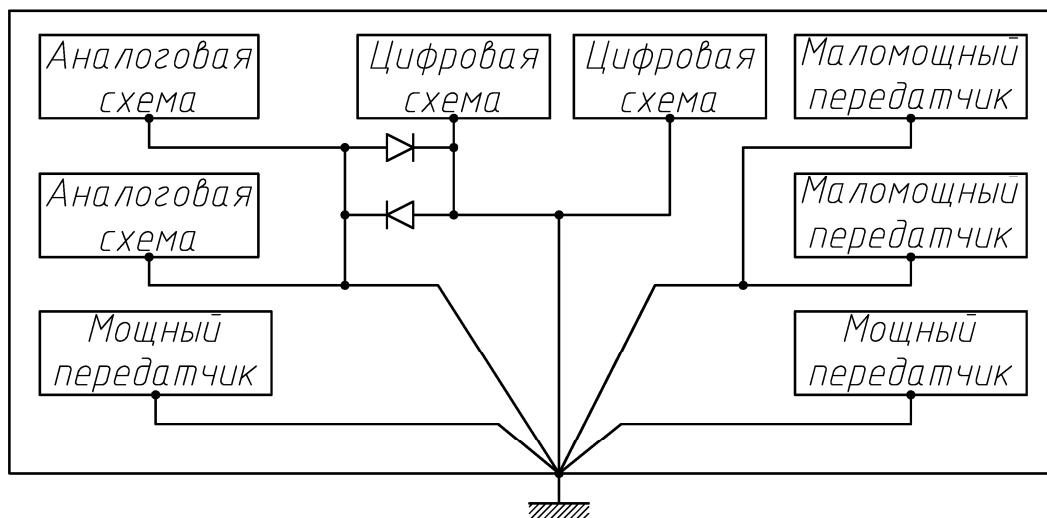


Рис. 15. Модифицированная одноточечная система заземления

При многоточечной системе заземления (рис. 16) отдельные схемы и участки корпуса соединены короткими перемычками ($l < 0,1\lambda$), чтобы свести к минимуму стоячие волны. Подобный метод обычно применяют для высокочастотных схем (более 10 МГц) с близким уровнем помех.

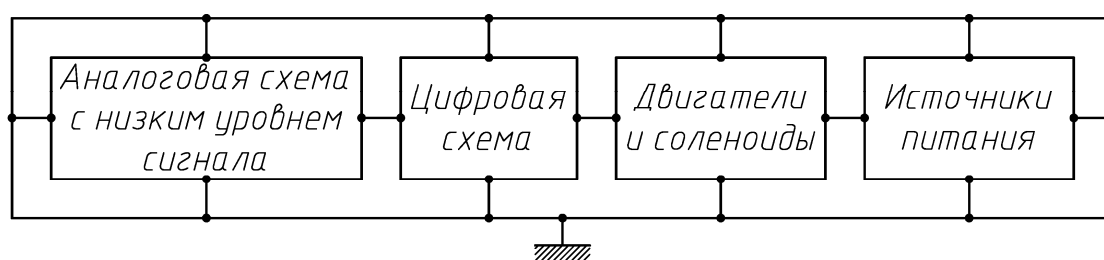


Рис. 16. Многоточечная система заземления

Такая заземляющая система 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 многослойной ПП, металлизация пластмассового корпуса и т.д.

Комбинированные заземляющие системы (рис. 17) представляют собой сочетание одноточечной, многоточечной и «плавающей» заземляющих систем.

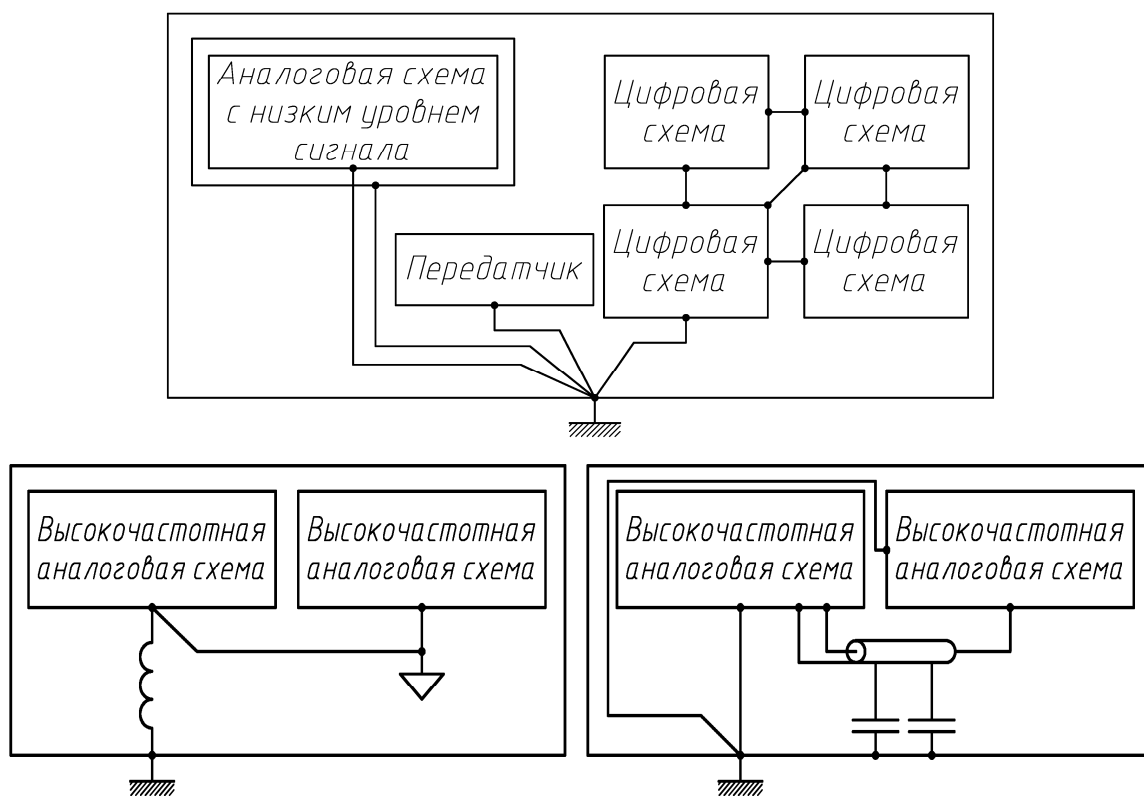


Рис. 17. Комбинированные системы заземления

Применяется катушка индуктивности, которая 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.

При применении двух последних вариантов заземления нужно быть очень внимательным, чтобы исключить резонансные явления в заземляющей системе из-за наличия в ней паразитных емкостей и индуктивностей.

Очень распространенным и в то же время требующим много хлопот является заземление в виде гирлянды (рис. 18). В нем помехи можно ослабить, если цепи с высоким уровнем помех

расположить в одной гирлянде (в порядке: цепи с незначительным уровнем помех, цепи с более высоким уровнем помех, цепи с максимальным уровнем помех, корпус), а чувствительные цепи расположить в другой гирлянде (в порядке: чувствительные схемы, более чувствительные схемы, самые чувствительные схемы, корпус).



Рис. 18. Система заземления в виде гирлянды

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 (линии, в которых 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 5-й или 10-й проводник должен использоваться для возврата сигнала. Эти линии возврата следует заземлять вблизи источника сигнала и его приемника.

Экраны необходимо заземлять для нейтрализации влияния электрических полей, причем заземляющие проводники следует располагать вблизи входных или выходных контактов сигнальной линии для уменьшения тока, текущего по экрану. Для 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. Длина перемычек, соединяющих корпус с

защитным заземлением, и расстояние между ними должны быть меньше $0,1\lambda$ (но не более 0,2 м). Перемычки заземления на корпусе следует располагать вдалеке от чувствительных схем [2].

В случае большой удаленности нагрузки от источника при заземлении цепи с обоих концов образуется контур заземления. В различных случаях он может приводить к влиянию помех различного рода. Например, когда через него протекают синфазные токи, потенциалы земли источника и земли нагрузки оказываются разными. Этот контур можно разорвать, применив развязывающий трансформатор. Трансформаторы обеспечивают удовлетворительную развязку до частот 5–10 МГц. Для более надежной развязки следует использовать трансформатор с электростатическим экранированием, причем заземлять экран у нагрузки.

Другой способ разрыва контура заземления осуществляется оптроном. 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 для цифровых сигналов.

Существуют несколько технических способов обеспечения низкоомной цепи заземления:

- соединение с широким поверхностным контактом, которое с двух концов имеет достаточно надежную связь с общим выводом;
- соединение из большого количества отдельных изолированных друг от друга проводников;
- применение экранированного провода, так как экран является для низких и высоких частот очень низкоомным соединением;
- использование системы заземления как пути возвратного тока, а не опорного напряжения 0 В;
- выполнение заземления короткими выводами.

7 ЭКРАНИРОВАНИЕ

Экранирование является основным средством ослабления электромагнитных помех вследствие проникновения поля в определенную область. 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 оптимальной компоновки аппаратуры.

В решении задач ЭМС и экранирования в частности важно правильно определить характер поля источника излучения помех. На практике для характеристики ЭМО при работе разнообразной РЭА используют термины *«электрическое поле»*, *«магнитное поле»*, *«электромагнитное поле»*. Электрическое поле создается зарядами между двумя проводниками с различными потенциалами. Для его характеристики используется понятие *«напряженность электрического поля E »*. Электрическое поле 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* . Оно 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 элементы источника питания, чувствительные к помехам. Эффек-

тивность экранирования SE оценивается в децибелах и определяется формулой [2]

$$SE = 10 \lg |P/P_э|,$$

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 электрических сигналов.

Сравнение двух сигналов путем сопоставления их мощностей не всегда бывает удобным. Во многих случаях оказывается проще измерять не мощность, а падение напряжения или протекающий ток, напряженность электрического и магнитного полей. Соотношение таких величин рассчитывается как отношение квадратов этих величин. Выражение эффективности экранирования принимает вид

$$SE = 20 \lg |E/E_э|;$$

$$SE = 20 \lg |H/H_э|,$$

где $E_э$ ($H_э$) – напряженность электрического (магнитного) поля в заданной точке защищаемого пространства при наличии экрана; E (H) – напряженность электрического (магнитного) поля в той же точке без 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 пространства, а также оказывает побочное влияние на паразитные параметры цепей электропитания, находящиеся в зоне действия экрана.

Для определения характера поля источника излучения полезны 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 $l \ll \lambda$ граница зон приблизительно определяется расстоянием $r = \lambda/2\pi$. Если $2\pi r/\lambda < 1$, то 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 характеристическим 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 $Z_D = 120\pi = 377$ Ом. Таким образом, определение зоны и характера источника поля позволяет принимать более эффективные меры. Поэтому различают задачи экранирования магнитного поля, электрического поля и плоской электромагнитной волны. Решение этих задач различно, но эффективная система экранирования для плоской волны будет эффективна и для экранирования электрического поля [21].

7.1 Магнитное поле

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 вследствие свойств излучателя либо соответствующей 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.

При магнитостатическом экранировании (т.е. магнитное поле создается постоянными магнитами или токами) происходит замыкание магнитного поля экраном вследствие его повышенной магнитной проводимости. Экран из немагнитного материала (медь, латунь, алюминий) не оказывает на магнитостатическое поле никакого влияния, и поэтому эффективность экранирования будет равна нулю.

К материалам, характеризующимся 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 существуют 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. При этом эффективность магнитостатического экранирования будет тем выше, чем выше магнитная проницаемость и толщина экрана, а также чем меньше в нем стыков, швов, разрезов поперек направления линий магнитной индукции [21].

Поэтому если они есть, то должны быть параллельны линиям магнитной индукции. Заземление экрана не влияет на эффективность его магнитостатического 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 [2].

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 – качество экранирования многослойного экрана будет выше, чем эффект от сплошного слоя с толщиной, равной сумме слоев.

Действие магнитного экрана в переменном высокочастотном магнитном поле основано на использовании явления электромагнитной индукции, приводящего к образованию ЭДС, вызывающей вихревые токи в экране, которые создают вторичное магнитное поле, направленное встречно помехонесущему полю в защищаемой экраном области. Следовательно, если в переменное магнитное поле поместить цилиндрический экран так, чтобы направление его оси совпадало с направлением линий магнитной индукции, то в нем, как в короткозамкнутом витке, согласно закону электромагнитной индукции наводится ЭДС, создающая переменный поток, магнитное поле которого направлено внутри цилиндра встречно, а за его пределами – в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле оказывается ослабленным внутри экрана и усиленным вне его, т.е. происходит вытеснение поля из защищаемой экраном области во внешнюю область пространства, следовательно, и экранирование.

7.2 Электрическое поле

В ближней зоне узлов и элементов РЭА с большими напряжениями и малыми токами создаются электромагнитные поля с преобладанием электрической составляющей (рис. 19, а). При этом помехи определяются электрической индукцией, приближенно определяемой эквивалентной емкостью связи. Для ослабления этой связи можно использовать следующие меры:

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

Если применение указанных мер при проектировании аппаратуры ограничено, то для обеспечения требуемого ослабления помех необходимо прибегнуть к экранированию электрического поля (рис. 19, б). Оно основано на замыкании силовых линий помехонесущего электрического поля на металлический экран, соединенный с корпусом аппаратуры или землей.

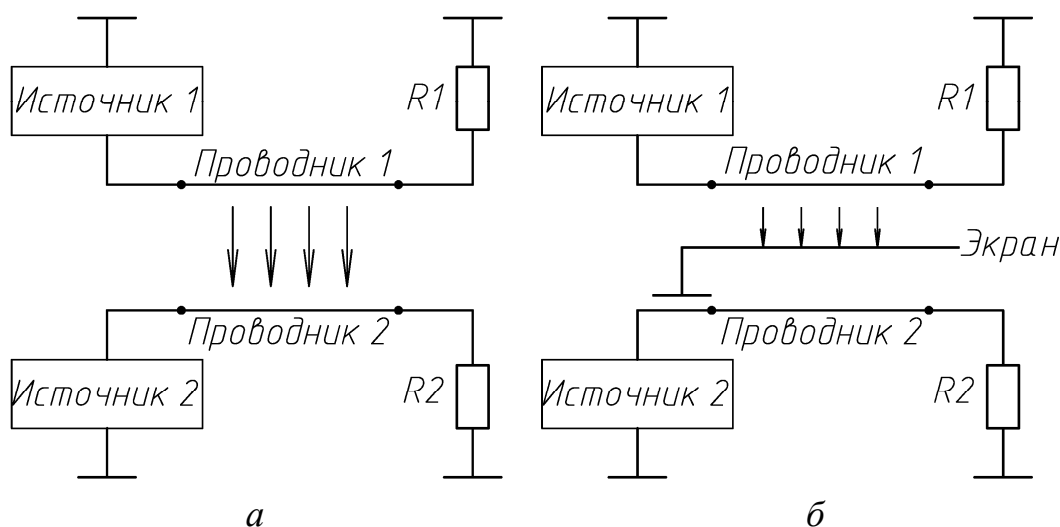


Рис. 19. Защита цепи сопротивления R_2 электростатическим экраном

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

7.3 Электромагнитное поле

В общем случае экран, толщина которого обеспечивает необходимую механическую прочность, предоставляет 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 создают медные или алюминиевые экраны. Для экранирования магнитных полей частотой от 10 кГц до 1 МГц следует применять стальную фольгу, а для экранирования магнитных полей ниже 10 кГц, когда становятся критическими размер и масса экрана, – сплавы с высокой магнитной проницаемостью (мю-металл, пермаллой) [2].

Степень ослабления обеспечивается экраном и зависит от трех механизмов. 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» (рис. 20).

Для оценки возможностей экранирования полезно рассмотреть случай перпендикулярного падения электромагнитной волны частотой f (Гц) и характеристическим сопротивлением Z_D на находящийся на расстоянии r от источника экран толщиной T из металла с абсолютной магнитной проницаемостью

$\mu = \mu_0 \mu_r \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \mu_r$ (Гн/м) и удельной электрической проводимостью σ , См/м (см. рис. 20) [2].

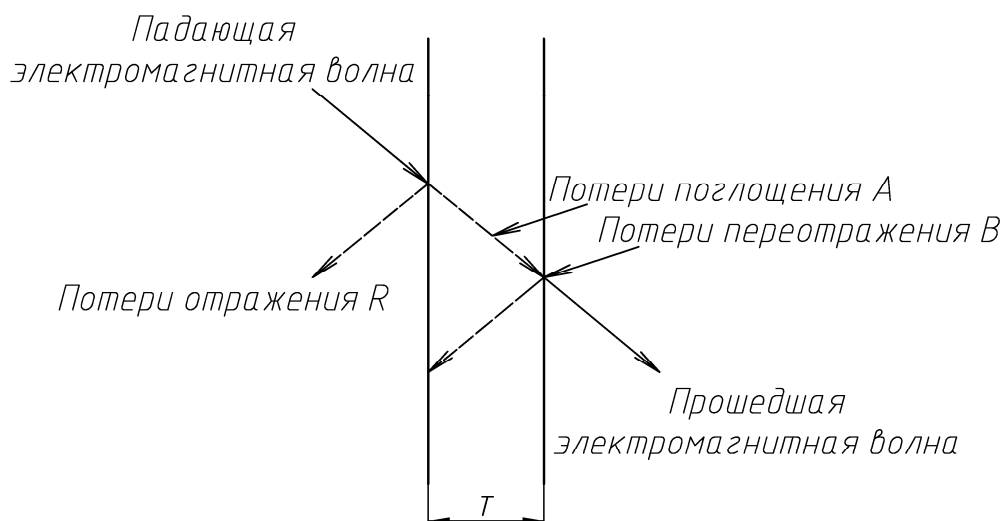


Рис. 20. Экранирование металлической пластиной

При падении волны на границу «воздух–металл» часть ее отражается, а оставшаяся часть распространяется в металле, ослабляясь при этом из-за потерь в металле. Дойдя до границы «металл–воздух» волна опять отражается, часть ее выходит из металла, а отраженная часть распространяется в обратном направлении, испытывая многочисленные переотражения в стенке металла. 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.

В общем случае эффективность экранирования (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 металла (это слагаемое отрицательно, поскольку в результате каждого переотражения часть волны все же проникает в экран).

Вычислить эти величины можно по формулам [10]

$$A = 20 \lg \left(e^{-\frac{T}{\delta}} \right) \approx 8,69 \frac{T}{\delta},$$

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

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

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

В зависимости от вида поля источника определяется Z_D :

– электромагнитного поля

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

– магнитного поля

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

– электрического поля

$$Z_D = \sqrt{\frac{1}{2\pi f \mu_0}}; \quad Z_M = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}};$$

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

Высокое характеристическое сопротивление электрических полей $Z_D \geq 377$ Ом способствует их отражению на границе раздела «воздух–экран», поэтому в этом случае очень тонкие экраны оказываются эффективными. Заземляя экраны, можно защитить схемы и от низкочастотных электрических полей. Магнитные поля с низким характеристическим 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.

Эффективность экранирования SE ориентировочно может быть оценена следующим образом:

$SE < 10$ дБ – недостаточное;

$10 < SE < 30$ дБ – соответствующее минимальным требованиям;

$30 < SE < 60$ дБ – достаточное;

$60 < SE < 90$ дБ – хорошее;

$90 < SE < 120$ дБ – предельно возможное.

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 эффективно экранирует от электрических и магнитных полей частотой более 100 кГц. Тонкий слой фольги легко формовать и сворачивать [21].

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, оказывается эффективнее медного. Однако для повышения его эффективности приходится

увеличивать его толщину. Кроме того, с ростом частоты магнитная проницаемость всех материалов резко уменьшается, причем тем значительнее, чем больше ее начальная величина. 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 материала ферромагнетика его магнитная проницаемость падает. Во избежание эффекта насыщения экран делают многослойным, при этом желательно, чтобы каждый последующий слой (по отношению к экранирующему излучению) имел большее начальное значение магнитной проницаемости, чем предыдущий, так как эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в толщу материала обратно пропорциональна произведению его магнитной проницаемости.

7.4 Элементы конструкции экранов

В зависимости от назначения экраны представляют собой самостоятельную конструкцию или часть конструкции экранируемой РЭА. Назначение экрана соответствующим образом 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 стенка устройства используется в качестве экрана 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.

На эффективность экранирования оказывают влияние наличие дефектов и отверстий в стенке экрана. В большинстве случаев прохождение полей через экраны обусловлено отверстиями и зазорами, которые уменьшают эффективность экранирования. По-

этому конструкция экрана должна сводить эти нежелательные влияния к минимуму.

Если размеры щели в экране $W \times P$ (м) ($W \geq P$) (рис. 21, а), а толщина экрана T (м), эффективность экранирования (дБ) волны длиной $\lambda > 2(W + P)$ (м) можно рассчитать по формуле [2]

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

Если в экране выполнено круглое отверстие (рис. 21, б) диаметром D (м), эффективность экранирования (дБ) волны длиной $\lambda > \pi D$ (м) можно рассчитать по формуле [2]

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

Первое слагаемое в этих формулах описывает влияние отверстий, а второе – эффект запредельного волновода. В общем случае диаметр отверстия или ширина щели не должны превышать $0,05\lambda$ (м).

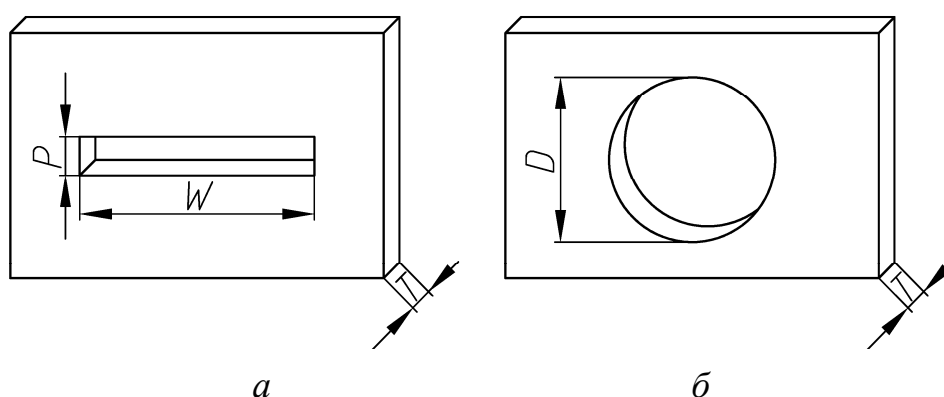


Рис. 21. Экраны с прямоугольной щелью (а) и круглым отверстием (б)

Можно экранировать высокочастотные установки, используя принцип заградительного волновода [2]. 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 пуклевок ($l_W \geq 3D$), вытянутых внутрь устройства (рис. 22).

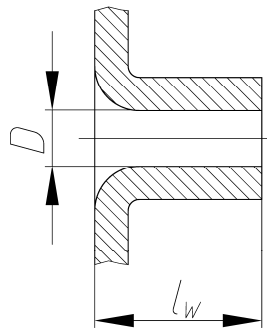


Рис. 22. Отверстие в виде пуклевки

Эффективность экранирования перфорированными экранами (рис. 23, 24) выражается формулой [3]

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

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.

В свою очередь потери в экране с прямоугольными отверстиями

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

– с круглыми отверстиями

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

– с отверстиями в виде волновода прямоугольного сечения

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

где W_w – наибольший линейный размер поперечного сечения волновода;

– с отверстиями в виде волновода круглого сечения

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

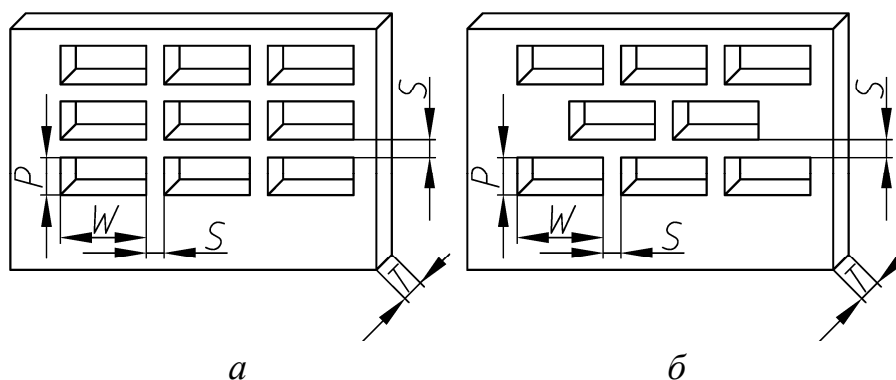


Рис. 23. Экраны с прямоугольными отверстиями

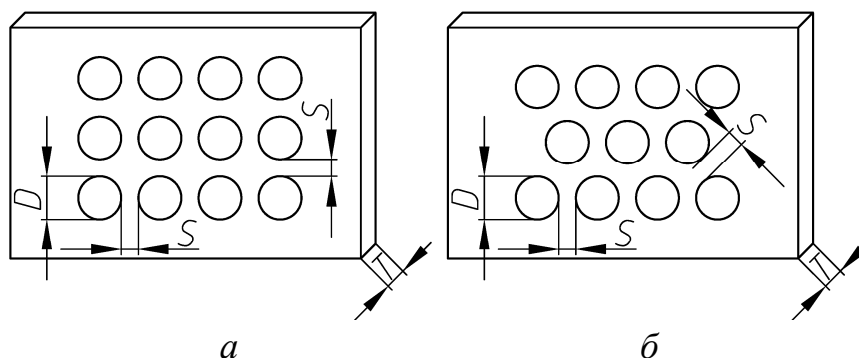


Рис. 24. Экраны с круглыми отверстиями

В выражениях, по которым определяются потери на отражение одиночного отверстия, учтен 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 числа отверстий определяется как

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

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 его физический смысл, а именно снижение эффективности экранирования при увеличении суммарной площади отверстий. Коэффициент определяется, если расстояние от источника электромагнитной волны существенно больше диаметра отверстия или его максимального размера. Если это условие не соблюдается, то $K_1 = 0$.

Поправочный коэффициент близости отверстий на низких частотах определяется как

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

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

Поправочный коэффициент близости отверстий на высоких частотах

$$K_3 = 20 \lg \left(\frac{e^{6,29T/W} + 1}{e^{6,29T/W} - 1} \right).$$

Для проволочных сеток следует пользоваться выражениями для экрана с прямоугольными отверстиями (см. рис. 20), 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 расстоянию между гранями и толщине стенок.

Для повышения эффективности экранирования перфорированных экранов рекомендуется:

- располагать отверстия в зонах со слабыми электромагнитными полями;
- не располагать отверстия около чувствительных элементов схемы;
- при заданной площади перфорации из конструктивных соображений уменьшать диаметр отверстий, увеличивая их количество;
- 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 заградительных волноводов.

Если в экранах необходимо выполнить швы, то они должны быть максимально плотными. Наилучшими являются сплошные сварные швы. Несколько уступают по качеству швы с перекрытием не менее 10 мм, точечно сваренные. 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 делает их более жесткими и уменьшает щели (рис. 25).

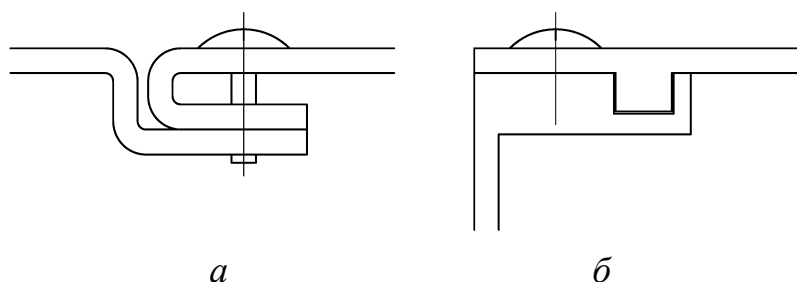


Рис. 25. Конструктивные лабиринты для электромагнитных волн

Схемы, являющиеся источником помех, и чувствительные схемы следует располагать вдали от краев крышки. Для уплотне-

ния соединения крышки с корпусом следует использовать заземляющие перемычки, металлические ленточные контакты или проводящие прокладки.

Прокладки используются для уплотнения сопрягаемых поверхностей, например, корпуса и крышки (рис. 26). Прокладки следует располагать вокруг стягивающих болтов между перекрывающимися участками экрана (рис. 26, *а, д*) для предотвращения рассеяния через отверстия под болты (рис. 26, *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 (рис. 26, *в, г, д*), приклеивать, используя проводящие склеивающие вещества (рис. 26, *а, б, д*). 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 (рис. 26, *е*).

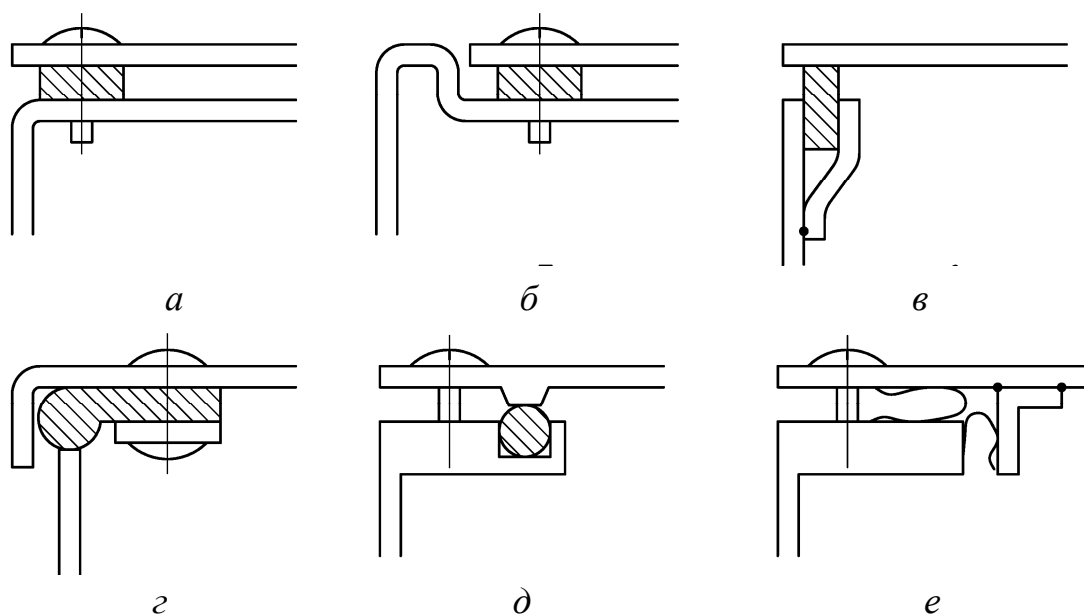


Рис. 26. Уплотнение разборных соединений с помощью прокладок

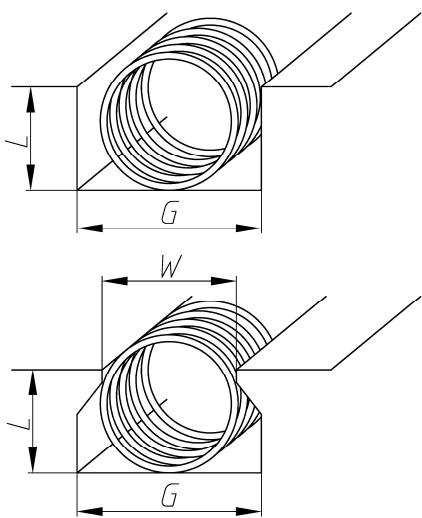
Толщина прокладки зависит от того, как часто будет разбираться соединение и каков максимальный зазор между сопрягае-

мыми деталями. В неразборных соединениях толщина прокладки должна превышать зазор в два раза. Соединения дверей и съемных панелей при аналогичном зазоре должны быть снабжены прокладками, толщина которых превышает этот зазор в три раза.

Широко используются спиральные проводящие прокладки, укладываемые для предотвращения их деформации или смещения в специальные канавки в корпусе (табл. 1) [10]. 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 нержавеющей стали или снижены требования к гибкости, экранирующим свойствам и предпочтителен более дешевый вариант.

Таблица 1

Рекомендуемые варианты установки и установочные размеры канавок корпуса для экранирующих спиралей

Вариант установки	Диаметр прокладки, мм	Глубина канавки L , мм	Ширина канавки G , мм	Ширина окна канавки W , мм
	0,9	0,59	1,17	0,84
	1,2	0,89	1,60	1,14
	1,6	1,17	2,19	1,52
	1,8	1,35	2,39	1,70
	2,0	1,50	2,77	1,91
	2,4	1,78	3,18	2,29
	2,6	1,96	3,58	2,52
	2,8	2,08	3,96	2,67
	3,2	2,39	4,34	3,07
	3,6	2,67	4,75	3,46
	4,4	3,25	5,94	4,19
	4,8	3,56	6,35	4,60
	6,4	4,70	8,71	6,10
	9,5	7,11	12,70	9,25

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 на постоянном токе. Чем меньше сопротивление, тем большую эффективность экранирования обеспечит установка прокладки в неоднородность экрана при сопряжении поверхностей корпуса [21].

Существуют экранирующие изделия из электрически проводящих эластомеров. Они состоят из силиконовой или флюоросиликоновой основы и серебряного наполнителя. Наполнителем могут также служить покрытые серебром медные или алюминиевые частицы, никель, никель с графитом. Эластомерные прокладки дают затухание электромагнитного поля от 50 до 120 дБ в зависимости от материала и длины волны, а также защищают от пыли и влаги.

Используются сеточные прокладки – деформируемые электромагнитные экраны из вязаного провода в виде мелкой сетки. Они изготавливаются прямоугольного и круглого поперечного сечения, сплошными и с полями, имеют отличную эластичность, обеспечивают хороший контакт и экранирование. Эффективность экранирования определяется размерами экранированной области, размерами ячеек сетки и технологией ее изготовления. Она увеличивается при уменьшении размера ячеек, при увеличении слоев сетки, которые должны быть изолированы друг от друга и соединены только в одной точке заземления [21]. Материалом 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 про-

вода. Кроме экранирования, такие прокладки обеспечивают пыле- и влагозащиту.

Для передачи высокочастотных сигналов широко используются коаксиальные кабели. 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).

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.

Уменьшение влияния магнитного поля достигается свиванием прямого и обратного проводов нагрузки. При высокоомных нагрузках доминирует влияние электрического поля, поэтому свивание проводов на него не действует [10], а компенсирует помехи в соседних витках витой пары от магнитного поля. Там, где сопротивление нагрузки меньше, магнитная связь больше, а свивание проводов уменьшает помеху. И наконец, где магнитная связь очень велика, т.е. сопротивление нагрузки мало, свивание проводов существенно 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).

Таким образом, для обеспечения хорошего экранирования необходимо:

- определить тип и размеры экрана, требуемые для представляющего интерес диапазона частот;

- располагать особо чувствительные цепи в качественных экранах;
- избегать больших отверстий в экране или принять меры для их исключения;
- выполнять хорошее соединение швов.

8 ФИЛЬТРАЦИЯ

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 по амплитуде до значений, заданных требованиями по обеспечению ЭМС как от внешних, так и от внутренних источников.

8.1 Помехоподавляющие фильтры

По своему назначению помехоподавляющие фильтры – это широкополосные фильтры нижних частот (ФНЧ), которые без искажения пропускают низкочастотные сигналы, но отражают высокочастотные (рис. 27).

Емкостной фильтр (рис. 27,*а*), работающий как проходной конденсатор, шунтирует помеху на землю и обеспечивает эффективную фильтрацию при высоких сопротивлениях источника и нагрузки. Индуктивный фильтр (рис. 27,*б*) хорошо работает при низких сопротивлениях источника и нагрузки

Емкостно-индуктивный и индуктивно-емкостной фильтры (рис. 27,*в,г*) следует применять там, где сопротивления источника и нагрузки существенно различны, 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 (рис. 27,*д*). Индуктивности в фильтре электромагнитных помех пропускают низкочастотные или даже постоянные сигналы, но блокируют нежелательные

высокочастотные сигналы. Конденсаторы обычно направляют высокочастотный шум путем низкого сопротивления обратно к заземлению источника питания или заземлению системы. При вероятности возникновения перенапряжений, выбросов тока и других нестационарных процессов на кабелях электропитания, рекомендуется на входе фильтра ставить индуктивность (см. рис. 27,з,д), которая будет в какой-то мере ослаблять возможные выбросы напряжений, обеспечивая определенную степень защиты конденсатора, как более чувствительного к нестационарным процессам элемента.

Фильтр П-образный (рис. 27,е) имеет два проходных конденсатора, шунтирующие помеху на землю, и индуктивность между ними. Такой фильтр представляет собой высокое сопротивление как для источника, так и для нагрузки. Больше всего подходит для применения в цепях с высокими, относительно равными по величине сопротивлениями источника и нагрузки.

Многосвязные фильтры (рис. 27,ж) применяются в условиях, сходных с условиями применения Т- и П-образных фильтров, в тех условиях, где предъявляются более высокие требования к характеристикам фильтра или требуется эффективное подавление помех в нижней части рабочего диапазона частот до 10 кГц. 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.

Емкостные и П-образные фильтры дают возможность достижения более высокого вносимого затухания в тех случаях, когда сопротивление источника и нагрузки более 50 Ом, а Т-образные дают возможность достижения более высокого вносимого затухания в тех случаях, когда сопротивление источника и нагрузки менее 50 Ом.

Такие фильтры наиболее распространены. Во многих случаях достаточно подключить конденсатор малой емкости или катушку индуктивности (см. рис. 27,а,б) вблизи помехосоздающих или чувствительных схем.

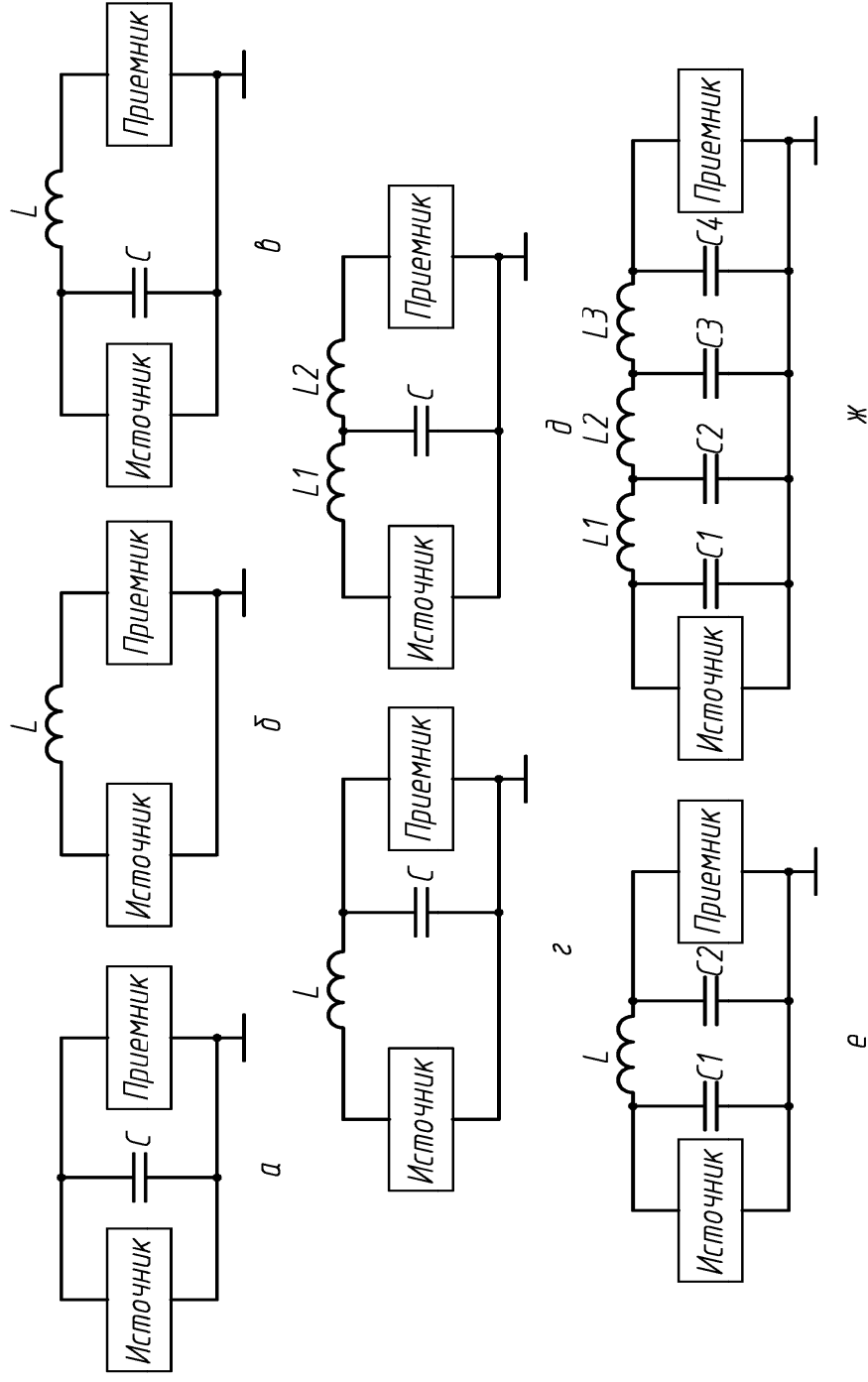


Рис. 27. Схемы помехоподавляющих ФНЧ: емкостная (а); индуктивная (б); емкостно-индуктивная (в); индуктивно-емкостная (г); Т-образная (д); П-образная (е); многозвенная (ж)

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

Первым элементом фильтра при малом сопротивлении источника выбирается катушка индуктивности, а при большом – конденсатор.

Аналогично выбирается и последний элемент фильтра, предшествующий нагрузке. 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.

Плохое заземление обуславливает общее полное сопротивление, которое уменьшается с частотой, связь на высоких частотах усиливается из-за локального пути заземления через фильтр (рис. 28). 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 при возможности экранированы друг от друга [11].

Расположение элементов внутри фильтра также играет существенную роль (рис. 29). Компоненты входа и выхода должны быть разнесены для минимальной емкостной связи, все сиг-

нальные проводники и особенно проводники заземления – по возможности короче и большего сечения. 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 является применение тороидальных сердечников.

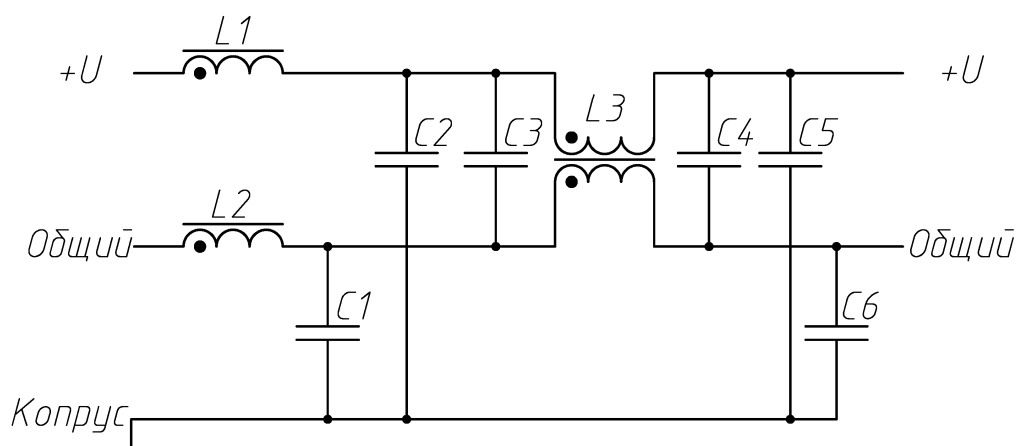


Рис. 28. Типовой сетевой фильтр

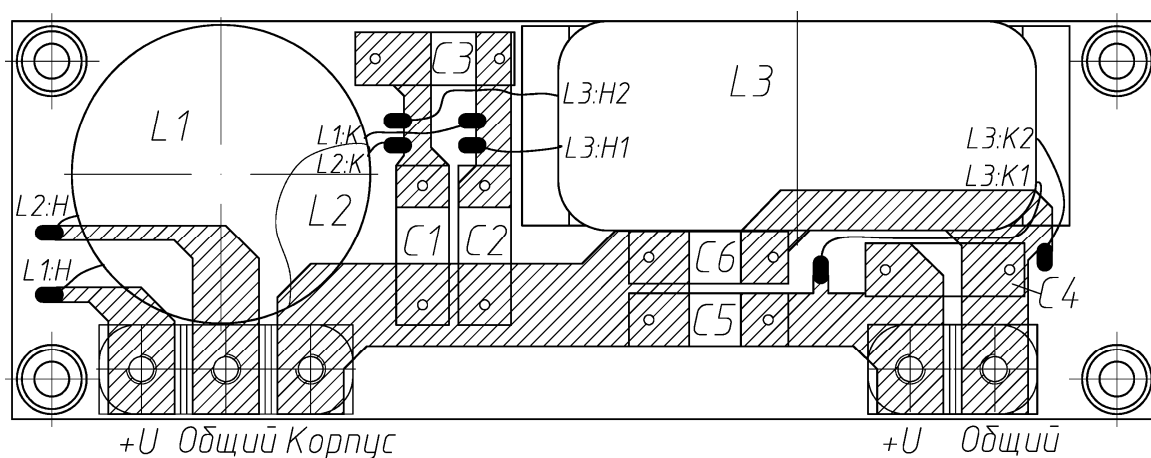


Рис. 29. Компоновка элементов фильтра на печатной плате

В изделии 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 (рис. 30). Это уменьшает влияние эмиссий, излучаемых внутри изделия, на кондуктивные эмиссии от него, а также помехи в обратном направлении.

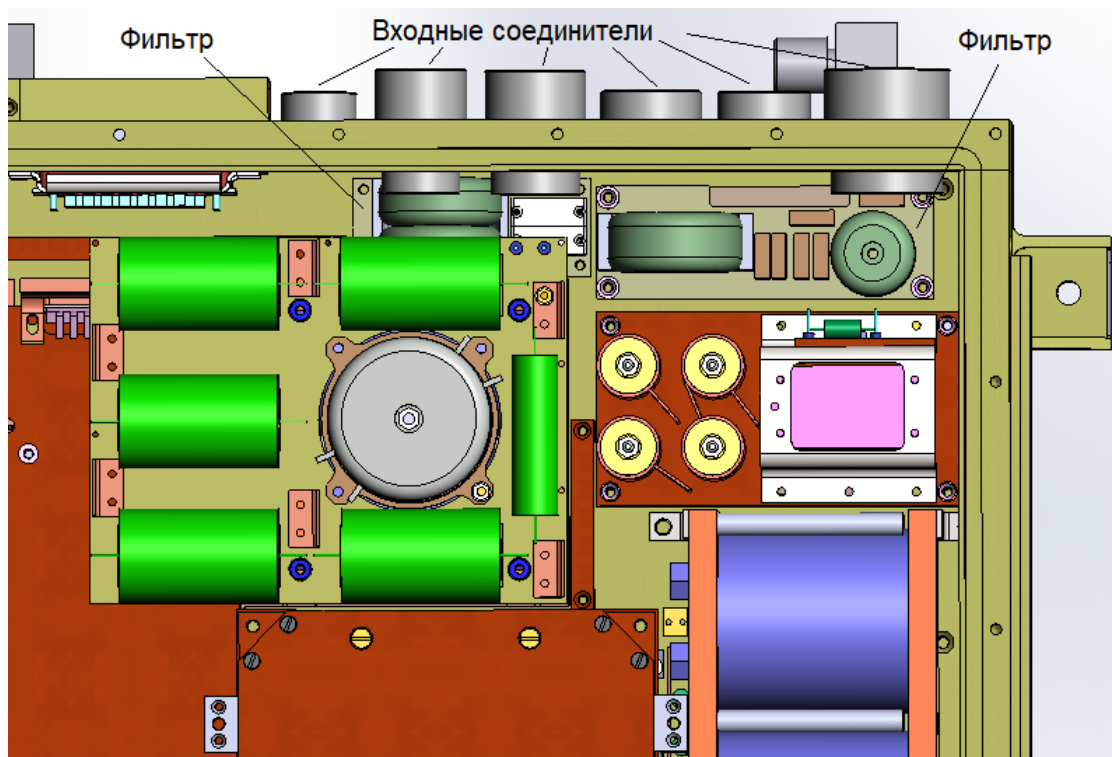


Рис. 30. Расположение фильтров в приборе

8.2 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 (рис. 31).

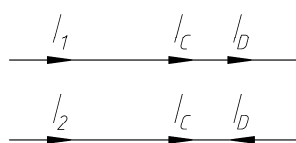


Рис. 31. Разложение тока на синфазный и противофазный

Эти токи можно разложить на синфазные I_C и противофазные I_D как

$$I_1 = I_C + I_D;$$

$$I_2 = I_C - I_D,$$

из чего получаются выражения синфазного и противофазного тока:

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

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

Результирующая напряженность электрического поля в какой-то одной точке наблюдения складывается из полей, создаваемых каждым из этих токов. Так как противофазные токи противоположно направлены, то создаваемые ими электрические поля также противоположно направлены 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. 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.

8.3 Ферриты с потерями

Контроля помех излучения от проводников можно достичь правильным размещением ферритового сердечника, вносящего потери [10]. Для удовлетворения большой потребности промышленности в области ЭМС разработаны разрезанные пополам фер-

риты, фиксируемые вокруг проводки после того, как она завершена.

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.

Текущий по проводнику ток создает вокруг него магнитное поле [13]. Передача энергии между током и магнитным полем определяется индуктивностью проводника. Расположение магнитных материалов вокруг проводника увеличивает плотность магнитного потока, что приводит к увеличению магнитного поля, и поэтому индуктивность проводника увеличивается. Феррит является именно таким материалом, его магнитная проницаемость управляется точным содержанием различных оксидных компонентов, входящих в его состав. Основной состав ферритовых материалов – это комбинация оксида железа и одного или нескольких других порошковых металлов, чаще всего марганца, цинка, кобальта и никеля. Ферриты эффективны в подавлении электромагнитных помех из-за изменения их потерь с частотой. Через феррит, установленный как подавитель, более низкие частоты пройдут без существенных потерь. Но выше частоты, с которой потери резко возрастают, 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.

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 почти пропорционально квадрату этого числа, но уменьшает частоту максимального затухания. Ферриты размещают на кабеле вблизи его выхода из корпуса изделия (рис. 32,а,б), которое может быть источником высокочастотных кондуктивных помех. Если кабель соединяет изделия, каждое из которых может быть ис-

точником помех, то ферриты могут потребоваться на каждом конце кабеля (рис. 32,в) [10].

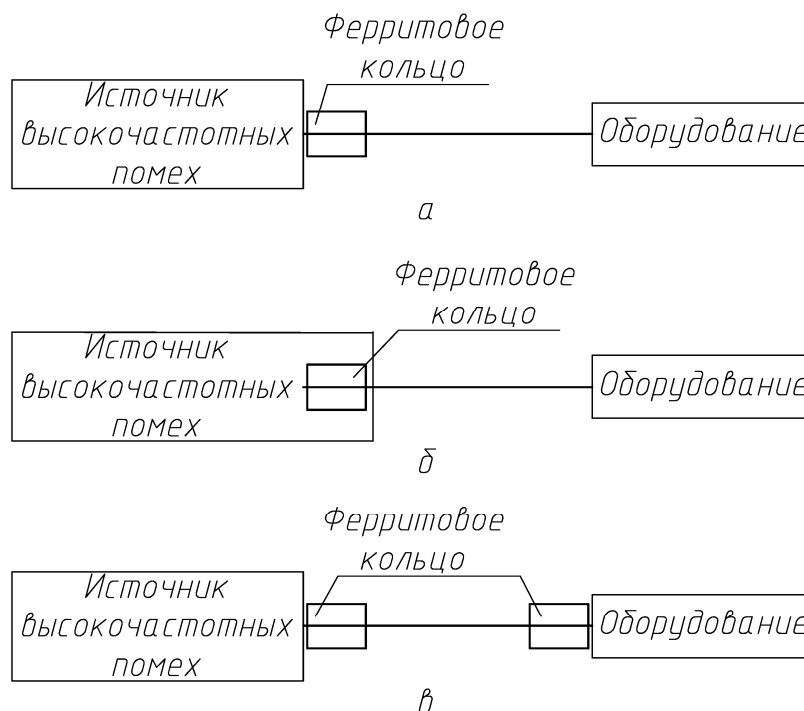


Рис. 32. Размещение ферритовых колец на кабеле

Обычно ферритовые кольца обеспечивают удовлетворительное функционирование схемы, пока постоянный ток не превышает 5 А [2], однако это предельное значение можно поднять, если в кольцо сформировать небольшие воздушные зазоры. Очень эффективным способом фильтрации является пропускание сквозь ферритовые кольца всех сигнальных и силовых линий, подходящих к корпусу.

Существуют два основных правила выбора ферритовых колец: там, где имеется возможность выбора, более длинное кольцо (втулка) предпочтительнее, чем толстое; из доступных следует применять материал с максимальными габаритными размерами.

9 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.

Из-за своей длины провода и кабели более эффективно взаимодействуют с внешней ЭМО, чем корпус аппаратуры, печатная плата и другие элементы конструкции. 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 [11].

Прежде всего сигналы, распространяющиеся по проводам, классифицируются по их напряжениям, токам и частотам. Проводной монтаж обычно разделяют на шесть видов [2]:

- 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

ку возмущения могут быть причиной возникновения помехоэмиссии 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 [11].

Совместная прокладка измерительных цепей и цепей управления с силовыми цепями с целью исключения электрического влияния силовых цепей на измерительные и цепи управления должна быть выполнена с учетом их пространственного разделения на всем протяжении, особенно когда трассы этих цепей параллельны. Расстояния между измерительными проводниками и силовыми зависят от мощности силовых электропроводок (табл. 2) [22].

Таблица 2

Минимальные расстояния от силовых до измерительных цепей

Электрические параметры электропроводок		Минимальное расстояние, см
Напряжение, В	Сила тока, А	
125	10	30
250	50	45
440	220	60

Неэкранированные силовые и информационные кабели необходимо разносить при прокладке, по крайней мере на 30 см. Силовые кабели желательно располагать ближе к элементам конструкции, которые поглощают часть излучаемой высокочастотной энергии. Информационные же желательно удалять от конструкции не менее чем на 25 см [12].

Однако не в любом оборудовании имеется достаточно свободного места для размещения проводов управления и силовых кабелей с учетом рекомендованных расстояний между ними. Поэтому необходимо принимать меры по уменьшению взаимовлияний.

Провода сигналов, чувствительных к помехам низкой частоты, можно объединить в жгут вместе с проводами питания постоянного тока при условии, что у чувствительных сигнальных линий имеются отдельные обратные провода для возвратных токов. Обратные провода питания постоянного тока не следует использовать в качестве заземляющих корпус и обратных сигнальных проводов.

Необходимо сводить к минимуму площади контуров, образуемых проводами питания, сигнальными проводами и нагрузкой в соединителях, а также контуров вблизи других кабелей и электромагнитных устройств. Если плоские и ленточные кабели связи удалены от металлических предметов и магнитных полей, они обеспечивают удовлетворительное функционирование на частотах до 150 МГц. Проводной монтаж из пары свитых проводов обладает низкой паразитной индуктивной связью и постоянным сопротивлением до частоты 10 МГц. При более высоких частотах сопротивление может меняться, так как начинают сказываться длина проводов, число изгибов на единицу длины и неравномерность их распределения.

Для прокладки кабелей необходимо использовать металлические кабелепроводы. 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 [21].

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 [2]. Для защиты от помех наиболее чувствительных сигналов могут потребоваться отдельные экраны, которые следует изолировать, чтобы не допустить случайного заземления. Провода чувствительных сигналов 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 режимов соединения при возмущениях, воздействующих на низких частотах (до нескольких сотен килогерц) и радиочастотах [11]. Эти два режима 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.

Заземление экрана только с одного конца (рис. 33, *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 (рис. 33, *б*). Это позволяет току I_s протекать в экране и компенсировать ток, наведенный в центральном проводнике.

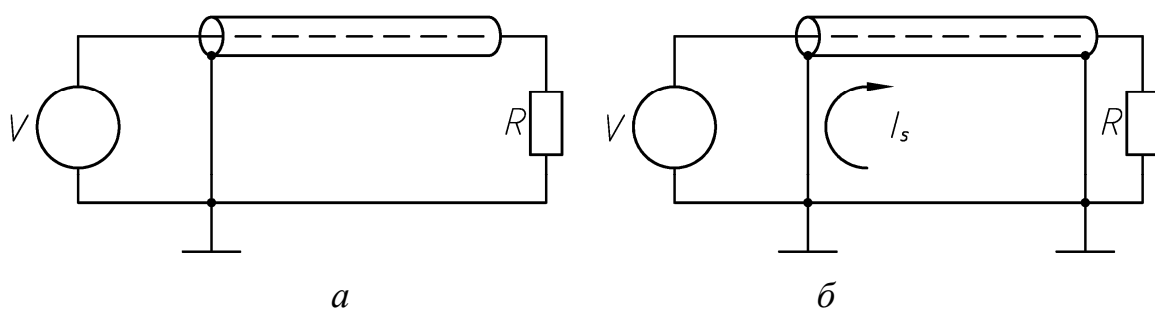


Рис. 33. Заземление экрана кабеля

Характеристики экранов зависят от их конструкций. 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:

- 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;

– металлизированная лента или фольга с дренажным проводом обеспечивает полное покрытие, но обладает явно выраженным высоким сопротивлением и поэтому умеренной эффективностью экранирования. Заделка этого провода представляет некоторые трудности. Ток экрана будет стремиться протекать в основном по дренажному проводу, делая экран непригодным для экранирования магнитных полей, хотя его экранирующее свойство для электрического поля высоко;

– комбинированный экран из ленты и оплетки содержит металлическую ленту и одиночную оплетку, что приводит к достижению оптимальных свойств на высоких частотах. Такая многослойная экранирующая оплетка улучшает характеристики одиночной оплетки, 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 то, что помеховые токи на экране будут протекать к земле без прохождения через другие цепи или без связи с ними. Наилучшим считается способ, когда экран охватывает соединитель на 360°. Соединение «косичкой» – это способ, когда экран отделяется от оплетки и формируется в виде некоторого проводника, который через контакт заземления подсоединяется к системе заземления, что не обеспечивает должного качества соединения на высоких частотах из-за индуктивности «косички». Если такое соединение применяется, оно должно быть выполнено настолько коротким, насколько это возможно. Также должно быть симметрично продублировано расположение «косички», чтобы ее индуктивность делилась пополам.

Когда принимается во внимание обеспечение ЭМС при проектировании РЭА, следует избегать параллельного расположения

сигнальных и силовых кабелей, использовать сигнальные кабели и соединители с правильным экранированием, располагать кабели дальше от отверстий в экранах и ближе к заземленным элементам конструкции, согласовывать линии, несущие высокочастотные сигналы, корректной нагрузкой, подсоединять качественно экран кабеля, избегая длинных неэкранированных участков.

10 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД

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.

Самый наглядный пример возникновения статического электричества – перемещение по ковру с густым ворсом. Когда человек идет по ковру, его ноги трутся о ворс и тело накапливает электрический заряд. При касании рукой любого металлического предмета, например дверной ручки, накопленный заряд моментально разрядится, в результате человек почувствует легкий удар током (еще никого не убил разряд тока от ковра). Ток, протекающий во время такого удара, слишком слаб, но для электронных компонентов и его может оказаться более чем 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.

Электростатический разряд – это внезапный поток электричества между двумя электрически заряженными объектами, вызванный контактом, коротким замыканием или пробоем диэлектрика. Опасность воздействия на оборудование ЭСР существует на всем жизненном цикле РЭА. Обычно воздействие ЭСР трактуется только как форма проявления ЭМП, хотя ЭМП – это только одно из проявлений ЭСР. Для возникновения ЭМП ЭСР должен

разрядиться непосредственно на оборудование. В некоторых случаях борьба с ЭМП может только усугубить ситуацию с ЭСР [23].

В электронике основная опасность, связанная со статическим зарядом, исходит от человека, несущего заряд. При разряде образуется тепло, которое приводит к выжиганию соединений, прерыванию контактов и разрыву дорожек микросхем. Часто компоненты не полностью выходят из строя, что можно считать еще более опасным, так как неисправность проявляется не сразу, а в непредсказуемый момент в процессе эксплуатации устройства. Общее правило – при работе с чувствительными к статическому электричеству устройствами всегда принимать меры для нейтрализации заряда, накопленного на теле человека.

Статическое электричество накапливается до тех пор, пока оно не получит возможность рассеяться или как-то высвободиться. В большинстве случаев со временем накопленный заряд «рассасывается» самостоятельно, но иногда может мгновенно разрядиться. Электрические заряды в материалах могут возникать при разрыве контакта между ними, трении друг о друга, деформации. При соприкосновении двух тел происходит перераспределение зарядов и, когда тела разъединяются, неравномерное распределение зарядов сохраняется. В результате соприкосновения двух материалов на их границе 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.

При трении материалов друг о друга вследствие неровностей поверхностей на отдельных участках возникает последовательный многократный контакт. 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 заряжения намного значительнее, чем при контакте материалов с последующим разрывом.

При деформации диэлектрических материалов происходит перераспределение зарядов под воздействием механической нагрузки, т.е. электроэластичный эффект.

В результате контакта изоляционные материалы самостоятельно 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, в основе которого лежит принцип обратной пропорциональности квадрата расстояния:

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

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. *Искра* – это разряд между двумя проводниками. Она характеризуется ярко выраженным световым каналом разряда, несущим ток высокой плотности. Искра проходит между двумя проводниками, когда напряженность поля между ними превышает электрическую напряженность атмосферы. Разница потенциалов между проводниками, необходимая для пробоя, зависит от их формы и расстояния между ними. Электрический разряд может спровоцировать возгорание. Эта способность разряда зависит 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 [23]. Коронный разряд наблюдается, когда один электрод, имеющий острые кромки, находится под высоким напряжением, а второй электрод заземлен (рис. 34, *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 (рис. 34, *б*). В результате коронного разряда электростатический заряд полностью не разряжается, этот вид разряда позволяет ограничивать возникающее напряжение и во многих случаях предотвращать электрический пробой.

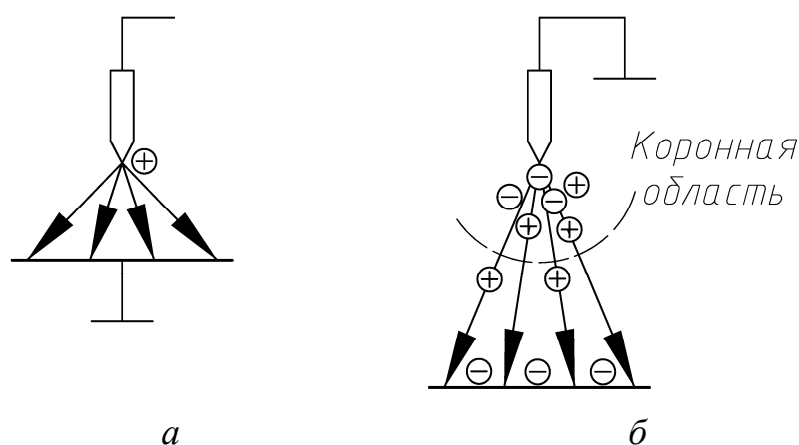


Рис. 34. Образование коронного разряда

Искровой разряд может происходить между двумя округлыми металлическими электродами (рис. 35). 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 элект-

трода до другого. Если электроды подсоединены к источнику напряжения, разряд может превратиться в непрерывную дугу (дуговой разряд). Когда разряжается заряд статического электричества, он быстро стекает по плазменному каналу, и разряд тут же прекращается.

Существует разновидность разряда, средняя 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 в течение достаточно длительного промежутка времени, он выглядит как неправильное люминесцентное свечение (рис. 36). Почти все разряды от изоляторов представляют собой кистевые разряды.

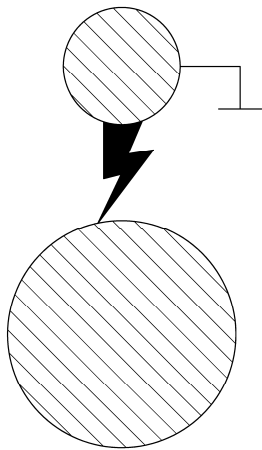


Рис. 35. Искровой разряд

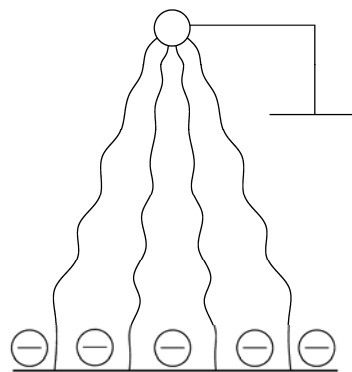


Рис. 36. Кистевой разряд

Поскольку объекты, между которыми проскакивает искра, являются проводниками, преобладающая часть сохраненного заряда проходит через искру. В большинстве случаев на практике это рассеивает почти всю сохраненную энергию. Энергия W (Дж) искры между телом и проводящим заземленным объектом может быть вычислена по формуле

$$W = \frac{QV}{2} = \frac{CV^2}{2},$$

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

Результатом расчета является максимальное количество энергии в зависимости от типа проводника (табл. 3).

Таблица 3

Значение емкости типичных 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.

Материалы очень отличаются друг от друга по своему отношению к статическому электричеству. К материалам, способным накапливать значительный статический заряд, относятся твердые тела, сопротивление которых выше 10^6 Ом. К материалам, на которых практически не образуются статические заряды, относятся твердые тела, сопротивление которых ниже 10^6 Ом, и проводящие материалы, соединенные с землей.

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 %.

При нейтрализации электрических зарядов на поверхности диэлектриков накопление заряда не исключается, но предотвращает нежелательное или опасное его проявление. Основная опас-

ность непосредственного воздействия ЭСР на РЭА заключается в поражении ее элементной базы. Различают основные виды дефектов, вызванные 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.). С позиции ЭМС ЭСР при косвенном воздействии является источником ЭМП.

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 [23]. Обычно импульс от ЭСР длится несколько микросекунд или менее. Поэтому любой вход, через который импульс может оказать необратимое воздействие на схему, должен быть защищен дважды. Это гарантирует, что одиночный импульс не причинит повреждений. Помехоустойчивость микросхемы определяется в этом случае динамической помехоустойчивостью, поэтому рекомендуется применять менее чувствительные и менее быстродействующие устройства. Следует по возможности не использовать логические схемы, срабатывающие по фронту импульса, и широкополосную логику. Если амплитуда импульса помехи высока, это может вызвать ложное срабатывание логики, и ложный сигнал пройдет по всей цепи так, как будто срабатывание вызвал 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. Следует соединять неиспользуемые входы с землей или питанием. Неиспользуемый вход обычно находится в состоянии покоя на пороге переключения. Возникающий помеховый сигнал на этом входе устройства может быть достаточным для превышения порога переключения и вызвать выходной сигнал.

Как и в случае схемотехнического проектирования, при разработке мер по устранению статического электричества на РЭА на этапе конструирования 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 принципы 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 [23].

На этапе конструирования для минимизации уровня связи при косвенном воздействии ЭСР используется рациональная компоновка, которая 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 различных зон (рис. 37), внутри которых применяются различные уровни защиты от ЭСР. Зона 0 (незащищенная) 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.

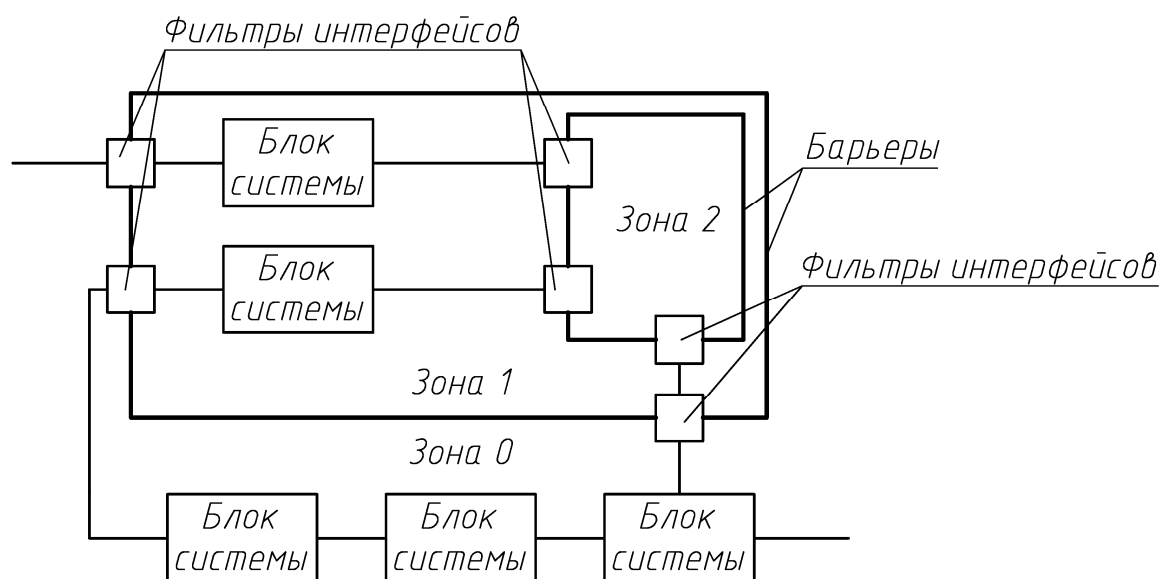


Рис. 37. Схема зонирования

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. 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, соответствующие ослаблению помеховой связи. Это обеспечивается системами защиты интерфейсов – фильтрами и ограничителями напряжений, возникающих в результате ЭСР. Подобный прием достаточно просто выполнить для кабелей питания, но для сигнальных линий и цепей управления это может вызвать значительные проблемы, в частности увеличить емкость кабеля, что приведет к снижению быстродействия системы. Существенным является качество подсоединения экрана к структуре заземления на границе. Это гарантирует, что токи помех на экране возвращаются к земле более эффективно, чем проникают из одной зоны в другую.

Заземление проектируется как отдельная подсистема. Хорошо спроектированная система заземления может существенно снизить помеховую связь внутри защищаемой зоны. Это происходит потому, что от заземления зависит комплексный ток. Остаточные токи помех не создают значительной разности потенциалов через зону, поэтому аппаратура внутри зоны не подвержена существенным электромагнитным воздействиям. 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.

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 устранит электростатическое поле. Металлический экран, полностью окружающий систему, гарантирует, что поле не будет действовать на систему, даже если на внешней поверхности экрана будет наведен заряд.

На практике аппаратура должна иметь смотровые окна, вентиляционные отверстия и пр. 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.

Электрические и магнитные поля высокой напряженности могут привести к вторичным разрядам или наводкам на схему [10]. Вторичные разряды предотвращаются путем заземления металлических частей корпуса или изоляции этих частей от близлежащих электронных цепей. 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 (рис. 38, *а*). 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. Свести к минимуму влияние вторичного разряда можно за счет увеличения пути разряда путем перекрытия стыков корпуса (рис. 38, *б*). Используют также дополнительный экран, уменьшающий емкость между частью корпуса, подверженной ЭСР, и близлежащими электронными цепями (рис. 38, *в*). Статическому разряду, накапливающемуся на пластмассовых элементах кнопок, дают возможность разрядиться на металлический разрядник, а не на печатную плату (рис. 38, *г*).

Для предотвращения появления дуговых разрядов внутри корпуса следует помнить, что на воздухе при напряжении около 20 кВ образуется дуга длиной около 2 см. При испытательном напряжении 4 кВ расстояние между заряженными элементами конструкции не должно быть менее 4 мм [23].

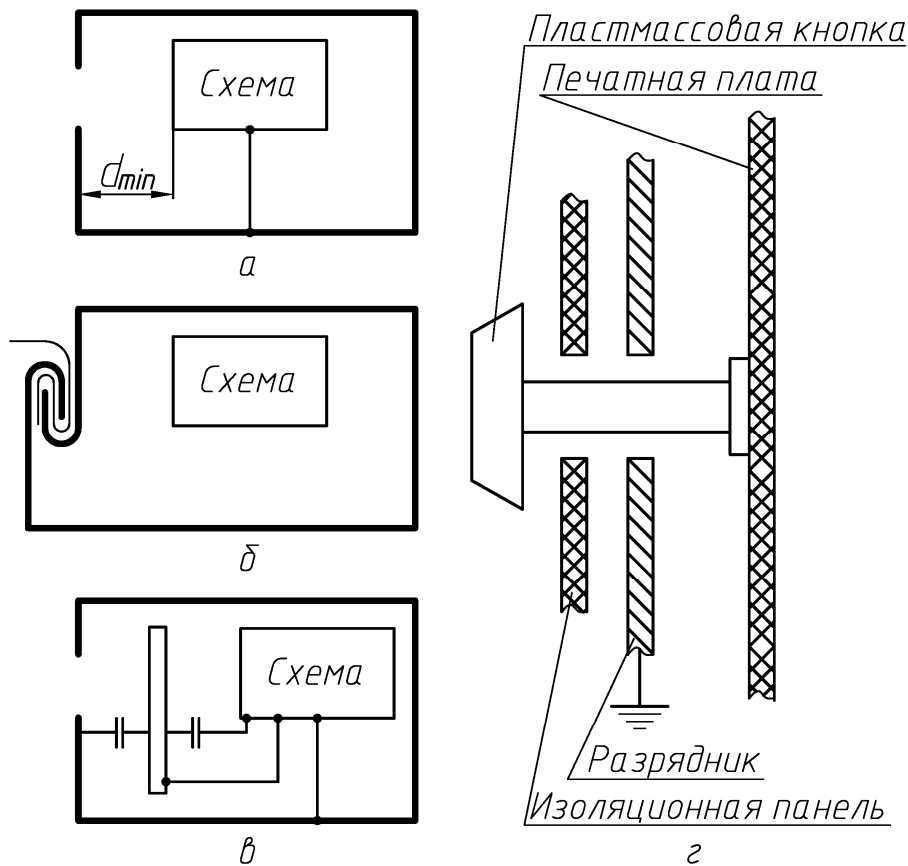


Рис. 38. Способы уменьшения влияния вторичного разряда: увеличение расстояния между элементами схемы и корпусом (а); увеличение длины пути разряда (б); введение дополнительного экрана (в); введение разрядника (г)

Хорошо заземленный корпус исключает развитие напряжения, достаточного для образования дуги ЭСР, поэтому в ряде случаев зазор в 4 мм может быть снижен. Из этого можно формулировать следующие рекомендации.

Во-первых, металлические неизолированные и заземленные части корпуса должны быть на расстоянии не менее 4 мм от открытых электронных компонентов или проводников (незаземленные крепежные и установочные изделия – особенно опасный путь попадания ЭСР в систему).

Во-вторых, следует избегать острых краев и углов на металлических элементах корпуса и шасси, так как они провоцируют вторичные дуговые разряды.

Наконец, корпуса должны конструироваться таким образом, чтобы оператор не мог приблизиться ближе чем на 4 см к поверхности открытого незаземленного металлического элемента конструкции, электронным компонентам или проводам, или же так, чтобы объект с заземленным шасси находился между оператором и электроникой.

Если электронные компоненты герметически закрыты качественным диэлектрическим материалом, например лаковым покрытием, то зазоры могут быть меньше. Следует помнить, что пластмассовые части имеют швы и отверстия, нарушающие герметизацию, что может вызвать возникновение дуговых разрядов между человеком и электроникой. Даже если объект с заземленным шасси перехватывает разряд до того, как он достигнет электроники, лучше, чтобы конструкция корпуса обеспечивала максимальное разделение источника и приемника ЭСР. Хотя разряд на заземленное шасси обычно не повреждает оборудование, он может за счет своего тока создавать сильное поле помех, которое необходимо учитывать.

Влияние ЭСР на работу схемы будет разным для разной геометрии корпуса и варианта подключения схемной земли к корпусной земле [10]. Влияние ЭСР на схему, схемная земля которой подключена к корпусной в непосредственной близости от места проникновения ЭСР (рис. 39, *а*), будет меньше, чем в случае подключения схемной земли дальше (рис. 39, *б*). Наименьшим сопротивлением будет обладать путь А, тогда как проход по пути Б, вероятнее всего, будет через элементы схемы. Однако определение пути наименьшего сопротивления (в силу широкого спектра ЭСР) может оказаться непростым. Даже протекание тока по пути А может привести к его сильному влиянию на электронные цепи. Поэтому правильное расположение точки подключения схемной земли к корпусной должно отводить токи от чувствительных цепей.

Если корпус хорошо защищает от ЭСР, то влияние ЭСР может быть связано с кабелями, играющими роль приемных и передающих антенн, и способствовать проникновению токов ЭСР в цепи внутри корпуса. Если экран кабеля сплошной (рис. 40, а), то он является продолжением корпуса и уменьшает влияние ЭСР. Если же экран соединяется с корпусом проводником (рис. 40, б), то протекание большого тока ЭСР по проводнику может создать наводки на входе кабеля.

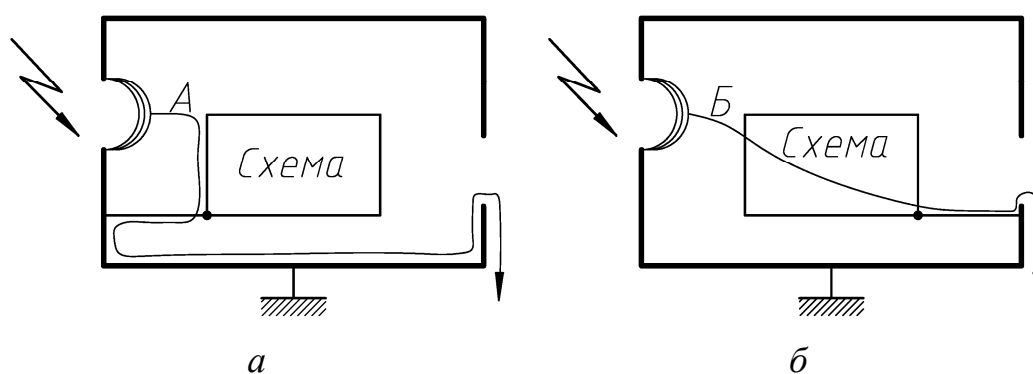


Рис. 39. Влияние подключения схемной земли к корпусной на путь разряда

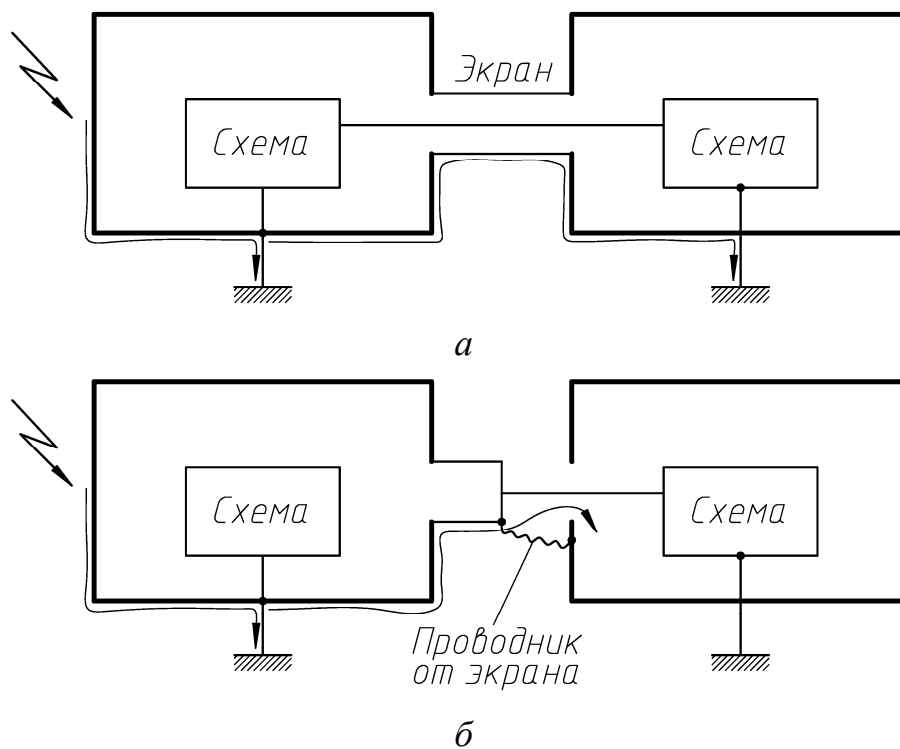


Рис. 40. Влияние подключения кабеля на распространение ЭСР

Сплошное экранирование часто непрактично и дорого, особенно если корпус пластмассовый. Тогда можно предотвратить протекание нежелательных токов их блокированием или шунтированием. Блокирование токов можно получить, применив синфазный дроссель, а шунтирование – подводя провода через проходные конденсаторы.

11 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ

В состав большинства РЭА входят монтажные платы, в которых на диэлектрическом основании установлены ЭРИ. С ростом быстродействия элементной базы и увеличение плотности монтажа электрические сигналы, распространяющиеся в межсоединениях на платах, искажаются из-за различных паразитных эффектов. Виды искажений и их проявление существенно зависят от конструкции платы, а также от геометрических и электрических параметров ее проводников и диэлектриков. Возможность уменьшения этих искажений еще на стадии проектирования плат играет важную роль в обеспечении ЭМС печатных узлов не только отдельного устройства, но и нескольких устройств, функционирующих в комплексе.

Печатная плата – это диэлектрическая пластина, на поверхности или в объеме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы. Плата предназначена для электрического и механического соединения различных электронных компонентов. Электронные компоненты на печатной плате соединяются своими выводами с элементами проводящего рисунка пайкой. Подходы, которые лежат в основе проектирования печатных плат, имеют существенные различия по обеспечению ЭМС для изделия в целом, в которое встраивается плата. Принципы, которые описаны выше, должны быть перенесены на печатную плату, особенно при ее компоновке, трассировке и организации заземления.

Проблемы обеспечения целостности сигнала выходят на ведущие позиции при проектировании цифровых систем в связи с увеличением их быстродействия. Решение этих проблем возможно только на основе анализа электромагнитных процессов, которые происходят в печатной плате при распространении сигнала по линиям передачи. Такие процессы попадают в одну из следующих категорий: тайминг, внутриаппаратные помехи, межсистемные электромагнитные помехи. Тайминг – это область, относящаяся к временным соотношениям в системе. В определенный

промежуток времени должен произойти ряд событий, связанных с обработкой дискретной информации, которая физически представлена в виде сигналов. Нарушение последовательности этих событий повлечет за собой ухудшение качества работоспособности изделия. Некорректная конструкция платы, отсутствие должного временного анализа прохождения сигналов по линиям передачи в плате приведут к упомянутым нарушениям.

Внутриаппаратные помехи проявляются в виде помех отражения, перекрестных помех, помех переключения, скачков напряжения в шинах питания и заземления, помех в результате затухания, дисперсии и т. п. Все они относятся к свойствам межсоединений и воздействуют на форму цифрового сигнала, приводя к его искажению. Вышеупомянутые эффекты связаны с проблемами целостности сигнала и с одним из следующих источников внутриаппаратных помех: электрофизические параметры и режим одиночной линии передачи, электромагнитное взаимодействие между двумя и более линиями, нарушение в системе распределения энергии и заземления, излучение от печатных узлов.

Эти проблемы играют важную роль во всех межсоединениях – от внутреннего межсоединения в кристалле и корпусе микросхемы до шкафа и стойки цифровой системы. На всех иерархических уровнях принципы и эффекты остаются неизменными, а отличия заключаются в физической структуре объекта – определенных геометрических размерах и свойствах материалов.

Перед началом этапа проектирования необходимо выполнить следующее:

- понять происхождение проблем целостности сигнала и общее направление их решения;
- конкретизировать общее направление в виде определенных правил проектирования для каждого конкретного изделия;
- провести анализ задач, выделяя критические направления, создавая модели для каждого компонента, критической цепи и системы в целом и выполняя моделирование;
- рационально построить процесс проектирования с учетом стоимости, времени выполнения и риска;

– провести экспериментальные исследования в течение всего цикла проектирования, чтобы уменьшить риск и повысить уверенность в качестве проектных решений.

11.1 Виды печатных плат

Выбор конструкции печатной платы является важным фактором, определяющим механические характеристики при использовании устройства в целом. Очень важно знать такие параметры слоистых пластиков, как удельное сопротивление, диэлектрическая постоянная, воспламеняемость, высокотемпературная стабильность, коэффициент гигроскопичности. Типовые конструкции печатных плат основаны на использовании стандартных теплоустойчивых 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 печатной платы. Применяется стеклотекстолит, покрытый с одной или двух сторон медной фольгой толщиной от 18 до 105 мкм. Этот параметр выбирается исходя из максимального протекающего тока.

В зависимости от общей сложности схемы и требований к качеству необходимо прежде всего определить количество слоев печатной платы [24]. Простые электронные схемы выполняются на односторонних печатных платах (ОПП) с использованием односторонних фольгированных материалов и часто имеют много перемычек, напоминая двухсторонние печатные платы (ДПП). Такой способ создания печатных плат рекомендуется только для низкочастотных схем, поскольку ОПП в большой степени восприимчивы к наводкам.

Конфигурация электронных схем, выполненных в виде печатных проводников, зависит от уровня протекающего по проводникам тока и напряжения. Ширина печатных проводников определяется токовой нагрузкой [25], а расстояния между проводниками и между другими элементами проводящего рисунка зависят от допустимых рабочих напряжений и определены стандартом [26].

На следующем уровне стоят ДПП, схемы на которых трассируются гораздо легче, так как в двух слоях проще осуществить разводку пересекающихся трасс. Однако для аналоговых схем пересечение трасс выполнять не рекомендуется. Там, где возможно, нижний слой необходимо отводить под полигон обратного провода, а остальные сигналы разводить в верхнем слое. Использование полигона в качестве обратного провода дает несколько преимуществ:

- обратный провод является наиболее часто подключаемым в схеме, поэтому лучше иметь соединение с ним для упрощения разводки во многих местах;
- увеличивается механическая прочность платы;
- уменьшается сопротивление всех подключений к обратному проводу, что в свою очередь уменьшает помехи;
- увеличивается распределенная емкость для каждой цепи схемы, помогая подавлять излучаемые помехи;
- полигон, являющийся экраном, подавляет помехи, излучаемые источниками, располагающимися с его стороны.

Если используется традиционная технология ОПП и ДПП, то самый простой способ трассировки плат состоит в том, чтобы начать с раскладки шины заземления. Затем размещают сигнальные цепи высокочастотной синхронизации или чувствительные цепи, которые должны быть расположены рядом с их возвратными земляными проводниками, а затем прокладывают все остальные. С принципиальной электрической схемой разработчику платы должна быть предоставлена следующая информация:

- физическое разделение на функциональные части, располагаемые на плате;
- требования к размещению чувствительных компонентов;
- требование о необходимости обеспечения гальванической развязки между группами элементов.

Тщательная проработка заземления прежде всего необходима с целью снижения уровня помех в межсоединениях путем минимизации значения собственного сопротивления заземления. Полное сопротивление проводника является преимущественно индуктивным на частотах выше нескольких килогерц. Индуктивность соединения можно уменьшить двумя путями:

- минимизировать длину проводника и, если возможно, увеличить его ширину;
- расположить проводник с возвратным током параллельно и на минимальном расстоянии.

Несмотря на все свои преимущества, ДПП не являются лучшими, особенно для малосигнальных или высокоскоростных схем. В общем случае толщина печатной платы, т.е. расстояние между слоями металлизации, равняется 1,5–2 мм, что слишком много для полной реализации некоторых преимуществ ДПП, приведенных выше.

Совмещение ДПП с металлическим основанием через диэлектрический слой, обеспечивающий электрическую изоляцию, образует монтажную плату (рис. 41), названную помехозащищенной теплопроводной монтажной платой (ПТМП) [27].

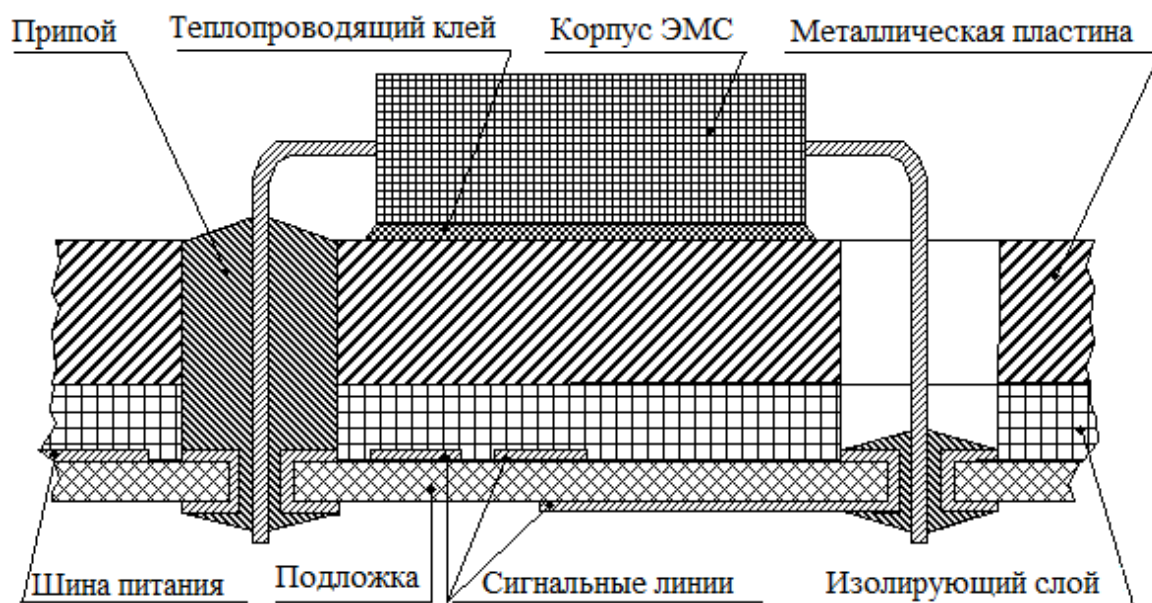


Рис. 41. Конструкция помехозащищенной теплопроводной монтажной платы

В первую очередь металлическое основание используется в качестве несущей конструкции, теплоотвода и корпусного заземления. Но такое основание можно использовать и как силовое заземление и/или сигнальное заземление, что позволяет уменьшить взаимные индуктивности в межсоединениях, а также площади контуров, по которым протекают прямые и возвратные токи [24]. Сигналы распространяются по линиям передачи с контролируе-

мым волновым сопротивлением, которые похожи на микрополосковые линии (МПП). Печатные проводники наружного сигнального слоя, отделенные от металлической пластины подложной ДПП и изолирующим слоем, образуют подвешенные полосковые линии (ППЛ). Печатные проводники внутреннего сигнального слоя, отделенные от металлической пластины изолирующим слоем, образуют обращенные полосковые линии (ОПЛ). Металлическая пластина ПТМП существенно уменьшает влияние электромагнитных полей на плату, а также излучение от платы.

Для ответственных схемотехнических разработок требуются многослойные печатные платы. Некоторые причины их применения очевидны:

- такая же удобная, как и для шины обратного провода, трассировка шин питания (если в качестве шин питания используются полигоны на отдельном слое, то можно с помощью переходных отверстий осуществить подводу питания 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 причин, существуют другие, менее очевидные.

Во-первых, происходит лучшее подавление электромагнитных и радиочастотных помех благодаря эффекту отражения относительно полигона. Когда проводник размещается близко к плоской проводящей поверхности, большая часть возвратных высокочастотных токов будет протекать 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, изменяются емкости и индуктивности, что приводит к уменьшению подавления помех.*

Во-вторых, снижается общая стоимость при мелкосерийном производстве. Несмотря на то что изготовление МПП обходится дороже, их возможное излучение меньше, чем у ОПП и ДПП.

Применение МПП может снизить уровень излучаемых помех на 20 дБ по сравнению с ДПП.

11.2 Линии передачи

Под линией передачи понимается система прямых и обратных проводников достаточной протяженности, расположенных в непосредственной близости друг от друга, формирующих единое электромагнитное поле, которое распространяется в этой системе преимущественно от источника к приемнику. Сумма токов прямых проводников равна сумме токов возвратных проводников, но направление их противоположно (рис. 42).

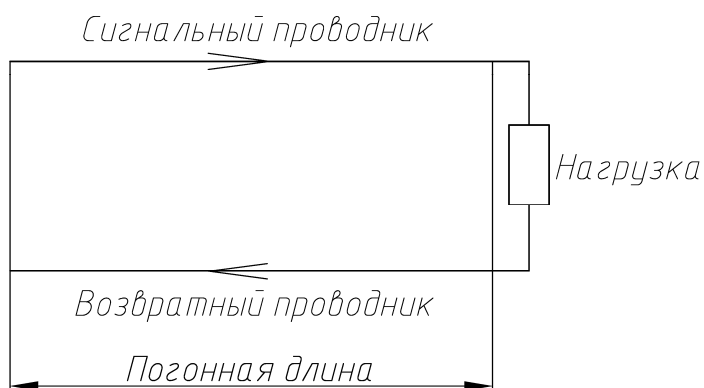


Рис. 42. Линия передачи
из двух протяженных проводников

Линия передачи из двух протяженных проводников схожа с моделью элементарного отрезка линии передачи на сосредоточенных идеальных элементах (см. рис. 1). Высокочастотные сигналы могут без существенных потерь распространяться только по линиям передачи.

Очень часто один из проводников линий передачи, по которой протекает возвратный ток, называют «землей». Более корректно использовать термин «возвратный проводник», поскольку его основная роль заключается не в заземлении, а в организации пути с малым полным сопротивлением возвратным токам. Путь высокочастотного возвратного тока будет зеркально отражать трассу сигнального тока. На высоких частотах индуктивность замкнутого контура из сигнального и возвратного проводников

минимизируется, когда возвратный провод будет расположен настолько близко к сигнальному, насколько позволит конструкция линии передачи. Когда сигнал распространяется вдоль линии передачи, электромагнитное поле формируется между сигнальным и возвратным проводниками. Поэтому в линии передачи важны оба проводника. 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 проводника. В данном случае в качестве сигнального принимается узкий проводник, а в качестве возвратного – плоскость.

Одной из задач обеспечения целостности сигнала при проектировании платы является выполнение всех соединений в виде регулярных линий передачи и минимизация длины всех нерегулярных линий передачи. Под регулярностью понимается неизменность поперечного сечения вдоль всей длины. К нерегулярным линиям передачи относятся линии, у которых размеры сечения и свойства материалов меняются вдоль всей линии. Когда прямой и возвратный проводники при одинаковой длине имеют одинаковые форму и размер сечения, то появляется симметрия в конструкции линии, и такая линия называется сбалансированной или симметричной. В общем случае для большинства линий передачи качество сигнала и перекрестная помеха не будут зависеть от того, сбалансирована линия или не сбалансирована. Однако на помехи по шинам заземления будут оказывать влияние особенности формы возвратного проводника.

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 в пространстве 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 определяется выражением

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

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

12 ВОЗВРАТНЫЕ ТОКИ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

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

Мы говорим, 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 зависит от частоты) и реактивную (зависит от частоты). На самом деле любая цепь в печатной плате может вести себя только как резистивная, или емкостная, или индуктивная в зависимости от геометрии, работы различных компонентов и частоты протекающего через цепь сигнала. Реальные цепи на плате следует моделировать как RLC-цепи (см. рис. 1), даже если цепь не содержит конденсаторов и катушек индуктивностей.

12.1 Путь возвратного тока в линиях передачи

Линия передачи сигналов определяется качеством выполнения сигнального и возвратного путей. Любые изменения поперечного сечения или геометрической формы проводников на пути прохождения токов изменяют волновое сопротивление линии и соответственно влияют на форму сигнала. Эти 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 на сигнал зависит от длительности фронта или спада сигнала. Если сигнал становится короче, то искажения увеличатся. Это означает, что неоднородность, которая не была проблемной в плате, работающей, например, на частоте 33 МГц, может стать такой при частоте 100 МГц.

Следует всегда помнить, что ток протекает по замкнутому контуру. Он начинается в источнике и возвращается к нему. В линиях передачи принимаем, что сигнальный (прямой) проводник служит для подвода тока от источника к нагрузке, а обратный 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 обратный ток будет стремиться располагаться рядом с прямым путем. Чем выше частота, тем ближе конфигурации пути обратного тока и прямого. При этом уменьшается полное сопротивление возвратного пути. Любые возмущения, которые имеются в возвратном токе на пути его распространения, 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 обратного токов происходит снижение индуктивности линии передачи и уменьшение ее волнового сопротивления. В любом случае путь обратного тока будет формироваться таким образом, что индуктивность контура тока будет минимальна. Любая неоднородность на пути возвратного тока будет приводить к увеличению индуктивности, а следовательно, 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 проявляется достаточно заметно 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 (рис. 43).

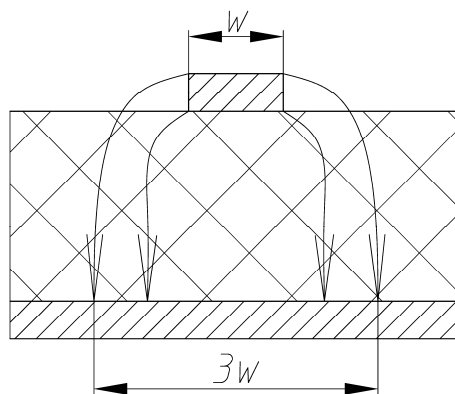


Рис. 43. Распределение тока в возвратном проводнике

Если сигнал, распространяющийся в линии передачи, встретит изменение волнового сопротивления, то часть его энергии отразится, а форма прошедшей части сигнала будет искажена. Он будет изменяться в каждой точке, в которой происходит изменение волнового сопротивления.

Если сигнальный проводник имеет поворот на 90° , то это будет являться неоднородностью, которая вызывает отражение сигнала и его искажения. Такой поворот эквивалентен увеличению ширины проводника для сигнала, который распространяется по линии. Это увеличивает емкость на данном участке, что является неоднородностью. Изменение угла до 45° и округление углов поворота минимизирует влияние неоднородностей.

Всякий раз, когда при разводке печатной платы появляется необходимость в создании переходного отверстия, т.е. межслойного соединения, необходимо помнить, что при этом возникает также паразитная индуктивность. Металлизированные отверстия следует рассматривать как неоднородности в линии передачи.

В низкочастотных системах они бы влияли на целостность сигнала незначительно, 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, что определяет появление неоднородности. Параметры этой неоднородности зависят от размеров металлизированного отверстия. Эксперименты показали, что каждое металлизированное отверстие увеличивает системную задержку примерно на 25 пс [16].

Следует иметь в виду, что индуктивность отверстия вместе с такой же 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 ответственных высокочастотных проводников печатных плат. Другое негативное явление: при большом количестве переходных отверстий в полигоне земли могут создаваться петлевые участки [17].

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

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 любые экранные эффекты представляют собой лишь компромисс. В данном случае лучше позаботиться о создании большой распределенной емкости между полигонами

питания и земли, расположив их во внутренних слоях. Другим преимуществом расположения сигнальных слоев снаружи является доступность сигналов для тестирования и изменения.

Для печатных плат с более чем четырьмя слоями существует общее правило: располагать высокоскоростные 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 используются несколько потенциальных слоев, которые могут рассматриваться как плоскости расположения путей возвратных токов. Особый интерес представляет расположение возвратного тока в слое, рядом с которым имеется другой потенциальный слой [16].

Проанализируем конструкцию МПП из четырех слоев (рис. 44) [16]. 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.

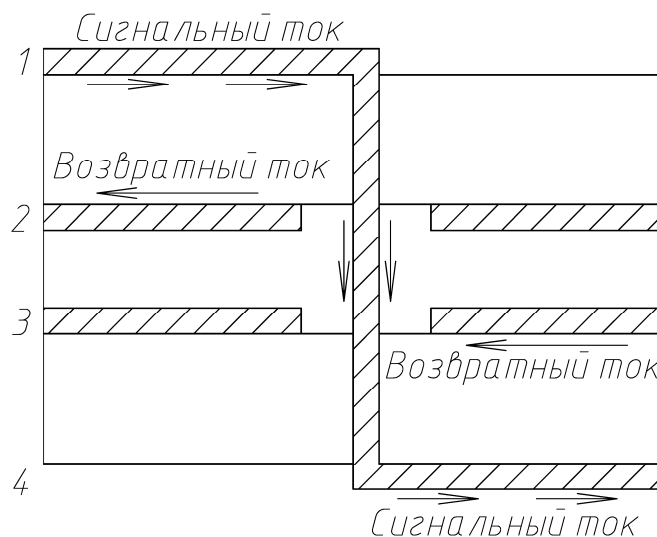


Рис. 44. Сечение четырехслойной МПП с переходом сигнального тока по металлизированному переходному отверстию

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 тока.

Рассмотрим сечение МПП с переходом сигнального тока с первого на четвертый слой через металлизированное отверстие. Для линии передачи, расположенной на первом слое, путь возвратного тока легко определить. В первой половине пути до переходного отверстия возвратный ток протекает по поверхности второго слоя. Во второй части пути после переходного отверстия возвратный ток течет по поверхности третьего слоя. Несколько сложнее определить, как будет протекать возвратный ток при протекании сигнального тока по металлизированному отверстию, которое соединяет слои МПП. Здесь также соблюдается общий принцип минимизации общей индуктивности пути тока. Металлизированное отверстие в МПП 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 будет встречать на своем пути сопротивление, равное полному сопротивлению линии передачи, созданной этими плоскостями. За счет этого сопротивления возвратный ток будет создавать некоторое изменение напряжения на своем пути, которое называется «подскок». При большом полном сопротивлении возвратного пути увеличивается напряжение подскока и в системе увеличивается 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.

Расчет волнового сопротивления линий передачи может быть выполнен через емкостные и индуктивные параметры линий. Для этого существуют расчетные формулы и графики [17].

12.2 Путь возвратного тока в аналого-цифровых платах

Хорошее заземление – общее требование насыщенной, многоуровневой системы. И оно должно планироваться на этапе проектирования. *Основное правило – разделение земли.*

Разделение земли на аналоговую и цифровую части – это один из простейших и наиболее эффективных методов подавления помех. Один или более слоев МПП обычно отводится под земляные полигоны [16]. При разработке МПП необходимо разделить земли на плате. Проводятся все подключения к аналоговому земляному полигону компонентов аналоговой схемы (формируется аналоговая земля), а к цифровому – компонентов цифровой (формируется цифровая земля). И лишь после этого в источнике производится объединение цифровой и аналоговой земель.

Рассмотрим различные варианты зонирования для аналого-цифровых схем. В простейшем случае потенциальную плоскость разделяют на две зоны (рис. 45). При таком разделении потенциального слоя щель в нем полностью прервет возвратные токи, которые должны повторять конфигурацию сигнальных проводников.

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 (рис. 46).

В этом случае могут образоваться токовые контуры значительной площади из-за разнесения прямых и возвратных токов.

Это приведет к значительному возрастанию уровня перекрестных помех и помехоэмиссии.

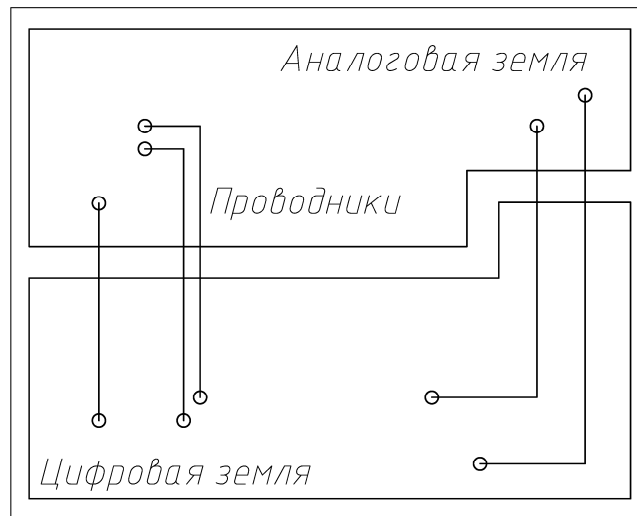


Рис. 45. Разделение плоскостей возвратных токов на две зоны

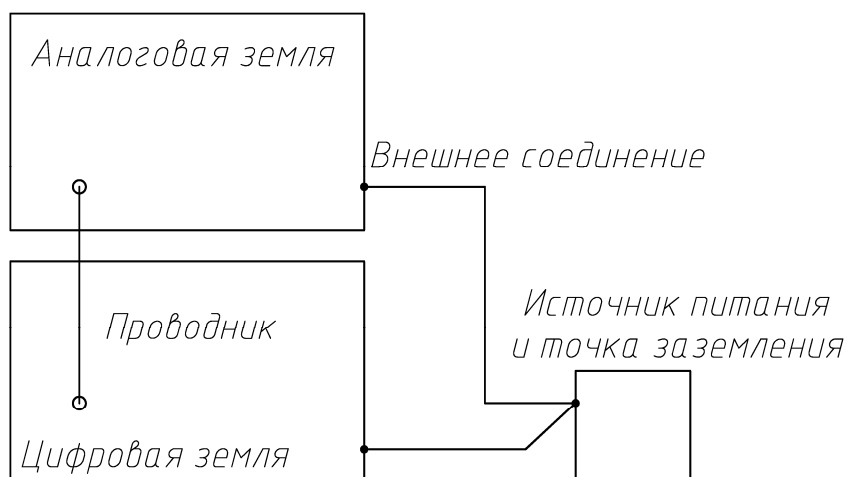


Рис. 46. Контур возвратных токов при разделении на две зоны

Часто конструктор использует неприемлемый вариант расположения сигнального проводника (рис. 47). В этом случае проводник, несущий цифровой сигнал, располагается над слоем аналоговой земли. Поэтому в аналоговом слое будут индуцироваться возвратные токи, вызывающие помеховые напряжения в аналоговой схеме. Если возвратные токи протекают в обход щели, то увеличивается площадь контура, что ухудшает показания ЭМС. Оба варианта плохи. В идеале этот 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. Сигнальный проводник следует располагать только над слоем земли, который соответствует зоне расположения соединяемых компонентов.

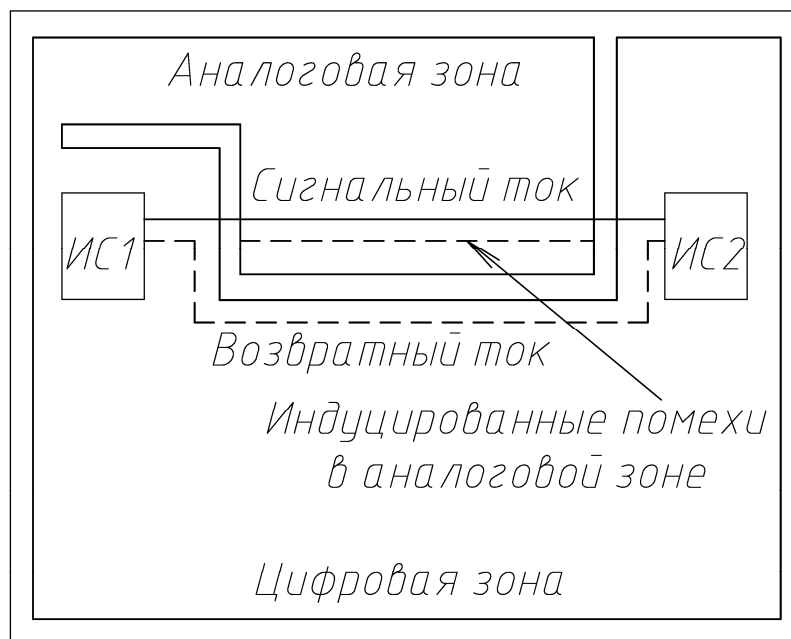


Рис. 47. Неприемлемый вариант расположения сигнального проводника аналого-цифровой схемы

Ситуация улучшится, если отдельные зоны потенциального слоя соединить в узкой области, поверх которой располагаются проводники (рис. 48). В этом варианте возвратные токи станут протекать под сигнальными проводниками и площади токовых контуров будут минимальны. Недостаток подобного соединения участков двух земель – усложнение трассировки.

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

Тогда зоны будут разделены некоторой границей и щель в потенциальном слое можно не выполнять. Для корректного пере-

хода между зонами на этой границе следует располагать аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Этот вариант (рис. 49) наиболее предпочтителен.

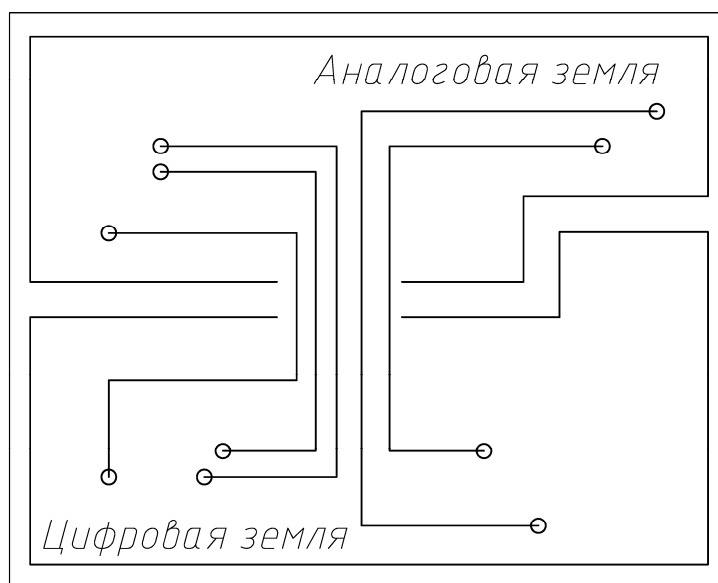


Рис. 48 Одноточечное соединение в потенциальном слое

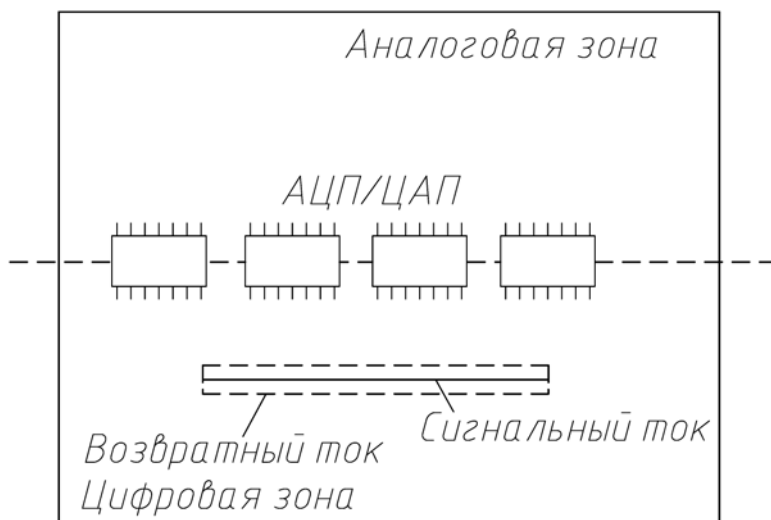


Рис. 49. Разделение потенциального слоя на аналоговую и цифровую зоны с помощью АЦП/ЦАП

Названия выводов (аналоговый или цифровой) относятся лишь к внутренней структуре преобразователя, к его внутренним соединениям. В схеме эти выводы должны быть подключены к шине аналоговой земли. Соединение может быть выполнено и внутри интегральной схемы, однако получить низкое сопротивление такого соединения довольно сложно из-за топологических

ограничений. Поэтому при использовании преобразователей предполагается внешнее соединение выводов аналоговой и цифровой земли. Если этого не сделать, то параметры микросхемы будут значительно хуже приведенных в технических условиях.

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 выводы преобразователя не сильно нагружены, то внутренние переключения обычно не вызывают особых проблем. При разработке печатной платы, содержащей АЦП или ЦАП, необходимо должным образом отнестись к развязке цифрового питания преобразователя на аналоговую землю.

Существуют такие варианты, в которых между зонами на минимальном расстоянии от сигнальных проводников устанавливаются высокочастотные конденсаторы (рис. 50).

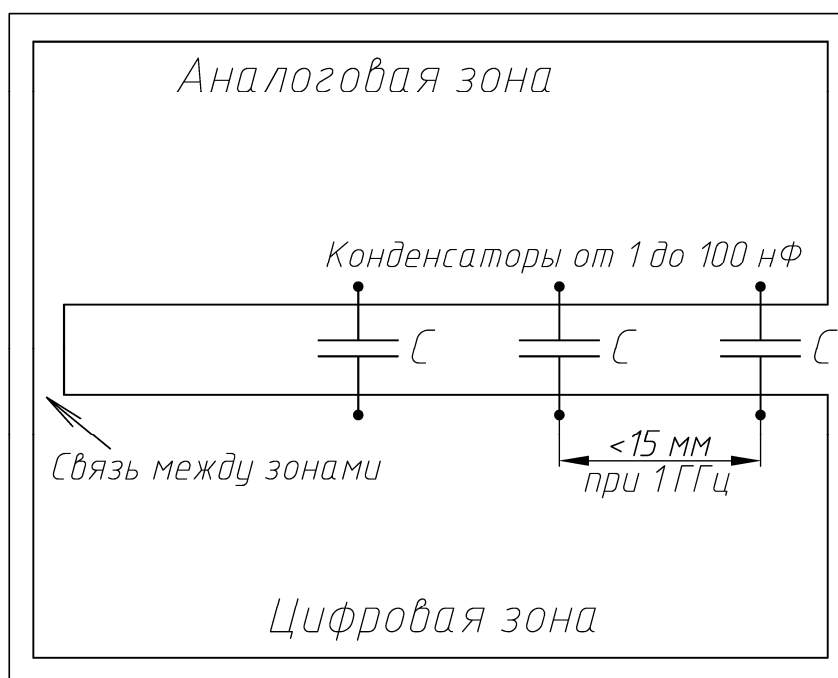


Рис. 50. Разделение потенциального слоя на аналоговую и цифровую зоны с помощью конденсаторов

Возможен вариант размещения всех компонентов на плате, включая источник питания (рис. 51), в котором используются три отделенных друг от друга и изолированных полигона земли–питания: 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 отнесены друг от друга. Такой вариант имеет очень высокую вероятность минимального взаимовлияния частей схемы, поскольку обеспечено хорошее размещение компонентов и следование правилам разделения цепей.

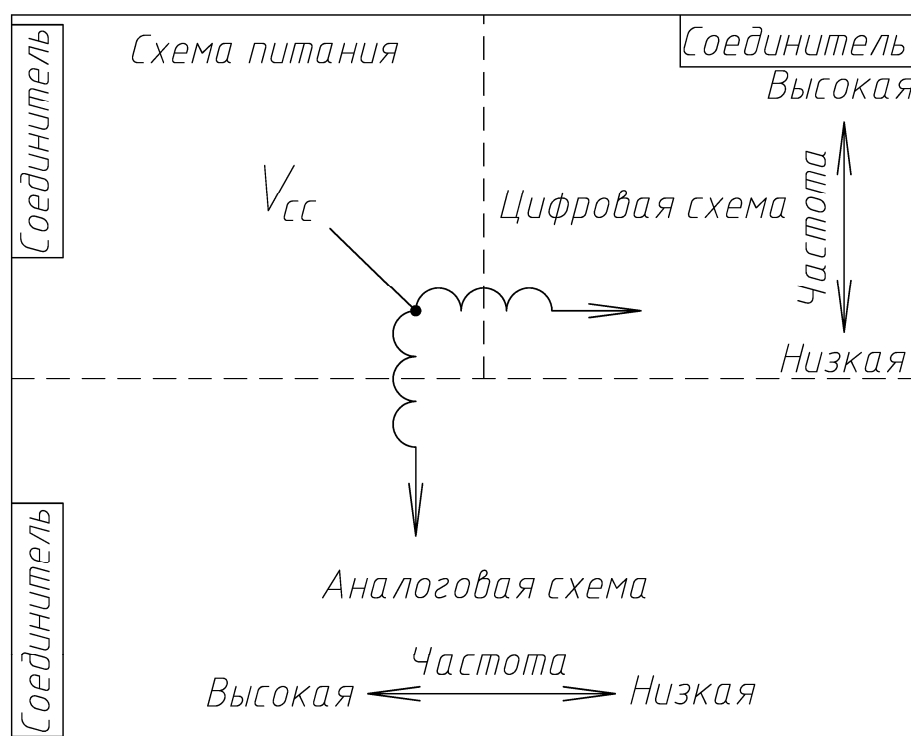


Рис. 51. Размещение на плате трех схем

Основные правила формирования земли на печатных платах:

- 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. Такие перекрытия нарушают изоляцию полигонов. Разделение не означает электрической изоляции аналоговой земли от цифровой. Они должны соединяться вместе в каком-то, желательно одном, узле. Правильная, с точки зрения обеспечения хорошего заземления, система имеет только одну землю, которая является выводом заземления для систем с питанием от сетевого переменного напряжения или общим выводом для систем с питанием от постоянного напряжения. Все сигнальные токи и токи питания в этой схеме должны возвращаться к этой земле в одну точку, которая будет служить системной землей. Такой точкой может быть вывод корпуса устройства. Важно понимать, что при подсоединении общего вывода схемы к нескольким точкам корпуса могут образовываться земляные контуры;

– 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 вызывает увеличение сопротивления контактов. Следовательно, для более надежной работы необходимо использование дополнительных выводов. Сложные цифровые печатные платы имеют много слоев и содержат сотни или тысячи проводников. Добавление еще одного проводника редко создает проблему в отличие от дополнительных выводов соединителей. Если это не удастся сделать, то необходимо создавать два проводника возвратного тока для каждой силовой цепи на плате;

– важно отделять шины цифровых сигналов от мест на печатной плате, где расположены аналоговые компоненты схемы. Это предполагает изоляцию (экранирование) полигонами, создание коротких трасс аналоговых сигналов и тщательное размещение пассивных компонентов при наличии рядом расположенных шин высокоскоростных цифровых и ответственных аналоговых сигналов. Шины цифровых сигналов должны разводиться вокруг

участков с аналоговыми компонентами и не перекрываться шинами и полигонами аналоговой земли и аналогового питания. Если этого не делать, то разработка 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 сигналами, поэтому даже небольшие емкости между трассами и полигонами могут создавать значительные связи.

Хорошей концепцией является размещение аналоговой части схемы вблизи входных и выходных соединений платы. Проектировщики цифровых печатных плат, использующие мощные интегральные схемы, часто склонны разводить шины шириной 1 мм и длиной несколько сантиметров для соединения аналоговых компонентов, полагая, что малое сопротивление трассы поможет избавиться от наводок. То, что при этом получается, представляет собой протяженный пленочный конденсатор, на который будут наводиться паразитные сигналы от цифровых компонентов, цифровой земли и цифрового питания, усугубляя проблему.

13 ПОМЕХИ В ПРОВОДНИКАХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

При передаче сигнала по одиночному межсоединению он задерживается по времени из-за конечной скорости распространения и затухает по амплитуде из-за потерь в материалах межсоединений. Изменения геометрических и физических параметров межсоединений приводят к изменению задержки сигнала и потерям. Важное влияние на искажения сигнала, передаваемого по межсоединению, оказывают нагрузки или неоднородности, расположенные по его длине. В результате часть сигнала отражается от каждой нагрузки и распространяется по межсоединению в обратном направлении. Поэтому к его концу сначала приходит оставшаяся часть сигнала, а позже приходят части, испытавшие четное число отражений [28]. Значение, полярность и форма отраженной части сигнала зависят от соотношения нагрузки с волновым сопротивлением межсоединения и от характера нагрузки (резистивная, комплексная).

С ростом быстродействия элементной базы и увеличением плотности монтажа увеличиваются взаимовлияния в соседних межсоединениях. Возбуждение сигнала в активной линии приводит к появлению напряжения (перекрестной помехи) в пассивной линии, которое может привести к сбою работы аппаратуры. Поэтому важен учет процессов, происходящих в связанных межсоединениях плат.

Для уменьшения взаимного влияния межсоединений соседних слоев печатных плат их располагают во взаимно ортогональных направлениях. В некоторых фрагментах трассировки печатных плат удобно провести межсоединения параллельно друг другу в различных слоях с целью повышения плотности и уменьшения их длины. Емкостная и индуктивная связи при этом сильно возрастают и требуют своей оценки.

Уменьшение искажений сигналов осуществляется прежде всего соответствующим выбором параметров межсоединений. Для снижения задержки сигнала в межсоединении фиксированной длины уменьшают относительную диэлектрическую прони-

цаемость диэлектриков межсоединения. Когда диэлектрики заданы, уменьшение задержки достигается таким изменением размеров и расположением диэлектриков и проводников межсоединения, чтобы как можно большая часть электромагнитного поля сигнала распространялась в диэлектрике с меньшей ϵ_r .

Указанные возможности уменьшения задержки относятся и к снижению затухания сигнала, вызванного потерями в диэлектрике. Потери в проводниках межсоединения уменьшаются при изготовлении проводников из металла с возможно большей удельной электрической проводимостью. Однако потери в проводниках складываются из нескольких составляющих, которые зависят от размеров, формы и расположения проводников и могут быть уменьшены соответствующим образом. Отражения сигнала от нагрузок на концах межсоединения уменьшаются с помощью согласования. В случае резистивных нагрузок традиционным способом согласования является выравнивание оконечной нагрузки с волновым сопротивлением межсоединения.

При многопроводных межсоединениях, расположенных параллельно друг другу, уменьшение их взаимовлияний достигается посредством увеличения расстояния между ними. Однако эффективность этого способа существенно зависит от формы и расположения обратного проводника межсоединений. В общем случае благодаря обратному проводнику можно уменьшать взаимовлияние межсоединений вплоть до полного их экранирования. Примером эффективного использования для этой цели обратного проводника является общая плоскость земли. Взаимовлияния межсоединений, расположенных по разные стороны от общей плоскости, очень малы. Межсоединения на одной стороне общей плоскости следует располагать как можно ближе к ней.

13.1 Перекрестная помеха в связанных линиях передачи

Между проводниками печатной платы, находящимися на разных слоях, возникает емкостная связь, когда они пересекаются. Иногда это может быть проблемой. Проводники, находящиеся

друг над другом на смежных слоях, создают длинный пленочный конденсатор.

Перекрестная помеха – одна из важнейших проблем обеспечения целостности сигнала. Механизм образования перекрестных помех заключается в передаче электромагнитной энергии из активной цепи в пассивную соседнюю цепь. На печатной плате 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 (преобразователю электрических управляющих сигналов в сигналы, необходимые для непосредственного управления) конце пассивной линии и на ее дальнем конце: на 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.

Электрические и магнитные поля линий передачи приблизительно на 50 % сосредоточены между прямым и возвратным проводниками, а 50 % не ограничены каким-либо конкретным пространством между проводниками и распространяются в окружающей среде. Их можно назвать внешними полями, определяющими краевые эффекты.

Когда на одном проводнике есть сигнал, то на этом проводнике развивается некоторое напряжение и в нем протекает определенный 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, то это обеспечивает путь для попадания нежелательных сигналов из одной цепи в другую.

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. Приемы, при которых минимизируются связи между линиями передачи, сводятся к увеличению расстояния между линиями, уменьшению длины взаимодействующих участков линий, применению материалов с низкой диэлектрической проницаемостью, снижению длительности фронта сигнала [11].

Следуя рассмотрению четной и нечетной мод [28], дальняя перекрестная помеха в структурах из отрезков двух симметричных проводников определяется по формуле

$$V_{FAR}(t) = [V^e(t) - V^0(t)]/2,$$

где $V^e(t)$ и $V^0(t)$ – формы сигнала в конце структуры, вычисленные для одиночной линии, имеющей параметры четной и нечетной мод соответственно.

Дальняя перекрестная помеха равна нулю, если эти формы сигнала совпадают. В свою очередь, для этого на конце структуры необходим одновременный приход четной и нечетной мод с одинаковой амплитудой.

Поясним понятие о четной и нечетной модах. При работе дифференциальной пары возможны два случая. Первый относится к одинаковым сигналам, приложенным к каждой линии. Это режим четной моды. В этом случае отсутствует изменение напряжения между сигнальными проводниками, поэтому емкостной связи между ними нет. Индуцированный ток в одной линии будет таким же, как во второй линии, поскольку скорости изменения тока в каждой линии одинаковы. В результате форма напряжения, которая распространяется вдоль линии, будет одинакова в каждой

линии. Во втором случае на линиях присутствуют разные сигналы, например перепад напряжения от 0 до 1 В в одной линии и из 0 в минус 1 В в другой линии. Это режим нечетной моды. Сигнал первой линии будет генерировать на конце второй линии перекрестную помеху в виде отрицательного импульса. Это будет снижать сигнал в первой линии по мере распространения. Одновременно отрицательный импульс во второй линии будет генерировать положительный импульс перекрестной помехи на дальнем конце первой линии. Амплитуда этого положительного импульса помехи в первой линии будет точно такая же, как и уменьшение амплитуды сигнала в первой линии из-за потерь, связанных с переносом энергии помех во вторую линию. Эти два режима передачи сигнала соотносятся с двумя специальными состояниями возбуждения линий, которые называются модами. Когда напряжение на линиях одинаковы, это четная мода, когда неодинаковы – нечетная мода [16].

Рассмотрим две связанные симметричные линии, одна из которых является активной, то есть на нее подается полезный сигнал, а другая пассивной, на которой появляется помеховый сигнал, наведенный от активной. Во время прохождения сигнала в активной линии он искажается как в начале V_{na} , так и в конце V_{fa} , а в пассивной – наводятся напряжения в начале $V_{np}(t)$ и конце $V_{fp}(t)$. Эти значения можно оценить выражениями

$$V_{na}(t) = \frac{1}{2} [V_R^e(t) + V_R^o(t)]; \quad V_{fa}(t) = \frac{1}{2} [V_T^e(t) + V_T^o(t)];$$

$$V_{np}(t) = \frac{1}{2} [V_R^e(t) - V_R^o(t)]; \quad V_{fp}(t) = \frac{1}{2} [V_T^e(t) - V_T^o(t)],$$

где $V_R^e(t)$ и $V_R^o(t)$ – формы отраженной волны сигнала структуры, имеющей параметры четной и нечетной мод соответственно; $V_T^e(t)$ и $V_T^o(t)$ – формы проходящей волны сигнала структуры, имеющей параметры четной и нечетной мод соответственно.

Проблемы помехи нет для связанных межсоединений в однородном диэлектрическом заполнении, где задержки четной и нечетной мод равны. Но в реальных платах диэлектрическое заполнение неоднородно. Небольшая разница в задержках мод дает

дальнюю перекрестную помеху, которая с ростом длины линии будет возрастать вплоть до половины амплитуды более быстрой моды. Поэтому в случае длинных линий в неоднородном диэлектрическом заполнении особенно важно выявление возможностей выравнивания задержек распространения четной и нечетной мод, описываемых равенством [9]

$$\sum_{i=1}^n (\tau_{0i}^e - \tau_{0i}^o) l_i = 0,$$

где n – общее число последовательно соединенных отрезков линии; τ_{0i}^e и τ_{0i}^o – погонные задержки распространения четной и нечетной мод в i -м отрезке линии; l_i – длина i -го отрезка.

Для той же цели удобнее пользоваться равенством

$$\sum_{i=1}^n (K_{Ci} - K_{Li}) \tau_{0i} l_i = 0,$$

где $K_{Ci} - K_{Li}$ – разность емкостной и индуктивной связей в i -м отрезке линии; τ_{0i} – среднее погонных задержек распространения в i -м отрезке.

Поскольку в зависимости от параметров двух связанных линий в неоднородном диэлектрическом заполнении их емкостная связь может быть больше, меньше или равна индуктивной связи, то дальняя перекрестная помеха будет иметь положительную или отрицательную полярность. Тогда в общем случае, если разница емкостной и индуктивной связей в одном отрезке имеет знак, противоположный разнице емкостной и индуктивной связей в другом отрезке, то возможна частичная или полная компенсация дальней перекрестной помехи последовательно соединенных отрезков связанных линий. В качестве частного случая неоднородного диэлектрического заполнения нередко встречается слоистая диэлектрическая среда.

Широко используются ДПП, изготовленные из стеклотекстолита толщиной 0,25 мм, которые для придания жесткости конструкции прессуются через диэлектрический слой к металлическому основанию (рис. 52) [29]. Если металлическое основание

играет роль схемной земли, то печатные проводники преобразуются в *полосковые линии* – линии передачи, представляющие собой радиоволновод для передачи электромагнитных волн в воздушной или иной диэлектрической среде вдоль двух или нескольких проводников, имеющих форму тонких полосок или пластин.

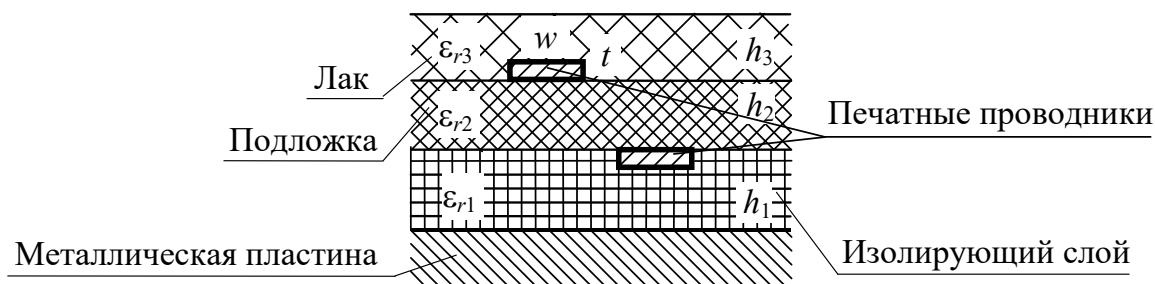


Рис. 52. Фрагмент поперечного сечения ПТМП

К металлической пластине через изолирующий слой толщиной h_1 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r1} = 5,4$ припрессована подложка толщиной h_2 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r2} = 5,5$. На обеих сторонах подложки расположены печатные проводники шириной w и толщиной t . Снаружи подложка покрыта слоем защитного лака толщиной h_3 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r3} = 4,5$. В таких платах печатные проводники, расположенные на внешней стороне платы, доступной для монтажа ЭРИ, принято называть подвешенными полосковыми линиями, а печатные проводники, расположенные на обратной стороне платы, ближе к металлическому основанию – обращенными полосковыми линиями. Исследования искажений сигналов в ППЛ и ОПЛ показали, что сумма и разность емкостного и индуктивного коэффициентов связи линий с увеличением толщины изолирующего слоя h_1 увеличиваются, а следовательно, и перекрестная помеха тоже увеличивается. Покрытие линий лаком увеличивает сумму коэффициентов и уменьшает их разность, значит, и уровень помех в начале пассивной линии может увеличиваться, а в конце – уменьшаться.

В широко используемых связанных микрополосковых линиях (МПЛ) – несимметричных полосковых линиях – компенсация дальней перекрестной помехи невозможна, поскольку при любых параметрах этих линий емкостная связь всегда меньше индуктивной. Однако простое добавление покрывающего диэлектрического слоя поверх МПЛ позволяет получить новые свойства. МПЛ получили свое название по причине того, что в результате высокой диэлектрической проницаемости подложки ее толщина и поперечные сечения проводников много меньше длины волны в свободном пространстве. В МПЛ распространяется волна квази-ТЕМ – такой тип электромагнитного поля, у которого основная часть поля сосредоточена в поперечном сечении линии передачи.

Для оценки паразитных составляющих проводников печатной платы необходимо рассчитать погонные значения емкости, индуктивности, проводимости и сопротивления МПЛ. Прежде всего необходимо определить две основные характеристики линии передачи – эффективную относительную диэлектрическую проницаемость и волновое сопротивление. Эффективная относительная диэлектрическую проницаемость ϵ_{re} материала подложки рассчитывается по формуле [30]

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w} \right)^{-ab},$$

где a и b – коэффициенты, учитывающие эффективное приращение МПЛ, а также влияние скин-эффекта на ширину проводника:

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52} \right)^2}{u^4 + 0,432} \right) + \frac{1}{18,7} \ln \left(1 + \left(\frac{u}{18,1} \right)^3 \right),$$

$$b = 0,564 \left(\frac{\epsilon_r - 0,9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0,053}.$$

В свою очередь

$$u = \frac{w}{h}.$$

Коэффициентами a и b можно пренебречь, тогда

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{w} \right)^{-1/2}.$$

Волновое сопротивление МПЛ Z (Ом) можно определить как

$$Z = \frac{Z_{L1}}{\sqrt{\varepsilon_{re}}},$$

где Z_{L1} – волновое сопротивление МПЛ в однородной среде, Ом,

$$Z_{L1} = \frac{Z_0}{2\pi} \ln \left(6 + (2\pi - 6) \cdot \exp \left(- \left(30,666 \frac{h}{w} \right)^{0,7528} \right) \frac{h}{w} + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{w} \right)^2} \right);$$

Z_0 – волновое сопротивление вакуума, 120π Ом.

Таким образом, зная волновое сопротивление МПЛ, можно определить погонные емкость C_0 (Ф/м), индуктивность L_0 (Гн/м) и проводимость G_0 (См/м) линии:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{re}}{cZ},$$

где c – скорость света в вакууме, м/с;

$$L_0 = C_0 Z^2;$$

$$G_0 = \tan \delta \cdot 2\pi f C_0,$$

где $\tan \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота сигнала, Гц.

Погонное сопротивление проводника R_0 (Ом/м) можно записать как

$$R_0 = \frac{\rho}{wt},$$

где ρ – удельное сопротивление проводника, Ом·мм²/м.

На примере ПТМП вычислены разности емкостных и индуктивных коэффициентов связи линий в зависимости от расстояний между линиями s , толщины изолирующего слоя h_1 и наличия защитного лака (табл. 4).

Таблица 4

Разность емкостного и индуктивного коэффициентов связи

$$K_C - K_L$$

h_1 , мм	$s+w$, мм	Наличие лака	ОПЛ	ППЛ	ОПЛ и ППЛ
0,248	0	Без лака	—	—	0,046
		С лаком	—	—	0,030
	0,625	Без лака	0	−0,157	−0,037
		С лаком	0,009	0,004	0,012
	1,250	Без лака	0,015	−0,093	−0,037
		С лаком	0,029	−0,015	−0,002
	2,500	Без лака	−0,006	−0,034	−0,015
		С лаком	−0,003	−0,020	−0,008
0,372	0	Без лака	—	—	0,054
		С лаком	—	—	0,041
	0,625	Без лака	0,009	−0,139	−0,033
		С лаком	0,020	0,014	0,023
	1,250	Без лака	−0,032	−0,097	−0,900
		С лаком	−0,008	−0,008	−0,851
	2,500	Без лака	−0,014	−0,042	−0,024
		С лаком	−0,005	−0,009	−0,010
0,496	0	Без лака	—	—	0,054
		С лаком	—	—	0,046
	0,625	Без лака	0,016	−0,134	−0,031
		С лаком	0,028	0,020	0,031
	1,250	Без лака	−0,019	−0,101	−0,052
		С лаком	0,011	−0,004	0,007
	2,500	Без лака	−0,036	−0,050	−0,034
		С лаком	−0,023	−0,022	0,012

Вычисления выполнены для печатных проводников шириной $w = 0,35$ мм, толщиной $t = 0,16$ мм, расположенных на подложке толщиной $h_2 = 0,18$ мм, покрытых слоем защитного лака $h_3 = 0,5$ мм [29]. Рассмотрены пары связанных линий передачи, расположенных на внутреннем и внешнем слоях ПТМП при расстоянии между линиями 0,625; 1,25 и 2,5 мм, а также в случае, когда линии расположены друг под другом ($s + w = 0$).

Разность емкостного и индуктивного коэффициентов связи, а значит, и разность погонных задержек мод для внутренних слоев (ОПЛ) даже без покрытия лаком близка к нулю из-за почти

однородного диэлектрического заполнения линий. Для линий внешнего слоя (ППЛ) с покрытием или без покрытия лаком разность может быть значительной. При исследовании влияния наличия и толщины защитного лака на уровень дальней перекрестной помехи на линии последовательно наносились слои лака УР-231. Например, при напряжении 200 мВ, подаваемом на активную линию, в пассивной появлялась помеха амплитудой около 40 мВ. После нанесения первого слоя лака уровень помехи уменьшился до 30 мВ, после второго – до 20 мВ, нанесение последующих слоев не повлияло на уровень помехи.

Линии передачи сигнала от генератора к нагрузке работают наилучшим образом в режиме согласования. Эффективным способом устранения помех отражения в линиях передачи является согласование, при котором установкой дополнительных резисторов добиваются равенства сопротивления нагрузки волновому сопротивлению линии. При этом для линейных нагрузок коэффициенты отражения на входе и выходе линии будут равны нулю, отраженные волны, искажающие форму сигнала, отсутствуют. Линейными нагрузками называются те элементы, для которых зависимость тока от напряжения, в также сопротивление постоянны. Для линейных элементов характерна линейная вольт-амперная характеристика, представляющая собой прямую линию, проходящую через начало координат под определенным углом. Это свидетельствует о том, что для линейных элементов электрических цепей закон Ома строго выполняется.

Если же зависимость тока от напряжения, в также сопротивление непостоянны, т.е. изменяются в зависимости от тока или от напряжения, то элементы называются нелинейными, и соответственно цепь, содержащая минимум один нелинейный элемент, окажется нелинейной электрической цепью. Для нелинейных нагрузок коэффициенты отражения в зависимости от характера нелинейности будут равны нулю только в отдельных точках диапазона изменений токов и напряжений. В практических случаях это явление не сможет существенно повлиять на качество согласования [11].

В зависимости от способа согласования различают согласование по входу и по выходу линии (рис. 53). Помехи отражения сводятся к минимуму, если устраняется отражение сигнала хотя бы на одном конце линии. При согласовании по входу (рис. 53, *a*) устанавливается согласующий резистор R_{ti} , сопротивление которого определяется из соотношения

$$R_{ti} = Z - r_0,$$

где Z – волновое сопротивление линии, Ом; r_0 – выходное сопротивление источника сигнала, Ом.

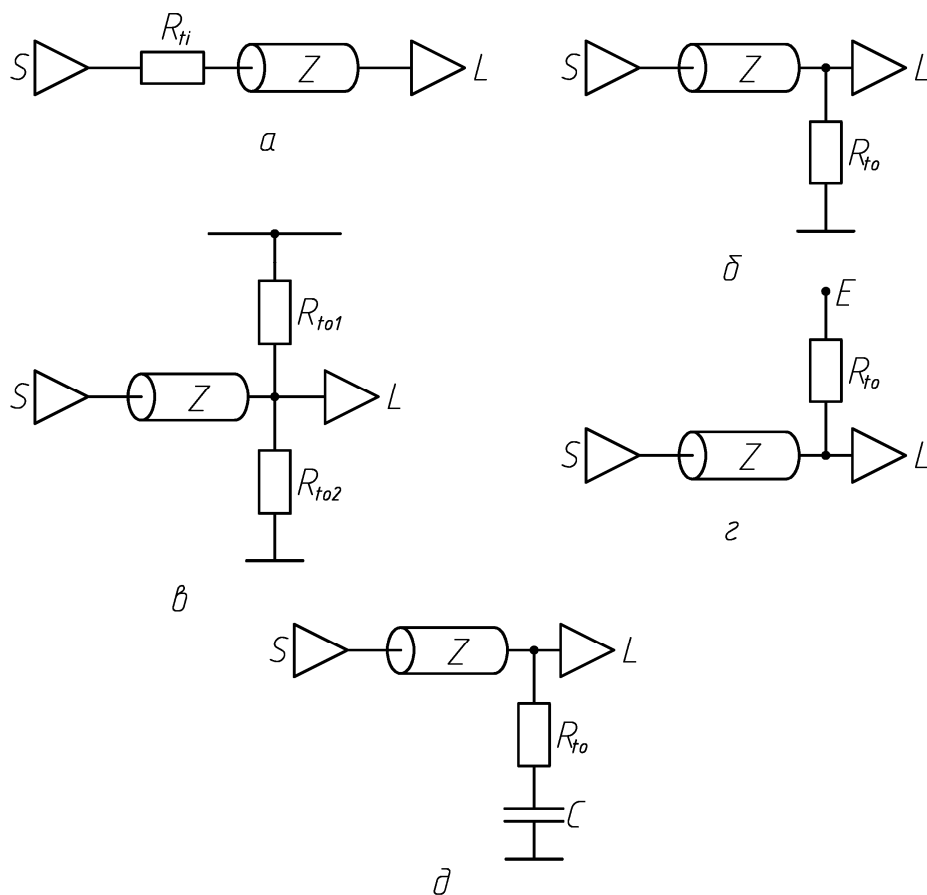


Рис. 53. Способы согласования одиночной линии передачи от источника сигнала S до его приемника L : последовательное в начале линии (*a*); параллельное в конце линии (*б*); с помощью делителя напряжения (*в*); активная схема согласования (*г*); с помощью RC-схемы (*д*)

Как правило, выходное сопротивление источника сигнала меньше волнового сопротивления линии. При последовательном согласовании на входе линии форма сигнала на выходе линии не

искажается, а на входе линии искажения вызваны приходом волны, отраженной от несогласованной нагрузки. При этом для микросхем, подключенных короткими отрезками к входу длинной линии, искаженный сигнал может рассматриваться как помеха.

Простой способ согласования на выходе линии заключается в установке согласующего резистора R_{to} параллельно нагрузке (рис. 53, б), поскольку входное сопротивление нагрузки R_1 значительно больше волнового сопротивления линии. Сопротивление согласующего резистора определяется из условия

$$Z = \frac{R_{to} R_1}{R_{to} + R_1},$$

из которого

$$R_{to} = \frac{Z R_1}{R_1 - Z}.$$

При $R_1 \gg Z$ сопротивление согласующего резистора равно волновому сопротивлению линии передачи. Согласование на выходе линии обеспечивает неискаженную форму сигнала как на входе, так и на выходе линии.

Хорошее согласование обеспечивает схема, содержащая делитель напряжения (рис. 53, в), один из резисторов R_{to1} которого включен между шиной питания и сигнальным проводником, а другой R_{to2} – между сигнальным проводником и шиной заземления:

$$R_{to} = Z = \frac{R_{to1} R_{to2}}{R_{to1} + R_{to2}}.$$

Разновидностью согласования по выходу линии является применение активной линии (рис. 53, з), когда смещение на входе приемника создается с помощью дополнительного источника питания E , что является недостатком схемы.

При согласовании на выходе линии при помощи RC-схемы (рис. 53, д) нагрузкой линии является полное сопротивление RC-цепочки. В ней значение сопротивления R_{to} должно быть равно волновому сопротивлению линии Z . При очень большой емкости

увеличивается время достижения порога срабатывания микросхемы нагрузки. Емкость меньше 100 пФ ослабляет эффективность согласования [11].

Перекрестная помеха особенно проявляется в несогласованных на концах связанных линиях. Линии несогласованны в случае, если на концах установлены разные сопротивления, например, в начале линии установлено сопротивление 8 Ом, а на ее конце 1 МОм. В этом случае перепад напряжения 5 В в активной несогласованной линии длиной 10 см, линейно нарастающий за 1 нс, приводит к появлению существенного помехового импульса в пассивной линии (табл. 5–7) [29]. При этом в активной линии тоже происходят искажения уровня сигнала. Уровень перекрестной помехи существенно зависит от диэлектрического заполнения линий и расположения линий в объеме структуры печатной платы, т.е обе линии являются ОПЛ либо ППЛ или одна из них ОПЛ, а другая ППЛ.

Таблица 5

Пиковые напряжения, В, в двух несогласованных ОПЛ
при разной толщине изолирующего слоя

$s+w$, мм	Напря- жение	$h_1=0,248$ мм		$h_1=0,372$ мм		$h_1=0,496$ мм	
		без лака	с лаком	без лака	с лаком	без лака	с лаком
0,625	V_{na}	5,529	5,529	5,433	5,439	5,390	5,398
	V_{fa}	7,357	7,326	8,006	7,978	8,113	8,085
	V_{np}	0,134	0,143	0,181	0,184	0,209	0,224
	V_{fp}	0,236	0,256	–0,360	–0,404	0,396	–0,505
1,25	V_{na}	5,534	5,535	5,424	5,432	5,373	5,383
	V_{fa}	7,413	7,383	8,096	8,068	8,235	8,209
	V_{np}	0,025	0,032	0,047	0,056	0,058	0,074
	V_{fp}	0,093	0,056	–0,255	–0,146	–0,202	0,175
2,5	V_{na}	5,334	5,535	5,424	5,431	5,372	5,381
	V_{fa}	7,411	7,084	8,101	8,077	8,245	8,222
	V_{np}	–0,009	0,006	0,016	0,011	0,039	0,027
	V_{fp}	0,034	0,022	–0,091	–0,050	–0,261	–0,185

Таблица 6

Пиковые напряжения, В, в двух несогласованных ППЛ
при разной толщине изолирующего слоя

$s+w$, мм	Напря- жение	$h_1=0,248$ мм		$h_1=0,372$ мм		$h_1=0,496$ мм	
		без лака	с лаком	без лака	с лаком	без лака	с лаком
0,625	V_{na}	5,391	5,383	5,268	5,345	5,253	5,331
	V_{fa}	8,080	8,103	8,156	8,185	8,167	8,188
	V_{np}	0,159	0,237	0,159	0,230	0,170	0,245
	V_{fp}	-1,013	-0,376	-0,953	-0,384	-0,921	-0,425
1,25	V_{na}	5,313	5,362	5,271	5,318	5,248	5,300
	V_{fa}	8,350	8,256	8,395	8,332	8,403	8,352
	V_{np}	0,078	0,073	0,077	0,080	0,075	0,091
	V_{fp}	-0,592	-0,193	-0,624	0,150	-0,647	0,112
2,5	V_{na}	5,310	5,359	5,267	5,268	5,248	5,292
	V_{fa}	8,359	8,273	8,406	8,404	8,417	8,380
	V_{np}	0,027	0,023	0,030	0,021	0,035	-0,034
	V_{fp}	-0,212	0,144	-0,266	0,070	-0,314	0,306

Таблица 7

Пиковые напряжения, В, в двух несогласованных ОПЛ и ППЛ
при разной толщине изолирующего слоя

$s+w$, мм	Напря- жение	$h_1=0,248$ мм		$h_1=0,372$ мм		$h_1=0,496$ мм	
		без лака	с лаком	без лака	с лаком	без лака	с лаком
0	V_{na}	5,574	5,569	5,549	5,545	5,521	5,515
	V_{fa}	7,175	7,162	7,959	7,941	8,096	8,073
	V_{np}	0,320	0,335	0,370	0,390	0,414	0,438
	V_{fp}	0,653	0,670	-0,964	-0,939	-1,137	-1,124
0,625	V_{na}	5,618	5,619	5,542	5,549	5,502	5,511
	V_{fa}	7,544	7,490	8,368	8,310	8,563	8,499
	V_{np}	0,136	0,126	0,134	0,161	0,154	0,185
	V_{fp}	-0,271	0,252	-0,714	0,444	-0,858	0,547
1,25	V_{na}	5,624	5,624	5,534	5,541	5,488	5,498
	V_{fa}	7,598	7,561	8,448	8,406	8,664	8,618
	V_{np}	-0,040	0,041	-0,065	0,060	-0,078	0,074
	V_{fp}	0,184	0,097	-0,452	-0,190	0,628	0,232
2,5	V_{na}	5,624	5,624	5,533	5,540	5,486	5,494
	V_{fa}	7,600	7,569	8,456	8,420	8,676	8,640
	V_{np}	0,015	0,009	-0,029	-0,015	0,039	0,020
	V_{fp}	0,060	0,041	-0,180	-0,111	0,295	0,163

Дальнюю перекрестную помеху из-за неравных амплитуд мод на конце структуры можно минимизировать. Часто используют приближенное согласование посредством одинаковых резистивных нагрузок на землю на концах линий передачи. В этом случае в активной линии уровень сигнала в начале и конце одинаков, а в пассивной имеются небольшие искажения. Например, перепад напряжения 5 В в активной линии длиной 10 см, линейно нарастающий за 1 нс, приводит к появлению помехового импульса в пассивной линии (табл. 8–10) [29].

Таблица 8

Пиковые напряжения, В, в двух согласованных ОПЛ
при разной толщине изолирующего слоя

$s+w$, мм	Напря- жение	$h_1=0,248$ мм		$h_1=0,372$ мм		$h_1=0,496$ мм	
		без лака	с лаком	без лака	с лаком	без лака	с лаком
0,625	V_{np}	0,362	0,374	0,647	0,661	0,837	0,855
	V_{fp}	–0,001	0,017	0,019	0,041	0,031	0,058
1,25	V_{np}	0,068	0,086	0,181	0,211	0,251	0,289
	V_{fp}	–0,024	0,002	–0,059	–0,015	–0,035	0,021
2,5	V_{np}	0,013	0,017	0,032	0,043	0,075	0,092
	V_{fp}	–0,012	–0,006	–0,025	–0,009	–0,066	–0,043

Таблица 9

Пиковые напряжения, В, в двух согласованных ППЛ
при разной толщине изолирующего слоя

$s+w$, мм	Напря- жение	$h_1=0,248$ мм		$h_1=0,372$ мм		$h_1=0,496$ мм	
		без лака	с лаком	без лака	с лаком	без лака	с лаком
0,625	V_{np}	0,753	0,967	0,839	1,046	0,936	1,151
	V_{fp}	–0,250	0,007	–0,224	0,028	–0,219	0,042
1,25	V_{np}	0,227	0,325	0,288	0,400	0,354	0,477
	V_{fp}	–0,143	–0,027	–0,149	–0,015	–0,154	–0,008
2,5	V_{np}	0,059	0,077	0,078	0,119	0,101	0,135
	V_{fp}	–0,051	–0,036	–0,063	–0,014	–0,075	–0,039

Таблица 10

Пиковые напряжения, В, в двух согласованных ОПЛ и ППЛ
при разной толщине изолирующего слоя

$s+w$, мм	Напря- жение	$h_1=0,248$ мм		$h_1=0,372$ мм		$h_1=0,496$ мм	
		без лака	с лаком	без лака	с лаком	без лака	с лаком
0	V_{np}	0,792	0,828	1,160	1,217	1,384	1,454
	V_{fp}	-0,048	0,008	-0,070	0,018	-0,080	0,028
0,625	V_{np}	0,345	0,335	0,491	0,576	0,633	0,735
	V_{fp}	0,013	-0,002	-0,116	0,009	-0,131	0,018
1,25	V_{np}	0,079	0,111	0,167	0,223	0,239	0,311
	V_{fp}	-0,056	-0,008	-0,090	-0,008	-0,107	-0,003
2,5	V_{np}	0,019	0,025	0,041	0,055	0,063	0,084
	V_{fp}	-0,020	-0,011	-0,039	-0,018	-0,054	-0,023

Существует несколько способов уменьшения уровня перекрестных помех в связанных линиях передачи [31]:

1) увеличение расстояния между проводниками и уменьшение ширины проводников. Так как ширину проводников печатной платы невозможно бесконечно уменьшать, то предельная ширина определяется технологическим процессом и толщиной фольги. Если два проводника проходят близко друг к другу, то между ними образуются емкостная и индуктивная связи. Сигнальные проводники не должны располагаться параллельно друг другу, исключая случаи разводки дифференциальных или микрополосковых линий. Зазор между проводниками должен быть минимум в три раза больше ширины проводников. При увеличении зазора до размера, равного трем значениям ширины проводника, помеха уменьшается на 65 %. При этом, конечно, уменьшается плотность расположения проводников на печатной плате. Кроме того, расстояние между проводниками является параметром, который влияет на напряжение электрического пробоя. Чем больше это расстояние, тем большее напряжение необходимо приложить для пробоя. Идеальных диэлектриков не бывает, и в какой-то момент любой материал начинает проводить ток. Воздух, который окружает проводники, тоже является диэлектриком, но при определенных условиях становится проводником. Воздушный электрический пробой – большая проблема в электронике, если

учитывать, что воздух бывает сухой, а может иметь влажность 90–100 %;

2) уменьшение длины зоны взаимодействия. При этом снижается амплитуда перекрестных помех. Например, если фронт 0,5 нс, а задержка в зоне взаимодействия составляет менее 0,1 нс, то напряжение помехи на дальнем конце линии будет 0,8 %;

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 основания, помеха на дальнем конце линии равна нулю. Оптимальная толщина покрытия зависит от геометрии 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 печатных плат также неоднороден, поэтому диэлектрическая проницаемость неоднородна. 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 она может только ухудшить ситуацию. Сигнал, распространяющийся по активной линии, будет генерировать напряжение помех на защитной трассе. Возвратный помеховый сигнал защитной трассы 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 совпадающей отрицательной отраженной помехой ближнего конца, распространяющегося в прямом направлении по защитной трассе. Замыкание концов защитной трассы накоротко будет устранять любую помеху на ближнем конце, которая приходит по защитной трассе. Металлизированные отверстия в защитной трассе 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 отверстий. Это будет гарантией перекрытия помех дальнего конца с отрицательным отражением, что вызовет устранение напряжения помех в защитной трассе;

б) использование слоя заземления в качестве инструмента борьбы с перекрестными помехами, которые являются внутренним проявлением проблемы ЭМС. Перекрестная помеха, возникающая при электромагнитном взаимодействии двух проводников, обусловлена индуктивной и емкостной связями, 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 значение от 40 до 70 дБ при бесконечном заземленном слое по сравнению с узким проводником [11]. Слой заземления может также уменьшить взаимную индуктивность. Емкостная связь между проводниками непосредственно не подвергается воздействию слоя заземления, но уменьшение волнового сопротивления линии будет снижать амплитуду перекрестной помехи.

13.2 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

своей работе создают всплески потребления тока по цепям «земля–питание», характеризующиеся величиной dI/dt . Эти всплески могут приводить к нарушающим нормальную работу помехам. Весьма острой эта проблема оказалась для цифровых микросхем, особенно высокой степени интеграции или малой степени интеграции, но при большом их количестве на одной печатной плате 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 [32]:

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

При этом роль индуктивности будут выполнять печатные проводники и выводы микросхем. По этой причине при проектировании печатных плат следует учитывать, что на каждые 2,5 см проводника приходится индуктивность, равная 20 нГн.

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 – длина проводника, см; w – ширина проводника, см; t – толщина проводника, см.

Необходимо отметить, что индуктивность печатного проводника также зависит от толщины фольги печатной платы. 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 подобный же эффект, т.е. уменьшение индуктивности в два раза.

Каждое переходное отверстие между слоями печатной платы представляет собой катушку индуктивности. Ее индуктивность L (нГн) определяется по формуле

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

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

При толщине печатной платы 1,5 мм каждое переходное отверстие диаметром 0,4 мм будет иметь индуктивность 1,1 нГн. Такое значение кажется совсем небольшим, и им можно пренебречь. Однако даже такая 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, но 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 большой потребляемой мощности для 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 [11].

Импульсные эмиссии в цепях питания могут приводить к сбоям в работе микросхем по следующим основным причинам [10]:

- 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 связей между ними.

Для снижения уровня помех в шинах питания применяют следующие методы:

– уменьшение активного сопротивления и индуктивности шин питания с учетом взаимной магнитной связи прямого и обратного проводников и расположением шины питания и заземления на минимальном расстоянии в МПП минимально возможной толщиной диэлектрической прокладки между проводящими слоями;

– сокращение длин 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 печатных платах 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 уменьшает электромагнитные помехи. Рост плотности монтажа и быстродействия элементной базы привел к такому 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 печатной платой специальные слои «земля–питание», разделенные между собой тонким слоем диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью.

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, уменьшается пропорционально произведению 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 компонентов, что позволяет существенно уменьшить площадь платы и более эффективно использовать ее, например, для установки элементов фильтрации и ограничителей напряжения.

13.3 Развязка сигналов

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

Развязка питания интегральных схем с целью подавления высокочастотных помех состоит в применении одного или нескольких конденсаторов, подключенных между выводами питания и земли (рис. 54). Важно, чтобы проводники, соединяющие выводы с конденсаторами, были короткими. Если это не так, то собственная индуктивность проводников будет играть заметную роль и сводить на нет выгоды от применения развязывающих конденсаторов.

Развязывающий конденсатор должен быть подключен к каждому корпусу микросхемы независимо от того, сколько ОУ находится внутри корпуса. Если на ОУ подается двухполярное питание, то развязывающие конденсаторы должны располагаться у каждого вывода питания. Питание должно приходить на микросхему через конденсатор, т.е. сначала на конденсатор, а затем на

вход микросхемы. Значение емкости должно быть тщательно выбрано в зависимости от типа помех, присутствующих в схеме.

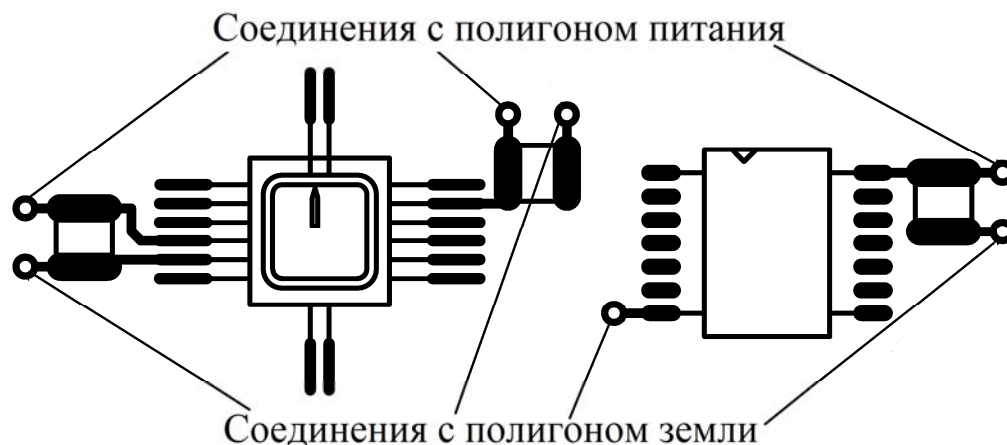


Рис. 54. Подключение развязывающих конденсаторов

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 [32].

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.

Множество помеховых проблем – результат непосредственного соединения входных и выходных выводов. Высокочастотные ограничения пассивных компонентов делают реакцию схемы на воздействие высокочастотной помехи достаточно непредсказуемой.

В ситуации, когда частотный диапазон наведенной помехи в значительной степени отличается от частотного диапазона работы

схемы, решение очевидно – размещение пассивного RC-фильтра для подавления высокочастотных помех. При использовании последовательно соединенных фильтров, настроенных на разные частотные диапазоны, более высокочастотный фильтр должен быть ближайшим к источнику помех. Катушки индуктивности на ферритовых кольцах также могут применяться для подавления помех, они сохраняют индуктивный характер сопротивления до некоторой определенной частоты, а выше их сопротивление становится активным.

14 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ

При проектировании печатных узлов следует руководствоваться практическими правилами:

- 1) использовать печатные платы только из качественного материала;
- 2) применять схемы, выполненные на МПП, которые на 20 дБ менее восприимчивы к внешним помехам, чем схемы, выполненные на ДПП;
- 3) использовать разделенные, неперекрывающиеся полигоны для различных земель и напряжений питания;
- 4) размещать трассы с потенциальными помеховыми сигналами дальше от чувствительных цепей;
- 5) располагать полигоны земли и питания на внутренних слоях МПП;
- 6) использовать полигон в качестве обратного провода, который наиболее часто подключается в схеме, для упрощения трассировки, уменьшения сопротивления всех подключений, уменьшения помехи;
- 7) выполнять печатные проводники максимально короткими;
- 8) уменьшать ширину проводника, если требуется его большая длина;
- 9) минимизировать площади замкнутых контуров для больших токов и чувствительных цепей;
- 10) не допускать не подключенных к какой-либо цепи металлизированных участков полигона;
- 11) избегать применения лишних переходных отверстий, так как их собственная индуктивность может привести к возникновению дополнительных помех;
- 12) не проводить проводники под прямыми углами, сглаживать вершины углов с целью уменьшения искажения сигналов, если это возможно;
- 13) увеличивать расстояния между проводниками и уменьшать ширину проводников;

- 14) применять защитные трассы между активной и пассивной линиями передачи;
- 15) покрывать проводники диэлектрическим материалом, что делает среду более однородной;
- 16) разделять земли на аналоговую и цифровую части;
- 17) не располагать проводники, передающие цифровые сигналы, через аналоговую часть платы, и наоборот;
- 18) размещать аналоговую схему вблизи соединителя питания;
- 19) учитывать частотные ограничения, вносимые пассивными компонентами и проводниками платы;
- 20) избегать вертикального размещения пассивных компонентов в высокоскоростных схемах;
- 21) использовать для высокочастотных схем компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа;
- 22) правильно подключать неиспользуемые выводы активных компонентов;
- 23) применять подходящие типы конденсаторов для подавления помех в цепях питания;
- 24) применять конденсаторы у каждого вывода питания микросхемы, при необходимости использовать несколько конденсаторов для разных частотных диапазонов;
- 25) использовать конденсаторы с меньшим значением емкости, если в схеме происходит возбуждение;
- 26) подключать развязывающие конденсаторы аналогового питания только к аналоговой земле, а не к цифровой.

Заключение

Надежность работы РЭА обусловлена ее помехозащищенностью по отношению к внешним и внутренним помехам. От правильного решения задачи обеспечения помехоустойчивости элементов и узлов РЭА зависят как сроки ее разработки, изготовления, настройки, так и нормальное функционирование в процессе эксплуатации.

Возможные сбои в работе оборудования, вызванные паразитными связями, скрыты от конструктора, они не обозначены на электрической схеме и не заложены в перечне элементов. Об их местонахождении можно только догадываться, их появление трудно предсказать, а устранить можно только в процессе эксперимента. Тем не менее ряд основных условий возникновения помех и методов их устранения достаточно хорошо изучен.

Построение качественной защиты от помех представляет собой весьма непростую задачу и требует соответствующего опыта. Для достижения требуемого результата необходимо при проектировании закладывать все необходимые средства защиты. Предложенные правила проектирования помехозащищенной РЭА являются базовыми и ориентированы на разработчиков и конструкторов. Решения, принятые на стадии конструкторской проработки ТС, являются важнейшими мероприятиями, направленными на повышение стойкости ТС к воздействию ЭМП.

Несмотря на то что современный мир предлагает большое количество альтернативных источников информации, в книге собраны решения основных вопросов проектирования помехозащищенной РЭА.

Литература

1. ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2013. 57 с.
2. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами : пер. с англ. М. : Мир, 1990. 119 с.
3. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М. : Радио и связь, 1989. 224 с.
4. Волин М. Л. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. М. : Радио и связь, 1981. 296 с.
5. Бадалов А. Л., Михайлов А. С. Нормы и параметры электромагнитной совместимости РЭС : справ. М. : Радио и связь, 1990. 270 с.
6. Базенков Н. И. Нелинейные эффекты и электромагнитная совместимость : учеб. пособие / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 1997. 216 с.
7. Тихомиров А. А., Ефанов В. И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2002. 228 с.
8. Газизов Т. Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / под ред. Н. Д. Малютина. Томск : НТЛ, 2003. 212 с.
9. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / под ред. Т. Р. Газизова. Томск : Том. гос. ун-т, 2002. 204 с.
10. Газизов Т. Р. Основы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. 138 с.
11. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М. : Группа ИДТ, 2007. 616 с.
12. Гурвич И. С. Защита ЭВМ от внешних помех. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1984. 224 с.

13. Кечиев Л. Н. Справочник по расчету электрической емкости, индуктивности и волнового сопротивления в электронной аппаратуре: Инженерное пособие. М. : Грифон, 2021. 280 с.
14. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М. : Группа ИДТ, 2004. 540 с.
15. Кечиев Л. Н. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры: Инженерное пособие. М. : Грифон, 2020. 480 с.
16. Кечиев Л. Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М. : Грифон, 2017. 426 с.
17. Cole E. Reducing Electromagnetic Interference (EMI) With Low Voltage Differential Signaling (LVDS) : Application Report. SLLA030C. September 2000. Revised June 2002. 6 p.
18. ГОСТ 18238-72. Линии передачи сверхвысоких частот. Термины и определения. М. : Стандартинформ, 2005. 66 с.
19. Кечиев Л. Н. Проектирование систем распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. М. : Грифон, 2016. 402 с.
20. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах : пер. с англ. М. : Мир, 1979. 318 с.
21. 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.
22. Ключев А. С., Глазов Б. В., Миндин М. Б. Техника чтения схем автоматического управления и технического контроля. М. : Энергоатомиздат, 1983. 376 с.
23. Кечиев Л. Н., Пожидаев Е. Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М. : Технологии, 2005. 352 с.
24. Кузнецова-Таджибаева О. М., Газизов Т. Р. Классификация коммутационных плат и используемых в них межсоединений для оценки паразитных эффектов // Тез. докл. XVI науч.-техн. конф. «Электронные и электромеханические системы и устройства» (г. Томск, 19–20 октября 2000 г.). 2000. С. 236–238.
25. РД 50-708–91. Инструкция. Платы печатные. Требования к конструированию. М. : Издательство стандартов, 1992. 40 с.

26. ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М. : Стандартинформ, 2018. 11 с.

27. Пат. 2013032 Российская Федерация, МПК Н 05 К 1/02. Монтажная плата / Базенков Н. И., Газизов Т. Р. ; заявитель Томский институт систем управления и радиоэлектроники. № 4921967/21 (025008) : заявл. 25.03.91 ; опубл. 15.05.94, Бюл. № 9.

28. Pan G. W., Olson K. S. and Gilbert B. K. Frequency-domain solution for coupled striplines with crossing strips // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1991. June. Vol. 39. P. 1013–1017.

29. Кузнецова-Таджибаева О. М. Искажения импульсных сигналов в одиночных и связанных полосковых линиях помехозащищенных теплопроводных монтажных плат : дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2005. 132 с.

30. Hammerstad E., Jensen O. Accurate models for microstrip computer-aided design // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Washington, DC: IEEE, 1980. P. 407–409.

31. Газизов Т. Р., Кузнецова-Таджибаева О. М., Заболоцкий А. М. Уменьшение дальней перекрестной помехи в печатных платах нанесением лака // Технологии ЭМС. 2006. № 4. С. 36–39.

32. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z : пер. с англ. К. : МК-Пресс ; СПб. : Корона-век, 2014. 256 с.

Оглавление

Введение	3
1 ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	6
2. ВИДЫ ПАРАЗИТНЫХ СВЯЗЕЙ	12
3 ВИДЫ СХЕМ	24
4 РАЗБИЕНИЕ СХЕМЫ СИСТЕМЫ	27
5 НЕИДЕАЛЬНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ	32
6 ЗАЗЕМЛЕНИЕ	39
7 ЭКРАНИРОВАНИЕ	46
7.1 Магнитное поле	48
7.2 Электрическое поле	51
7.3 Электромагнитное поле	52
7.4 Элементы конструкции экранов	56
8 ФИЛЬТРАЦИЯ	67
8.1 Помехоподавляющие фильтры	67
8.2 Синфазные дроссели	72
8.3 Ферриты с потерями	73
9 ПРОВОДНОЙ МОНТАЖ	76
10 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД	82
11 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С УЧЕТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ	96
11.1 Виды печатных плат	98
11.2 Линии передачи	102
12 ВОЗВРАТНЫЕ ТОКИ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ	105
12.1 Путь возвратного тока в линиях передачи	105
12.2 Путь возвратного тока в аналого-цифровых платах	111
13 ПОМЕХИ В ПРОВОДНИКАХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	119
13.1 Перекрестная помеха в связанных линиях передачи	120
13.2 Помехи в шинах питания	137
13.3 Развязка сигналов	141
14 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ	144
Заключение	146
Литература	147

Научное издание

Кузнецова-Таджибаева Ольга Михайловна

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Монография

Подписано в печать 28.11.2022. Формат 60х84/16.

Усл. печ. л. 8,6. Тираж 100 экз. Заказ № 306.

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»
г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.