

82.84.7
Д-10

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



ZHANGIR KHAN
UNIVERSITY

Западно-Казахстанский аграрно-технический
университет имени Жангир хана

Д.А. Джапарова
А.Р. Ғұсманова

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Уральск
2024

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



**Западно-Казахстанский аграрно – технический
университет имени Жангир хана**

**Д.А. Джапарова
А.Р. Ғұсманова**

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Уральск
2024**

УДК: 621.315
ББК: 32.841.174
Д40

Учебное пособие рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана
(протокол №5 от 23.12.2024 г.)

Рецензенты: **Ербаев Е.Т.**, доктор PhD, и.о. доцента ЗКАТУ имени Жангир хана
Захаров В.П., асс. профессор кафедры «Энергетика, автоматизация и вычислительная техника» ЗКИТУ

Джапарова Д.А.
Д40 Электромагнитная совместимость: учебное пособие / Д.А. Джапарова, А.Р. Ғұсманова. – Уральск: ЗКАТУ имени Жангир хана, 2024. – 188 с.

ISBN 978-601-319-544-5

Данное пособие предназначено для изучения основ взаимодействия электронных и электрических систем в условиях различных электромагнитных воздействий. В издании рассмотрены принципы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС), включая анализ источников помех, методы их подавления и минимизации, а также способы защиты оборудования и систем от внешних электромагнитных влияний.

Данное учебное пособие предназначено для магистрантов инженерных и технических специальностей, изучающих вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС). Особое внимание уделено современным подходам к решению задач ЭМС, включая использование программных средств и экспериментальных установок. Пособие сопровождается иллюстрациями, схемами и примерами расчетов, что делает его удобным для самостоятельного изучения.

УДК: 621.315
ББК: 32.841.174

ISBN 978-601-319-544-5

© Джапарова Д.А., Ғұсманова А.Р., 2024
© НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ.....	7
1.1 Введение в ЭМС.....	7
1.2 Шум и помехи.....	7
1.3 Проектирование с учетом электромагнитной совместимости..	8
1.4 Инженерная документация и ЭМС.....	10
ГЛАВА 2. КАБЕЛИ.....	11
2.1 Ёмкостная связь.....	12
2.2 Влияние экрана на емкостную связь.....	14
2.3 Индуктивная связь.....	19
2.4 Расчеты взаимной индуктивности.....	22
2.5 Влияние экрана на магнитную связь.....	23
2.6 Экранирование для предотвращения магнитного излучения...	32
2.7 Экранирование рецептора от магнитных полей.....	36
2.8 Экранирующая муфта с общим импедансом.....	37
2.9 Экспериментальные данные.....	38
2.10 Пример селективного экранирования.....	43
2.11 Переходное сопротивление экрана.....	44
2.12 Коаксиальный кабель против витой пары.....	45
2.13 Плетеные экраны.....	48
2.14 Спиральный экран.....	50
2.15 Заделки экранов.....	54
2.16 Кабели из риббона.....	63
ГЛАВА 3. ЗАЗЕМЛЕНИЕ.....	66
3.1 Распределение питания переменного тока и защитные заземления.....	67
3.2 Сигнальные заземления.....	80
3.3 Заземление оборудования/системы.....	94
3.4 Грунтовые лопаты.....	106
3.5 Высокочастотный анализ дросселя с общим модом.....	115
3.6 Единая точка заземления для цепи.....	117
ГЛАВА 4. БАЛАНСИРОВКА И ФИЛЬТРАЦИЯ.....	118
4.1 Балансировка.....	118
4.2 Фильтрация.....	135
4.3 Развязка источника питания.....	140
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	
№1. Пути распространения электромагнитных помех.....	144
№2. Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях.....	147
№3. Разряды статического электричества.....	153

№4. Уровни помех. Использование ЭМС-номограммы при описании помех.....	156
№5. Помехозащитные устройства. Экранирование.....	161
№6. Помехозащитные устройства. Фильтры.....	164
№7. Электромагнитная обстановка на энергетических и промышленных объектах.....	169
№8. Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ.....	176
№9. Качество электрической энергии и его обеспечение.....	180
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	185
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	186

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электромагнитная совместимость» (ЭМС) является неотъемлемой частью подготовки специалистов в области электротехники, электроники, радиотехники и телекоммуникаций. Она исследует взаимодействие электрических и электронных устройств в общей электромагнитной среде и методы обеспечения их корректной работы без взаимных помех.

Современные технологии постоянно повышают плотность и сложность электрических устройств, что усиливает требования к их совместимости. Именно поэтому понимание ЭМС важно для разработки надежных систем и соблюдения норм безопасности.

Применение на производстве различного вида электронных устройств, которые применяются для автоматизированного управления производственным процессом приводит к тому что многие устройства расположены в непосредственной близости, что в свою очередь приводит к их взаимному взаимодействию и негативному влиянию друг на друга.

Данное негативное влияние называют, электромагнитными помехами, которые приводят к ряду проблем для разработчиков схем и устройств, а также проектировщиков систем электроснабжения. Тенденция данной проблемы склонна к увеличению своих масштабов, в связи с применением большого количества электронных устройств, находящихся в общем пользовании. Кроме того, использование интегральных схем и крупномасштабной интеграции привело к уменьшению размеров электронного оборудования. Уменьшение габаритов электронных схем в крупномасштабной интеграции приводит к влиянию электромагнитных помех.

Перед разработчиками и проектировщиками стоит задача обеспечить нормальное функционирование своих систем и устройств, в условиях работы другого оборудования в непосредственной близости, и при этом соответствовать государственным нормам электромагнитной совместимости (ЭМС). Это означает, что оборудование не должно подвергаться воздействию внешних источников электромагнитного излучения и само не должно быть источником электромагнитного шума, который может загрязнять окружающую среду. Электромагнитная совместимость должна быть одной из основных целей проектирования.

В данном учебном пособии рассмотрены основные виновники ухудшения электромагнитной совместимости, виды помех и экранирование как способ борьбы с различными видами электромагнитных помех. А также виды кабелей и методы предотвращения возникновения в них шумов. Рассмотрены виды заземлений, балансировки и фильтрации сигналов. В разделе практические

задания приведены некоторые решения практических вопросов электромагнитной совместимости.

Изучение дисциплины «Электромагнитная совместимость» позволит обучающимся эффективно применять полученные знания для решения сложных задач, связанных с проектированием, эксплуатацией и модернизацией электрооборудования.

ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

1.1 Введение в ЭМС

Широкое использование электронных схем для связи, вычислений, автоматизации и других целей приводит к тому, что различные схемы должны работать в непосредственной близости друг от друга. Слишком часто эти схемы оказывают друг на друга негативное влияние. Электромагнитные помехи (ЭМП) стали серьезной проблемой для разработчиков схем, и в будущем она, вероятно, станет еще более серьезной. Эта тенденция отчасти объясняется большим количеством электронных устройств, находящихся в общем пользовании. Кроме того, использование интегральных схем и крупномасштабной интеграции привело к уменьшению размеров электронного оборудования. Поскольку схемы становятся все меньше и сложнее, все больше схем занимают все меньше места, что увеличивает вероятность возникновения помех. Кроме того, за прошедшие годы значительно возросла тактовая частота - во многих случаях более чем до гигагерца. Сегодня нередки случаи, когда тактовая частота персональных компьютеров, используемых в домашних условиях, превышает 1 ГГц [1].

Современные разработчики оборудования должны не просто обеспечить работу своих систем в идеальных лабораторных условиях. Помимо этой очевидной задачи, продукты должны быть спроектированы для работы в «реальном мире», с другим оборудованием поблизости, и соответствовать государственным нормам электромагнитной совместимости (ЭМС). Это означает, что оборудование не должно подвергаться воздействию внешних источников электромагнитного излучения и само не должно быть источником электромагнитного шума, который может загрязнять окружающую среду. Электромагнитная совместимость должна быть одной из основных целей проектирования

1.2 Шум и помехи

Шум - это любой электрический сигнал, присутствующий в цепи, отличный от желаемого сигнала. Это определение исключает продукты искажения, возникающие в цепи из-за нелинейности. Хотя эти искажения могут быть нежелательными, они не считаются шумом, если они не связаны с другой частью цепи. Из этого следует, что желаемый сигнал в одной части схемы может считаться шумом, если он соединен с другой частью схемы.

Источники шума можно разделить на следующие три категории: (1) внутренние источники шума, возникающие в результате случайных флуктуаций в физических системах, такие как тепловой и дробовой шум;

(2) искусственные источники шума, такие как двигатели, переключатели, компьютеры, цифровая электроника и радиопередатчики; и (3) шум, вызванный естественными возмущениями, такими как молнии и солнечные пятна.

Помехи - это нежелательный эффект шума. Если напряжение шума вызывает неправильную работу схемы, это помехи. Шум нельзя устранить, а помехи - можно. Шум можно только уменьшить по величине, пока он не перестанет вызывать помехи [1].

1.3 Проектирование с учетом электромагнитной совместимости

Электромагнитная совместимость (ЭМС) - это способность электронной системы (1) правильно функционировать в предусмотренной для него электромагнитной среде и (2) не быть источником загрязнения этой электромагнитной среды. Электромагнитная среда состоит как из излучаемой, так и из проводимой энергии. Поэтому электромагнитная совместимость имеет два аспекта: излучение и восприимчивость.

Восприимчивость - это способность устройства или схемы реагировать на нежелательную электромагнитную энергию (т.е. шум). Противоположностью восприимчивости является *невосприимчивость*. Уровень невосприимчивости схемы или устройства - это электромагнитная среда, в которой оборудование может работать удовлетворительно, без ухудшения характеристик и с определенным запасом прочности. Одна из трудностей при определении уровня невосприимчивости (или восприимчивости) заключается в определении того, что представляет собой ухудшение характеристик.

Эмиссия относится к потенциалу продукта, вызывающему помехи. Цель контроля излучения - ограничить излучаемую электромагнитную энергию и тем самым контролировать электромагнитную обстановку, в которой должны работать другие изделия. Контроль излучения одного изделия может устранить проблему помех для многих других изделий. Поэтому желательно контролировать излучение в попытке создать электромагнитно совместимую среду.

В определенной степени восприимчивость является саморегулируемой. Если продукт восприимчив к электромагнитной среде, пользователь узнает об этом и может отказаться от дальнейшего приобретения этого продукта. Однако эмиссия, как правило, не является саморегулируемой. Изделие, являющееся источником излучения, может само не подвергаться воздействию этого излучения. Чтобы гарантировать, что ЭМС будет учитываться при разработке всех электронных продуктов, различные правительственные агентства и регулирующие органы установили нормы ЭМС, которым должен соответствовать продукт, прежде чем он будет допущен к продаже. Эти нормы контролируют

допустимые излучения и в некоторых случаях определяют требуемую степень помехоустойчивости.

К проектированию ЭМС можно подойти одним из двух способов: кризисный подход и системный подход. При кризисном подходе разработчик полностью игнорирует ЭМС до тех пор, пока не будет завершен функциональный дизайн, а тестирование или, что еще хуже, опыт эксплуатации не покажут, что проблема существует. Решения, реализованные на этом позднем этапе, обычно дороги и состоят из нежелательных "дополнений". Такой подход часто называют "пластырем".

По мере того как разработка оборудования переходит от проектирования к испытаниям и производству, разнообразие доступных разработчику методов снижения шума неуклонно уменьшается. Одновременно с этим растет стоимость. Эти тенденции показаны на рис. 1.1. Поэтому ранние решения проблем, связанных с помехами, обычно являются наилучшими и наименее затратными.

При системном подходе ЭМС рассматривается на протяжении всего проектирования; разработчик предвидит проблемы ЭМС в начале процесса проектирования, находит оставшиеся проблемы на стадии макетных плат и ранних прототипов, а также как можно тщательнее тестирует конечные прототипы на ЭМС. Таким образом, ЭМС становится неотъемлемой частью электрической, механической, а в некоторых случаях и программной/программной конструкции продукта. В результате ЭМС разрабатывается в продукте, а не добавляется к нему. Такой подход является наиболее предпочтительным и экономически эффективным.

Если ЭМС и шумоподавление рассматриваются для одного этапа или подсистемы за раз, когда оборудование только проектируется, необходимые методы снижения шума обычно просты и понятны. Опыт показывает, что при таком подходе к ЭМС разработчик может создать оборудование, в котором 90 % или более потенциальных проблем будут устранены еще до начала испытаний.

Система, спроектированная с полным пренебрежением к ЭМС, почти всегда будет иметь проблемы, когда начнется тестирование. Анализ, проводимый в это время с целью выявления того, какие из множества возможных комбинаций шумовых путей способствуют возникновению проблемы, может быть не простым и не очевидным. Решения на этом позднем этапе обычно связаны с добавлением дополнительных компонентов, которые не являются неотъемлемой частью схемы. При этом приходится платить штрафные санкции, включающие дополнительные затраты на проектирование и тестирование, а также стоимость компонентов для снижения шума и их установки. Кроме того, могут быть штрафы за размер, вес и рассеиваемую мощность.

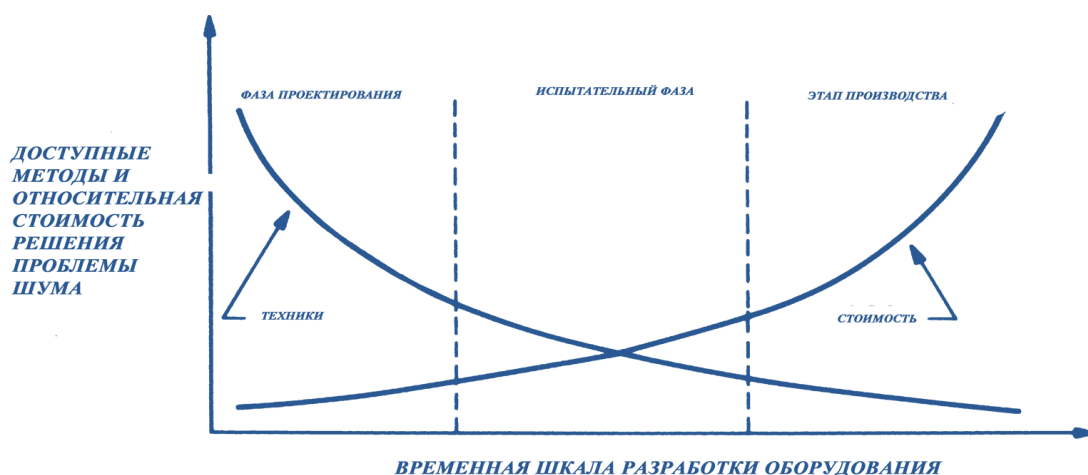


Рисунок 1.1 - По мере развития оборудования количество доступных методов шумоподавления уменьшается. В то же время стоимость шумоподавления возрастает

1.4 Инженерная документация и ЭМС

Как обнаружит читатель, большая часть информации, важной для электромагнитной совместимости, не может быть удобно передана стандартными методами инженерной документации, такими как схемы и так далее. Например, символ заземления на схеме далеко не всегда адекватно описывает, куда и как должна быть подключена эта точка. Многие проблемы ЭМС связаны с паразитными явлениями, которые не показаны на наших чертежах. Кроме того, компоненты, изображенные на наших инженерных чертежах, имеют удивительно идеальные характеристики.

Поэтому одной передачи стандартной инженерной документации недостаточно. Хорошее проектирование ЭМС требует сотрудничества и обсуждения между всей командой разработчиков, системным инженером, инженером-электриком, инженером-механиком, инженером по ЭМС, разработчиком программного обеспечения/программного обеспечения и разработчиком печатной платы.

Кроме того, многие средства автоматизированного проектирования (САПР) не содержат достаточных (или вообще не содержат) соображений ЭМС. Поэтому соображения ЭМС часто приходится применять вручную, переопределяя систему CAD. Кроме того, у вас и вашего разработчика печатных схем часто разные цели. Вашей целью является или должна являться разработка системы, которая работает правильно и отвечает требованиям ЭМС. Задача разработчика печатной платы (ПП) - сделать все необходимое, чтобы разместить все компоненты и дорожки на плате, невзирая на последствия для ЭМС.

ГЛАВА 2. КАБЕЛИ

Кабели очень важны, поскольку они обычно являются самыми длинными частями системы и поэтому выступают в роли эффективных антенн, принимающих и/или излучающих шум. В этой главе рассматриваются механизмы связи, возникающие между полями и кабелями, а также между кабелями (перекрестные наводки), причем рассматриваются как неэкранированные, так и экранированные кабели.

В этой главе мы предполагаем следующее:

1. Экраны изготавливаются из немагнитных материалов и имеют толщину, значительно меньшую, чем глубина кожи на интересующей частоте [2].

2. Рецептор не связан с источником настолько тесно, что нагружает его.

3. Индуцированные токи в цепи рецептора достаточно малы, чтобы не исказить исходное поле. (Это не относится к экрану вокруг рецепторной цепи).

4. Кабели короче длины волны.

Поскольку кабели считаются короткими по сравнению с длиной волны, связь между цепями может быть представлена единичной емкостью и индуктивностью между проводниками. Затем схема может быть проанализирована с помощью обычной теории сетей.

Рассматриваются три типа связи. Первый - это емкостная или электрическая связь, которая возникает в результате взаимодействия электрических полей между цепями. В литературе этот тип связи обычно называют электростатической связью, что является очевидной ошибкой, поскольку поля не являются статическими.

Вторая - индуктивная, или магнитная, связь, которая возникает в результате взаимодействия магнитных полей двух контуров. Этот тип связи принято называть электромагнитной, что опять же является ошибочной терминологией, поскольку в этом случае не возникает электрических полей. Третий тип представляет собой комбинацию электрического и магнитного полей и правильно называется электромагнитной связью или радиоизлучением. Методы, разработанные для борьбы с электрической связью, также подходят для электромагнитного случая. Для анализа в ближнем поле мы обычно рассматриваем электрическое и магнитное поля отдельно, в то время как случай электромагнитного поля рассматривается, когда проблема находится в дальнем поле. Цепь, вызывающая помехи, называется источником, а цепь, на которую воздействуют помехи, называется рецептором [2].

2.1 Ёмкостная связь

На рис. 2.1 показано простое представление ковалентной связи между двумя проводниками. Емкость C_{12} - это паразитная емкость между проводниками 1 и 2. Емкость C_{1G} - это емкость между проводником 1 и землей, C_{2G} - общая емкость между проводником 2 и землей, а R - сопротивление цепи 2 относительно земли. Сопротивление R является результатом работы схемы, подключенной к проводнику 2, и не является паразитным компонентом. Емкость C_{2G} состоит как из паразитной емкости проводника 2 по отношению к земле, так и из влияния любой цепи, подключенной к проводнику 2.

Эквивалентная схема связи также показана на рис. 2.1. Считайте, что напряжение V_1 на проводнике 1 является источником помех, а проводник 2 - воздействующей цепью или рецептором. Любой емкостью, подключенной непосредственно к источнику, такой как C_{1G} на рис. 2.1, можно пренебречь, поскольку она не влияет на шумовую связь. Напряжение помех V_N , создаваемое между проводником 2 и землей, можно выразить следующим образом:

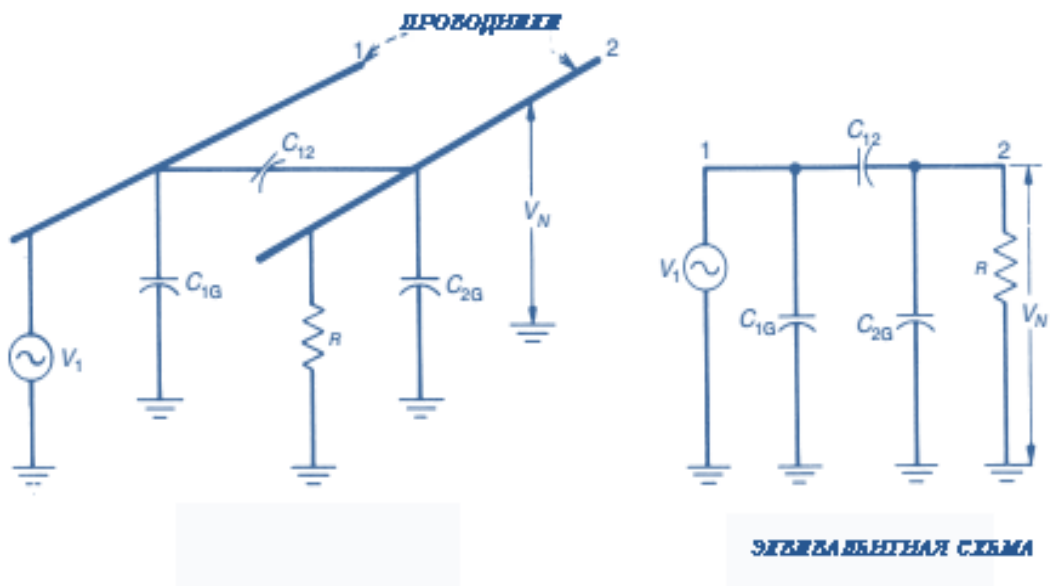


Рисунок 2.1 - Ёмкостная связь между двумя проводниками

$$V_N = \frac{j\omega \left[\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right]}{j\omega + 1/R[C_{12} + C_{2G}]} V_1 \quad (2.1)$$

Уравнение 2.1 не показывает четко, как напряжение наводки зависит от различных параметров. Уравнение 2.1 можно упростить для случая, когда импеданс R меньше импеданса паразитной емкости C_{12} плюс C_{2G} . В большинстве практических случаев это так и есть.

Поэтому для

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$

уравнение 2.1 может быть сведено к следующему:

$$V_N = j\omega RC_{12}V_1 \quad (2.2)$$

Связь электрического поля (емкостная) может быть смоделирована как генератор тока, подключенный между рецепторной цепью и землей, с величиной $j\omega RC_{12}V_1$. Это показано на рис. 2.9А.

Уравнение 2.2 является наиболее важным уравнением для описания емкостной связи между двумя проводниками, и оно наглядно показывает, как напряжение наводки зависит от параметров. Уравнение 2.2 показывает, что напряжение шума прямо пропорционально частоте ($\omega = 2\pi f$) источника шума, сопротивлению R затронутой цепи относительно земли, взаимной емкости C_{12} между проводниками 1 и 2, а также величине напряжения V_1 .

Если предположить, что напряжение и частота источника шума не могут быть изменены, то остается только два параметра для уменьшения емкостной связи. Схема приемника может работать при более низком уровне сопротивления, или можно уменьшить взаимную емкость C_{12} . Емкость C_{12} можно уменьшить за счет правильной ориентации проводников, экранирования (описано в разделе 2.2) или физического разделения проводников. Если проводники раздвинуты дальше друг от друга, C_{12} уменьшается, тем самым снижая наведенное напряжение на проводнике 2. Влияние расстояния между проводниками на емкостную связь показано на рис. 2.2. Для сравнения, 0 дБ - это связь, когда проводники разнесены на расстояние, в три раза превышающее диаметр проводника. Как видно из рисунка, расстояние между проводниками, превышающее в 40 раз их диаметр (1 в случае провода 22 калибра), дает незначительное дополнительное затухание.

Если сопротивление проводника 2 относительно земли велико, то

$$R \gg \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$

тогда уравнение 2.1 сводится к

$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}}\right)V_1, \quad (2.3)$$

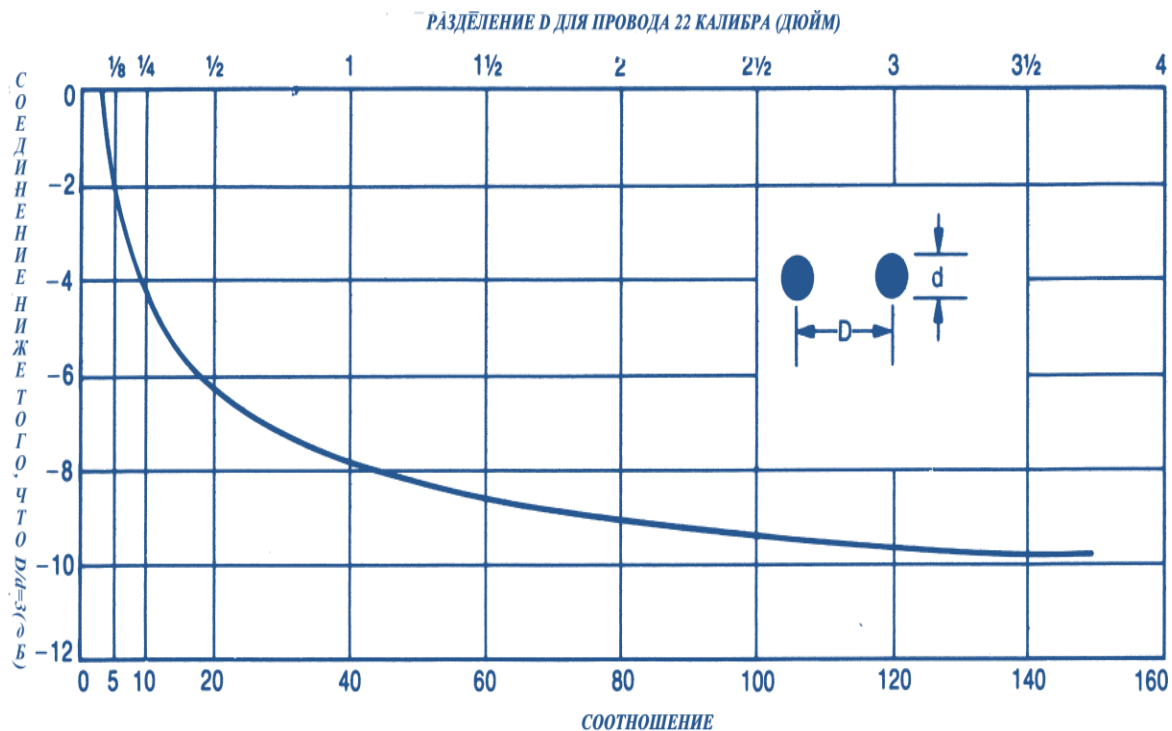


Рисунок 2.2 - Влияние расстояния между проводниками на емкостную связь. В случае провода 22-го калибра наибольшее затухание происходит на первом дюйме расстояния

В этом случае напряжение шума, возникающее между проводником 2 и землей, является результатом работы емкостного делителя напряжения C_{12} и C_{2G} . Напряжение шума не зависит от частоты и имеет большую величину, чем при малом значении R .

График зависимости уравнения 2.1 от ω показан на рис. 2.3. Как можно заметить, максимальная шумовая связь определяется уравнением 2.3. Из рисунка также видно, что фактическое напряжение шума всегда меньше или равно значению, определяемому уравнением 2-2. При частоте

$$\omega = \frac{1}{R(C_{12} + C_{2G})}, \quad (2.4)$$

Уравнение 2.2 дает значение шума, которое в 1,41 раза больше фактического значения. Почти во всех практических случаях частота гораздо меньше этого значения, и уравнение 2.2 применимо.

2.2 Влияние экрана на емкостную связь

Сначала рассмотрим случай идеального экранированного проводника, как показано на рис. 2.4. На рисунке также показана

эквивалентная схема емкостной связи. Это идеальный случай, потому что:

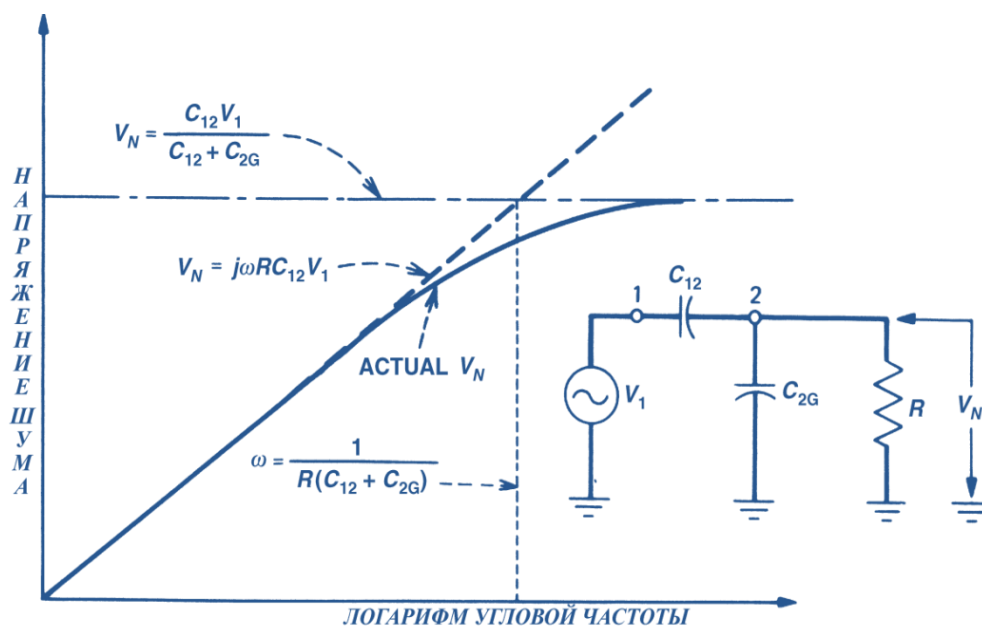


Рисунок 2.3 - Частотная характеристика напряжения шума, связанного с емкостью

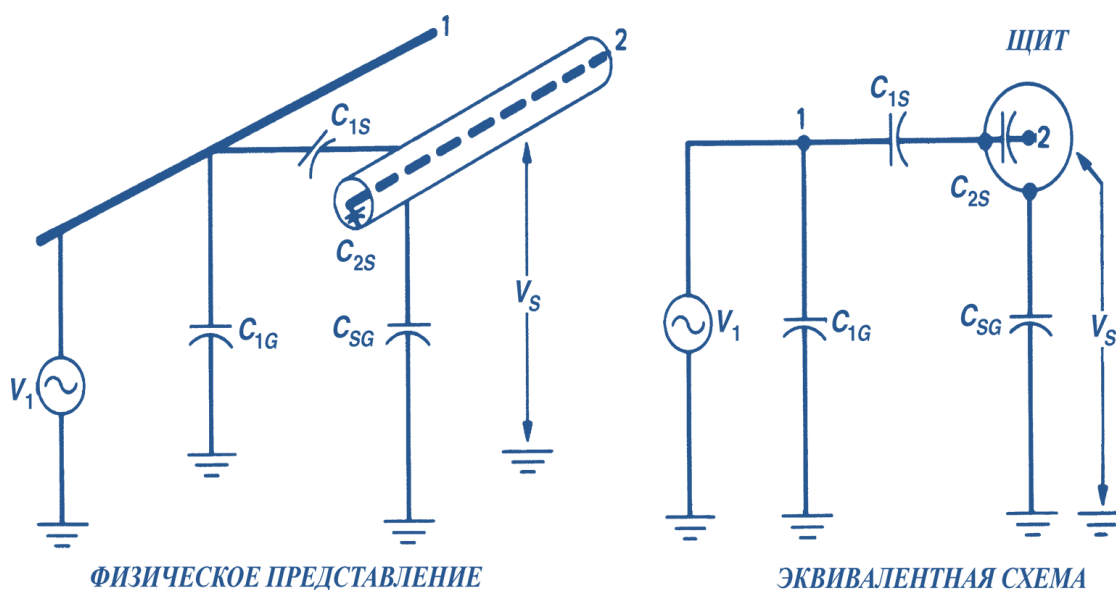


Рисунок 2.4 - Емкостная связь с экраном, расположенным вокруг проводника рецептора

1. Экран полностью окружает проводник 2 - ни один из проводников 2 не выходит за пределы экрана.
2. Экран цельный - в нем нет отверстий, как в случае с плетеным

экраном.

3. Экран не заделан, и на проводнике 2 нет согласующего сопротивления.

Экран - это неэкранированный проводник, соединенный с проводником 1, и поскольку на экране нет заделки, он имеет высокое согласующее сопротивление. Поэтому для определения напряжения, принимаемого экраном, можно использовать уравнение 2.3. Напряжение шума на экране будет равно

$$V_S = \left(\frac{C_{1S}}{C_{1S} + C_{SG}} \right) V_1, \quad (2.5)$$

Из эквивалентной схемы, показанной на рис. 2-4, следует, что для идеального случая единственным импедансом, подключенным к проводнику 2, является емкость C_{2S} . Поскольку к проводнику 2 не подключено никаких других импедансов, через C_{2S} не может протекать ток. В результате не может быть падения напряжения на C_{2S} , и напряжение, снимаемое проводником 2, составит

$$V_N = V_S \quad (2.6)$$

Поэтому экран не уменьшает напряжение помех на проводнике 2. Однако если экран заземлен, то напряжение $V_S = 0$, а из уравнения 2-6 следует, что напряжение шума V_N на проводнике 2 также уменьшится до нуля. Таким образом, мы можем сделать вывод, что экран не эффективен, если он не заземлен должным образом. Как мы увидим, во многих случаях заделка экрана является более важнее, чем характеристики самого экрана (см. раздел 2.15 о заделке экранов) [1].

Во многих практических случаях центральный проводник выходит за пределы экрана, и ситуация становится такой, как на рис. 2.5. Здесь C_{12} - это емкость между проводником 1 и экранированным проводником 2, а C_{2G} - емкость между проводником 2 и землей. Обе эти емкости существуют потому, что концы проводника 2 выходят за пределы экрана, а также в результате наличия отверстий в экране. Даже если экран заземлен, к проводнику 2 подключено напряжение помех. Его величина выражается следующим образом:

$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G} + C_{2S}} \right) V_1, \quad (2.7)$$

Значение C_{12} , и, следовательно, V_N , в уравнении 2.7 зависит в первую очередь от длины проводника 2, выходящего за пределы экрана, и в меньшей степени от наличия отверстий в экране.

Поэтому для хорошего экранирования электрического поля необходимо (1) минимизировать длину центрального проводника, выходящего за пределы экрана, и (2) обеспечить хорошее заземление экрана. Одно заземление обеспечивает хорошее заземление экрана, если длина кабеля не превышает одной двадцатой длины волны. В более длинных кабелях может потребоваться несколько заземлений.

Если к тому же принимающий проводник имеет конечное сопротивление относительно земли, то схема будет такой, как показано на рис. 2.6. Если экран заземлен, эквивалентная схема может быть упрощена, как показано на рисунке. Любой емкостью непосредственно напротив источника можно пренебречь, поскольку она не влияет на шумовую связь. Упрощенная эквивалентная схема может быть признана той же самой схемой, которая была проанализирована на рис. 2.1, при условии, что C_{2G} заменяется суммой C_{2G} и C_{2S} . Поэтому, если

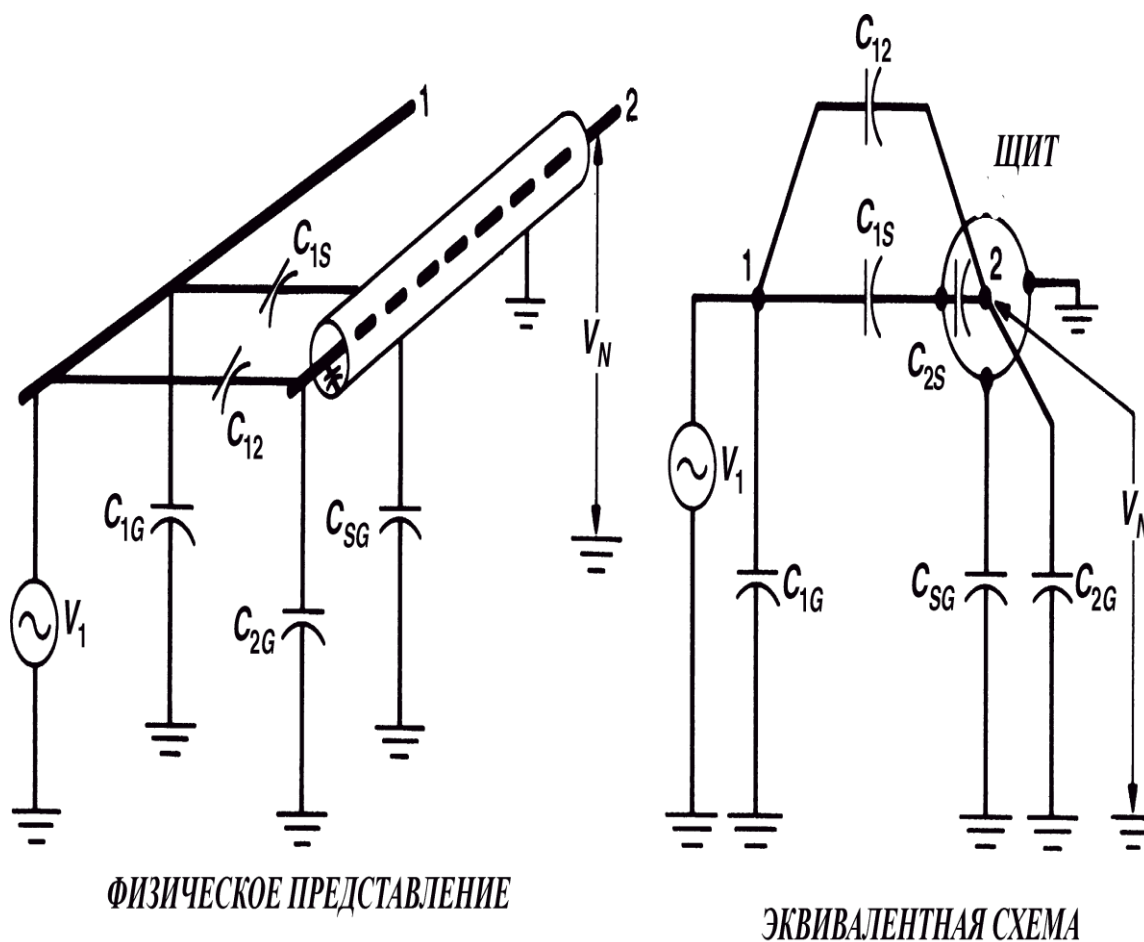


Рисунок 2.5 - Емкостная связь, когда центральный проводник выходит за пределы экрана; экран заземлен в одной точке

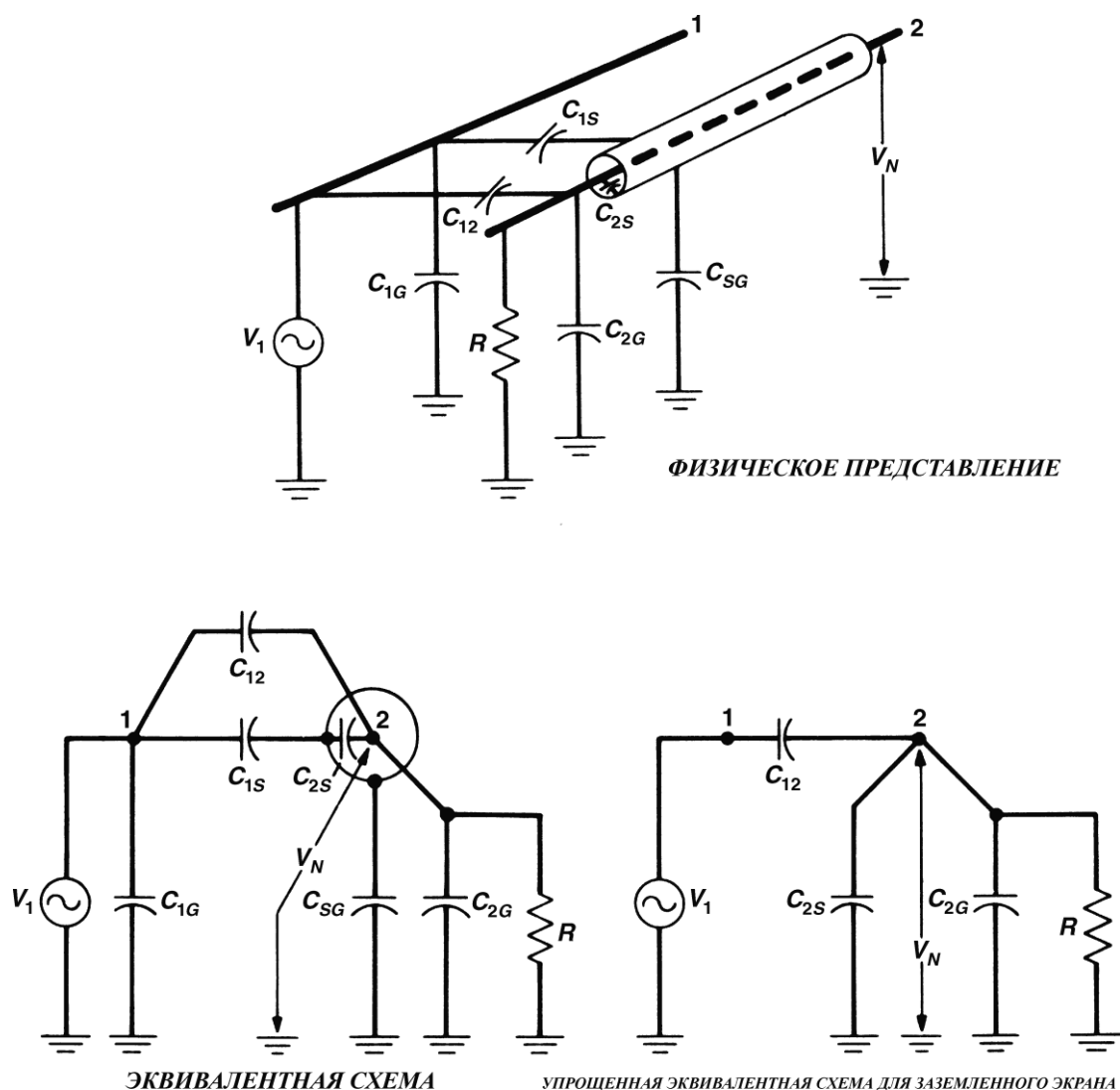


Рисунок 2.6 - Емкостная связь, когда рецепторный проводник имеет сопротивление относительно земли

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G} + C_{2S})},$$

что обычно верно, тогда напряжение шума, подключенное к проводнику 2, равно

$$V_N = j\omega R C_{12} V_1 \quad (2.8)$$

Это то же самое, что и уравнение 2.2 для неэкранированного кабеля, за исключением того, что C_{12} значительно уменьшается из-за наличия экрана. Емкость C_{12} теперь состоит в основном из емкости между проводником 1 и неэкранированными частями проводника 2.

Если экран имеет оплетку, любая емкость, которая существует между проводником 1 и проводником 2 через отверстия в оплетке, также должна быть включена в C_{12} .

2.3 Индуктивная связь

Когда по проводнику течет ток I , он создает магнитный поток Φ , который пропорционален току. Константой пропорциональности является индуктивность L ; следовательно, мы можем записать

$$\Phi_T = LI, \quad (2.9a)$$

где Φ_T - полный магнитный поток,
а I - ток, создающий этот поток.

Переписав уравнение 2-9а, получим для *самоиндукции* проводника

$$L = \frac{\Phi_T}{I}, \quad (2.9b)$$

Индуктивность зависит от геометрии цепи и магнитных свойств среды, содержащей поле.

Когда ток в одной цепи создает поток во второй цепи, возникает *взаимная индуктивность* M_{12} между контурами 1 и 2, определяемая как

$$M_{12} = \frac{\Phi_T}{I_1}, \quad (2.10)$$

Напряжение V_N , индуцированное в замкнутом контуре площадью $\bar{A}$ в результате действия магнитного поля. поле с плотностью потока $\bar{B}$ может быть получено из закона Фарадея и имеет вид

$$V_N = -\frac{d}{dt} \int_A \bar{B} * d\bar{A}, \quad (2.11)$$

где $\bar{B}$ и $\bar{A}$ - векторы. Если замкнутый контур неподвижен, а плотность потока синусоидально изменяется со временем, но постоянна по площади контура, уравнение 2-11 сводится к

$$V_N = j\omega B A \cos\theta, \quad (2.12)$$

Как показано на рис. 2-7, A - площадь замкнутого контура, B - среднеквадратичное (среднеквадратичное) значение синусоидально изменяющейся плотности потока с частотой ω радиан в секунду, а V_N - среднеквадратичное значение индуцированного напряжения.

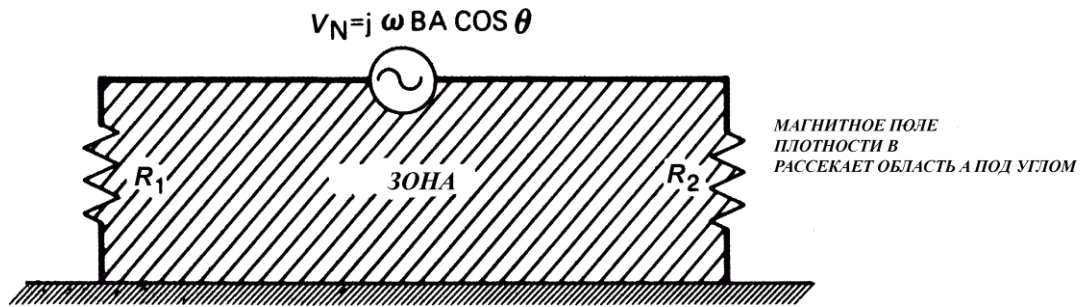


Рисунок 2.7 - Индуцированный шум зависит от площади, занимаемой нарушенной цепью

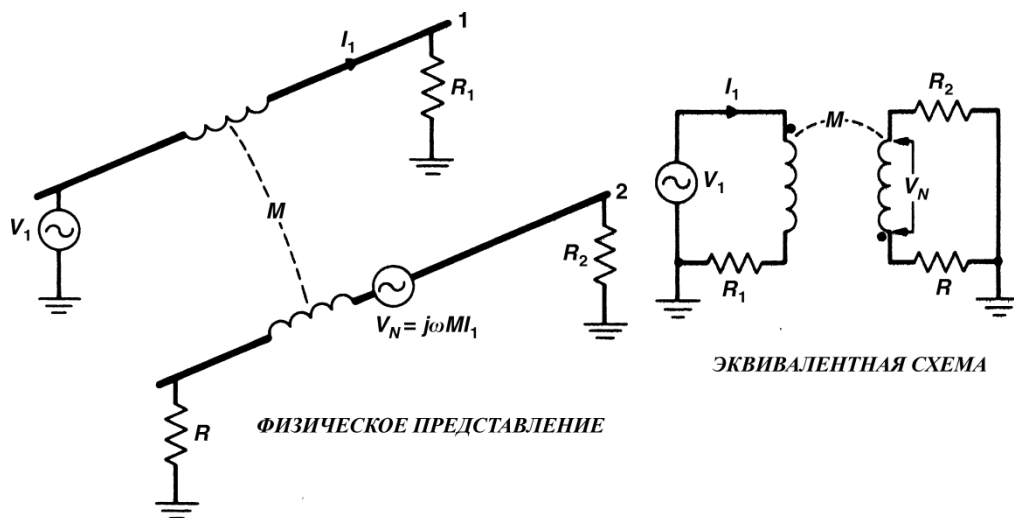


Рисунок 2.8 - Магнитная связь между двумя контурами

Поскольку $BA \cos \theta$ представляет собой полный магнитный поток (Φ_{12}), подключенный к рецепторному контуру, уравнения 2.10 и 2.12 могут быть объединены для выражения индуцированного напряжения в терминах взаимной индуктивности M между двумя контурами следующим образом:

$$V = j\omega M I_1 = M \frac{di_1}{dt}, \quad (2.13)$$

Уравнения 2.12 и 2.13 - это основные уравнения, описывающие индуктивную связь между двумя контурами. На рис. 2.8 показана индуктивная (магнитная) связь между двумя контурами, описываемая уравнением 2.13. I_1 - это ток в интерферирующем контуре, а M - член, учитывающий геометрию и магнитные свойства среды между двумя контурами. Наличие ω в уравнениях 2.12 и 2.13 указывает на то, что связь прямо пропорциональна частоте. Чтобы уменьшить напряжение шума, необходимо уменьшить B , A или $\cos \theta$. Член B может быть уменьшен

путем физического разделения цепей или скручивания проводов источника, при условии, что ток течет в витой паре, а не через плоскость земли.

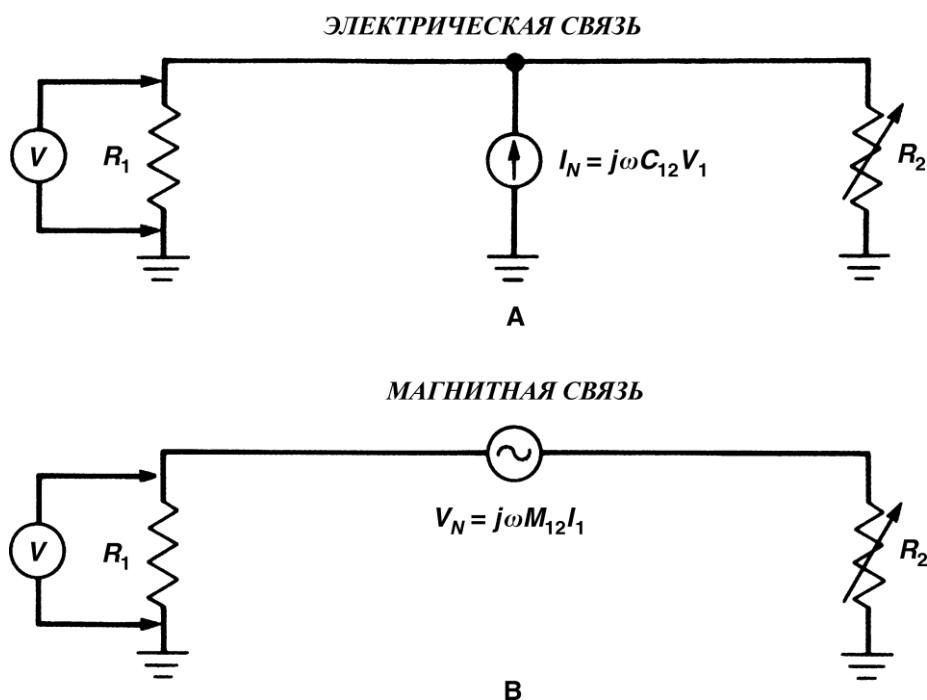


Рисунок 2.9 - (А) Эквивалентная схема для связи электрического поля;
(В) эквивалентная схема для связи магнитного поля

При таких условиях скручивание приводит к тому, что поля B от каждого из проводов аннулируются. Площадь приемной цепи можно уменьшить, расположив проводник ближе к плоскости земли (если обратный ток проходит через плоскость земли) или используя два проводника, скрученных вместе (если обратный ток проходит по одному из пары, а не по плоскости земли). $\cos\theta$ может быть уменьшен за счет правильной ориентации контуров источника и приемника [6].

Полезно отметить некоторые различия между муфтой магнитного и электрического поля. При магнитной связи шумовое напряжение возникает последовательно с проводником рецептора (рис. 2-9В), тогда как при электрической связи шумовой ток возникает между проводником рецептора и землей (рис. 2-9А). Это различие может быть использовано в следующем тесте для различения электрической и магнитной связи. Измерьте напряжение шума через импеданс на одном конце кабеля, одновременно уменьшая импеданс на противоположном конце кабеля (рис. 2-9). Если измеренное напряжение шума уменьшается, значит, наводка электрическая, а если измеренное напряжение шума увеличивается, значит, наводка магнитная.

2.4 Расчеты взаимной индуктивности

Чтобы оценить выражение в уравнении 2-13, необходимо знать взаимную индуктивность между источником и рецептором. В большинстве учебников не уделяется особого внимания расчетам взаимной индуктивности для практических геометрий цепей. Однако Гровер подробно рассматривает этот вопрос, а Рюли развивает полезную концепцию частичной взаимной индуктивности.

Прежде чем рассчитывать взаимную индуктивность, необходимо определить выражение для величины плотности магнитного потока в зависимости от расстояния до токоведущего проводника. Используя закон Биота-Саварта, можно записать плотность магнитного потока B на расстоянии r от длинного токопроводящего проводника как

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r}, \quad (2.14)$$

для r больше радиуса проводника. Плотность потока B равна потоку Φ на единицу площади. Поэтому магнитное поле прямо пропорционально току I и обратно пропорционально расстоянию r . Используя уравнения 2.14 и 2.10, можно определить мутационную индуктивность для любой произвольной конфигурации проводников, рассчитав магнитный поток, связанный с контуром приемника от каждого токоведущего проводника в отдельности, а затем наложив все результаты для получения общего потока связи.

Пример 2.1. Рассчитайте взаимную индуктивность двух вложенных друг в друга копланерных контуров, показанных на рис. 2-10А, предполагая, что стороны контура намного длиннее концов (т. е. связью, вносимой концевыми проводниками, можно пренебречь). По проводникам 1 и 2 течет ток I_1 , который индуцирует напряжение V_N в контуре, образованном проводниками 3 и 4. На рис. 2.10В показан вид в поперечном сечении с указанием расстояния между проводниками. Магнитный поток, создаваемый током в проводнике 1, пересекающем петлю между проводниками 3 и 4, равен

$$\Phi_{12} = \int_a^b \frac{\mu I_1}{2\pi r} dr = \frac{\mu I_1}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right). \quad (2.15)$$

Проводник 2 также вносит равный поток из-за симметрии проводников. Этот поток направлен в ту же сторону, что и поток, создаваемый током в проводнике 1. Таким образом, общий поток, подключенный к контуру, образованному проводниками 3 и 4, в два раза превышает поток, определяемый уравнением 2.15, или

$$\Phi_{12} = \left[\frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \right] I_1. \quad (2.16)$$

Разделив уравнение 2.16 на I_1 и подставив $4\pi * 10^{-7}$ в значение μ , получим взаимную индуктивность в Гн/м.

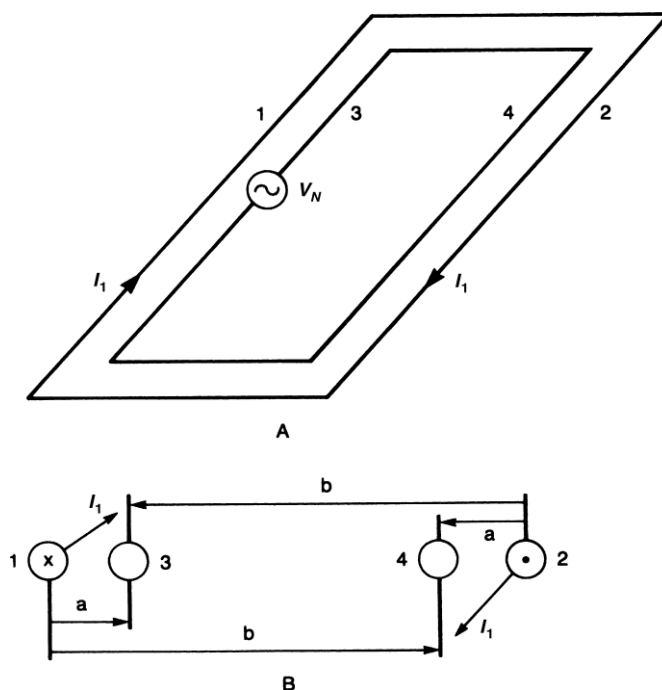


Рисунок 2.10 - (А) Вложенные копланарные петли; (В) вид в поперечном сечении А

$$M = 4 * 10^{-7} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.17)$$

Напряжение, связанное между двумя контурами, можно рассчитать, подставив результат из упр. 2.17 в упр. 2.13.

2.5 Влияние экрана на магнитную связь

Если теперь вокруг проводника 2 поместить незаземленный немагнитный экран, то схема станет такой, как на рис. 2.11, где M_{1s} - взаимная индуктивность между проводником 1 и экраном. Поскольку экран не влияет на геометрию или магнитные свойства среды между контурами 1 и 2, он не влияет на напряжение, индуцируемое в проводнике 2. Однако на экране появляется напряжение, вызванное током в проводнике 1:

$$V_S = j\omega M_{1s} I_1, \quad (2.18)$$

Заземление на одном конце экрана не изменит ситуацию.

Отсюда следует, что немагнитный экран, установленный вокруг проводника и заземленный с одного конца, не влияет на магнитное напряжение, индуцированное в этом проводнике.

Однако если экран заземлен с обоих концов, напряжение, наведенное на экран с M_{1S} на рис. 2.11, вызовет ток экрана. Ток экрана будет индуцировать второе напряжение помех в проводнике 2, и это необходимо учитывать. Прежде чем рассчитывать это напряжение, необходимо определить взаимную индуктивность между экраном и его центральным проводником.

По этой причине, прежде чем продолжить обсуждение индуктивной связи, необходимо рассчитать магнитную связь между полый проводящей трубкой (экраном) и любым проводником, помещенным внутрь трубки. Эта концепция является основополагающей для обсуждения магнитного экранирования и понадобится позже.

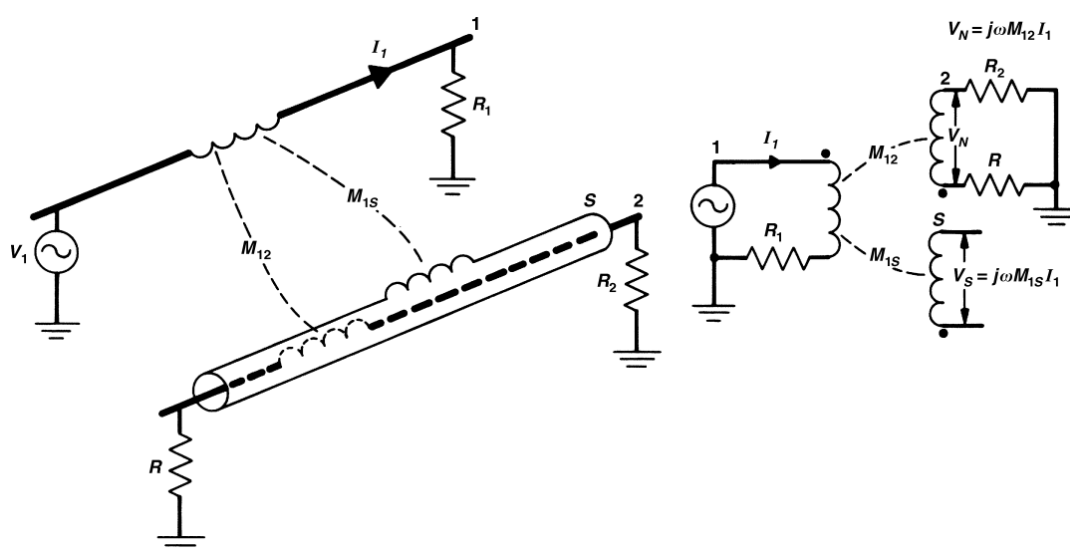


Рисунок 2.11 - Магнитная связь при наличии экрана вокруг проводника рецептора

2.5.1 Магнитная связь между экраном и внутренним проводником

Сначала рассмотрим магнитное поле, создаваемое трубчатым проводником с *равномерным* осевым током, как показано на рис. 2.12. Если отверстие в трубке концентрично с внешней стороны трубки, то магнитное поле в полости отсутствует, а общее магнитное поле является внешним по отношению к трубке.

Теперь поместим проводник внутрь трубки, чтобы получился коаксиальный кабель, как показано на рис. 2.13. Весь поток Φ от тока I_S в экранирующей трубке окружает внутренний проводник.

Индуктивность экрана равна

$$L_S = \frac{\Phi}{I_S} \quad (2.19)$$

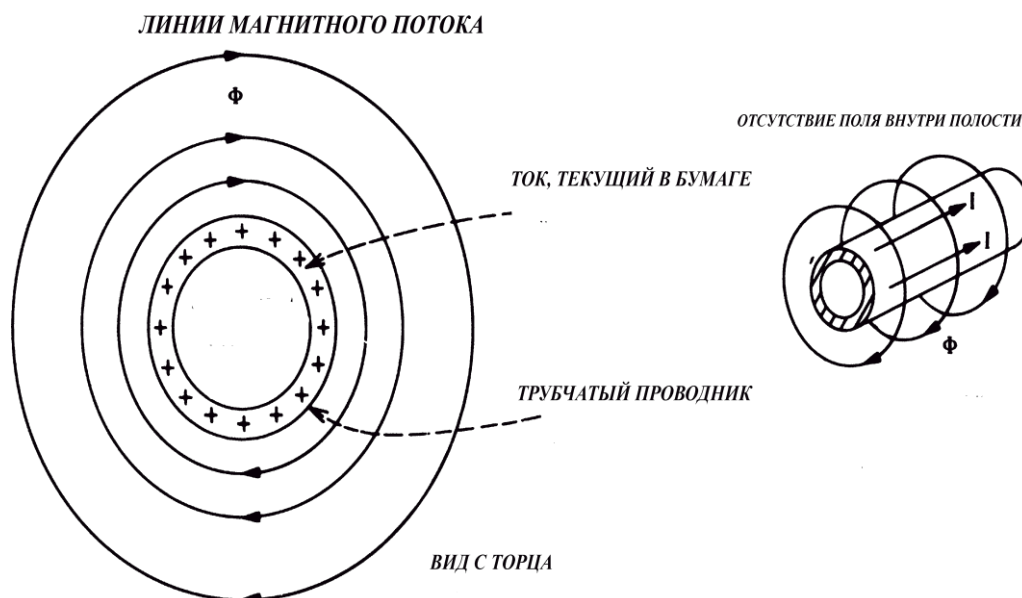


Рисунок 2.12 - Магнитное поле, создаваемое током в трубчатом проводнике

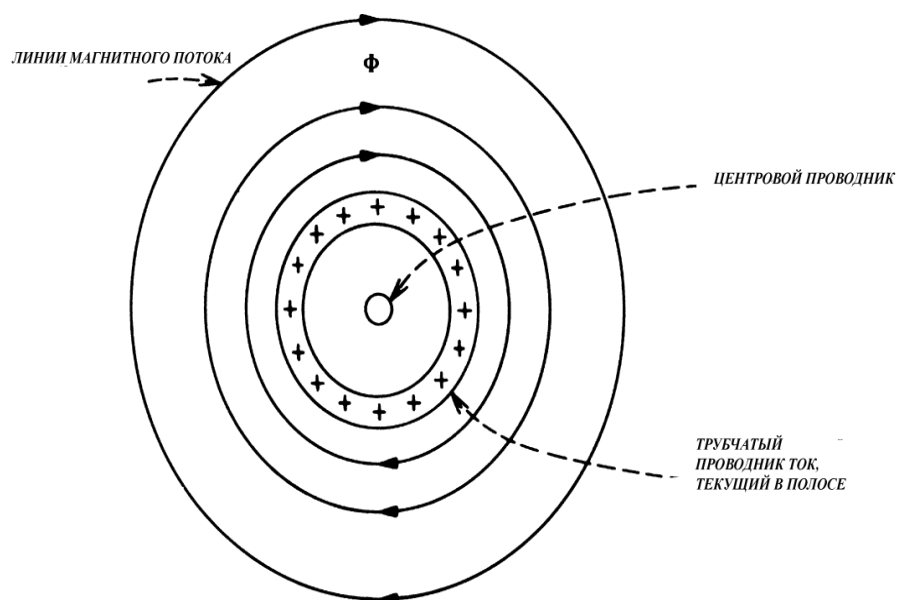


Рисунок 2.13 - Коаксиальный кабель с током в экране, протекающим равномерно по окружности экрана

Взаимная индуктивность между экраном и внутренним проводником равна

$$M = \frac{\Phi}{I_S} \quad (2.20)$$

Поскольку весь поток, создаваемый током экрана, окружает центральный проводник, поток Φ в уравнениях 2.19 и 2.20 одинаков. Поэтому взаимная индуктивность между экраном и центральным проводником равна самоиндукции экрана

$$M = L_S \quad (2.21)$$

Уравнение 2.21 - это очень важный результат, к которому мы будем часто обращаться. Это было сделано для того, чтобы показать, что взаимная индуктивность между экраном и центральным проводником равна индуктивности экрана. Исходя из принципа взаимной индуктивности, должно быть верно и обратное. То есть взаимная индуктивность между центральным проводником и экраном равна индуктивности экрана. Справедливость уравнения 2.21 зависит только от того, что в полости трубки не возникает магнитного поля от тока, протекающего через экран. Поскольку магнитное поле в трубке отсутствует, уравнение 2.21 применимо независимо от положения проводников в трубке. Другими словами, два проводника не обязательно должны быть коаксиальными. Уравнение 2.21 также применимо к случаю нескольких проводников в экране, в этом случае оно будет представлять собой взаимную индуктивность между экраном и каждым проводником в экране.

Теперь можно рассчитать напряжение V_N , индуцированное в центральном проводнике из-за тока I_S в экране. Предположим, что ток в экране создается напряжением V_S , индуцированным в экране из другой цепи. На рис. 2.14 показана рассматриваемая цепь; L_S и R_S - индуктивность и сопротивление экрана. Напряжение V_N равно

$$V_N = j\omega M I_S \quad (2.22)$$

Ток I_S равен

$$I_S = \frac{V_S}{L_S} \left(\frac{1}{j\omega + R_S/L_S} \right) \quad (2.23)$$

Поэтому

$$V_N = \left(\frac{j\omega M V_S}{L_S} \right) \left(\frac{1}{j\omega + R_S/L_S} \right) \quad (2.24)$$

Поскольку $L_S = M$ (из уравнения 2-21),

$$V_N = \left(\frac{j\omega}{j\omega + R_S/L_S} \right) V_S \quad (2.25)$$

График уравнения 2-25 показан на рис. 2-15. Частота излома для этой кривой определяется как частота среза щита (ω_c) и возникает при

$$\omega_c = \frac{R_S}{L_S}, \text{ или } f_c = \frac{R_S}{2\pi L_S} \quad (2.26)$$

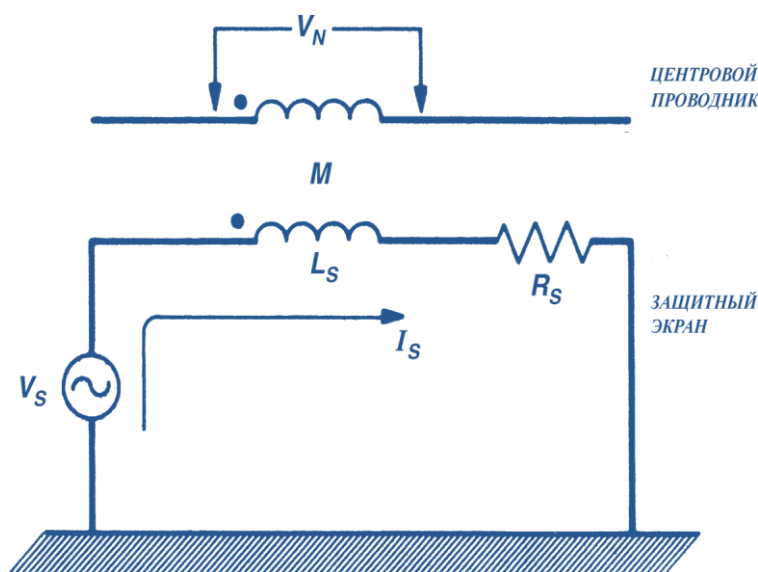


Рисунок 2.14. Эквивалентная схема экранированного проводника

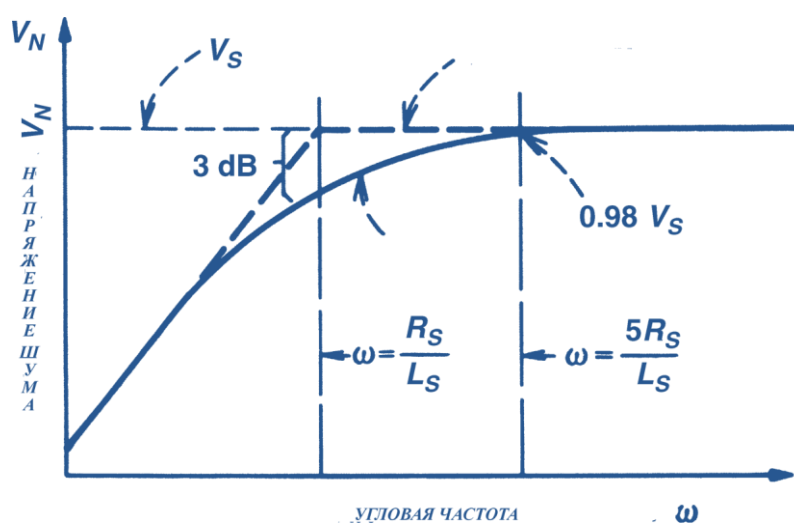


Рисунок 2.15 - Напряжение шума в центральном проводнике коаксиального кабеля из-за тока экрана

Напряжение шума, индуцируемое в центральном проводнике, равно нулю при постоянном токе и возрастает почти до V_S на частоте $5R_S / L_S$ рад/с. Поэтому, если ток экрана протекает, в центральном проводнике индуцируется напряжение, почти равное напряжению экрана на частотах, превышающих в пять раз частоту среза экрана [7].

Это очень важное свойство проводника внутри экрана. Измеренные значения частоты среза экрана и пятикратного значения этой частоты приведены в таблице 2.1 для различных кабелей. Для большинства кабелей пятикратное значение частоты среза экрана находится вблизи высокой границы полосы звуковых частот. У перечисленных кабелей с экраном из алюминиевой фольги частота среза экрана намного выше, чем у других, что обусловлено повышенным сопротивлением тонкого экрана из алюминиевой фольги.

2.5.2 Магнитное соединение открытого провода с экранированным проводником

На рис. 2.16 показаны магнитные муфты, которые возникают, когда вокруг проводника 2 установлен немагнитный экран, а экран заземлен с обоих концов. На этом рисунке экранирующий проводник показан отдельно от проводника 2 для упрощения чертежа. Поскольку экран заземлен с обоих концов, по экрану течет ток и индуцирует напряжение в проводнике 2. Поэтому напряжение, наведенное в проводнике 2, имеет две составляющие. Напряжение V_2 от прямой индукции с проводника 1 и напряжение V_c от индуцированного тока экрана. Обратите внимание, что эти два напряжения имеют противоположную полярность. Таким образом, общее напряжение шума, индуцируемое в проводнике 2, равно

$$V_N = V_2 - V_c \quad (2.27)$$

Если мы воспользуемся тождеством уравнения 2.21 и заметим, что взаимная индуктивность M_{15} от проводника 1 к экрану равна взаимной индуктивности M_{12} от проводника

Таблица 2.1 - Измеренные значения частоты среза шильда f_c

Кабель	Импеданс (Ω)	Частота среза (кГц)	Пятикратная частота среза (кГц)	Примечания
1	2	3	4	5
Коаксиальный кабель				
RG-6A	75	0.6	3.0	Двойное экранирование
RG-213	50	0.7	3.5	

1	2	3	4	5
RG-214	50	0.7	3.5	Двойное экранирование
RG-62A	93	1.5	7.5	
RG-59C	75	1.6	8.0	
RG-58C	50	2.0	10.0	
Экранированная витая пара				
754E	125	0.8	4.0	Двойное экранирование
24 Ga.	-	2.2	11.0	
22 Ga. ^a	-	7.0	35.0	Экран из алюминиевой фольги
Экранированный одинарный				
24 Ga.	-	4.0	20.0	

1 к проводнику 2 (поскольку экран и проводник 2 расположены в одном и том же месте пространства по отношению к проводнику 1), то уравнение 2.27 приобретает вид

$$V_N = j\omega M_{12} I_1 \left[\frac{R_S/L_S}{j\omega + R_S/L_S} \right] \quad (2.28)$$

Если ω в уравнении 2.28 мало, член в скобках равен 1, а напряжение шума такое же, как и для неэкранированного кабеля. Поэтому на низких частотах экран, даже если он заземлен с обоих концов, не обеспечивает экранирования магнитного поля.

Если ω велико, то уравнение 2.28 сводится к

$$V_N = M_{12} I_1 \left(\frac{R_S}{L_S} \right) \quad (2.29)$$

Уравнение 2.28 представлено на рис. 2.17. На низких частотах наводки помех в экранированном кабеле такие же, как и в неэкранированном; однако на частотах выше частоты среза экрана напряжение наводки перестает расти и остается постоянным. Таким образом, эффективность экранирования (показана крестиком на рис. 2.17) равна разнице между линиями для неэкранированного и экранированного кабелей.

Из уравнения 2.29 можно сделать вывод, что для минимизации напряжения помех, подключаемого к проводнику 2, сопротивление экрана R_S должно быть минимальным. Это происходит потому, что именно индуктированный ток экрана создает магнитное поле, которое гасит большую часть прямой индукции в проводнике 2.

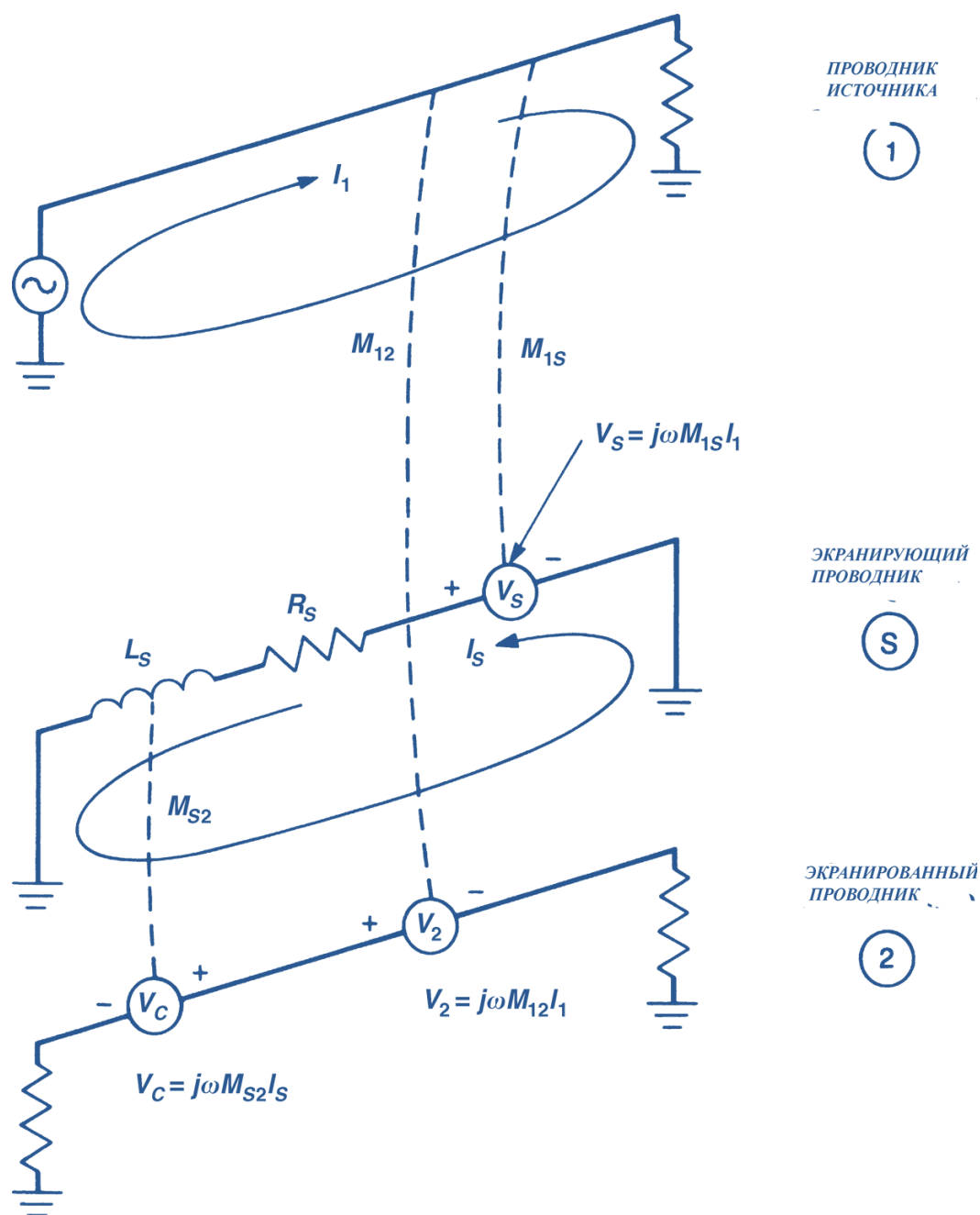


Рисунок 2.16 - Магнитная связь с экранированным кабелем с заземленным экраном на обоих концах

Поскольку R_S уменьшает ток экранирования, это снижает эффективность магнитного экранирования.

Из средней диаграммы на рис. 2.16 можно сделать вывод, что R_S представляет собой не только сопротивление экрана, но и все сопротивления в контуре, в котором протекает ток экрана I_S . Таким образом, R_S включает в себя не только сопротивление экрана, но и сопротивление заделки экрана и любое сопротивление в земле. Для достижения максимальной эффективности экранирования все эти

сопротивления должны быть сведены к минимуму. Поэтому рекомендуемая иногда практика заделки экрана резистором, а не напрямую на землю, резко снижает эффективность экранирования магнитного поля кабеля, и ее следует избегать.

На рис. 2.18 показана эквивалентная схема аналогии трансформатора для конфигурации, приведенной на рис. 2.16. Как можно заметить, экран действует как закороченный виток трансформатора для замыкания напряжения на обмотке 2. Любое сопротивление (например, сопротивление экрана) в закороченном витке (экране) будет снижать его эффективность в замыкании напряжения на обмотке 2.

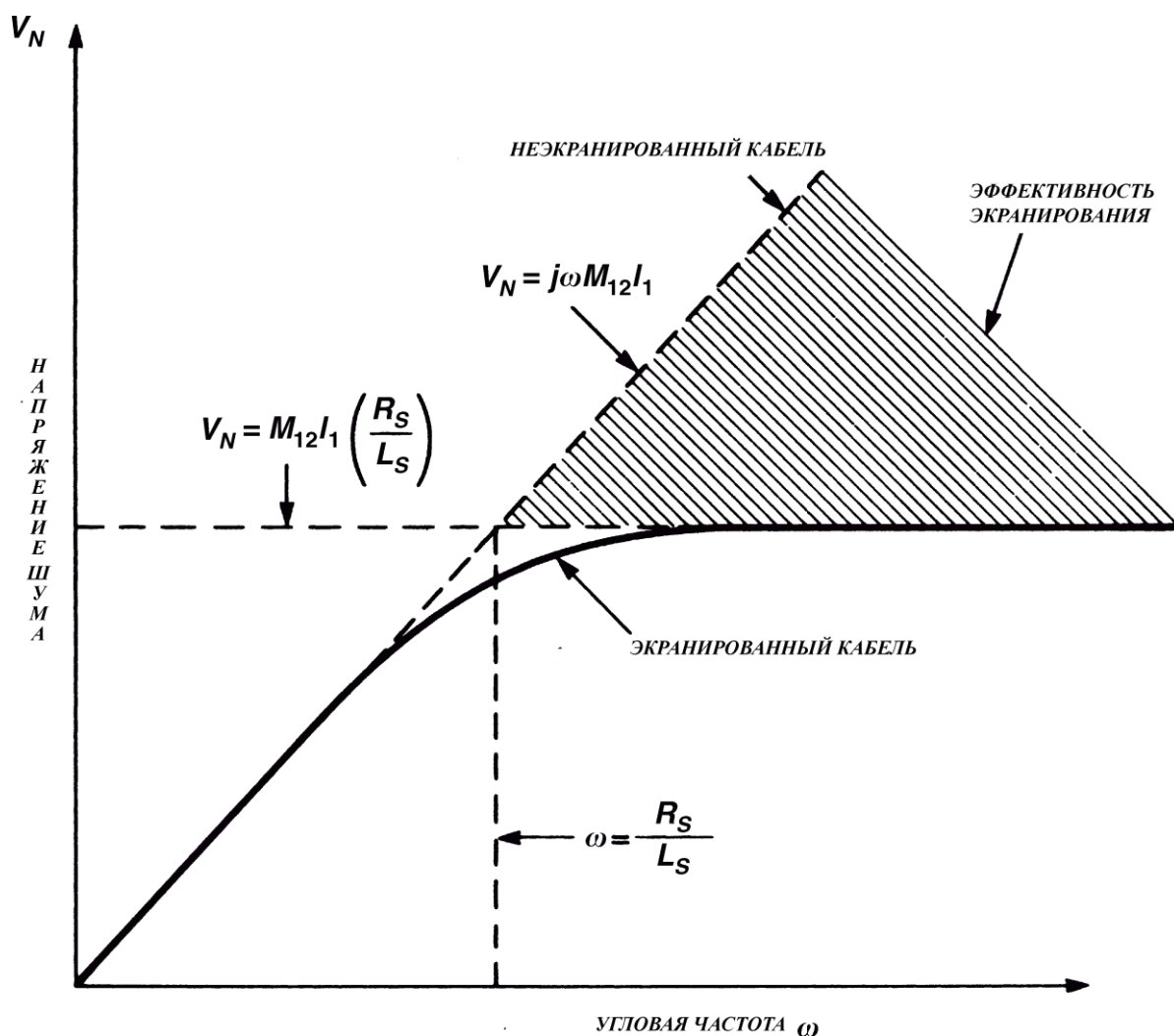


Рисунок 2.17 - Напряжение шума, связанного с магнитным полем, для неэкранированного и экранированного кабеля (экран заземлен на обоих концах) в зависимости от частоты

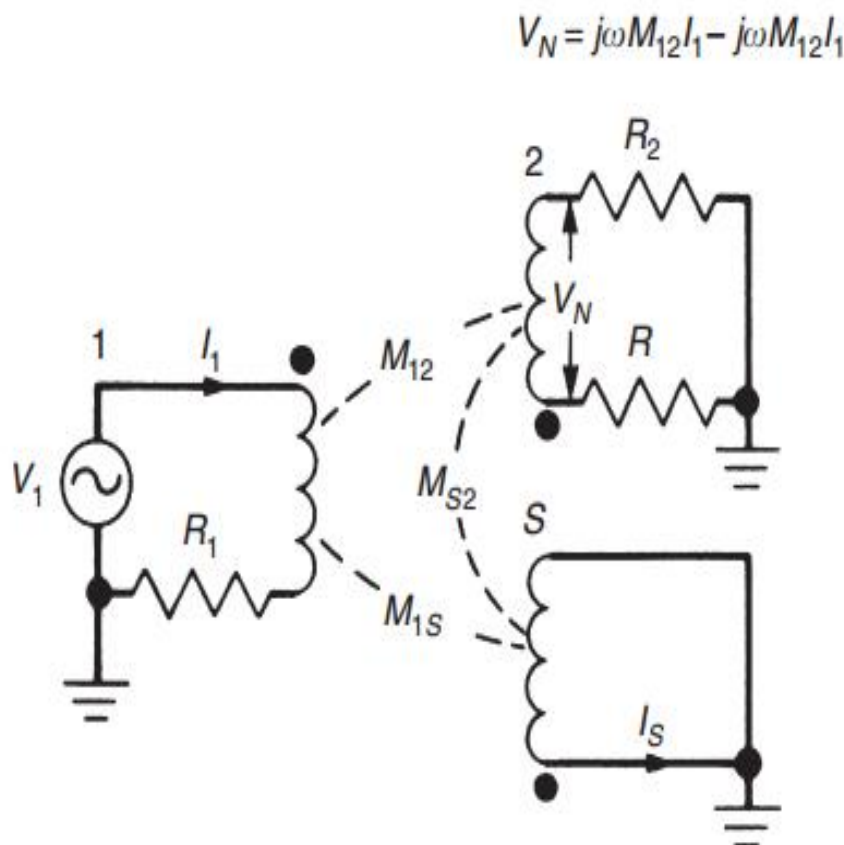


Рисунок 2.18 - Трансформаторная аналогия связи магнитного поля с экранированным кабелем, когда экран заземлен с обоих концов ($MS2$ намного больше, чем $M12$ или $M1S$)

2.6 Экранирование для предотвращения магнитного излучения

Для предотвращения излучения источник помех может быть экранирован. На рис. 2.19 показаны электрическое и магнитное поля, окружающие кондуктор с током, расположенный в свободном пространстве. Если поместить немагнитный экран вокруг проводника, то линии электрического поля будут заканчиваться на экране, но на магнитное поле это повлияет очень слабо, как показано на рис. 2.20. Если по экрану протекает ток, равный и противоположный току в центральном проводнике, то он создает равное, но противоположное внешнее магнитное поле. Это поле отменяет магнитное поле, вызванное током в центральном проводнике, внешнем по отношению к экрану, что приводит к состоянию, показанному на рис. 2.21, при котором внешние по отношению к экрану поля отсутствуют.

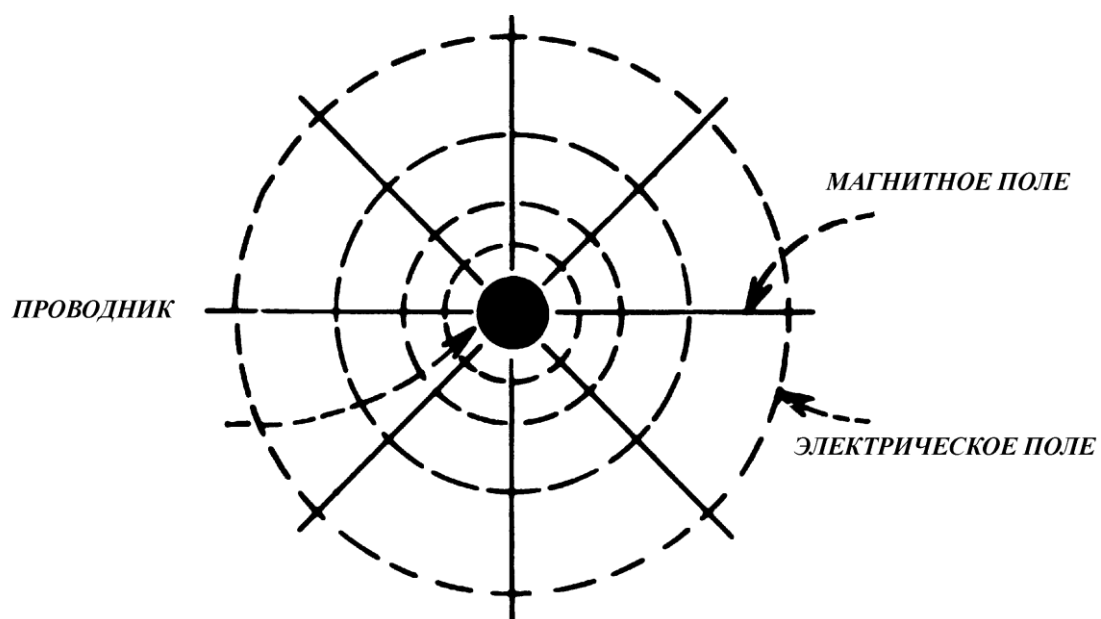


Рисунок 2.19 - Поля, окружающие проводник с током

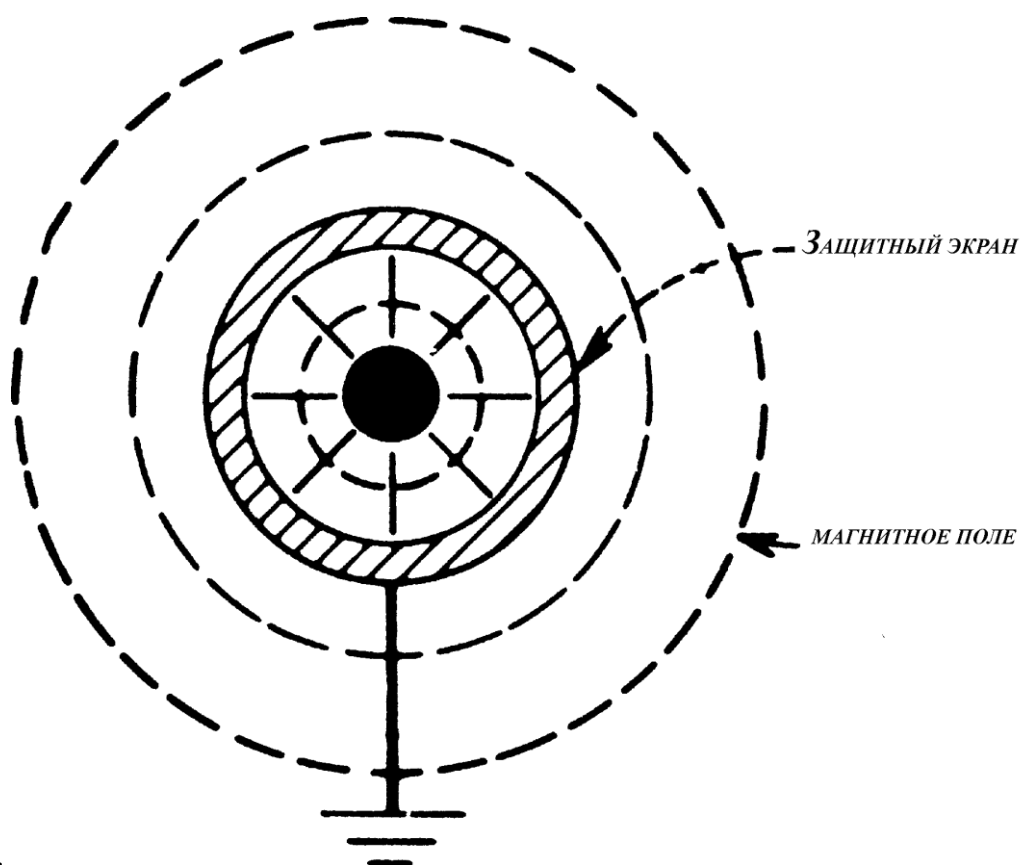


Рисунок 2.20 - Поля вокруг экранированного проводника; экран заземлен в одной точке

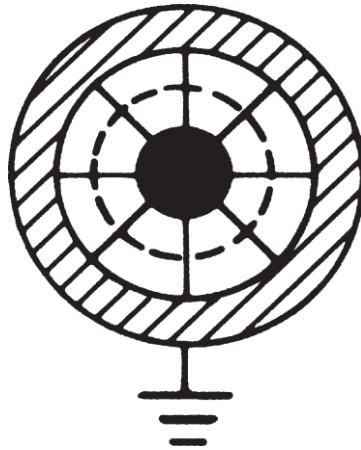


Рисунок 2.21 - Поля вокруг экранированного проводника; экран заземлен и пропускает ток, равный току проводника, но в противоположном направлении

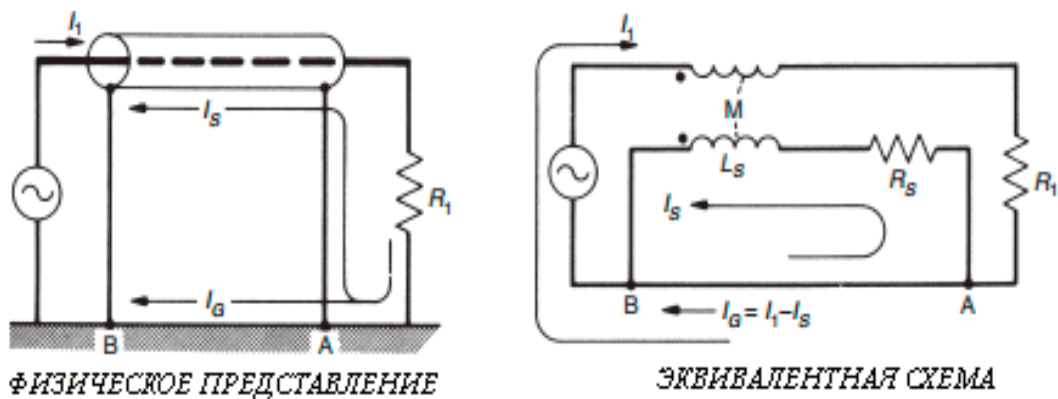


Рисунок 2.22 - Разделение тока между экраном и плоскостью заземления

На рис. 2.22 показана цепь, заземленная с обоих концов и пропускающая ток I_1 . Чтобы предотвратить излучение магнитного поля из этой цепи, экран должен быть заземлен с обоих концов, и обратный ток должен течь из точки A в точку B в экране (I_S на рисунке), а не в плоскости заземления (I_G на рисунке). Но почему ток должен возвращаться из точки A в точку B через экран, а не через заземленную плоскость с нулевым сопротивлением? Для анализа этой конфигурации можно использовать эквивалентную схему. Написав уравнение сетки вокруг контура заземления ($A-R_S-L_S-B-A$), можно определить ток экрана I_S :

$$0 = I_S(j\omega L_S + R_S) - I_1(j\omega M) \quad (2.30)$$

где M - взаимная индуктивность между экраном и центральным проводником, и, как было показано ранее (уравнение 2-21), $M = L_S$.

Эта подстановка и перестановка дает следующее выражение для I_S :

$$I_S = I_1 \left(\frac{j\omega}{j\omega + \frac{R_S}{L_S}} \right) = \left(\frac{j\omega}{j\omega + \omega_c} \right) I_1 \quad (2.31)$$

Как видно из предыдущего уравнения, если частота значительно выше частоты среза экрана ω_c , ток экрана приближается к току центрального проводника. Из-за взаимной индуктивности между экраном и центральным проводником коаксиальный кабель действует как дроссель общего тока (см. рис. 3.36), и экран обеспечивает обратный путь с меньшей общей индуктивностью цепи, чем плоскость заземления на высокой частоте. При снижении частоты ниже $5\omega_c$ кабель обеспечивает все меньшее магнитное экранирование, поскольку все большая часть тока возвращается через плоскость заземления.

Чтобы предотвратить излучение магнитного поля от проводника, заземленного с обоих концов, проводник должен быть экранирован, а экран - заземлен с обоих концов. Такой подход обеспечивает хорошее экранирование магнитного поля на частотах, значительно превышающих частоту среза экрана. Это уменьшение излучаемого магнитного поля не связано с магнитными экранирующими свойствами экрана как такового. Скорее, обратный ток на экране создает поле, которое отменяет поле центрального проводника.

Если заземление удалено с одного конца цепи, как показано на рис. 2.23, то экран не следует заземлять на этом конце, поскольку обратный ток теперь должен течь по экрану. Это особенно верно на частотах, меньших, чем частота среза экрана. Заземление обоих концов экрана в этом случае снижает степень экранирования, поскольку часть тока будет возвращаться через плоскость заземления.

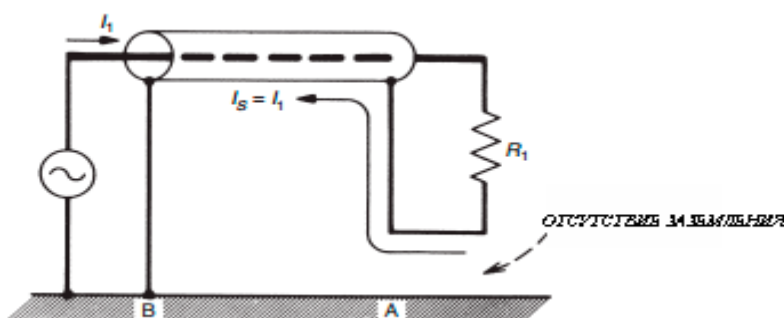


Рисунок 2.23 - Без заземления на дальнем конце весь обратный ток течет через экран

2.7 Экранирование рецептора от магнитных полей

Лучший способ защиты от магнитных полей рецепторов - уменьшить площадь рецепторной цепи. Под площадью здесь понимается общая площадь, покрываемая током в рецепторной цепи. Важным моментом является путь тока обратно к источнику. Во многих случаях площадь контура изменяется из-за того, что ток возвращается по другому пути, чем предполагал разработчик. Если ток вынужден возвращаться по пути, занимающему меньшую площадь, благодаря немагнитному экрану, установленному вокруг проводника, экран обеспечивает некоторую защиту от магнитных полей. Однако эта защита обусловлена уменьшением площади цепи, а не магнитными свойствами экрана.

На рис. 2.24 показано влияние экрана на площадь контура цепи. На рис. 2.24А источник V_S соединен с нагрузкой R_L одним проводником с использованием обратного пути через землю. Область, охваченная током, - это прямоугольник между проводником и плоскостью земли. На рис. 2.24В экран расположен вокруг проводника и заземлен с обоих концов. Если ток возвращается через экран, а не через плоскость заземления, то площадь контура уменьшается, и обеспечивается определенная степень магнитной защиты. Ток будет возвращаться через экран, если частота превышает в пять раз частоту среза экрана, как было показано ранее. Экран, расположенный вокруг проводника и заземленный только с одного конца, как показано на рис. 2-24С, не изменяет площадь контура и, следовательно, не обеспечивает магнитной защиты [9].

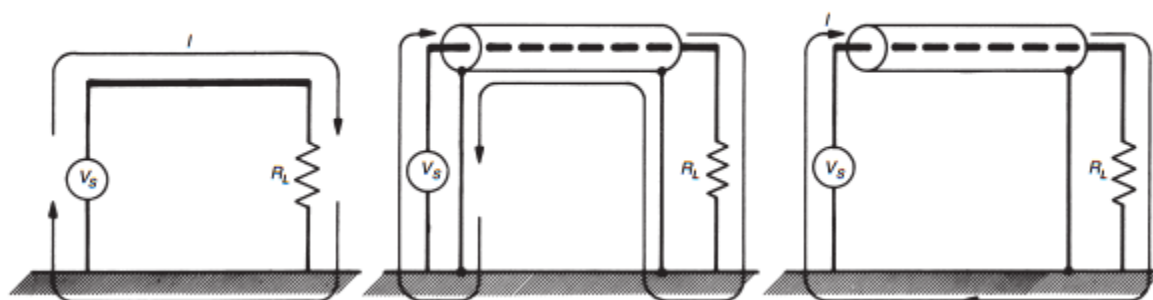


Рисунок 2.24 - Влияние экрана на площадь рецепторной петли

Схема на рис. 2-24В не защищает от магнитных полей на частотах ниже частоты среза экрана, поскольку в этом случае большая часть тока возвращается через плоскость земли, а не через экран. На низких частотах эта схема также имеет две другие проблемы: (1)

Поскольку экран является одним из проводников схемы, любой шумовой ток в нем будет создавать падение IR на экране и отображаться в схеме как шумовое напряжение, и (2) если между двумя концами экрана существует разность потенциалов земли, то она отобразится в схеме как шумовое напряжение.

2.8 Экранирующая муфта с общим импедансом

Если коаксиальный кабель используется на низких частотах и экран заземлен с обоих концов, защита от магнитного поля возможна лишь в ограниченном объеме из-за наведенного в экране тока помех. Поскольку наведенный ток протекает через экран, который также является одним из сигнальных проводников, в экране возникает напряжение помех, равное току экрана, умноженному на его сопротивление. Это показано на рис. 2-25. Ток I_S - это шумовой ток, вызванный разностью потенциалов земли или взаимодействием с внешним магнитным полем. Если напряжения суммируются по входному контуру, то получается следующее выражение:

$$V = -j\omega M I_S + j\omega L_S I_S + R_S I_S \quad (2.32)$$

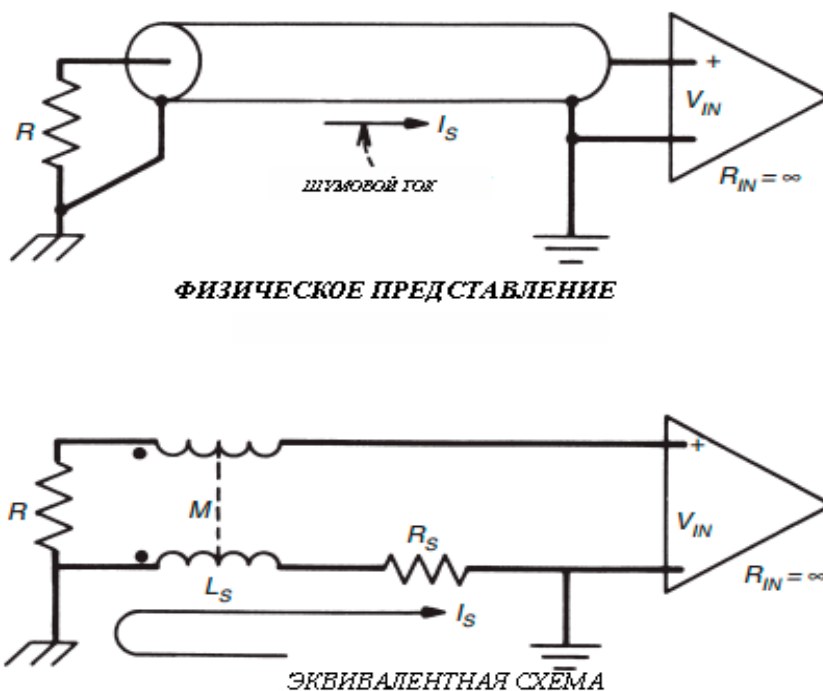


Рисунок 2.25 - Эффект шумового тока, протекающего в экране коаксиального кабеля

Поскольку, как было показано ранее, $L_S = M$, уравнение 2.32 сводится к

$$V_{IN} = R_S I_S, \quad (2.33)$$

Обратите внимание, что два напряжения индуктивного шума (первый и второй члены в уравнении 2.32) отменяются, и остается только член напряжения резистивного шума.

Этот пример демонстрирует общую импедансную связь и является результатом того, что экран должен выполнять две функции. Во-первых, он является обратным проводником для сигнала, а во-вторых, он является экраном и пропускает ток наведенного шума. Эту проблему можно устранить или, по крайней мере, свести к минимуму, используя трехпроводный кабель (например, экранированную витую пару). В этом случае по двум проводникам витой пары передается сигнал, а по экрану - только ток помех; таким образом, экран не выполняет двух функций [9].

Сопряжение экранов с общим сопротивлением часто является проблемой в бытовых аудиосистемах, использующих несимметричные межблочные соединения, которые обычно состоят из кабеля с центральным проводником и экраном, подключенного к фоноштекеру. Проблему можно свести к минимуму, уменьшив сопротивление экрана кабеля или используя балансное соединение и экранированную витую пару.

Даже если экран заземлен только с одного конца, в нем все равно могут протекать токи помех из-за связи с электромагнитным полем (то есть кабель действует как антенна и улавливает радиочастотную энергию). Это часто называют шумом, вызванным током экрана (SCIN).

Эта проблема не возникает на высоких частотах, поскольку в результате скин-эффекта коаксиальный кабель фактически содержит следующие три изолированных проводника: (1) центральный проводник, (2) внутренняя поверхность экранирующего проводника и (3) внешняя поверхность экранирующего проводника. Ток возврата сигнала течет только по внутренней поверхности экрана, а ток шума - только по внешней поверхности экрана. Поэтому эти два тока не протекают через общее сопротивление, и помеховая связь, о которой говорилось выше, не возникает.

2.9 Экспериментальные данные

Были измерены и сравнены свойства экранирования магнитного поля кабелей различных конфигураций. Испытательная установка показана на рис. 2.26, а результаты испытаний приведены в таблицах

на рис. 2.27 и 2.28. Частота (50 кГц) более чем в пять раз превышает частоту среза экрана для всех испытанных кабелей. Кабели, показанные на рис. 2.7 и 2.28, представляют собой испытательные кабели, показанные как L_2 на рис. 2.26.

В цепях А-Е (рис. 2.27) оба конца цепи заземлены. Они обеспечивают гораздо меньшее ослабление магнитного поля, чем цепи с G по K (рис. 2.28), где заземлен только один конец.

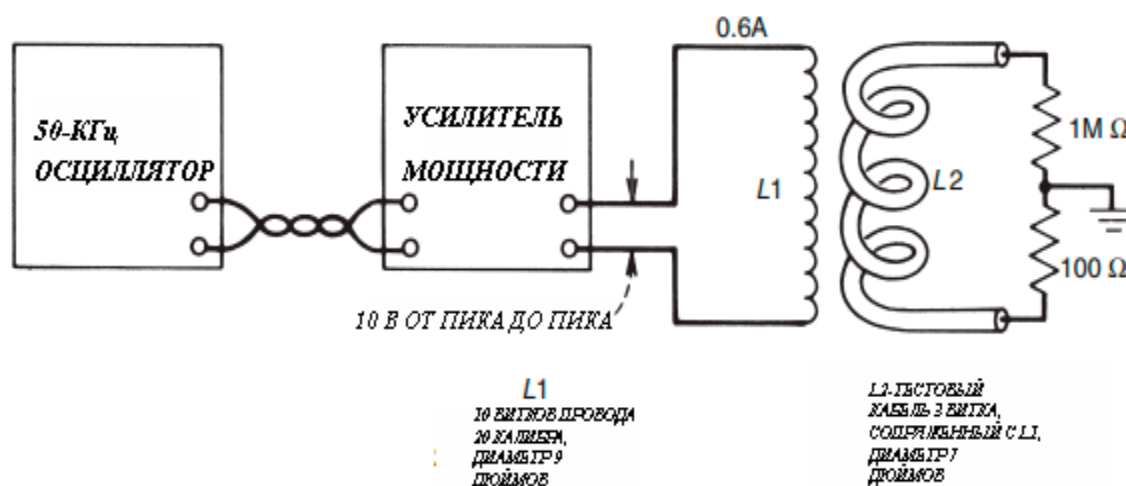


Рисунок 2.26 - Испытательная установка для эксперимента с индуктивной связью

Схема А на рис. 2.27 практически не экранирует магнитное поле. Фактическое напряжение шума, измеренное через резистор 1 М Ω , в этом случае составило 0,8 В. Наводка в схеме А используется в качестве эталонной и называется 0 дБ, чтобы сравнить характеристики всех остальных схем. В схеме В экран заземлен с одного конца; это не влияет на магнитное экранирование. Заземление экрана с обоих концов, как в схеме С, обеспечивает некоторую защиту от магнитного поля, поскольку частота выше частоты среза экрана. Защита была бы еще больше, если бы не контур заземления, образующийся при заземлении обоих концов цепи. Магнитное поле индуцирует большой ток помех в низкоомном контуре заземления, состоящем из экрана кабеля и двух точек заземления. Ток шума в экране приводит к появлению шумовых колебаний в экране, как было показано в предыдущем разделе.

Использование витой пары, как в схеме D, должно обеспечить гораздо большее снижение шума магнитного поля, но его эффект сводится на нет заземляющей петлей, образованной заземлениями схемы на обоих концах. Этот эффект можно наглядно наблюдать, сравнивая затухание схемы H с затуханием схемы D. Добавление

экрана, один конец которого заземлен на витую пару, как в схеме *E*, не дает никакого эффекта. Заземление экрана с обоих концов, как в схеме *F*, обеспечивает дополнительную защиту, поскольку низкоомный экран отводит часть магнитно-индуцированного тока контура заземления от сигнальных проводников. В целом, однако, ни одна из конфигураций схемы на рис. 2.27 не обеспечивает хорошей защиты от магнитного поля из-за наличия контуров заземления. Если цепь должна быть заземлена с обоих концов, то следует использовать конфигурации *C* или *F*.

Схема *G* демонстрирует значительное улучшение экранирования магнитного поля, что обусловлено малой площадью петли, образуемой коаксиальным кабелем, и отсутствием контура заземления, способного нарушить экранирование. Коаксиальный кабель обеспечивает небольшую площадь петли, поскольку экран может быть представлен эквивалентным проводником, расположенным на его центральной оси. Это позволяет разместить экран на оси центрального проводника или рядом с ней.

Ожидалось, что витая пара схемы *H* обеспечит значительно большее экранирование, чем показанные 55 дБ. Снижение уровня экранирования объясняется тем, что из-за неэкранированной витой пары и несимметричной заделки начинает проявляться некоторая связь электрических полей. Это видно на схеме *I*, где затухание увеличивается до 70 дБ за счет установки экрана вокруг витой пары. Тот факт, что затухание в схеме *G* лучше, чем в схеме *I*, указывает на то, что в данном случае конкретный коаксиальный кабель представляет собой меньшую площадь петли для магнитного поля, чем витая пара. Однако это не всегда верно в общем случае. Увеличение числа витков на единицу длины любой из витых пар (*H* или *I*) уменьшит наводки. В общем случае схема *I* предпочтительнее схемы *G* для низкочастотного магнитного экранирования, поскольку в ней экран не является также одним из сигнальных проводников.

Заземление обоих концов экрана, как в схеме *J*, немного снижает степень экранирования. Это уменьшение объясняется высоким током экрана в контуре заземления, образованном экраном, который индуцирует неравные напряжения на двух центральных проводниках. Схема *K* обеспечивает большее экранирование, чем *I*, поскольку сочетает в себе особенности коаксиального кабеля *G* и витой пары *I*. Схема *K* обычно нежелательна, поскольку любые шумовые напряжения или токи, попадающие на экран, могут стекать по сигнальному проводнику. Почти всегда лучше соединить экран и сигнальные проводники в одной точке. Эта точка должна быть такой, чтобы току помех с экрана не нужно было стекать по сигнальному проводнику, чтобы попасть на землю.

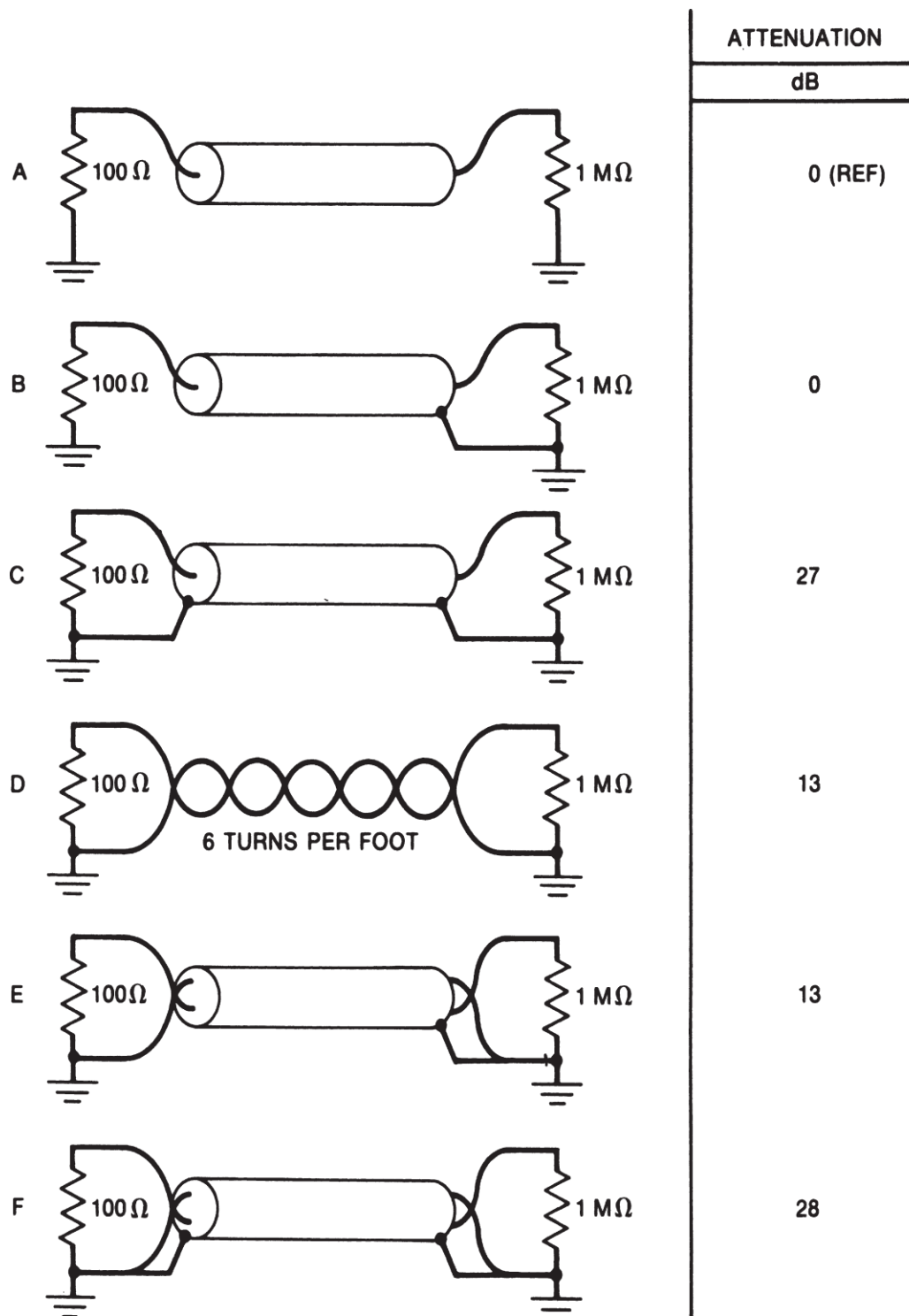
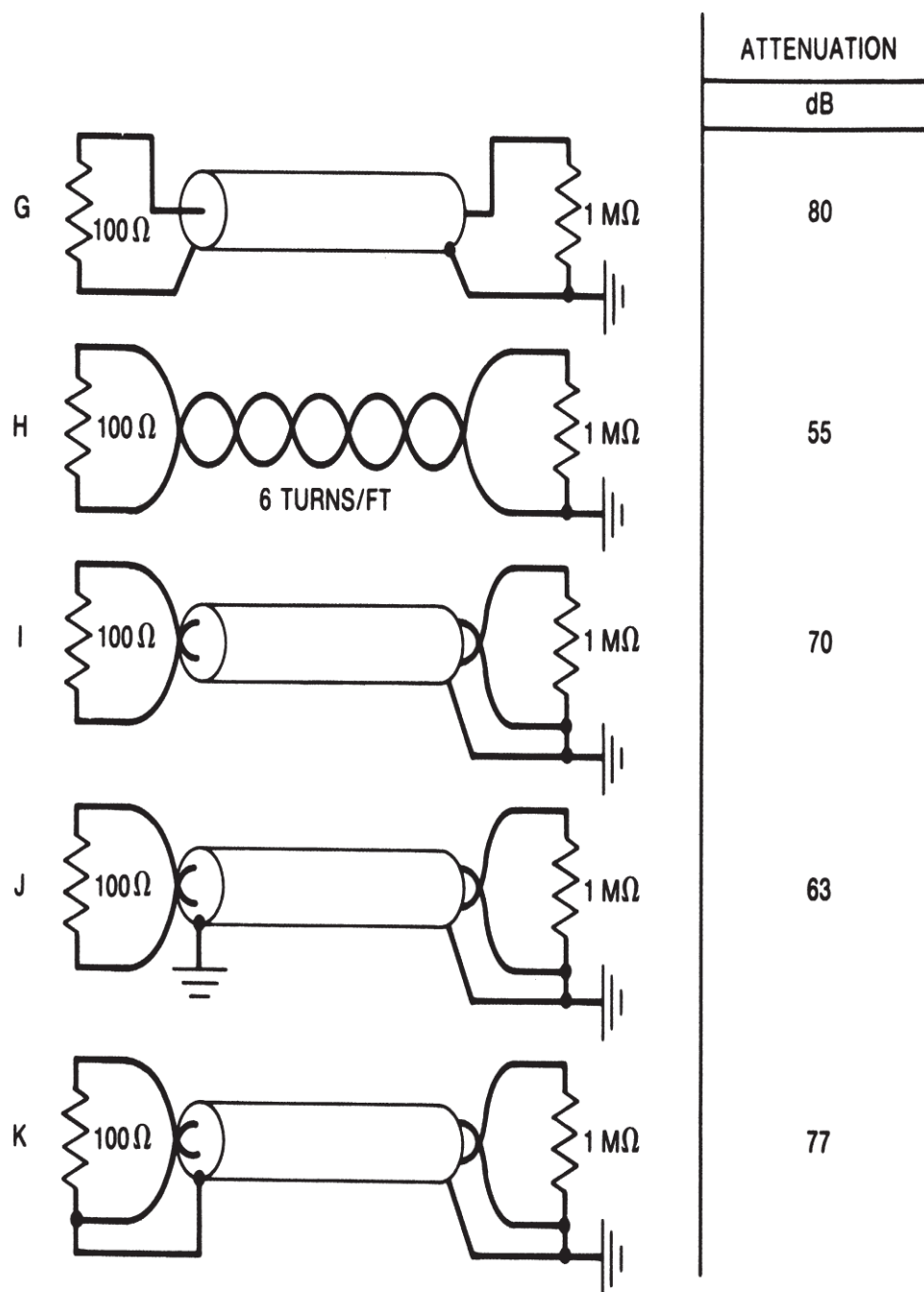


Рисунок 2.27 - Результаты эксперимента с индуктивной связью; все цепи заземлены с обоих концов



FREQUENCY = 50 KHz FOR ALL TESTS

Рисунок 2.28 - Результаты эксперимента с индуктивной связью; все цепи заземлены только с одного конца

Следует помнить, что эти экспериментальные результаты относятся только к относительно низкочастотному (50 кГц) экранированию магнитного поля, и между двумя концами кабеля в испытательной установке не было разницы потенциалов земли.

2.10 Пример селективного экранирования

Экранированная петлевая антенна - это пример, когда электрическое поле экранируется выборочно, а магнитное поле остается незатронутым. Такая антенна полезна в радиопеленгаторах и в качестве датчика магнитного поля для предварительных измерений ЭМС (см. раздел 18.4). Она также может снизить уровень шумовой наводки антенны в радиовещательных приемниках. Последний эффект очень важен, поскольку большинство источников локального шума генерируют преимущественно электрическое поле. На рис. 2.29А показана базовая петлевая антенна. Из уравнения 2.12 следует, что величина напряжения, создаваемого в петле магнитным полем, равна

$$V_m = 2\pi f B A \cos\theta. \quad (2.34)$$

Угол θ измеряется между магнитным полем и перпендикуляром к плоскости петли. Петля, однако, также действует как вертикальная антенна и будет принимать напряжение от падающего электрического поля [11]. Это напряжение равно полю E , умноженному на эффективную высоту антенны. Для круговой однопетлевой антенны эффективная высота равна $2\pi A/\lambda$. Наведенное напряжение от электрического поля становится равным

$$V_c = \frac{2\pi A E}{\lambda} \cos\theta \quad (2.35)$$

Угол θ измеряется между электрическим полем и плоскостью петли.

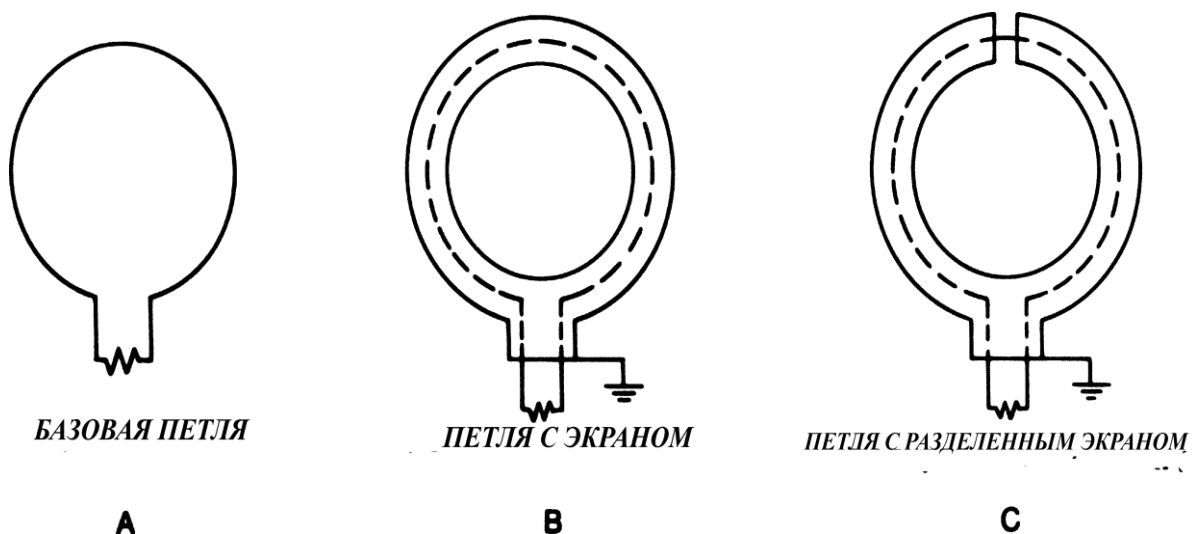


Рисунок 2.29 - Раздельный экран на петлевой антенне избирательно уменьшает электрическое поле, пропуская магнитное

Чтобы устранить наводки от электрического поля, петлю можно экранировать, как показано на рис. 2-29В. Однако такая конфигурация позволяет протекать экранирующему току, который аннулирует как магнитное, так и электрическое поле. Чтобы сохранить магнитную чувствительность контура, экран должен быть разорван, чтобы предотвратить протекание тока экрана. Это можно сделать, как показано на рис. 2-29С, разорвав экран в верхней части. Полученная антенна реагирует только на магнитную составляющую приложенной волны.

2.11 Переходное сопротивление экрана

В 1934 году Шелкунов впервые предложил концепцию передаточного импеданса в качестве средства измерения эффективности экранирования кабельных экранов. Передаточное сопротивление экрана - это свойство экрана, которое соотносит напряжение разомкнутой цепи (на единицу длины), возникающее между центральным проводником и экраном, с током экрана [1]. Импеданс передачи экрана можно записать в виде

$$Z_r = \frac{1}{I_s} \left(\frac{dV}{dl} \right) \quad (2.36)$$

где Z_T - импеданс передачи в омах на единицу длины, I_s - ток экрана, V - напряжение, индуцированное между внутренними проводниками и экраном, а l - длина кабеля. Чем меньше импеданс передачи, тем эффективнее экранирование.

На низких частотах импеданс передачи равен сопротивлению постоянного тока экрана. Этот результат эквивалентен результатам, полученным в уравнении 2.33. На более высоких частотах (выше 1 МГц для типичных кабелей) импеданс передачи сплошного трубчатого экрана уменьшается из-за скин-эффекта, и эффективность экранирования кабеля возрастает. Скин-эффект приводит к тому, что шумовой ток остается на внешней поверхности экрана, а сигнальный ток - на внутренней; таким образом, устраняется связь между двумя токами по общему импедансу.

На рис. 2.30 представлен график величины импеданса передачи (нормированный на значение сопротивления постоянного тока R_{dc}) для *сплошного* трубчатого экрана. Если экран имеет оплетку, то импеданс передачи будет увеличиваться с ростом частоты выше 1 МГц, как показано на рис. 2.34.

2.12 Коаксиальный кабель против витой пары

При сравнении коаксиального кабеля с витой парой важно сначала понять, насколько полезны оба типа кабелей с точки зрения распространения сигнала. Это показано на рис. 2.31. До 1980-х годов нормальной полезной частотой для витой пары считалась частота около 100 кГц, а для специальных применений - до 10 МГц. Однако, осознав экономическое преимущество витой пары перед коаксиальным кабелем во многих приложениях, современные разработчики и производители кабелей нашли способы преодолеть это ограничение.

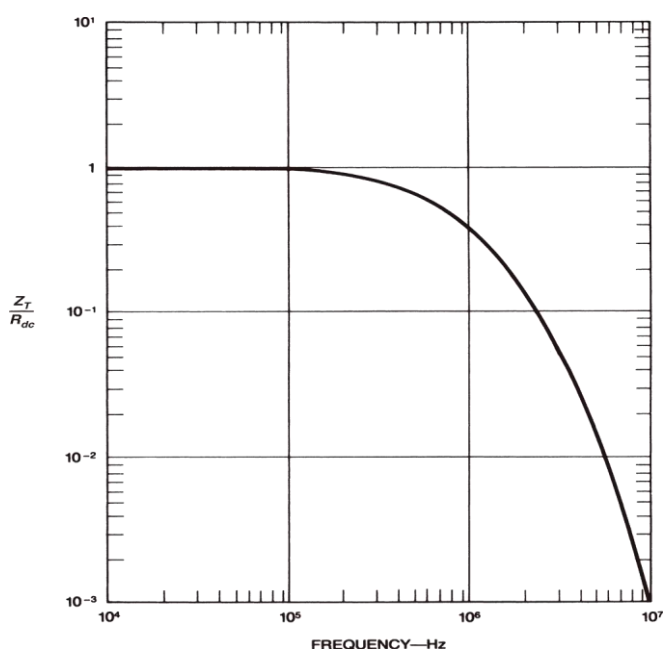


Рисунок 2.30 - Величина нормированного передаточного импеданса для сплошного экрана

Кабели на основе витой пары имеют не такой равномерный характеристический импеданс, как коаксиальные кабели, что является следствием того, что два проводника не сохраняют постоянного положения относительно друг друга, и особенно это проявляется при сгибании или изгибе кабеля. Современные разработчики кабелей смогли увеличить обычную полезную частоту витых пар до 10 МГц, а в некоторых приложениях [например, Ethernet и мультимедийный интерфейс высокой четкости (HDMI)] - до сотен мегагерц. Эти высокопроизводительные кабели имеют меньшую емкость и более плотно и равномерно скручены. Кроме того, в некоторых случаях оба провода пары скреплены между собой, поэтому они остаются в одинаковом соотношении друг к другу на протяжении всей длины кабеля. Кабели со связанными витыми парами обеспечивают более равномерный характеристический импеданс, более устойчивы к помехам и создают гораздо меньше излучений [1].

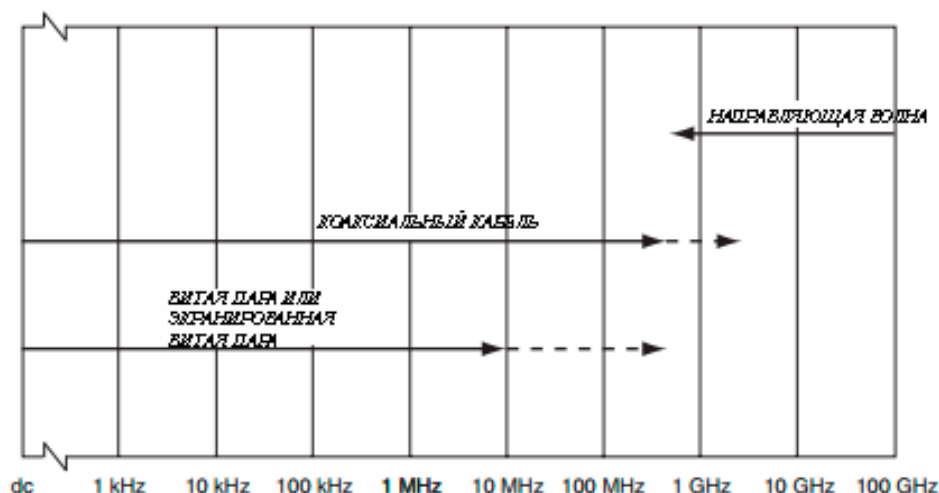


Рисунок 2.31 - Диапазон полезных частот для различных линий передачи. Обычные применения (сплошная линия) и специальные применения (пунктирная линия)

Многие современные кабели на основе неэкранированной витой пары работают так же хорошо или даже лучше, чем старые кабели на основе экранированной витой пары. Кабель на основе витой пары по своей сути является сбалансированной структурой и эффективно подавляет шумы, о чем говорилось в главе 4. Многие современные кабели очень хорошо сбалансированы. Отличным примером этого являются кабели Ethernet категорий (Cat) 5 и Cat 6. ANSI/TIA/ EIA 568B-2.1 определяет технические характеристики, такие как импеданс, потери в кабеле, перекрестные помехи и излучение, для кабелей Ethernet категории Cat 5. Кабель Cat 5 (см. рис. 2.32) состоит из четырех UTP, изготовленных из одножильного провода 24 калибра. Номинальный шаг скрутки составляет 1 на см (2,5/дюйм). Однако каждая пара в кабеле имеет немного другой шаг, чтобы минимизировать перекрестные помехи между парами. Заделки кабеля Ethernet сбалансированы. Кабели UTP Cat 5е рассчитаны на работу до 125 МГц, кабели Cat 6 - до 250 МГц, а в будущем кабели Cat 7 будут полезны примерно до 600 МГц.

Коаксиальный кабель имеет более равномерный характеристический импеданс с меньшими потерями. Он используется в диапазоне от постоянного тока до очень высоких частот (ОВЧ), а в некоторых случаях - до сверхвысоких частот (СВЧ). Выше 1 ГГц потери в коаксиальном кабеле становятся большими, и волновод часто становится более практичной средой передачи.

Коаксиальный кабель, заземленный с одного конца, обеспечивает хорошую степень защиты от емкостных наводок (электрического поля). Но если в экране протекает ток помех, то возникает напряжение

помех, как обсуждалось в разделе 2.8. Его величина равна току в экране, умноженному на сопротивление экрана. Поскольку в коаксиальном кабеле экран также является частью пути сигнала, это напряжение появляется как шум последовательно с входным сигналом.

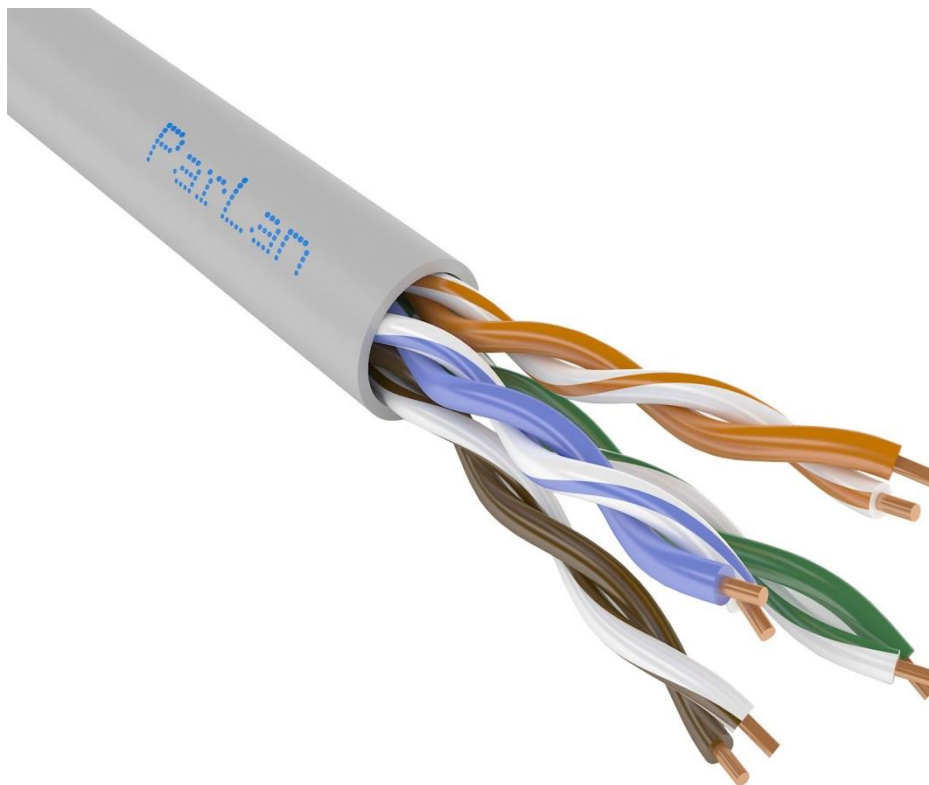


Рисунок 2.32 - Кабель Ethernet Cat 5

Кабель с двойным экраном или триаксиальный кабель с изоляцией между двумя экранами может устранить напряжение помех, возникающее из-за сопротивления экрана. Шумовой ток протекает во внешнем экране, а обратный ток сигнала - во внутреннем. Таким образом, оба тока (сигнальный и шумовой) не протекают через общее сопротивление.

К сожалению, триаксиальные кабели дороги и неудобны в использовании. Однако коаксиальный кабель на высоких частотах действует как триаксиальный из-за скин-эффекта. Для типичного коаксиального кабеля скин-эффект становится важным на частоте около 1 МГц. Шумовой ток течет по внешней поверхности экрана, в то время как сигнальный ток течет по внутренней поверхности. По этой причине коаксиальный кабель лучше ведет себя на высоких частотах.

Экранированная витая пара по своим характеристикам похожа на триаксиальный кабель, при этом она не такая дорогая и неудобная. Сигнальный ток течет по двум внутренним проводникам, а любой

наведенный шумовой ток течет по экрану. Таким образом, общая импедансная связь исключается. Кроме того, любой ток в экране одинаково (в идеале) связан взаимной индуктивностью с обоими внутренними проводниками, и два равных шумовых напряжения аннулируются. Неэкранированная витая пара, если ее заделки не сбалансированы (см. раздел 4.1), обеспечивает очень слабую защиту от емкостных наводок (электрических полей), но очень хорошо защищает от наводок магнитных полей. Эффективность скрутки возрастает с увеличением количества витков на единицу длины. При заделке витой пары чем больше расстояние между двумя проводами, тем меньше подавление помех. Поэтому при заделке витой пары, экранированной или неэкранированной, не раскручивайте проводники больше, чем это необходимо для заделки.

Кабели на основе витой пары, даже неэкранированные, очень эффективно снижают связь магнитных полей. Для этого необходимо соблюдение всего двух условий. Во-первых, сигнал должен проходить по двум проводникам одинаково и в противоположных направлениях. Во-вторых, шаг скрутки должен быть меньше одной двадцатой длины волны на интересующих вас частотах. (Одна скрутка на дюйм будет эффективна примерно до 500 МГц.) Все вышесказанное справедливо независимо от того, сбалансированы заделки или нет. Кроме того, если заделки сбалансированы, то витая пара также будет эффективна для уменьшения связи электрических полей (см. раздел 4.1). Не путайте витую пару с балансировкой, поскольку это два совершенно разных понятия, хотя часто используются вместе.

2.13 Плетеные экраны

Большинство кабелей экранированы не сплошным проводником, а оплеткой; см. рис. 2.33. Преимуществом оплетки является гибкость, прочность, долговечность и длительный срок службы. Оплетки обычно обеспечивают покрытие от 60 до 98 % и менее эффективны в качестве экранов, чем одножильные проводники. Экраны с оплеткой обычно обеспечивают лишь незначительное экранирование электрического поля (за исключением частот УВЧ), но значительно снижают экранирование магнитного поля. Причина в том, что оплетка искажает однородность продольного тока экрана. Оплетка обычно на 5-30 дБ менее эффективна, чем сплошной экран, для защиты от магнитных полей.

На высоких частотах эффективность оплетки снижается еще больше из-за отверстий в ней. Многослойные экраны обеспечивают большую защиту, но при этом требуют больших затрат и обладают меньшей гибкостью. Кабели премиум-класса с двойными и даже тройными

экранами, а также с посеребренной медной оплеткой используются в некоторых критически важных военных, аэрокосмических и приборных приложениях.

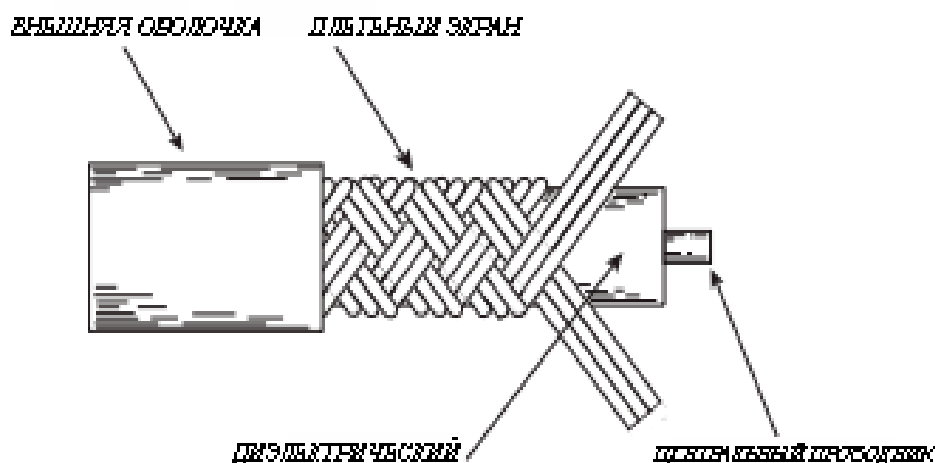


Рисунок 2.33 - Кабель с экраном в виде оплетки

На рис. 2.34 показан импеданс передачи для типичного кабеля с экранированной оплеткой, нормированный на постоянное сопротивление экрана. Уменьшение импеданса передачи в районе 1 МГц обусловлено скин-эффектом экрана. Последующее увеличение импеданса передачи выше 1 МГц вызвано наличием отверстий в оплетке. Кривые приведены для различных процентов покрытия оплетки. Оплетка со свободным плетением (меньший процент охвата экрана) обеспечивает большую гибкость, в то время как оплетка с плотным плетением (большой процент охвата экрана) обеспечивает лучшее экранирование и меньшую гибкость. Как можно заметить, для наилучшего экранирования оплетка должна обеспечивать покрытие не менее 95 %.

Также доступны экранированные кабели с тонкой алюминиевой фольгой. Однако они не такие прочные, как оплетка, а их более высокое сопротивление приводит к более высоким частотам среза экрана, что затрудняет (но не исключает) правильную заделку. Некоторые экраны сочетают экранирование фольгой с оплеткой. Эти кабели предназначены для использования лучших свойств как фольги, так и оплетки при минимизации их недостатков. Оплетка позволяет правильно заделать экран 3601, а фольга закрывает отверстия в оплетке. Эффективность экранирования оплетки по сравнению с фольгой или двойной оплеткой не начинает снижаться примерно до 100 МГц.

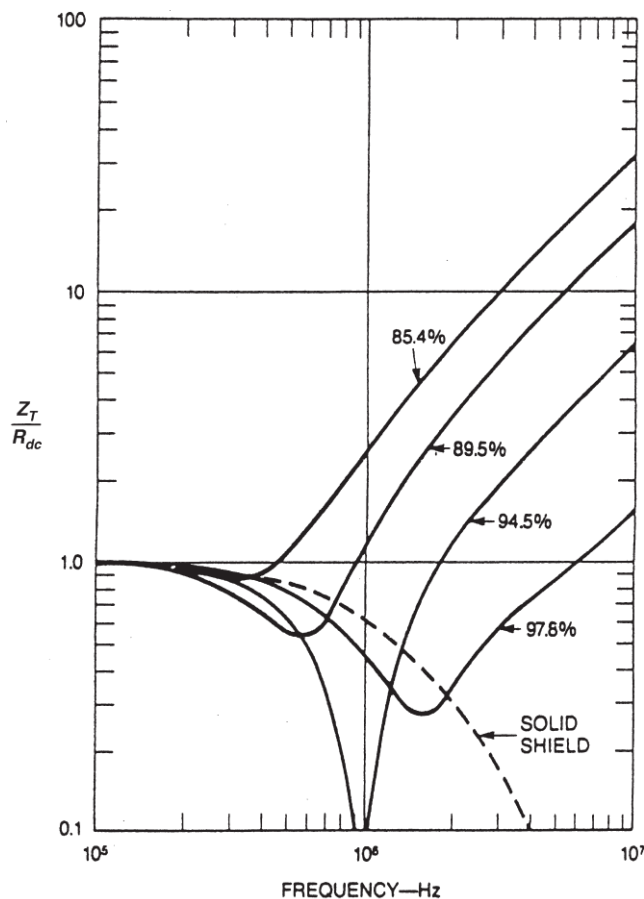


Рисунок 2.34 - Нормализованный импеданс передачи экранирующей оплетки в зависимости от процента покрытия оплетки

2.14 Спиральный экран

Спиральный экран (рис. 2.35) используется в кабелях по одной из трех причин: снижение стоимости производства, простота заделки или повышенная гибкость. Он состоит из ленты проводников, обернутых вокруг жилы кабеля (диэлектрика). Обычно лента состоит из трех-семи проводников.

Рассмотрим различия между спиральным экранирующим кабелем и идеальным сплошным однородным экранирующим кабелем. В сплошном однородном экранирующем кабеле ток в экране проходит продольно вдоль оси кабеля, а магнитное поле, создаваемое током в экране, является круговым и внешним по отношению к экрану, как показано на рис. 2-12.

В случае спирального экранирующего кабеля ток в экране следует по спирали и находится под углом φ по отношению к продольной оси кабеля, где φ - угол наклона спирали, как показано на рис. 2-36.

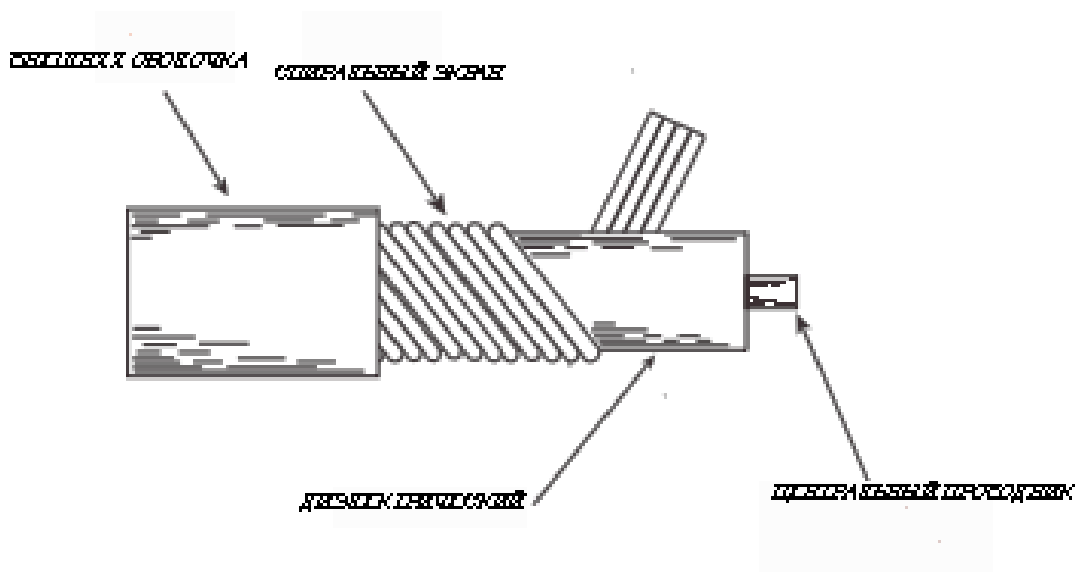


Рисунок 2.35 - Кабель со спиральным экраном

Общий ток I в экране можно разложить на две составляющие: продольную вдоль оси кабеля и круговую по окружности кабеля, как показано на рис. 2.37. Продольный ток I_L вдоль оси кабеля равен

$$I_L = I \cos \varphi \quad (2.37)$$

где I - полный ток экрана, а φ - угол наклона. Круговой ток I_C , направленный перпендикулярно оси кабеля и по его окружности, равен

$$I_C = I \sin \varphi \quad (2.38)$$

Продольный ток I_L ведет себя так же, как ток экрана в однородном сплошном экранированном кабеле, и создает круговое магнитное поле снаружи кабеля. В случае длинного тонкого кабеля круговой ток ведет себя как соленоид (катушка провода или индуктор) вдоль оси кабеля и создает продольное магнитное поле H внутри экрана и не создает магнитного поля вне экрана, как показано на рис. 2.38. Это прямо противоположно магнитному полю, создаваемому продольным экранирующим током, который существует вне экрана и не имеет магнитного поля внутри него. Продольное магнитное поле, создаваемое кольцевой составляющей тока экрана, оказывает вредное воздействие, увеличивая индуктивность экрана. Поэтому кабель ведет себя как обычный коаксиальный кабель в результате продольной составляющей тока с дополнительной индуктивностью в результате круговой составляющей тока.

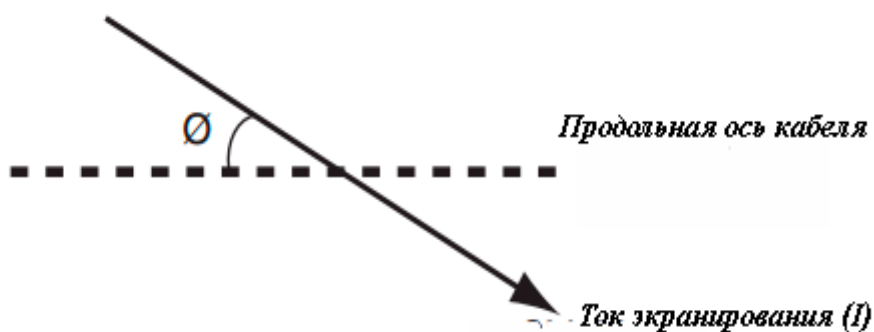


Рисунок 2.36 - Направление протекания тока в спиральном экранирующем кабеле; $\varnothing$ - угол наклона спирали

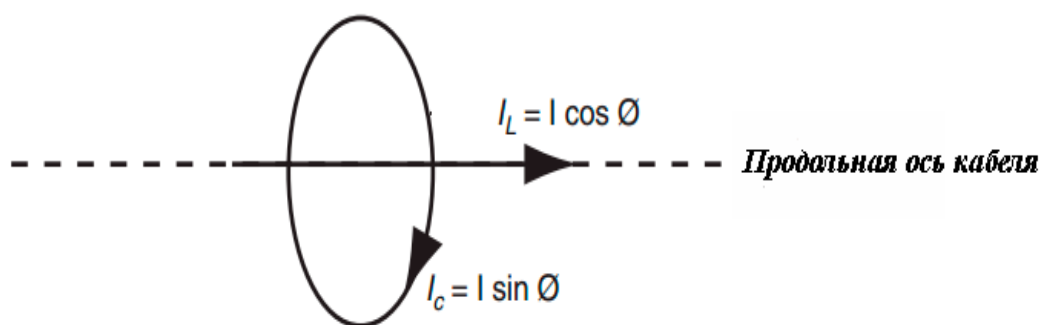


Рисунок 2.37 - Ток в экране спирального кабеля можно разложить на две составляющие: продольную (I_L) и круговую (I_c)

Экранирующий кабель с оплеткой можно представить себе как два или более переплетенных спиральных пояса из наборов проводников, сплетенных в противоположном направлении так, что каждый пояс попеременно проходит то над, то под другим поясом, как показано на рис. 2.33. Одна лента накладывается по часовой стрелке, а другая - против часовой стрелки. Из-за противоположного направления укладки двух лент круговые составляющие тока экранирования стремятся аннулировать друг друга, в результате чего остается только продольная составляющая тока экранирования - отсюда и гораздо лучшие высокочастотные характеристики экранирующих кабелей с оплеткой по сравнению со спиральными экранирующими кабелями.

Как было сказано ранее (раздел 2.11), эффективность экранирования экранированного кабеля может быть выражена в терминах импеданса передачи экрана. Для кабеля со спиральным экраном импеданс передачи содержит два члена: один от длиннотудинальной составляющей тока экрана, а другой - от круговой составляющей тока экрана.

Импеданс передачи, возникающий из-за продольной составляющей тока экрана, уменьшается с частотой (что хорошо), как было показано на рис. 2.30, в то время как составляющая от круговой составляющей тока экрана увеличивается с частотой (что плохо). В итоге для кабелей со спиральным экраном импеданс передачи увеличивается с ростом частоты выше 100 кГц. Высокочастотный импеданс передачи является сильной функцией угла наклона φ спирали; чем больше этот угол, тем больше будет импеданс передачи и тем меньше эффективность экранирования кабеля.

У кабелей с обычным экраном в оплетке передаточное сопротивление экрана также увеличивается на высоких частотах, но это увеличение гораздо меньше, чем в случае кабелей со спиральным экраном. На рис. 2.39 показаны измеренные значения импеданса передачи для кабелей с различными типами экранов (рис. 3.9).

Спиральные экраны - это, по сути, катушки проволоки, которые проявляют индуктивный эффект с большим высокочастотным передаточным сопротивлением. Поэтому кабели со спиральным экраном не следует использовать в приложениях, где сигналы превышают примерно 100 кГц; в основном их применение должно быть ограничено аудиочастотами и ниже.

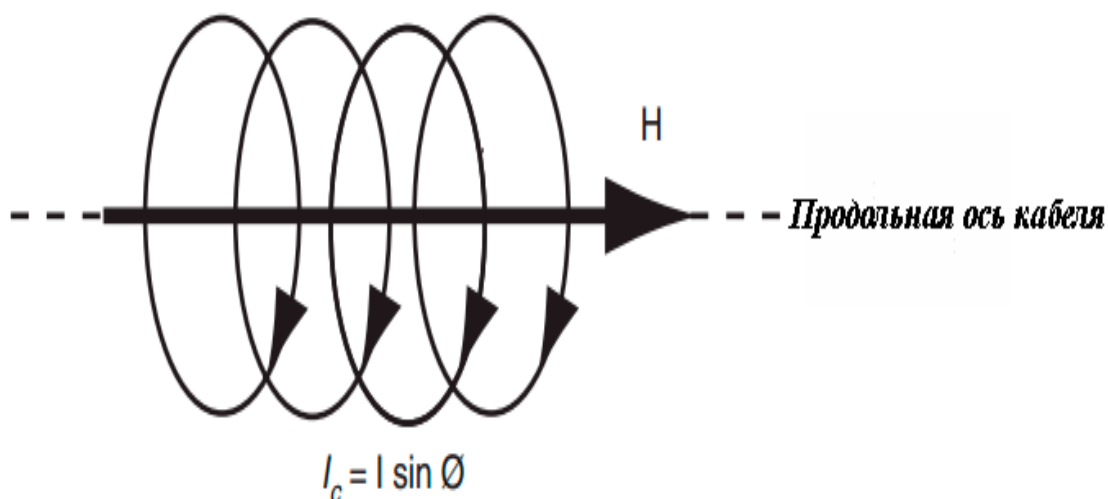


Рисунок 2.38 - Круговая составляющая тока в спиральном экранирующем кабеле создает магнитное поле вдоль продольной оси кабеля

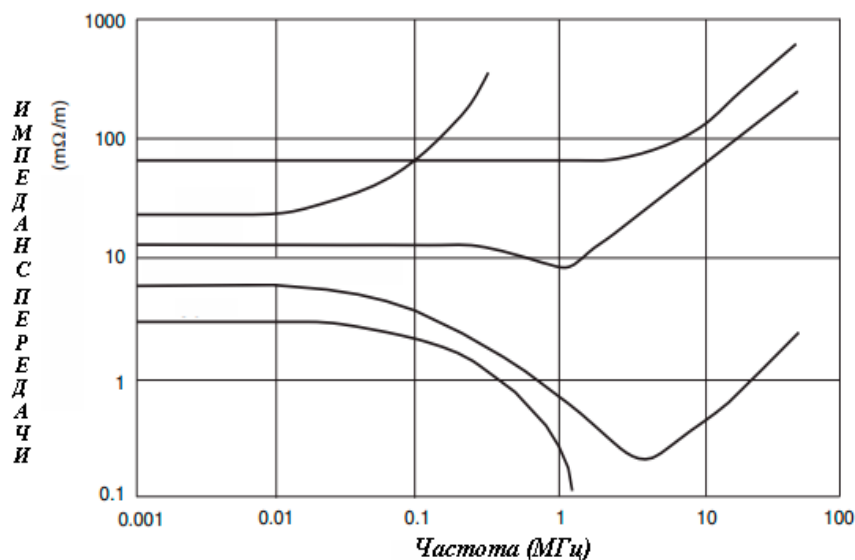


Рисунок 2.39 - Измеренные значения передаточного импеданса экрана в зависимости от частоты для различных типов кабельных экранов.

Чем ниже импеданс передачи, тем лучше экранирование

2.15 Заделки экранов

Большинство проблем с экранированным кабелем возникает из-за неправильной заделки экрана. Максимальные преимущества хорошо экранированного кабеля будут реализованы только при правильной заделке экрана. Требования к правильной заделке экрана следующие:

- Окончание на надлежащем конце или концах и в надлежащей точке или точках
- Оконечное соединение с очень низким сопротивлением
- Контакт 360° с экраном

2.15.1 Косички

Магнитное экранирование, о котором говорилось ранее, зависит от равномерного распределения продольного тока экрана по его окружности. Поэтому эффективность магнитного экранирования вблизи концов кабеля сильно зависит от способа заделки экрана. Соединение «косички» (рис. 2.40) приводит к тому, что ток экрана концентрируется на одной стороне экрана. Для максимальной защиты экран должен быть заделан равномерно по всей окружности. Для этого можно использовать коаксиальные разъемы типа BNC, UHF или типа N. Такой разъем, показанный на рис. 2.41, обеспечивает электрический контакт 360° с экраном. Коаксиальная заделка также обеспечивает полное покрытие внутреннего проводника, что сохраняет целостность экранирования электрического поля [1].

Контакт 360° важен не только между экраном и разъемом, но и между двумя сопрягаемыми половинками разъема. В этом отношении лучше всего работают разъемы винтового типа, такие как тип N и UHF. На рис. 2.42 показана версия разъема XLR без винта, предназначенная для ЭМС, которая содержит пружинные пальцы по всей окружности для обеспечения контакта экрана 360° между сопрягаемыми половинками. На рис. 2.43 показан еще один метод обеспечения контакта экрана 360°, в данном случае без использования разъема.

Использование заделки типа «косички», длина которой составляет лишь малую часть общей длины кабеля, может существенно повлиять на уровень помех, наводимых на кабель на частотах выше 100 кГц. Например, на рис. 2.44 показана связь с экранированным кабелем длиной 3,66 м (12 футов) с экраном, заземленным на обоих концах, с 8-см заделками типа «косички».

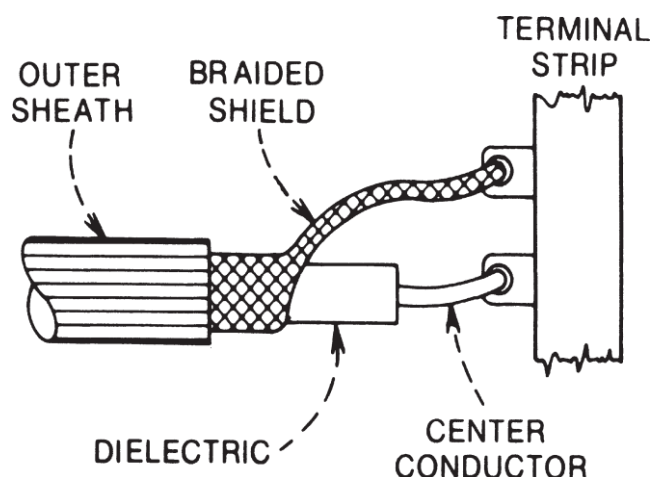


Рисунок 2.40 - Соединение экрана «косички» концентрирует ток на одной стороне экрана

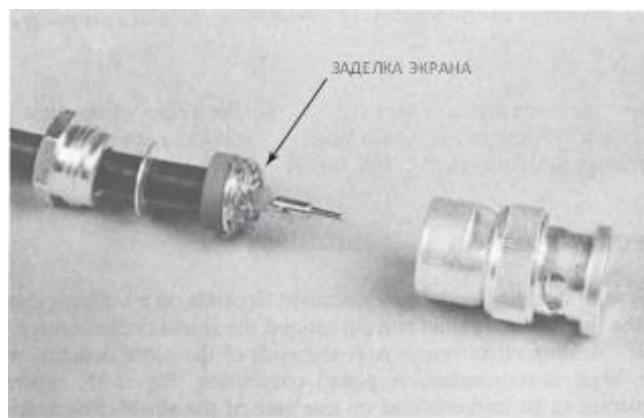


Рисунок 2.41 - Разобранный разъем BNC, показывающий контакт 360° с экраном

Импеданс экранированного проводника составлял 50 Ом. На этом рисунке показан индивидуальный вклад магнитной связи с экранированной частью кабеля, магнитной связи с неэкранированной (косички) частью кабеля и электрической связи с неэкранированной частью кабеля. Емкостная (электрическое поле) связь с экранированной частью кабеля была пренебрежимо мала, поскольку экран был заземлен, а окончательный импеданс экранированного проводника был низким (50 Ом). Как показано на рис. 2.44, выше 100 кГц основная связь с кабелем возникает из-за индуктивной связи с косичкой.

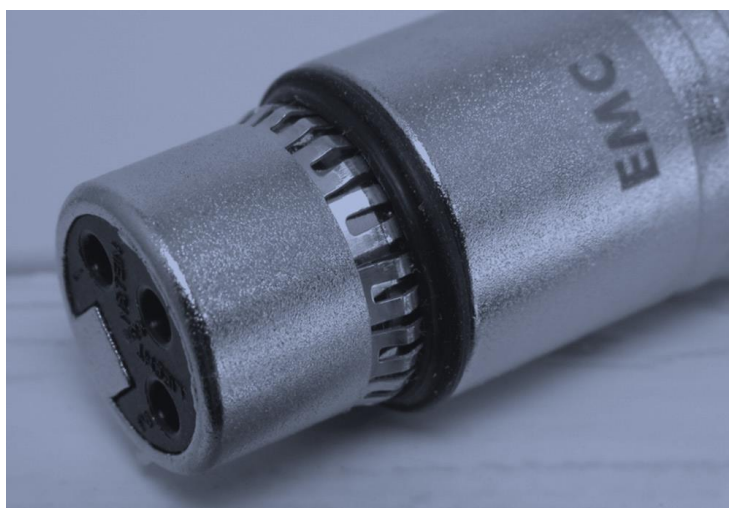


Рисунок 2.42 - Женский разъем XLR (используется в аудиосистемах) с пружинными пальцами по периметру для обеспечения контакта 360° между сопрягаемыми половинками задней крышки разъема

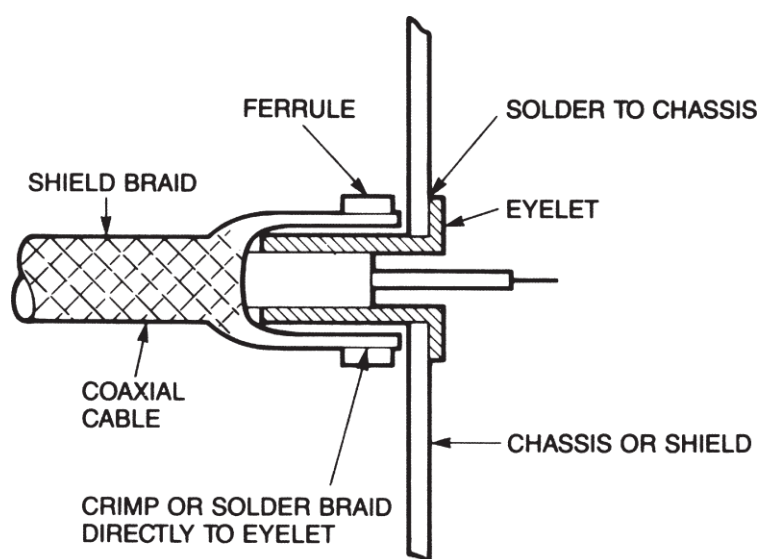


Рисунок 2.43 - Один из способов оконцевания кабеля без разъема с обеспечением контакта 360° с экраном

Если окончное сопротивление экранированного проводника увеличить с 50 до 1000 Ом, результат будет таким, как показано на рис. 2.45. В этом случае емкостная связь с косичкой является преобладающим механизмом связи на частотах выше 10 кГц. В этих условиях связь на частоте 1 МГц на 40 дБ больше, чем если бы кабель был полностью экранирован (без косички).

Как видно из рис. 2.44 и 2.45, хотя короткие заделки типа косички могут быть приемлемы для заземления экранов низкочастотных (<10 кГц) кабелей, они неприемлемы для заземления экранов высокочастотных кабелей.

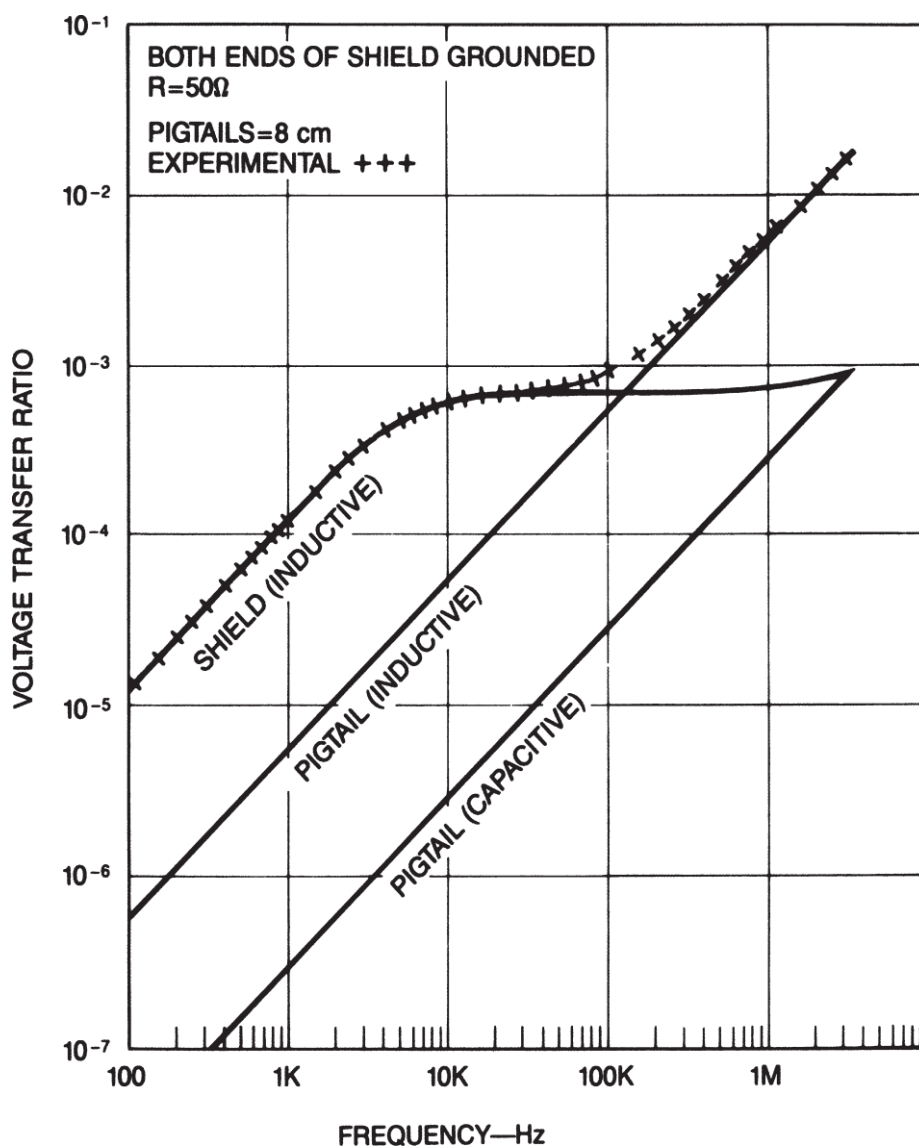


Рисунок 2.44 - Подключение к 3,7-метровому экранированному кабелю с 8-сантиметровым наконечником. Заделка цепи равна 50 Ом

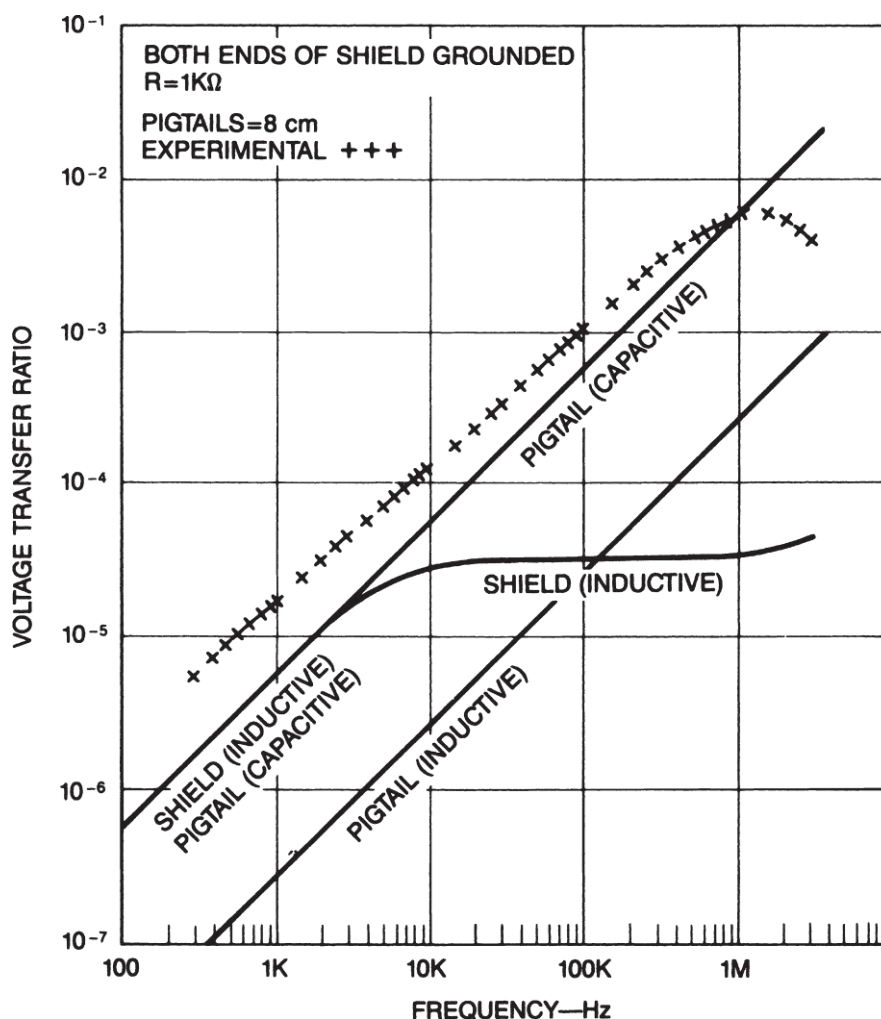


Рисунок 2.45 - Подключение к 3,7-метровому экранированному кабелю с 8-сантиметровым наконечником. Заделка цепи равна 1000 Ом

На низких частотах экраны многопроводниковых кабелей, в которых экран не является проводником возврата сигнала, часто заземляются только с одного конца. Если экран заземлен более чем с одного конца, то в нем может протекать ток помех из-за разности потенциалов земли на двух концах кабеля. Эта разность потенциалов, а значит, и ток в экране, обычно является результатом токов 50/60 Гц в земле. В случае коаксиального кабеля ток экрана будет создавать напряжение помех, величина которого равна току экрана, умноженному на сопротивление экрана, как показано в упр. 2.33. В случае экранированной витой пары ток экрана может индуктивно объединять неравные напряжения в сигнальных проводниках витой пары и быть источником шума (см. раздел 4.1 о балансировке). Но если экран должен быть заземлен только с одного конца, то с какого конца он должен быть заземлен и на какую землю?

Обычно лучше заземлять экран со стороны источника сигнала, поскольку он является опорным для напряжения сигнала. Однако если

источник сигнала плавающий (не заземлен), то лучше заземлить экран кабеля со стороны нагрузки.

Предпочтительные схемы низкочастотного экранирования как для экранированной витой пары, так и для коаксиального кабеля показаны на рис. 2.46. Схемы с А по Д - это случаи, когда заземляется либо источник, либо цепь усилителя (нагрузки), но не обе. В этих четырех случаях экран кабеля также показан заземленным только с одного конца, и это тот же конец, на котором заземлена цепь. Когда сигнальная цепь заземлена с обоих концов, как показано в схемах Е и F, возможное снижение уровня шума ограничивается разностью потенциалов земли и восприимчивостью контура заземления к магнитным полям. В случае схемы Е экранированный кабель витой пары также заземлен с обоих концов, чтобы заставить часть тока контура заземления протекать через экран с меньшим сопротивлением, а не по проводнику возврата сигнала. В схеме F экран коаксиального кабеля должен быть заземлен с обоих концов, поскольку он также является обратным проводником сигнала, а сигнал заземлен с обоих концов. В этом случае шумовую связь можно уменьшить, уменьшив сопротивление экрана кабеля, так как это уменьшит общее сопротивление связи, как обсуждалось в разделе 2.8. Если требуется дополнительная помехоустойчивость, то контур заземления необходимо разорвать. Это можно сделать с помощью трансформаторов, оптических соединителей или дросселей общей моды, как обсуждалось в разделе 3.4.

Представление о том, каких характеристик следует ожидать от конфигураций, показанных на рис. 2.46, можно получить, обратившись к результатам эксперимента с магнитной связью, представленным на рис. 2.27 и 2.28.

Однако заземление экрана кабеля только с одного конца для устранения связи с частотными помехами линии электропередачи позволяет кабелю действовать как высокочастотная антенна и быть уязвимым для наводок РЧ. Радиопередатчики АМ и FM могут наводить в экране кабеля высокочастотные РЧ-токи. Если экран кабеля подключен к заземлению цепи, то эти токи высокой частоты попадут в оборудование и могут вызвать помехи. Поэтому правильным способом подключения экрана кабеля является подключение к экранированному корпусу оборудования, а не к заземлению цепи. Это соединение должно иметь как можно более низкий импеданс, а само соединение должно быть выполнено с внешней стороны экранированного корпуса. Таким образом, любой ток высокочастотного шума на экран будет безвредно стекать по внешней поверхности корпуса и через паразитную емкость корпуса на землю, минуя чувствительные электроники внутри корпуса.

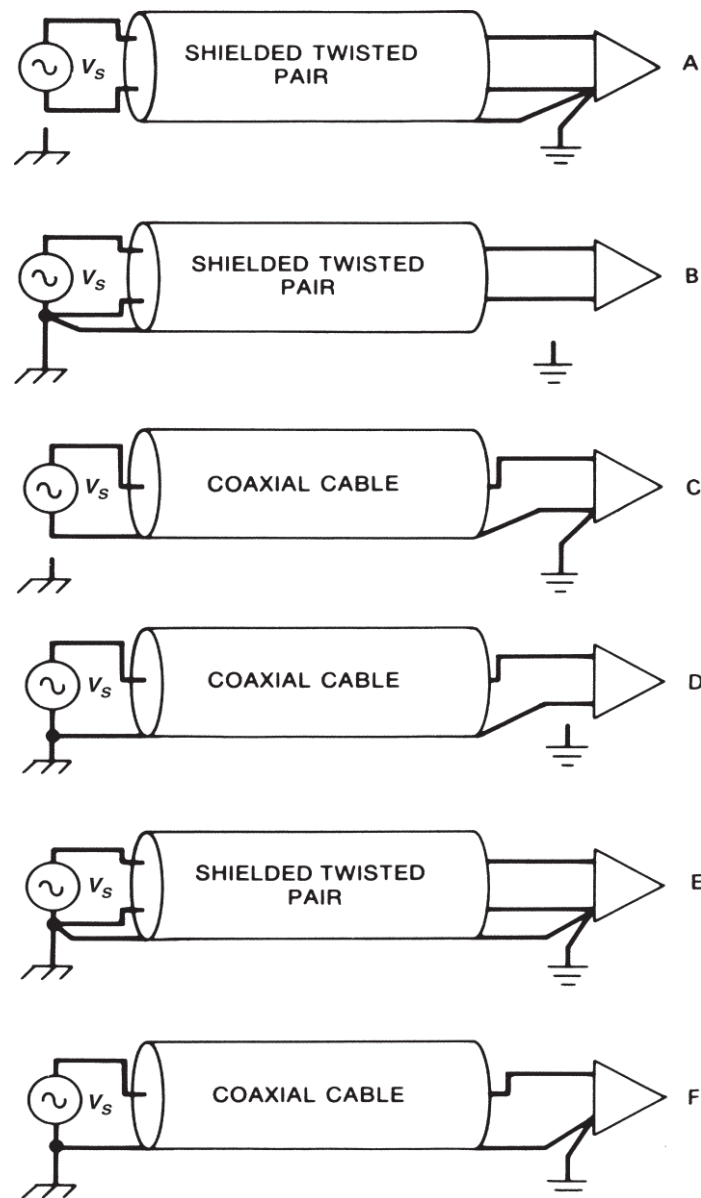


Рисунок 2.46 - Предпочтительные схемы низкочастотного заземления экранов экранированных витых пар и коаксиальных кабелей

Заземление экрана высокочастотного кабеля. На частотах свыше 100 кГц или при длине кабеля более одной двадцатой длины волны возникает необходимость заземления экрана на обоих концах. Это справедливо как для многопроводниковых, так и для коаксиальных кабелей. На высоких частотах возникает другая проблема: блуждающая емкость стремится завершить контур заземления, как показано на рис. 2-47, что затрудняет или делает невозможным поддержание изоляции от земли на нетерминированном конце экрана [].

Поэтому на высоких частотах и в цифровых схемах принято заземлять экран кабеля с обоих концов. Любое небольшое шумовое напряжение, вызванное разностью потенциалов земли, которое может

попасть в цепь (в основном на частотах ЛЭП и ее гармоник), не повлияет на цифровые схемы и обычно может быть отфильтровано в цепях РЧ из-за большой разности частот между шумом и сигналом. На частотах выше 1 МГц скин-эффект уменьшает общее сопротивление связи между токами сигнала и шума, протекающими в экране. Благодаря скин-эффекту ток шума протекает по внешней поверхности экрана, а ток сигнала - по внутренней. Многочисленные заземления также обеспечивают экранирование магнитного поля на частотах выше частоты среза экрана.

Гибридное заземление экранов кабелей. Хотя одноточечные заземления эффективны на аудиочастотах и ниже, а многоточечные - на высоких частотах, что делать, если сигнал содержит как высокочастотные, так и низкочастотные компоненты, например, видеосигнал? Большинство аудиоаппаратуры сегодня также содержит цифровые схемы обработки сигналов, поэтому даже в аудиоаппаратуре часто присутствуют высокочастотные сигналы. Хотя в этом случае высокочастотные сигналы не могут намеренно попадать в кабель, они могут непреднамеренно подключаться к кабелю в качестве сигнала общей моды, и тогда для предотвращения излучения этих высокочастотных сигналов может потребоваться экран кабеля.

В таких ситуациях можно воспользоваться схемой, показанной на рис. 2.47, заменив паразитную емкость на реальный конденсатор (например, 47 нФ), который образует комбинированную или гибридную землю. На низкой частоте существует одноточечное заземление, поскольку импеданс конденсатора велик. Однако на высокой частоте конденсатор становится низкоомным, что преобразует цепь в заземленную с обоих концов.

Однако реальная реализация эффективного гибридного заземления экрана кабеля может быть затруднена, поскольку любая индуктивность, включенная последовательно с конденсатором, снижает его эффективность. В идеале конденсатор должен быть встроен в разъем. В последнее время некоторые производители аудиоразъемов начали понимать преимущества гибридного заземления экрана и разработали разъемы со встроенным эффективным экранирующим конденсатором. На рис. 2.48 показан разъем XLR с 10 радиальными поверхностными конденсаторами, подключенными между экраном кабеля и задней панелью разъема, который эффективно разрывает контур заземления на низких частотах, сохраняя при этом низкоомное соединение кабеля с экраном и разъемом на высокой частоте.

Параллельное включение 10 конденсаторов уменьшает индуктивность последовательно с одним конденсатором в 10 раз и создает гибридную экранирующую заделку, которая может быть эффективной на частотах до 1 ГГц.



Рисунок 2.48 - Разъем XLR с 10 SMT-конденсаторами между экраном кабеля и задней крышкой разъема

2.15.2.4 Заземление кабеля с двойным экраном. Две причины для использования кабеля с двойным экраном заключаются в следующем: Первая - для повышения эффективности высокочастотного экранирования; вторая - когда в одном кабеле передаются высокочастотные и низкочастотные сигналы. В первом случае два экрана могут соприкасаться друг с другом; во втором случае два экрана должны быть изолированы друг от друга (часто упоминается как триаксиальный кабель).

Наличие двух изолированных друг от друга экранов дает разработчику возможность по-разному заделать оба экрана. Внешний экран может быть заделан с обоих концов, чтобы обеспечить эффективное экранирование высокочастотных и магнитных полей. Внешний экран также часто используется для предотвращения излучения от кабеля, которое возникает в результате высокочастотных токов общей моды в кабеле. Внутренний экран может быть заделан только с одного конца, что позволяет избежать заземления, которое может возникнуть, если заземлить оба конца. Таким образом, внутренний экран является низкочастотным, а внешний - высокочастотным, что решает проблему, связанную с сигналом, содержащим как высокочастотные, так и низкочастотные компоненты. Внешний экран должен быть подключен к корпусу, а внутренний - корпуса или на заземление цепи, в зависимости от того, что лучше в данных обстоятельствах.

Еще одна интересная возможность при использовании триаксиального кабеля - заделка обоих экранов только на одном конце, но на противоположных концах. Таким образом, контур заземления на низких

частотах отсутствует, но межэкрановая емкость закрывает контур на высоких частотах. Такой способ может быть эффективен в случаях с очень длинными кабелями, когда между двумя концами может быть большая разность напряжений заземления, и когда из-за длинного кабеля будет большая межэкрановая емкость.

2.16 Кабели из риббона

Основные расходы, связанные с использованием кабелей, - это расходы, связанные с заделкой кабеля. Преимущество ленточных кабелей заключается в том, что они позволяют недорого выполнять несколько заделок, что является основной причиной их использования.

Ленточные кабели имеют второе преимущество. Они являются "управляемыми кабелями", потому что положение и ориентация проводов в кабеле фиксированы, как у проводников на печатной плате. Однако обычный жгут проводов - это "случайный кабель", поскольку положение и ориентация проводов в кабеле случайны и меняются от одного жгута к другому. Поэтому шумовые характеристики "случайного кабеля" могут отличаться от одного устройства к другому. Основная проблема, связанная с использованием ленточных кабелей, связана с тем, как отдельные проводники распределены относительно сигнальных проводов и заземлений. На рис. 2.49А показан ленточный кабель, в котором один проводник является заземлением, а все остальные проводники - сигнальными. Такая конфигурация используется потому, что она минимизирует количество необходимых проводников; однако у нее есть три проблемы. Во-первых, между сигнальными проводниками и их ответной частью на землю образуются большие петли, что приводит к излучению и восприимчивости. Вторая проблема - это общая импедансная связь, возникающая, когда все сигнальные проводники используют один и тот же заземляющий проводник. Третья проблема - перекрестные наводки между отдельными проводниками - как емкостные, так и индуктивные; поэтому такую конфигурацию следует использовать редко. Если она используется, единое заземление должно быть назначено одному из центральных проводников, чтобы минимизировать площадь петли [1].

На рис. 2.49В показана лучшая конфигурация. При таком расположении площадь контуров невелика, поскольку каждый проводник имеет рядом с собой отдельный возврат на землю. Поскольку каждый проводник имеет отдельный заземляющий контакт, общая импедансная связь устраняется, а перекрестные наводки между жилами сводятся к минимуму. Это предпочтительная конфигурация для ленточного кабеля, хотя она требует в два раза больше проводников, чем рис. 2.49А. В тех случаях, когда перекрестные наводки между кабелями являются

проблемой, может потребоваться два заземления между сигнальными проводниками.

Конфигурация, которая лишь немного уступает рис. 2.49В, и в которой используется на 25 % меньше проводников, показана на рис. 2.49С. В этой конфигурации рядом с каждым сигнальным проводником находится проводник заземления, поэтому площадь контуров невелика. Два сигнальных проводника имеют одно заземление, поэтому некоторый общий импеданс возникает связь, а перекрестные наводки выше, чем на рис. 2.49В, поскольку между некоторыми соседними сигнальными проводниками нет земли.

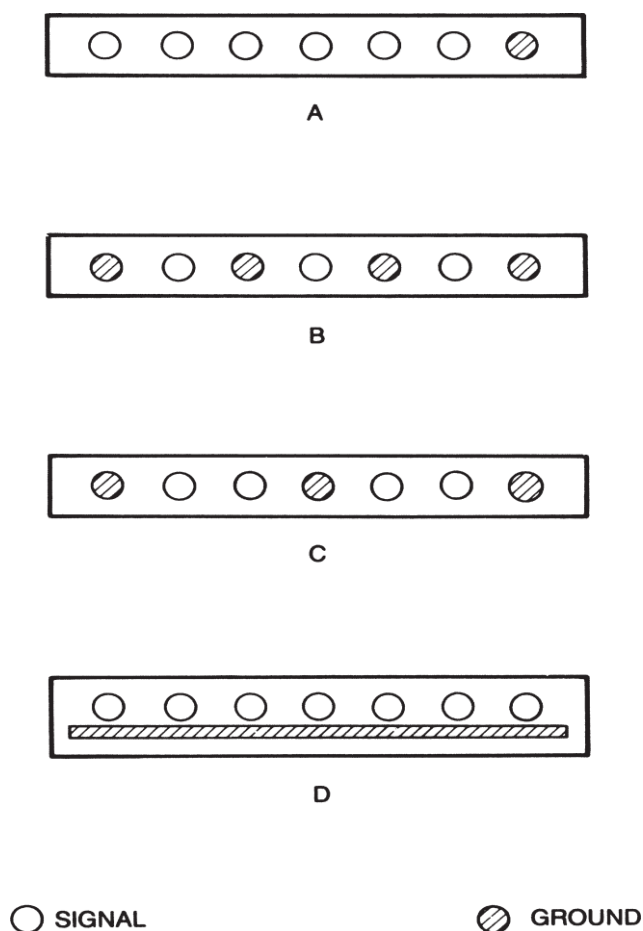


Рисунок 2.49 - Конфигурации ленточных кабелей: (А) одно заземление; (В) чередование заземлений; (С) земля/сигнал/сигнал/земля; (D) сигнал над плоскостью земли

Эта конфигурация может обеспечить адекватную производительность во многих приложениях и имеет самое низкое соотношение стоимости и производительности.

Ленточные кабели также выпускаются с плоскостью заземления по всей ширине кабеля, как показано на рис. 2.49D. В этом случае площадь контура определяется расстоянием между сигнальным проводником и

плоскостью заземления под ним. Поскольку этот размер обычно меньше, чем расстояние между жилами в кабеле, площадь контура меньше, чем в альтернативной конфигурации заземления на рис. 2.49В. Если это разрешить, ток заземления будет протекать под сигнальным проводником по той же причине, что и ток, возвращающийся по экрану на рис. 2.22.

Однако, если кабель не заделан с электрическим контактом всей ширины с плоскостью заземления, возвратные токи будут вытеснены из-под сигнальных проводников, и площадь петли увеличится. Поскольку такой кабель трудно правильно заделать, он используется нечасто.

Экранированные ленточные кабели также доступны; однако, если экран не заделан должным образом с помощью соединения 360° (что довольно сложно сделать), их эффективность значительно снижается. Влияние заделки экрана на излучение ленточных кабелей было рассмотрено в работе Palmgren (1981). Палмгрен отмечает, что внешние проводники в экранированном ленточном кабеле экранированы не так хорошо, как проводники, расположенные ближе к центру кабеля (обычно экранирование на 7 дБ меньше). Этот эффект вызван неравномерностью тока экрана на внешнем краю экрана. Поэтому не следует размещать критические сигналы на внешних проводниках экранированных ленточных кабелей.

ГЛАВА 3. ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Из всех проводников, используемых в соединении электроники, самым сложным, по иронии судьбы, является тот, которому обычно уделяется меньше всего внимания, - заземление. Заземление - это один из основных способов минимизации нежелательных шумов и создания безопасной системы. При этом малошумная система не обязательно является безопасной, и наоборот, безопасная система не обязательно является малошумной. Ответственность проектировщика заключается в том, чтобы обеспечить как безопасную, так и бесшумную систему. *Хорошая наземная система должна быть спроектирована*; ожидать, что наземная система будет работать хорошо, если при ее проектировании не было уделено достаточного внимания или вообще ничего не было сделано, - это выдавать желаемое за действительное. Иногда трудно поверить, что дорогостоящее инженерное время должно быть посвящено проработке мельчайших деталей заземления цепи, но в конечном итоге отсутствие необходимости решать загадочные проблемы шума после того, как оборудование построено и испытано, экономит и время, и деньги [10].

Одно из преимуществ хорошо спроектированной системы заземления заключается в том, что она часто может обеспечить защиту от нежелательных помех и излучений без каких-либо дополнительных затрат на единицу продукции. Единственные затраты - это время, необходимое для проектирования системы. Для сравнения, неправильно спроектированная система заземления может быть основным источником помех и излучений и, следовательно, потребовать значительного времени для устранения проблемы. Таким образом, правильно спроектированная система заземления может быть действительно экономически эффективной.

Заземление - важный и часто неправильно понимаемый аспект борьбы с шумами и помехами. Одна из проблем с заземлением заключается в самом слове. Слово «заземление» может означать много разных вещей для разных людей. Это может быть стержень длиной 8 футов, вбитый в землю для молниезащиты, зеленый защитный провод, используемый в системе распределения электроэнергии переменного тока (АС), плоскость заземления на печатной плате цифровой логики (PCB) или узкая трасса на PCB, которая обеспечивает обратный путь для низкочастотного аналогового сигнала на спутнике, вращающемся вокруг Земли. Во всех вышеперечисленных случаях требования к заземлению различны.

Заземления делятся на две следующие категории: (1) защитные заземления и (2) сигнальные заземления. Вторая категория, вероятно, вообще не должна называться заземлениями, а скорее *возвратами*, и она может быть дополнительно разделена на сигнальные или силовые

возвраты. Если они называются заземлениями, их следует называть «сигнальными» или «силовыми», чтобы определить тип тока, который они пропускают, и отличить их от «защитных» заземлений. Однако в обиходе их часто называют просто заземлениями.

В большинстве случаев защитные заземления не проводят ток, за исключением случаев неисправностей, о которых говорится далее в этой главе. Это различие важно, поскольку сигнальные заземления проводят ток во время нормальной работы. Таким образом, классифицировать заземления можно следующим образом: (1) те, которые проводят ток при нормальной работе (например, сигнальные или силовые заземления), и (2) те, которые не проводят ток при нормальной работе (например, защитные заземления).

Кроме того, если заземление подключено к корпусу или шасси оборудования, его часто называют *заземлением шасси*. Если заземление подключено к земле через низкоомный канал, то его можно назвать *заземлением*. Защитные заземления обычно подключаются к земле или к какому-либо проводящему телу, которое служит вместо земли, например к плану самолета или корпусу корабля. Сигнальные заземления могут быть подключены к земле, а могут и не быть. Во многих случаях защитное заземление требуется в точке, которая не подходит для сигнального заземления, что может усложнить проблему проектирования. Однако основная цель заземления всегда должна заключаться в том, чтобы *сначала сделать его безопасным, а затем заставить его работать должным образом без ущерба для безопасности*. Во всех случаях для этого существуют методы заземления.

3.1 Распределение питания переменного тока и защитные заземления

В энергетике заземление обычно означает соединение с землей. В Казахстане стандарты распределения электроэнергии переменного тока, заземления и электропроводки для объектов содержатся в Национальном электрическом кодексе (НЭК), который часто называют просто «кодексом». Изменения в кодекс вносятся каждые 3 года. Основная цель заземления системы электроснабжения - защитить персонал, животных, сооружения и здания от поражения электрическим током или пожара. В электропроводке объекта это обычно достигается следующим образом:

1. Обеспечение срабатывания защитного устройства (предохранителя или автоматического выключателя) в случае неисправности (т.е. контакта между горячим проводником и корпусом оборудования)

2. Минимизация разности потенциалов между токопроводящими корпусами и другими металлическими предметами

3. Обеспечение молниезащиты.

3.1.1 Служебный вход

Электроэнергия поступает на объект (жилой или коммерческий/промышленный) через сервисный вход. Коммунальное предприятие отвечает за проводку и заземление на стороне питания от сервисного входа, а пользователь отвечает за проводку и заземление на стороне нагрузки от сервисного входа. Служебный вход является связующим звеном между коммунальным предприятием и пользователем; именно здесь происходит учет, здесь можно отключить питание от объекта и именно здесь возможно попадание молнии в объект.

Для подачи электроэнергии в микрорайон обычно используется трехфазная высоковольтная система (обычно 4160 или 13 800 В). Подводка к объекту может быть воздушной или подземной. В промышленных районах для подвода к объекту доступны все три фазы. В жилых районах, однако, для подвода электроэнергии используется только одна фаза - высокое напряжение понижается с помощью однофазного распределительного трансформатора. Очень распространенной конфигурацией является распределительный трансформатор с центральным подключением вторичной обмотки, как показано на рис. 3-1. Такая схема обеспечивает объект однофазным питанием с напряжением 120 и 240 В. Центральный отвод вторичной обмотки трансформатора (нейтральный провод) надежно заземлен на землю как на распределительном трансформаторе, так и на входной панели обслуживания.

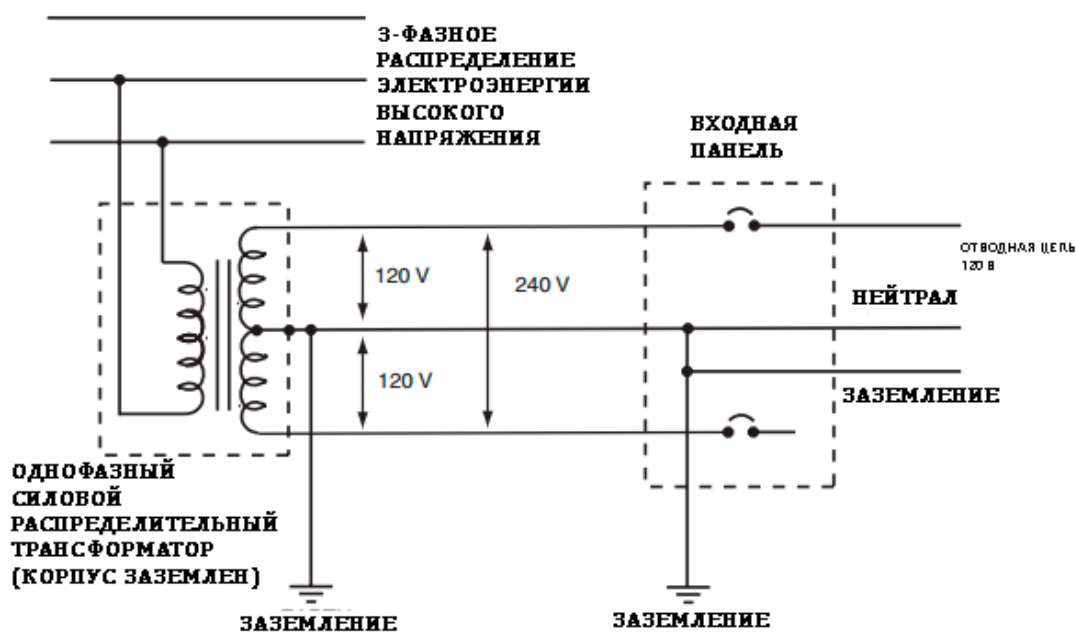


Рисунок 3.1 - Однофазная бытовая электросеть, обеспечивающая однофазное питание 120/240 В

Напряжение между любой из внешних клемм вторичной обмотки трансформатора и нейтралью составляет 120 В. Напряжение между двумя внешними клеммами трансформатора составляет 240 В. Напряжение двести сорок вольт часто используется для питания крупных приборов, таких как электрические печи, большие кондиционеры и электрические сушилки для белья. Два внешних проводника являются «горячими» (под напряжением по отношению к заземленной нейтрали) и должны содержать устройства защиты от сверхтоков, такие как предохранители или автоматические выключатели. Предохранители или автоматические выключатели не допускаются в нейтральном проводнике (230.90(B)). В кодексе также указано, что для полного отключения питания от объекта требуется не более шести выключателей или разъединителей с ручным управлением (230.71), и все эти разъединители должны находиться в одном месте, предпочтительно в одном щитке.

НЭК не подразумевает, что заземление - это единственный способ сделать электроустановки безопасными; изоляция, изоляция и защита также являются приемлемыми альтернативами в некоторых ситуациях. Например, системы распределения электроэнергии выше 1000 В обычно не заземляются. Тем не менее, НЭК предлагает один из методов обеспечения безопасности системы распределения переменного тока, и он часто кодифицируется в законе местными и государственными органами власти.

На заре развития электроснабжения переменным током среди «экспертов» было много дискуссий по поводу того, следует ли заземлять систему распределения электроэнергии в зданиях. Термин «заземление» в данном случае означает соединение одного из токоведущих проводников, обычно называемого нейтралью, с землей. В 1892 году Нью-Йоркский совет пожарных страховщиков выпустил отчет о *заземлении электрических проводов*, в котором говорилось следующее: «Нью-Йоркский совет пожарных страховщиков осудил практику заземления нейтрали как опасную и приказал прекратить ее. Нет никаких сомнений в том, что практика заземления нейтрали не так безопасна, как полностью изолированная система» [1].

Единственным обязательным требованием к заземлению в первом (1897) издании Национального электрического кодекса было требование к молниеотводам. Только 16 лет спустя в кодексе 1913 года нейтральный проводник вторичной обмотки силового трансформатора переменного тока должен был быть заземлен.

По сей день во многих частях мира широко используются незаземленные системы распределения электроэнергии переменного тока. Более чем 100-летний опыт работы с такими незаземленными системами показал, что они могут быть безопасными. На военных кораблях, где надежность имеет решающее значение, а морская вода является постоянной проблемой, системы распределения питания обычно не

заземляются. Однако в Соединенных Штатах, как и во многих других странах, принята система с заземлением - такой подход многие считают более безопасным. Однако вышеизложенное ясно показывает, что существует не один приемлемый способ обеспечения электробезопасности.

3.1.2 Разветвленные цепи

Требования к заземлению для систем распределения электроэнергии переменного тока содержатся в статье 250 кодекса. В дополнение к заземленной нейтрали требуется дополнительное защитное заземление для защиты от поражения током. Поэтому разветвленная цепь 120 В должна быть трехпроводной, как показано на рис. 3.2.

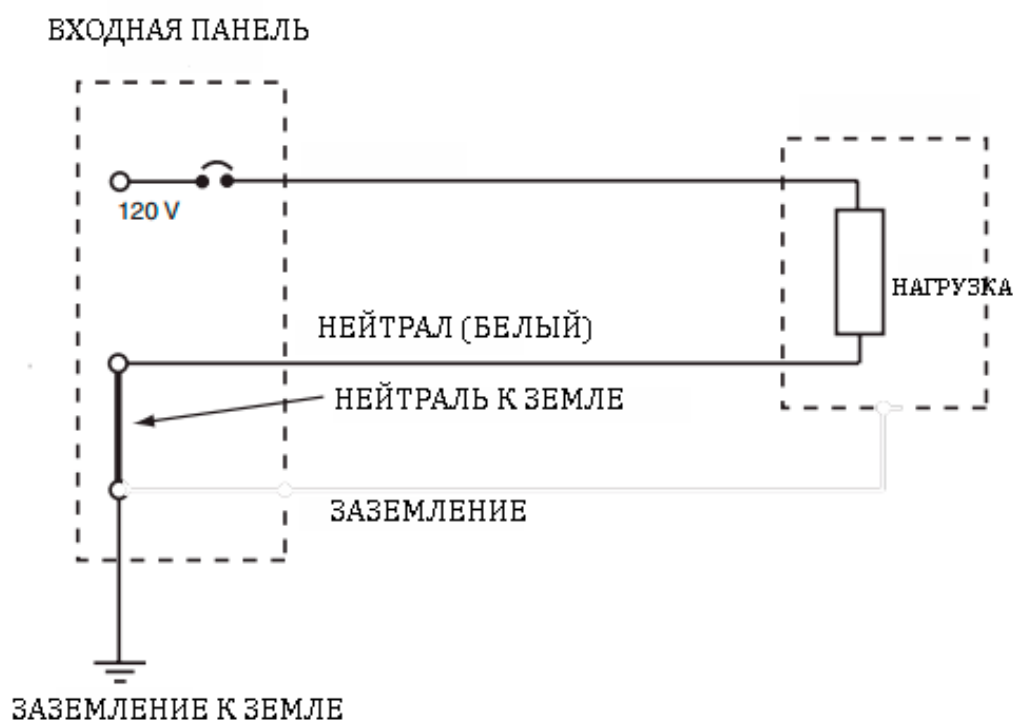


Рисунок 3.2 - Стандартная цепь распределения электроэнергии 120В переменного тока имеет три проводника

Ток нагрузки течет по горячему (черному) проводнику, который содержит защиту от сверхтоков, и возвращается по нейтральному (белому) проводнику. НЭК называет нейтраль «заземленным проводником». Защитное заземление (зеленый, зеленый с желтой полосой или голый) должно быть подключено ко всем нетоковедущим металлическим корпусам и аппаратуре оборудования, и оно должно находиться в том же кабеле или кабелепроводе, что и черный и белый токоведущие проводники. В НЭК защитное заземление называется «заземляющим

проводником». Однако в этой книге мы будем называть эти три проводника просто «горячим», «нейтральным» и «заземлением» (или «защитным заземлением»).

Ток по заземляющему проводнику течет только во время неисправности, и то кратковременно, пока устройство защиты от сверхтоков (предохранитель или автоматический выключатель) не разомкнет цепь, снимая напряжение и делая оборудование безопасным. Поскольку в земле обычно не течет ток, на ней нет падения напряжения, а оборудование и корпуса, подключенные к ней, находятся под одним потенциалом. Согласно НЭК, нейтральный и заземляющий провода должны быть соединены в *одной и только одной точке*, и эта точка должна находиться на главной входной панели (250.24(A)(5)). В противном случае часть тока нагрузки будет возвращаться по заземляющему проводу, что приведет к падению напряжения в нем. Кроме того, НЭК требует, чтобы заземляющий проводник также был соединен с землей через заземляющую штангу или другим способом на панели входа в систему. В НЭК стержень заземления называется «заземляющим электродом». Мы будем называть его просто стержнем заземления. Металлические водопроводные трубы и строительная сталь также должны быть соединены со стержнем заземления, чтобы образовать единую "систему заземления" для здания. Правильно подключенная цепь разветвления показана на рис. 3.3.

Комбинированная цепь 120/240 В аналогична цепи 120 В, за исключением дополнительного горячего (чаще всего красного) провода, как показано на рис. 3.4. Если нагрузка требует только 240 В, нейтральный (белый) провод, показанный на рис. 3.4, не требуется.

На рисунке 3.5 показано, что происходит при возникновении неисправности в электрооборудовании, подключенном к правильно смонтированной линии электропередачи переменного тока. Возникает низкоомный путь, состоящий из горячего проводника, заземляющего проводника и соединения нейтрали с землей, который потребляет большой ток повреждения и быстро отключает устройство защиты от сверхтоков, тем самым отключая питание от нагрузки и делая оборудование безопасным.

Обратите внимание, что соединение «земля-нейтраль» необходимо для работы устройства защиты от сверхтоков; однако соединение «земля-земля» не требуется. Заземление не требуется и для того, чтобы все металлы, подключенные к заземляющему проводнику, имели одинаковый потенциал. Почему же НЭК требует заземления? Воздушные линии электропередачи очень чувствительны к ударам молнии. Заземление используется для отвода тока молнии на землю и ограничения напряжения, накладываемого на энергосистему молнией, а также любого напряжения, вызванного скачками напряжения на линии электропередачи или

непреднамеренным контактом с линиями электропередачи более высокого напряжения.

3.1.3 Контроль шума

Следует иметь в виду, что в НЭК очень мало говорится о борьбе с шумом и помехами, в основном он касается электробезопасности и противопожарной защиты. Проектировщик системы должен найти способ удовлетворить кодекс и при этом создать малозумную систему. Кроме того, НЭК касается только частоты 50/60 Гц и ее гармоник. Приемлемое заземление на 60 Гц не будет приемлемым заземлением на 1 МГц.

Помехи могут быть дифференциальными (от горячей к нейтрали) или синфазными (от нейтрали к земле), как показано на рис. 3.6. *Заземление, однако, влияет только на шумы общего режима.*

Для борьбы с шумами и помехами необходимо создать низкоомную систему заземления, эффективную не только на частотах 50/60 Гц, но и на гораздо более высоких частотах (десятки, а то и сотни мегагерц). Для достижения этой цели могут потребоваться дополнительные заземляющие проводники, такие как заземляющие ленты, заземляющие плоскости, заземляющие решетки и т. д.

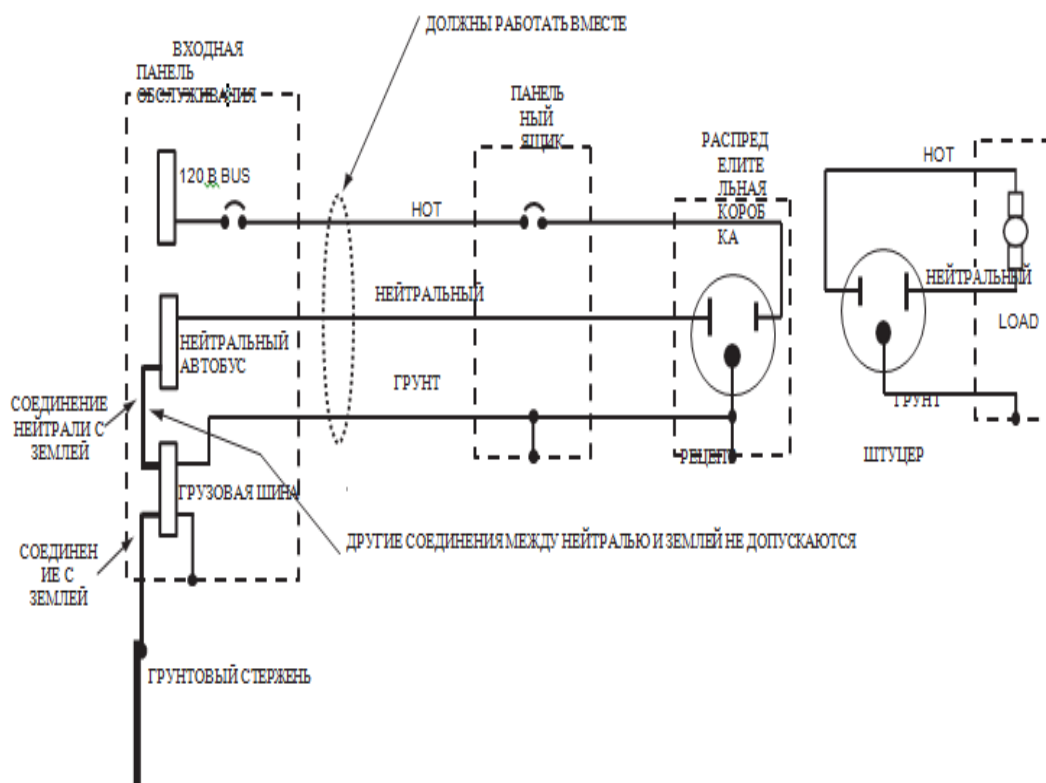


Рисунок 3.3 - Правильно подключенная и заземленная цепь переменного тока

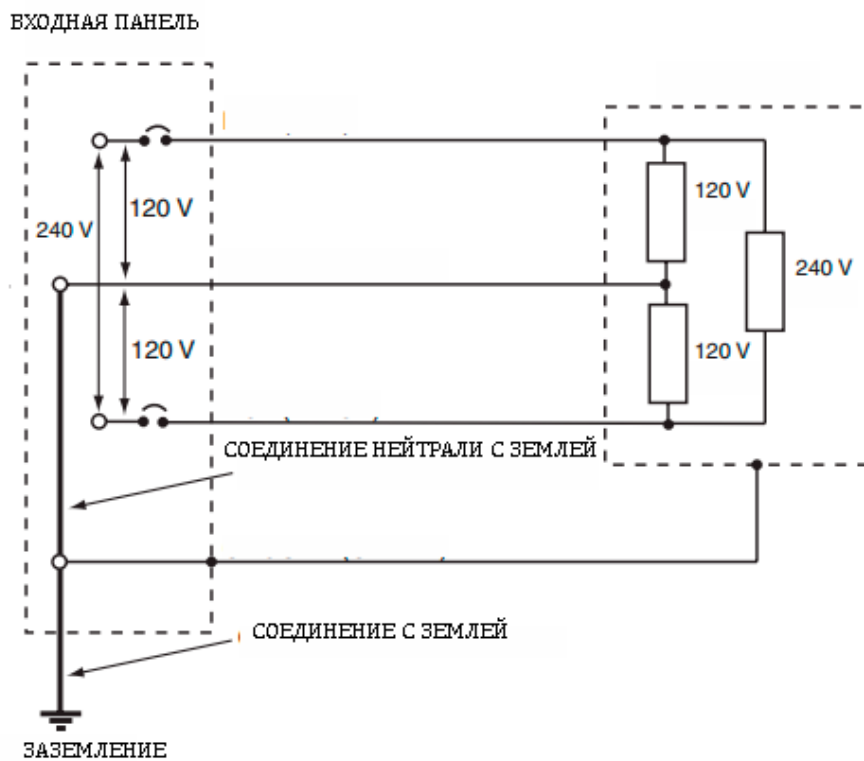


Рисунок 3.4 -Комбинированная цепь распределения питания 120/240 В переменного тока имеет четыре проводника

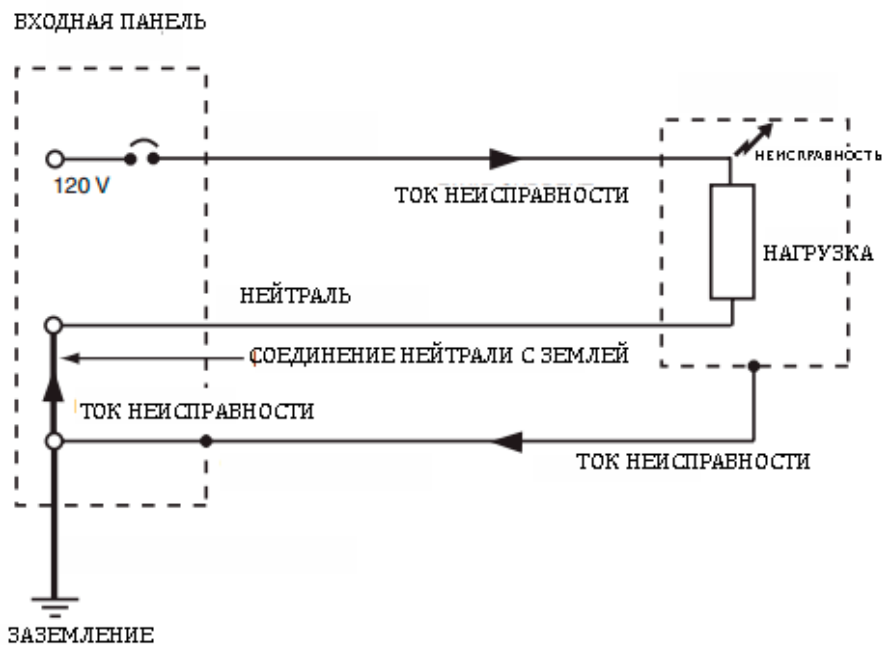


Рисунок 3.5. Путь тока короткого замыкания в стандартной ответвительной цепи распределения электроэнергии 120 В переменного тока

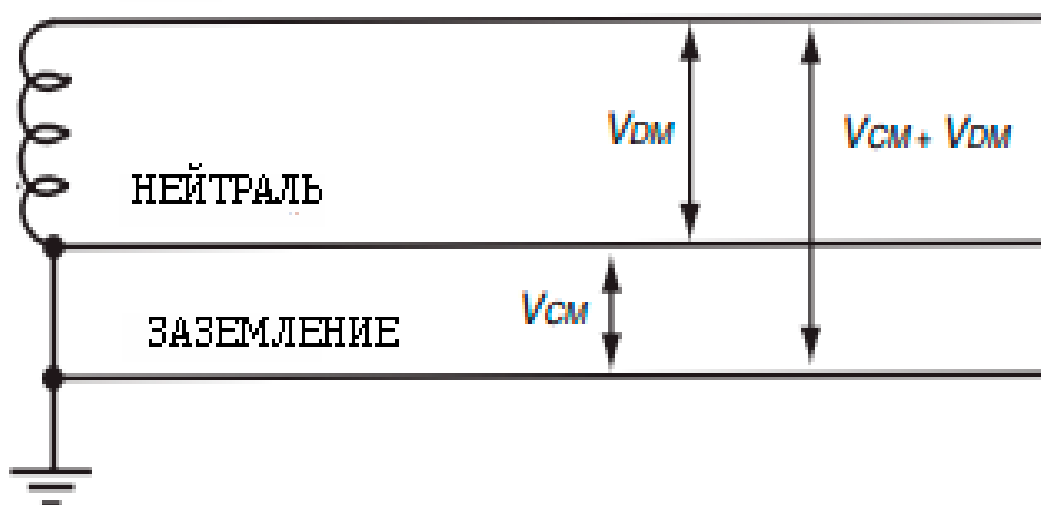


Рисунок 3.6 - Дифференциально-модовые и синфазные шумы

НЭК допускает такие дополнительные заземляющие проводники, если они отвечают следующим двум условиям:

1. Они должны быть *в дополнение* к заземляющим проводникам, требуемым НЭК, а не вместо них.
2. Они должны быть соединены с заземляющими проводниками, предусмотренными стандартом НЭК.

Наиболее эффективным методом получения низкоомной земли в широком диапазоне частот для физически разделенных единиц оборудования является их соединение с твердой плоскостью земли, как показано на рис. 3.26. Эту плоскость часто называют опорной плоскостью нулевого сигнала (ОПНС). ОПНС имеет на несколько порядков меньший импеданс, чем одиночный провод заземления любых практических размеров, и этот низкий импеданс существует в диапазоне частот, охватывающем многие порядки (т.е. от постоянного тока до сотен мегагерц и более). ОПНС, без сомнения, является *оптимальной низкоимпедансной, широкополосной структурой заземления*.

Во многих случаях использование сплошного ОПНС нецелесообразно; в этом случае можно использовать сетку для моделирования сплошной плоскости с хорошими результатами. Сетку можно представить как плоскость с отверстиями. Пока максимальный размер отверстий не превышает одной двадцатой длины волны, сетка будет почти так же эффективна, как и плоскость. Этот подход, представляющий собой решетчатый ОПНС, обычно используется в больших компьютерных залах в виде ячеистого фальшпола с расстоянием между проводниками решетки 60 см (около 2 футов).

3.1.4 Земляной грунт

Это миф, что подключение оборудования к заземлению снижает уровень шума и помех. Некоторые разработчики оборудования, пытаясь бороться с шумами и помехами, предлагают подключать свое оборудование к «тихой земле», состоящей из изолированного отдельного заземляющего стержня. Такая система показана на рис. 3.7. Однако если между горячим проводником и корпусом произойдет замыкание, то путь тока замыкания, как показано стрелками на рисунке, теперь включает землю. Проблема заключается в том, что земля не является хорошим проводником. Сопротивление заземления редко бывает меньше нескольких Ом, а чаще всего оно находится в диапазоне от 10 до 15 Ω . Согласно НЭК, сопротивление между стержнем заземления и землей может достигать 25 Ω (250,56). Если сопротивление заземления больше 25 Ω , то необходимо установить второй заземляющий стержень на расстоянии не менее 6 футов от первого и электрически связать его с первым заземляющим стержнем. Таким образом, ток повреждения может быть менее 5 А, что слишком мало, чтобы вызвать срабатывание автоматического выключателя. Такая конфигурация очень опасна, и ее никогда не следует использовать. Она также нарушает требования, содержащиеся в НЭК. НЭК гласит, что: Заземление не должно рассматриваться как эффективный путь тока повреждения (250.4(B)(4)).

Если используется несколько заземляющих стержней, НЭК требует, чтобы все они были соединены вместе для создания единого низкоомного пути тока замыкания (250.50). Заземляющие стержни систем связи [кабельного телевидения, телефона и т.д.] также должны быть соединены с системой заземляющих электродов здания (810.20(J)). Это необходимо для уменьшения разности потенциалов между заземляющими стержнями во время удара молнии [12].

Помимо того, что конфигурация на рис. 3.7 небезопасна, она редко снижает уровень шума и помех. Система заземления сети переменного тока представляет собой массив длинных проводов, которые действуют как антенны, улавливая всевозможные шумы и помехи. Кроме того, она сильно загрязнена шумовыми токами от другого оборудования и электросети. Земля не является низкоомной и далеко не эквипотенциальной. Скорее всего, она является причиной шума и помех, чем решением этих проблем.

На практике в правильно смонтированной системе распределения электроэнергии переменного тока в здании или доме возникает небольшая, совершенно безопасная разница напряжений между заземлениями различных розеток. Токи утечки, индукция магнитного поля и токи, проходящие через конденсаторы фильтра электромагнитных помех (ЭМП), подключенные к заземлению оборудования, вызывают эти напряжения.

Напряжение, измеренное между двумя точками заземления, обычно составляет менее 100 мВ, но в некоторых случаях оно достигает нескольких вольт. Эти шумовые напряжения, хотя и безопасны, но при подключении к большинству низковольтных сигнальных цепей являются явно чрезмерными. Поэтому заземление питания переменного тока не имеет практической ценности в качестве опорного сигнала. Подключение к заземлению питания переменного тока следует выполнять только в тех случаях, когда это необходимо для обеспечения безопасности.

3.1.5 Изолированные земли

Если требуется снизить уровень шумов (электромагнитных помех) на землю чувствительного электронного оборудования, НЭК разрешает использовать розетку, в которой клемма заземления изолирована от монтажной конструкции розетки (250.146(D)). Аналогичный раздел (250.96(B)) позволяет использовать изолированное заземление в корпусах оборудования с прямым подключением. Эти примеры являются исключениями из обычного требования НЭК о сплошном заземлении. Важно понимать, что в данном случае термин «изолированное заземление» относится к способу заземления розетки, а не к тому, заземлена ли она. Розетка с изолированным заземлением (ИЗ) - это розетка, в которой нет прямого электрического соединения между клеммой заземления на розетке и любой другой металлической частью сборки. Розетки с изолированным заземлением обычно окрашены в оранжевый цвет; однако единственное требование НЭК - обозначать их оранжевой буквой D на лицевой стороне розетки (406.2(D)). Использование розетки ИЗ не снимает требования о том, что металлическая коробка розетки и все другие металлические конструкции должны быть заземлены.

Подключение розетки с изолированным заземлением показано на рис. 3.8. Заземляющий штырь розетки соединяется с защитным заземлением отдельным изолированным проводником, идущим к входному щитку или источнику отдельной системы (см. раздел 3.1.6). Изолированный проводник заземления должен проходить через все промежуточные щитовые коробки без электрического соединения с ними. Обычный проводник защитного заземления по-прежнему необходим и подключается ко всем розеткам и щитовым коробкам. Теперь в системе есть два заземляющих проводника. Изолированный заземляющий проводник подключается к штырю заземления розетки и заземляет только оборудование, подключенное к розетке. Обычный проводник безопасного заземления заземляет все остальное оборудование, а также розеточную коробку и все промежуточные щитовые коробки. Электропроводка переменного тока теперь представляет собой четырехпроводную систему,

включающую горячую, нейтральную, изолированную землю, нормальную аппаратную (защитную) землю.*

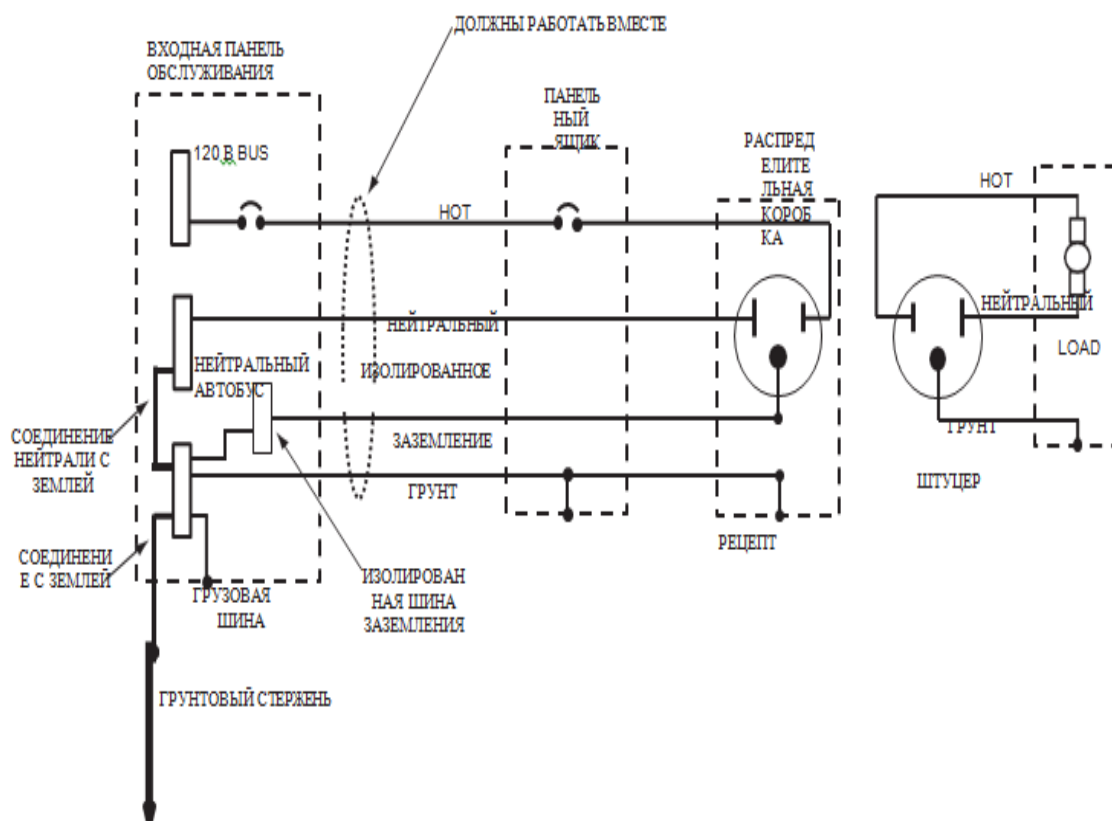


Рисунок 3.8 - Правильно подключенная розетка ИЗ

Сравнение рис. 3.3 и 3.8 показывает, что единственные различия заключаются в (1) удалении соединительной перемычки между штырем заземления розетки и розеточной коробкой и (2) добавлении изолированного провода заземления, идущего обратно к входному щитку.

Любое преднамеренное или случайное соединение между изолированным заземляющим проводником и проводником защитного заземления, кроме соединения на входной панели, нарушает всю цель конфигурации изолированного заземления. Это приведет не только к повреждению цепи, в которой происходит внешнее соединение, но и ко всем цепям изолированного заземления, поддерживаемым шиной изолированного заземления на панели входа в систему.

Преимущества использования розеток ИЗ, если таковые имеются, не являются общепризнанными и не обсуждаются в кодексе. Результаты варьируются от отсутствия улучшения, некоторого улучшения до увеличения шума. Однако любое улучшение шума, которое происходит, относится только к шуму общего режима, а не к шуму дифференциального режима.

Во многих случаях отдельная цепь разветвления, ОПНС или использование разделительного трансформатора для создания системы с

раздельной разводкой обеспечивают лучшие шумовые характеристики. Эти подходы можно использовать в сочетании друг с другом, а также с изолированной землей для еще большего снижения уровня шума.

3.1.6 Отдельные производные системы

Отдельно выведенная система - это система электропроводки, в которой горячий и нейтральный проводники не имеют *прямого* электрического соединения с основной электросетью. Примерами отдельно выведенной системы являются генератор, аккумулятор или трансформатор - при условии, что нет прямого электрического соединения с другим источником питания. В принципе, в случае отдельно выведенной системы мы начинаем все заново, как если бы это была главная входная панель, и создаем новую одноточечную связь нейтрали с землей.

Для снижения уровня синфазных помех часто используется разделительный трансформатор. Поскольку разделительный трансформатор создает отдельную систему, можно создать новую точку соединения нейтрали с землей. В этой точке между землей и нейтральным проводником не будет напряжения общего шума. Если напряжение, получаемое от трансформатора, используется только для питания чувствительных электронных нагрузок, то уровень шума значительно снизится. На рисунке 3.9 показана схема подключения изолирующего трансформатора к нагрузке. Рассматривая вторичную обмотку трансформатора как отдельно полученный (новый) источник питания, мы видим, что правая часть рис. 3.9 (от щитка до нагрузки) и рис. 3.2 подключены одинаково.

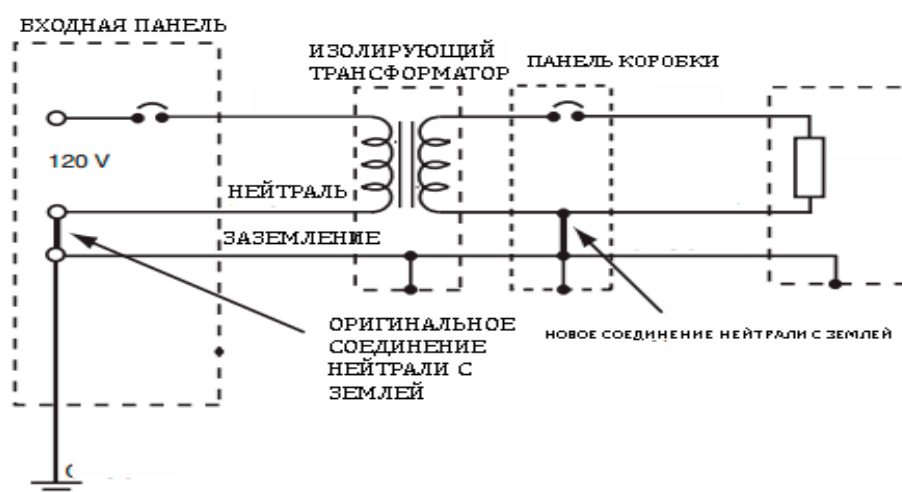


Рисунок 3.9 - Разделительный трансформатор используется для создания отдельно выведенной системы. Новая точка соединения нейтрали с землей устанавливается у трансформатора или первого щитка после трансформатора

Разделительный трансформатор не уменьшит дифференциально-модовые (горячие-нейтральные) помехи, присутствующие в основном источнике питания, поскольку они будут напрямую передаваться через трансформатор. Разделительный трансформатор можно использовать с розеткой со сплошным заземлением или с розеткой ИЗ. Эта техника, вероятно, является наилучшим вариантом использования розетки ИЗ в сочетании с разделительным трансформатором.

3.1.7 Заземляющие мифы

В области заземления существует больше мифов, чем в любой другой области электротехники. Наиболее распространенными из них являются следующие:

1. Земля - низкоомный путь для тока земли. Ошибка, импеданс земли на порядок больше, чем импеданс медного проводника.

2. Земля является эквипотенциальной. Ошибка, это явно не так, как следует из (1).

3. Импеданс проводника определяется его сопротивлением. Ошибка, что произошло с понятием индуктивной реактивности?

4. Чтобы работать с низким уровнем шума, схема или система должна быть подключена к заземлению. Ошибка, потому что самолеты, спутники, автомобили и портативные компьютеры с батарейным питанием прекрасно работают без заземления. Более того, заземление чаще всего является причиной проблемы шума. Больше проблем с шумами в электронных системах решается путем удаления (или изоляции) цепи от заземления, чем путем ее подключения к заземлению.

5. Чтобы снизить уровень шума, электронная система должна быть подключена к отдельному "тихому заземлению" с помощью отдельного изолированного заземляющего стержня. Ложь, но такой подход не только не соответствует действительности, но и опасен и нарушает требования НЭК.

6. Заземление является однонаправленным, ток течет только в землю. Ложь, поскольку ток должен течь по контуру, любой ток, втекающий в землю, должен также вытекать из земли в другом месте.

7. Изолированная розетка не заземлена. Ложь, термин "изолированная" относится только к способу заземления розетки, а не к тому, заземлена ли она.

8. Разработчик системы может назвать заземляющие проводники по типу тока, который они должны пропускать (например, сигнальный, силовой, грозовой, цифровой, аналоговый, тихий, шумный и т. д.), и электроны будут подчиняться и течь только по соответствующим проводникам. Очевидная ложь.

3.2 Сигнальные заземления

Заземление часто определяется как эквипотенциальная точка или плоскость, которая служит опорным потенциалом для цепи или системы. Мне нравится называть это *определение* заземления *напряжением*. Однако это определение не подходит для практических систем заземления, поскольку в действительности они не являются эквипотенциальными; кроме того, это определение не подчеркивает важность фактического пути, пройденного током заземления. Проектировщику важно знать фактический путь возвратного тока, чтобы оценить излучение или восприимчивость цепи. Чтобы понять ограничения и проблемы реальных систем заземления, лучше использовать определение, более точно отражающее реальную ситуацию. Лучшее определение для сигнального заземления - это низкоомный путь для возврата тока к источнику. Это *современное определение* заземления подчеркивает важность протекания тока. Оно подразумевает, что, поскольку ток течет через некоторое конечное сопротивление, между любыми двумя физически разделенными точками заземления будет существовать разность потенциалов. Определение напряжения определяет, каким должно быть заземление в идеале, в то время как определение тока более точно определяет, каким заземление является на самом деле. Не забывайте еще об одном важном различии между понятиями заземления по напряжению и по току. Напряжение всегда относительно, и мы должны спросить: «По отношению к чему?» Какой потенциал должен быть у нашего заземления, и относительно чего он должен измеряться? Ток, с другой стороны, является окончательным - ток всегда стремится вернуться к источнику.

Три основные цели заземления сигналов заключаются в следующем:

1. Не прерывать обратный путь заземления
2. Возвращайте ток через наименьшую петлю
3. Помните о возможной общей связи импедансов в земле

Наиболее важной характеристикой заземляющего проводника является его импеданс.

Импеданс любого проводника можно записать в виде

$$Z_g = R_g + j\omega L_g \quad (3.1)$$

Уравнение 3.1 наглядно показывает влияние частоты на импеданс грунта. На низкой частоте сопротивление R_g будет преобладать. На высокой частоте доминирующим импедансом будет индуктивность L_g . На частотах более 13 кГц прямая длина 24-канального провода,

расположенного на высоте 1 дюйма над плоскостью заземления, имеет большую индуктивную реактивность, чем сопротивление; см. рис. 3.10.

При проектировании заземления важно задать вопрос: как протекает ток в заземлении? Необходимо определить путь, по которому течет ток заземления. Затем, поскольку любой проводник, по которому течет ток, имеет падение напряжения, необходимо оценить влияние этого падения напряжения на работу всех цепей, подключенных к заземлению. Напряжение на земле, как и любое другое напряжение, подчиняется закону Ома, поэтому,

$$V_g = I_g Z_g \quad (3.2)$$

Уравнение 3.2 указывает на два способа минимизации напряжения шума на земле V_g

1. Минимизировать импеданс заземления Z_g
2. Уменьшить I_g , заставив ток земли течь по другому пути.

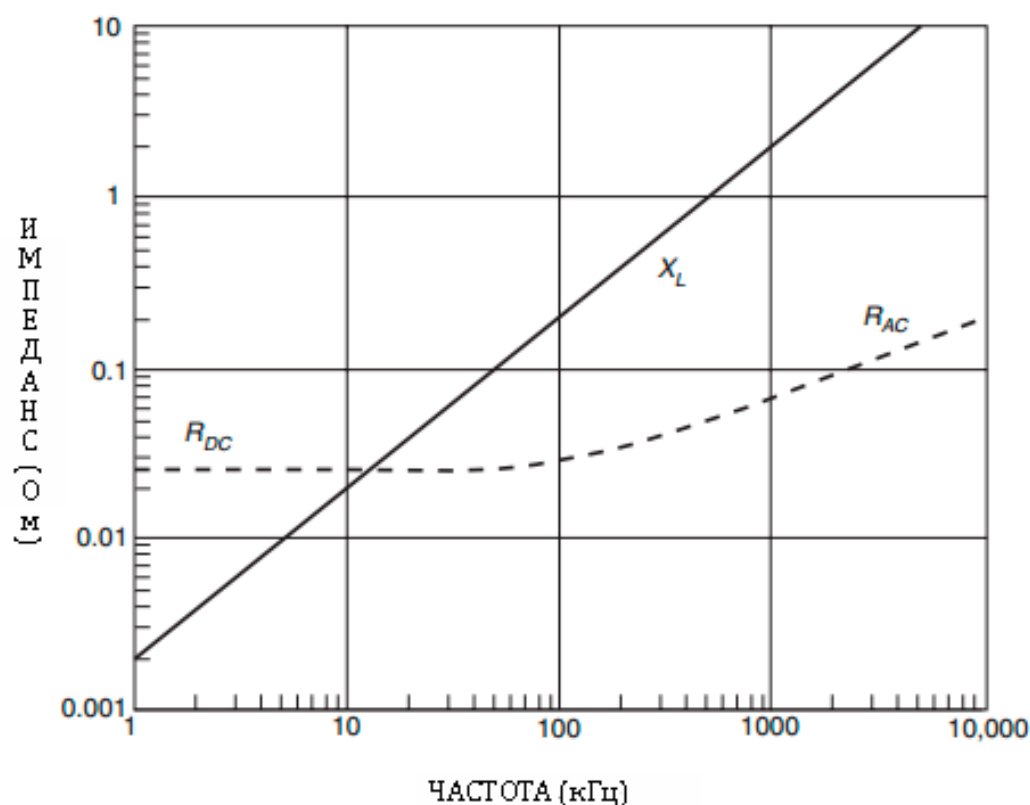


Рисунок 3.10 - Сопротивление и индуктивная реактивность в зависимости от частоты для прямого провода длиной 24 калибра, расположенного на высоте 1 дюйма над плоскостью земли

Первый подход обычно применяется на высоких частотах и в цифровых схемах, используя плоскость заземления или сетку. Второй подход обычно используется в низкочастотных аналоговых схемах с

помощью одноточечного заземления. При одноточечном заземлении мы можем направить ток земли туда, куда нам нужно. Уравнение 3.2 также наглядно демонстрирует тот важный момент, что при условии наличия тока в земле две физически разделенные точки никогда не будут находиться под одним и тем же потенциалом.

Рассмотрим случай двухсторонней печатной платы, как показано на рис. 3.11. Она состоит из трассы, проложенной, как показано на рисунке, на верхней стороне платы и сплошной плоскости заземления на нижней стороне платы. В точках А и В через плату проходят каналы, соединяющие трассу на верхней стороне с плоскостью заземления, чтобы завершить токовую петлю. Вопрос в том, как именно протекает ток в плоскости заземления между точками А и В?

На низких частотах ток в земле будет идти по пути наименьшего сопротивления, который находится непосредственно между точками А и В, как показано на рис. 3.12А. Однако на высоких частотах ток в земле проходит по пути наименьшей индуктивности, который находится непосредственно под трассой, как показано на рис. 3.12В, поскольку здесь площадь контура наименьшая. Поэтому пути возврата тока отличаются на низкой и высокой частоте. В этом случае различие между низкой и высокой частотой обычно составляет несколько сотен килогерц.

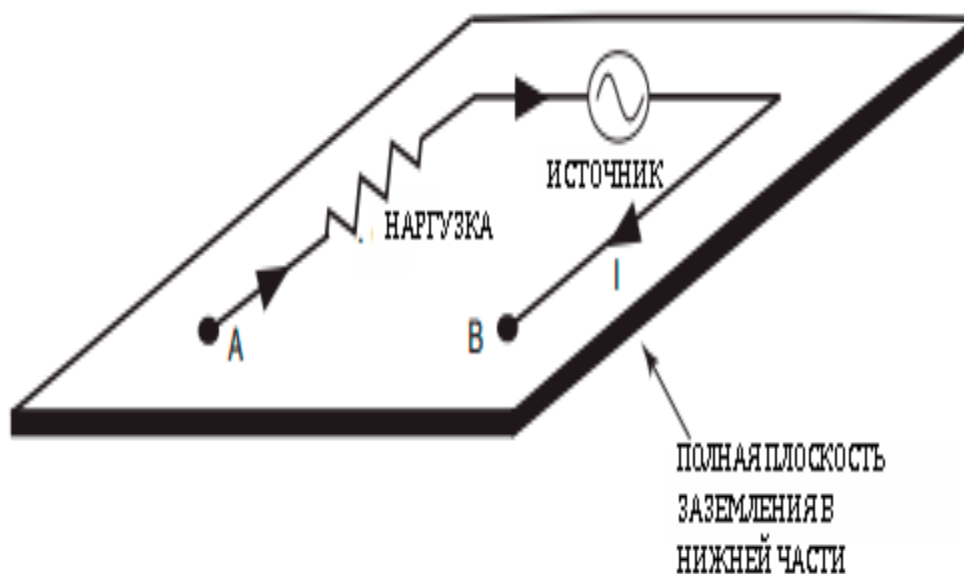


Рисунок 3.11 - Двухсторонняя печатная плата с одной трассой на верхней стороне и полной плоскостью заземления на нижней стороне. Как протекает ток по плоскости заземления между точками А и В?

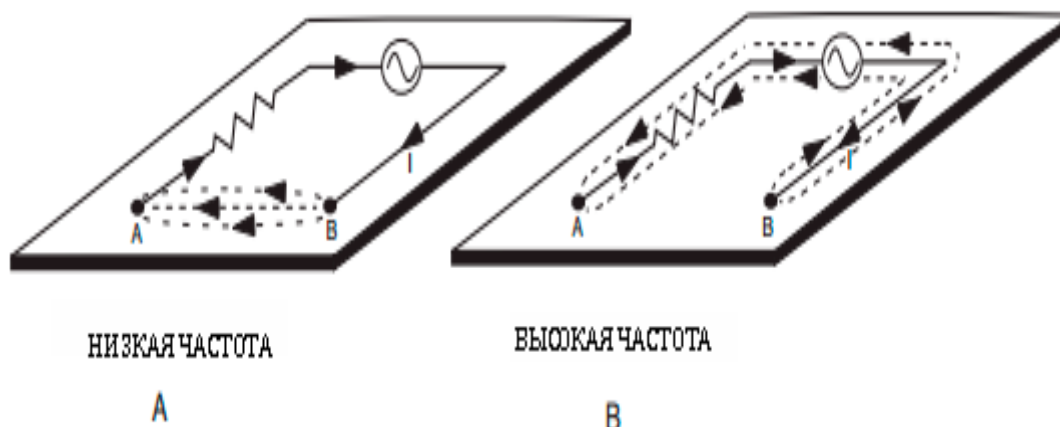


Рисунок 3.12 - Путь тока в плоскости заземления, (А) на низкой частоте обратный ток идет по пути наименьшего сопротивления и (В) на высокой частоте обратный ток идет по пути наименьшей индуктивности

Обратите внимание, что в низкочастотном случае (рис. 3.12А) ток течет по очень большой петле, что нежелательно. Однако в высокочастотном случае (рис. 3.12В) ток течет по небольшой петле (длина сигнальной трассы, умноженная на толщину платы). Таким образом, можно сделать вывод, что высокочастотные токи заземления делают то, что мы хотим (то есть текут по небольшой петле), и нам, как разработчикам, нужно лишь не прерывать их и не мешать им течь так, как они хотят. Низкочастотные токи заземления, однако, могут протекать или не протекать так, как мы хотим (т.е. протекать через небольшой контур), поэтому мы часто должны направлять ток (или заставлять его протекать) туда, куда мы хотим.

Выбор подходящей системы заземления определяется многими факторами, такими как тип схемы, частота работы, размер системы, ее автономность или распределенность, а также другими ограничениями, такими как безопасность и защита от электростатического разряда (ESD). Важно понимать, что ни одна система заземления не подходит для всех применений.

Еще один фактор, который следует учитывать, - это то, что заземление всегда связано с компромиссом. Все системы заземления имеют как преимущества, так и недостатки. Задача проектировщика - максимально использовать преимущества и минимизировать недостатки заземления для конкретного применения.

Кроме того, проблемы с заземлением имеют более одного приемлемого решения. Поэтому, хотя два разных инженера часто предлагают два разных решения одной и той же проблемы заземления, оба решения могут быть приемлемыми.

Наконец, заземление является иерархическим. Заземление выполняется на уровне интегральной схемы (ИС), на уровне печатной платы, а также на уровне системы или оборудования. Каждый уровень часто выполняется разными людьми; каждый из них обычно не знает, что произойдет на следующем уровне. Например, разработчик ИС не знает всех случаев использования или применения устройства, всех элементов оборудования, в которое оно будет встраиваться, или стратегии заземления, которой будет придерживаться разработчик конечного оборудования.

Сигнальные земли можно разделить на следующие три категории:

1. Одноточечные заземления
2. Многоточечные основания
3. Гибридные основания

Одноточечные и многоточечные заземления показаны на рис. 3.13 и 3.14, соответственно. Гибридные заземления показаны на рис. 3.21 и 3.23. Одноточечные заземления подразделяются на два подкласса: с последовательным и параллельным соединением, как показано на рис. 3.13. Последовательное соединение также называют общим или гирляндой, а параллельное соединение часто называют отдельной или звездообразной системой заземления.

В целом, желательно, чтобы топология системы распределения электроэнергии повторяла топологию грунта. Обычно сначала проектируется структура грунта, а затем аналогичным образом распределяется электроэнергия.

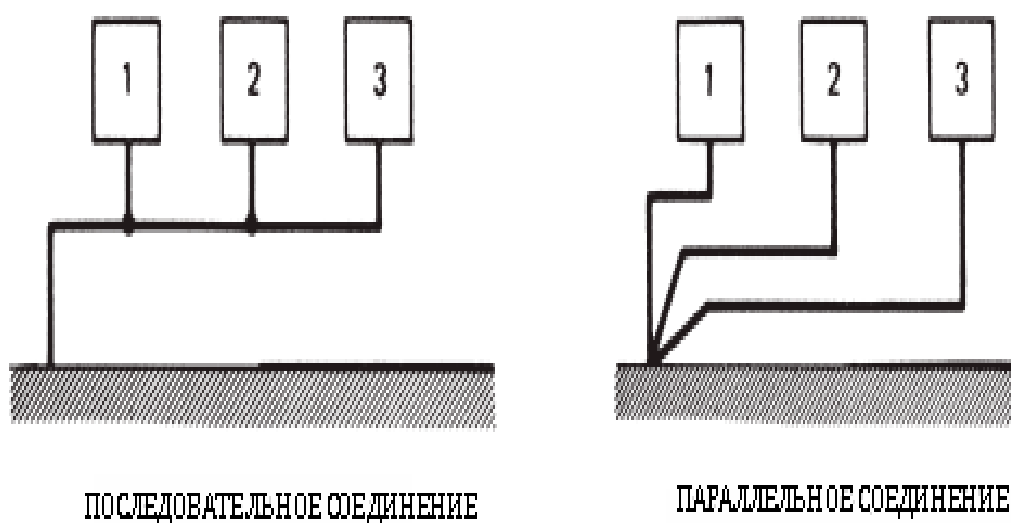


Рисунок 3.13 - Два типа одноточечных заземляющих соединений

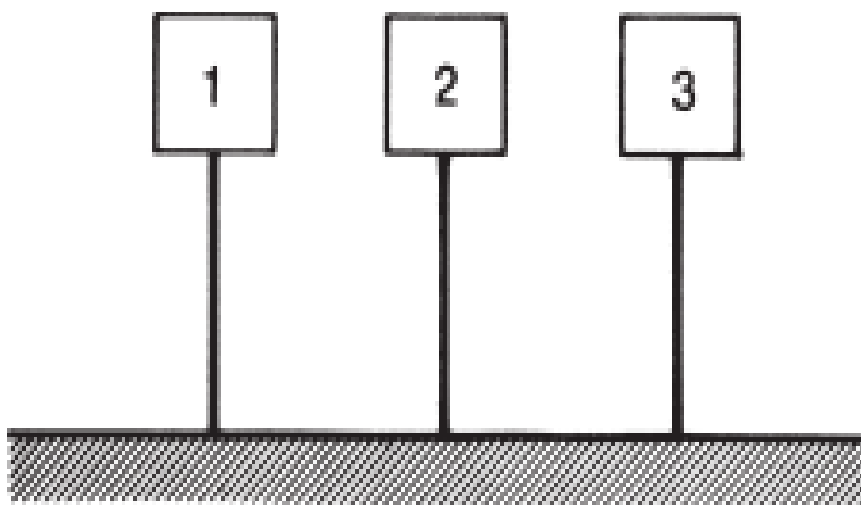


Рисунок 3.14 - Многоточечные соединения заземления

3.2.1 Одноточечные наземные системы

Одноточечные заземления наиболее эффективно используются на низких частотах, от постоянного тока до 20 кГц. Обычно их не следует использовать на частотах выше 100 кГц, хотя иногда этот предел может быть расширен до 1 МГц. При одноточечном заземлении мы управляем топологией заземления, чтобы направить ток заземления туда, куда мы хотим, чтобы он протекал, что уменьшает I_g в чувствительных частях заземления. Из уравнения 3.2 следует, что уменьшение I_g , уменьшает падение напряжения в этой части заземления. Кроме того, одноточечное заземление может эффективно использоваться для предотвращения образования контуров заземления.

Наиболее нежелательной системой заземления с одной точкой является общая система заземления или система "гирлянда", показанная на рис. 3. 15. Эта система представляет собой последовательное соединение всех отдельных заземлений цепи. Сопротивления Z , показанные на рисунке*, представляют собой сопротивления заземляющих проводников, а I_1 , I_2 , и I_3 - токи заземления цепей 1, 2 и 3 соответственно. Точка А не имеет нулевого потенциала, а находится под потенциалом в точке С.

$$V_A = (I_1 + I_2 + I_3)Z_1, \quad (3.3)$$

$$V_C = (I_1 + I_2 + I_3)Z_1 + (I_1 + I_2)Z_2 + I_3Z_3 \quad (3.4)$$

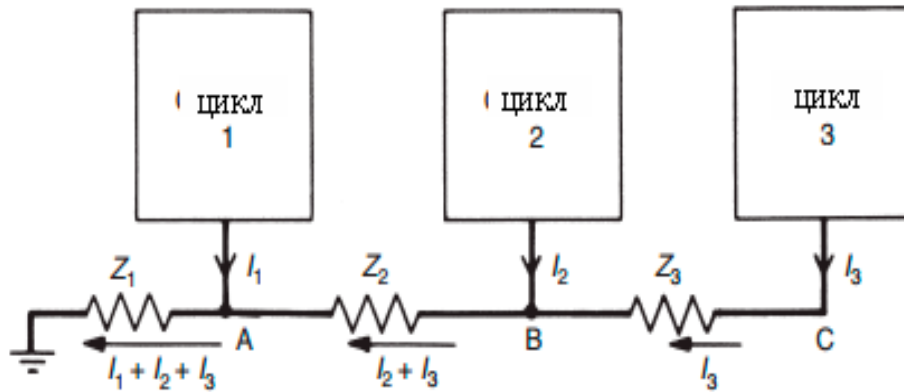


Рисунок 3.15 - Общая, или гирляндная, система одноточечного заземления представляет собой последовательное заземление и нежелательна с точки зрения помех, но имеет преимущество в виде простого подключения

Хотя эта схема является наименее предпочтительной системой одноточечного заземления, она широко используется из-за своей простоты. В некритичных приложениях она может быть вполне удовлетворительной. Эту схему не следует использовать между цепями, работающими при сильно различающихся уровнях тока, поскольку ступени с высоким током будут оказывать негативное влияние на цепи с низким уровнем тока через общее сопротивление заземления. При использовании этой системы наиболее критичной должна быть цепь, ближайшая к первичной точке заземления. Обратите внимание, что точка А на рис. 3.15 находится под более низким потенциалом, чем точки В и С.

Раздельная или параллельная система заземления, показанная на рис. 3.16, является более предпочтительной, чем одноточечная система заземления. Это связано с тем, что не возникает перекрестной связи между токами заземления от разных цепей. Потенциалы в точках А и С, например, следующие:

$$V_A = I_1 Z_1, \quad (3.5)$$

$$V_C = I_3 Z_3 \quad (3.6)$$

Потенциал заземления цепи теперь зависит только от тока заземления и импеданса этой цепи. Однако эта система может быть механически громоздкой, поскольку в большой системе может потребоваться неоправданное количество проводников заземления.

Большинство практических одноточечных систем заземления представляют собой комбинацию последовательного и параллельного соединения. Такая комбинация является компромиссом между необходимостью соответствовать критериям электрического шума и

стремлением избежать усложнения проводки. Ключом к успешному балансу этих факторов является выборочная группировка проводов заземления, чтобы цепи с сильно различающимися уровнями мощности и шума не использовали один и тот же провод заземления. Таким образом, несколько низкоуровневых цепей могут иметь общий заземляющий проводник, в то время как другие высокоуровневые цепи могут иметь другой заземляющий проводник.

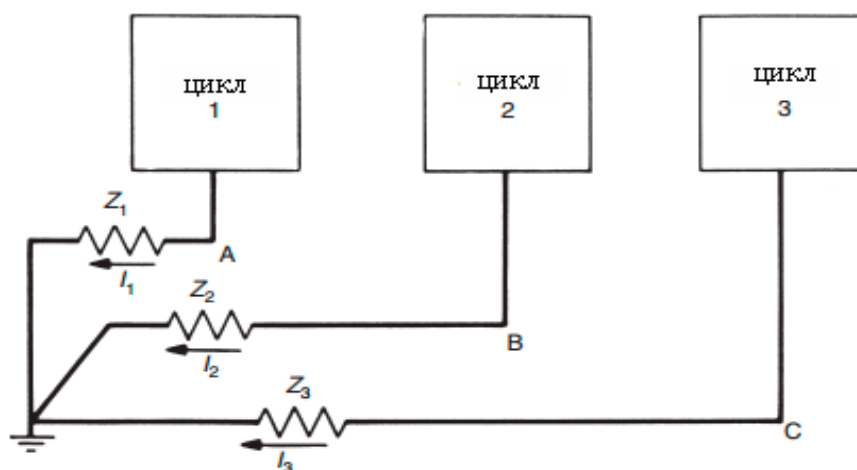


Рисунок 3.16 - Раздельная, или параллельная, одноточечная система заземления представляет собой параллельное заземление и обеспечивает хорошее низкочастотное заземление, но может быть механически громоздкой в больших системах

Система заземления электропитания переменного тока, предусмотренная стандартом НЭК, фактически представляет собой комбинацию последовательно и параллельно соединенных одноточечных заземлений. В пределах разветвленной цепи (подключенной к одному автоматическому выключателю) заземления соединены последовательно, а заземления различных разветвленных цепей соединены параллельно. Единая точка, или звезда, находится на панели входа в сеть, как показано на рис. 3.17.

На высоких частотах одноточечная система заземления нежелательна, поскольку индуктивность заземляющих проводников увеличивает импеданс заземления. На еще более высоких частотах импеданс заземляющих проводников может быть очень высоким, если их длина совпадает с нечетными кратностями четверти длины волны. Такие заземления не только имеют большой импеданс, но и действуют как антенны, излучая и эффективно принимая энергию. Для поддержания низкого импеданса и минимизации излучения и наводок заземляющие провода всегда должны быть короче одной двадцатой длины волны.

На высоких частотах одноточечное заземление невозможно. На рисунке 3.18 показано, что происходит при попытке использовать одноточечную конфигурацию заземления на высоких частотах. Из-за своей индуктивности проводники заземления имеют высокий импеданс. Однако на высокой частоте импеданс паразитной емкости между цепями и землей мал. Поэтому ток через землю проходит через низкий импеданс блуждающей емкости, а не через высокий импеданс, возникающий из-за индуктивности длинных проводников заземления. В результате получается многоточечное заземление на высокой частоте.

3.2.2 Многоточечные наземные системы

Многоточечные заземления используются на высоких частотах (выше 100 кГц) и в цифровых схемах. Многоточечные системы заземления минимизируют напряжение заземления V_g в уравнении 3.2 за счет минимизации импеданса заземления Z_g , что можно сделать с помощью заземляющих плоскостей или решеток. По возможности используйте несколько соединений между цепями и плоскостью, чтобы уменьшить индуктивность.

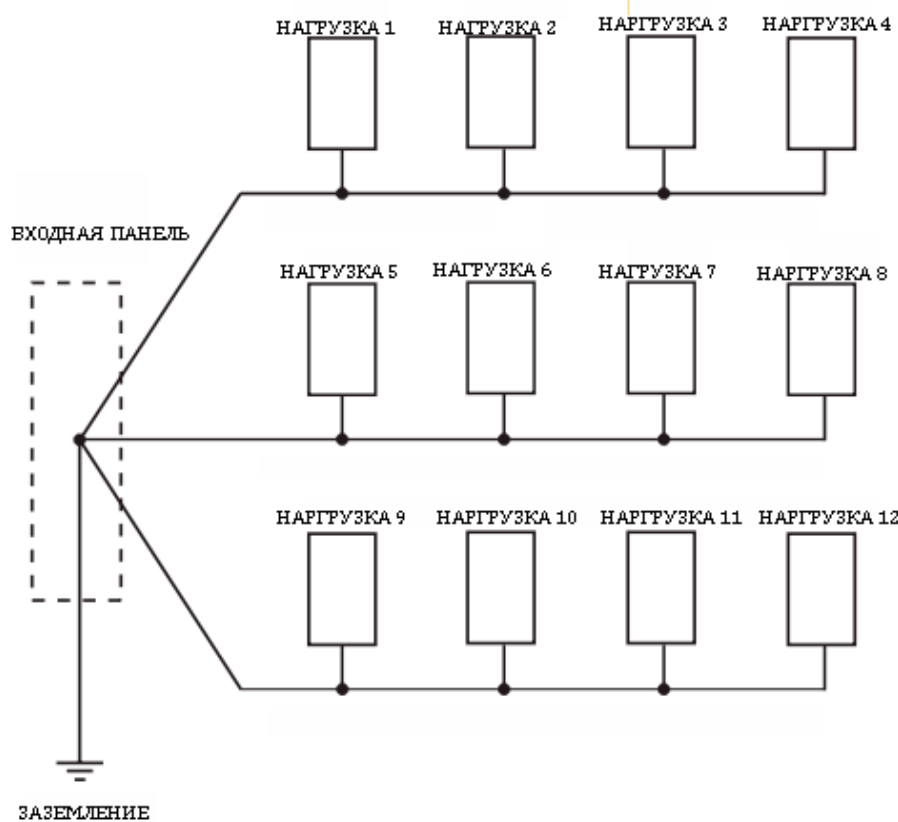


Рисунок 3.17 - Одноточечное заземление сети переменного тока в соответствии с НЭК

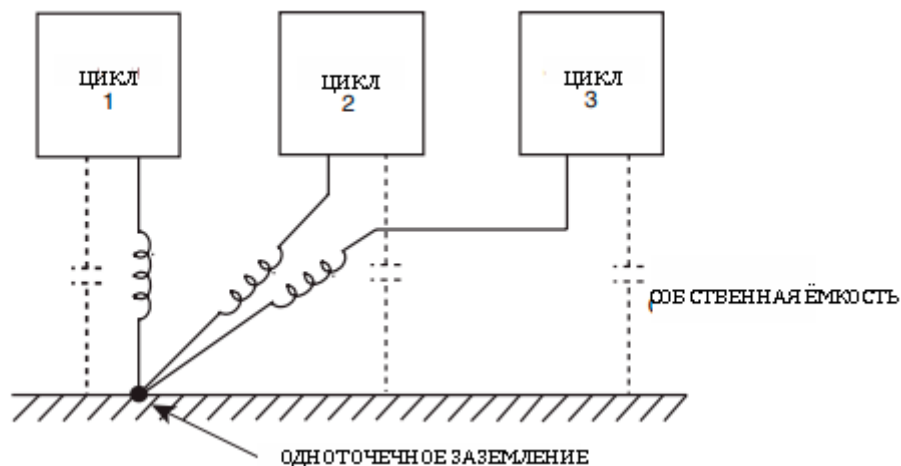


Рисунок 3.18 - На высокой частоте одноточечные заземления становятся многоточечными из-за паразитной емкости

В многоточечной системе, показанной на рис. 3.19, цепи подключаются к ближайшей доступной низкоомной плоскости заземления. Низкий импеданс заземления обусловлен в первую очередь низкой индуктивностью плоскости заземления. Соединения между каждой цепью и плоскостью заземления должны быть как можно короче, чтобы минимизировать их импеданс. Во многих высокочастотных цепях длина этих заземляющих проводников может составлять считанные доли дюйма. Все одноточечные заземления становятся многоточечными заземлениями на высокой частоте из-за паразитной емкости, как показано на рис. 3.18.

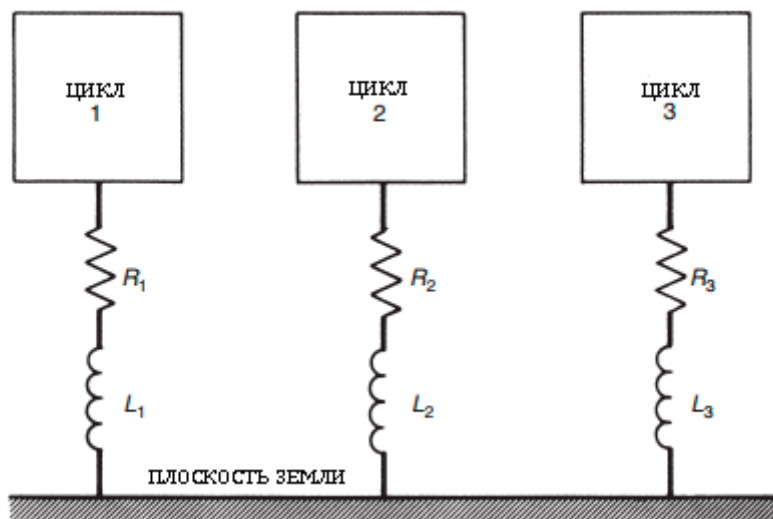


Рисунок 3.19 - Многоточечная система заземления является хорошим выбором на частотах выше 100 кГц. Сопротивления $R_1 - R_3$ и $L_1 - L_3$ должны быть минимизированы на интересующей частоте

Увеличение толщины плоскости заземления не влияет на ее

высокочастотный импеданс, поскольку (1) ее импеданс определяется индуктивностью, а не сопротивлением заземления, и (2) высокочастотные токи протекают только по поверхности плоскости из-за скин-эффекта.

Хорошая низкоиндуктивная земля необходима на любой печатной плате, содержащей высокочастотные или цифровые логические схемы. Заземление может представлять собой либо плоскость заземления, либо, если плата двусторонняя, сетку заземления. Плоскость земли обеспечивает возврат сигнальных токов с малой индуктивностью и позволяет использовать линии передачи с постоянным импедансом для соединения сигналов.

Хотя заземление цифровой логической платы должно быть многоточечным, это не означает, что питание, подаваемое на плату, также должно быть многоточечным. Поскольку высокочастотные токи цифровой логики должны быть ограничены платой и не протекать по проводникам питания, питающим плату, и поскольку питание постоянное, его можно подключить как одноточечное заземление, даже если заземление логической платы многоточечное.

3.2.3 Сопряжение с общим импедансом

Многие проблемы в системе заземления возникают в результате связи общего импеданса. Пример общего импеданса показан на рис. 3.20,

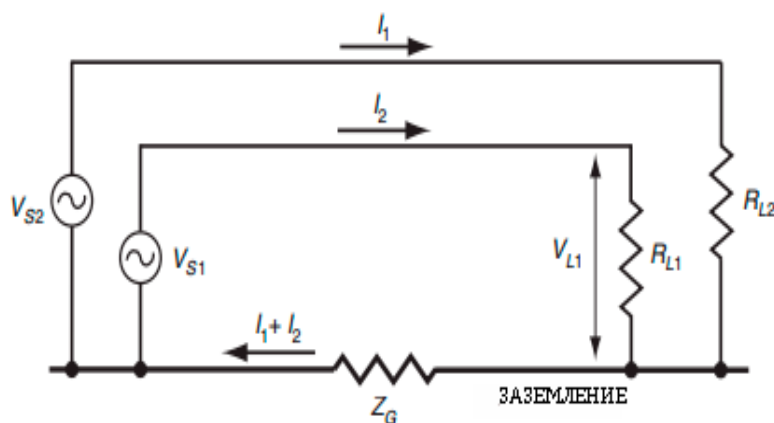


Рисунок 3.20 - Пример связи с общим импедансом

где Z_G - импеданс общей земли, а I_1 и I_2 - токи сигнала в цепях 1 и 2, соответственно. Обратите внимание, что в этой ситуации напряжение сигнала на нагрузке R_{L1} цепи 1 уже не является функцией только тока в цепи 1, но также является функцией тока в цепи 2. $I_1 Z_G$ в уравнении 3-7 представляет собой напряжение внутрисхемного шума, а $I_2 Z_G$ - напряжение межсхемного шума.

$$V_{LI} = V_{S1} + Z_G(I_1 + I_2) \quad (3.7)$$

Общесетевая связь становится проблемой, когда две или более цепей имеют общую землю и существует одно или более из следующих условий:

1. Заземление с высоким импедансом (на высокой частоте это вызвано слишком большой индуктивностью, на низкой частоте - слишком большим сопротивлением).
2. Большой ток заземления.
3. Очень чувствительный, малошумящий маркерный контур, подключенный к земле.

Одноточечные заземления преодолевают эти проблемы, разделяя заземляющие потоки, которые могут мешать друг другу, и заставляя их течь по разным проводникам, эффективно управляя I_g в уравнении 3.2. Этот подход эффективен на низких частотах. Однако пути прохождения сигнального тока и большая длина проводов, связанных с одноточечным заземлением, увеличивают индуктивность, что негативно сказывается на высоких частотах. Кроме того, на высоких частотах одноточечное заземление практически невозможно, поскольку паразитная емкость замыкает контур заземления, как показано на рис. 3.18.

Многоточечные заземления преодолевают эти проблемы, создавая очень низкий импеданс заземления, эффективно контролируя член L_g в уравнении 3.1.

Обычно на частотах ниже 100 кГц предпочтительнее использовать одноточечную систему заземления, а на частотах выше 100 кГц лучше использовать многоточечную систему заземления.

3.2.4 Гибридная площадка

Если частота сигнала охватывает широкий диапазон как выше, так и ниже 100 кГц, решением может стать гибридное заземление. Хорошим примером является видеосигнал; частота сигнала может варьироваться от 30 Гц до десятков мегагерц. Гибридное заземление - это такое заземление, в котором конфигурация системы заземления ведет себя по-разному на разных частотах. На рисунке 3.21 показан распространенный тип гибридной системы заземления, которая работает как одноточечное заземление на низких частотах и как многоточечное заземление на высоких частотах.

Практическим применением этого принципа является конфигурация экранирования кабеля, показанная на рис. 3.22. На низкой частоте конденсатор C имеет высокий импеданс, а экран кабеля

заземлен только со стороны нагрузки. На высокой частоте конденсатор C имеет низкий импеданс, а экран кабеля эффективно заземлен с обоих концов. Этот тип гибридного заземления экрана ранее обсуждался в разделе 2.15.2.3.

Другой тип гибридного заземления показан на рис. 3.23. Это гибридное заземление, хотя и не очень распространенное, может использоваться, когда многие корпуса оборудования должны быть заземлены на землю энергосистемы, но желательно иметь одноточечное сигнальное заземление для схем.

Индукторы заземления обеспечивают низкоомное защитное заземление на частоте 50/60 Гц и изоляция заземления на более высоких частотах.

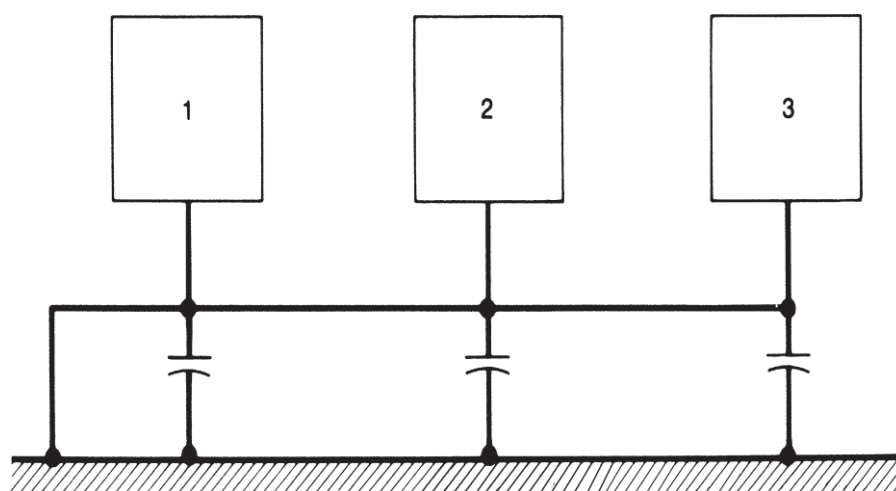


Рисунок 3.21 - Гибридное заземление, которое действует как одноточечное заземление на низких частотах и как многоточечное заземление на высоких частотах

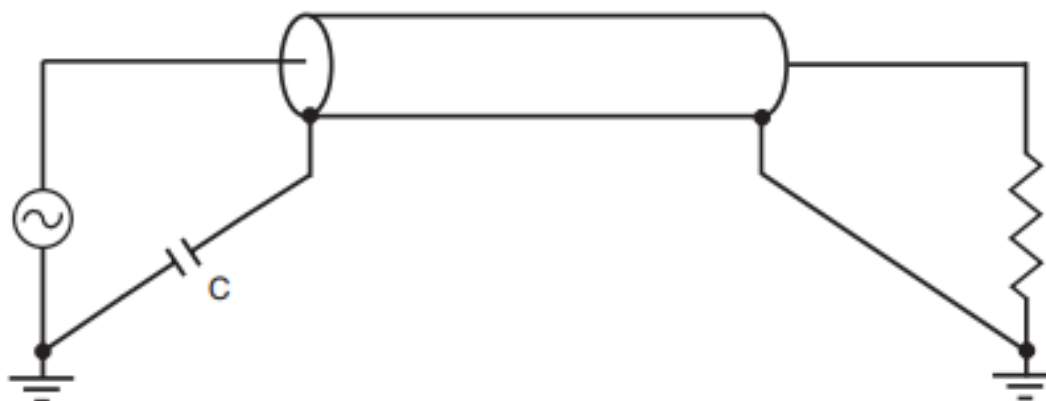


Рисунок 3.22 - Пример гибридного заземленного экрана кабеля

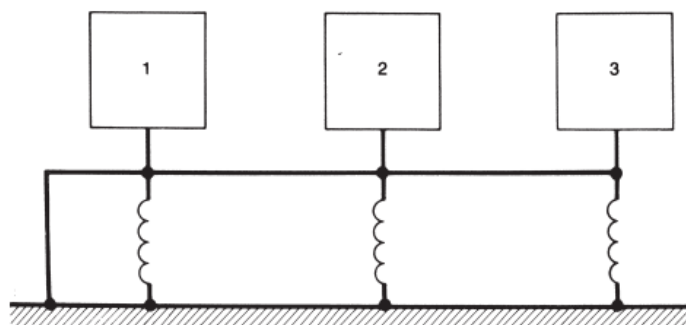


Рисунок 3.23 - Гибридное заземление, которое действует как многоточечное заземление на низких частотах и как одноточечное заземление на высоких частотах

Другое применение может быть в случае, если оборудование проводит ток помех по проводнику заземления, что вызывает излучение силового кабеля, тем самым нарушая нормативные требования по электромагнитной совместимости (ЭМС). Если удалить заземляющий проводник, изделие пройдет проверку на ЭМС, но это нарушение требований безопасности. Индуктивность или дроссель (например, 10-25 мГн), включенный последовательно с проводом заземления, обеспечит низкий импеданс на частотах 50/60 Гц и высокий импеданс на гораздо более высоких частотах шума.

3.2.5 Заземление шасси

Заземление шасси - это любой проводник, подключенный к металлическому корпусу оборудования. Заземление шасси и сигнальное заземление обычно соединяются в одной или нескольких точках. Ключом к минимизации шумов и помех является определение места и способа подключения сигнальной земли к шасси. Правильное заземление цепи уменьшит излучаемые продуктом помехи, а также повысит его устойчивость к внешним электромагнитным полям.

Рассмотрим случай печатной платы с кабелем ввода/вывода (I/O), установленной внутри металлического корпуса, как показано на рис. 3.24. Поскольку земля цепи проводит ток и имеет конечное сопротивление, на ней будет падение напряжения V_G . Это напряжение будет вызывать ток синфазной составляющей в кабеле и приведет к его излучению. Если заземление схемы подключено к шасси на конце печатной платы напротив кабеля, то полное напряжение V_G выведет ток на кабель. Если же заземление подключено к корпусу у разъема ввода/вывода, то напряжение, вызывающее ток синфазного состояния на кабеле, в идеале будет равно нулю. Полное напряжение земли появится на конце печатной платы без подключения кабеля. Поэтому важно установить низкоомное соединение

между шасси и землей схемы в зоне ввода/вывода платы.

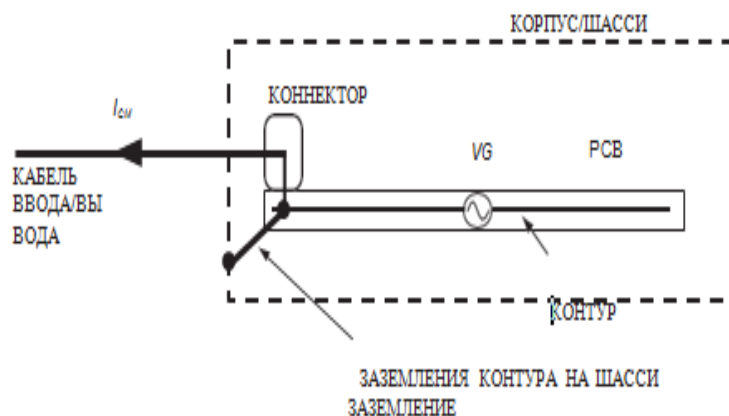


Рисунок 3.24 - Заземление цепи должно быть подключено к корпусу (шасси) в области ввода/вывода печатной платы

Другой способ представить этот пример - предположить, что напряжение заземления создает ток синфазного шума, который течет к разъему ввода/вывода. В разъеме будет происходить разделение тока между кабелем и соединением "земля-шасси" печатной платы. Чем меньше значение импеданса заземления платы и шасси, тем меньше будет ток общей моды в кабеле. Ключом к эффективности этого подхода является достижение низкого импеданса (на интересующих частотах) в соединении печатной платы с шасси. Зачастую это легче сказать, чем сделать, особенно если речь идет о частотах в диапазоне сотен мегагерц и более. На высоких частотах это подразумевает низкую индуктивность и обычно требует нескольких соединений.

Создание низкоомного соединения между заземлением схемы и шасси в зоне ввода/вывода также является преимуществом с точки зрения устойчивости к радиочастотным помехам (РП). Любые высокочастотные шумовые токи, наведенные в кабеле, будут отводиться на корпус, а не стекать по земле печатной платы.

3.3 Заземление оборудования/системы

Электронные схемы многих систем монтируются в больших стойках или шкафах для оборудования. Типичная система состоит из одного или нескольких таких шкафов с оборудованием. Корпуса оборудования могут быть большими или маленькими; они могут располагаться рядом друг с другом или быть рассредоточены; они могут находиться в здании, на корабле или в самолете; они могут питаться от систем переменного или постоянного тока (DC). Цели заземления оборудования включают в себя электробезопасность, молниезащиту, контроль ЭМС и целостность сигнала. Ниже рассматриваются наземные системы с питанием от

переменного тока; однако аналогичные методы заземления применимы к системам в транспортных средствах и самолетах, а также к системам с питанием от постоянного тока.

Хотя в этом разделе приведены примеры заземления больших корпусов оборудования, те же принципы в равной степени применимы к системам, содержащим множество небольших модулей схем, таких как те, что можно найти в автомобилях или самолетах. Фактически, эти принципы применимы даже к системе, содержащей набор печатных плат. Помните, что заземление иерархично, и одни и те же принципы применимы независимо от масштаба.

3.3.1 Изолированные системы

Изолированная система - это система, в которой все функции находятся в одном корпусе без внешних сигнальных соединений с другими заземленными системами. Примерами изолированных систем являются торговые автоматы, телевизоры, компонентные стереосистемы (со всеми компонентами, установленными в одной стойке), настольные компьютеры и т. д. Эта система является самой простой из всех систем, и ее легче всего правильно заземлить. Оптимальный способ минимизировать разность потенциалов между взаимосвязанными электронными устройствами - поместить их все в один шестигранный металлический корпус как можно меньшего размера.

Согласно НЭК, все открытые металлические корпуса электронного оборудования должны быть подключены к проводнику заземления сети переменного тока. Требуется только одно соединение безопасного заземления между корпусом и землей, конструкцией, планом, корпусом и т. д. Это заземление корпуса может быть обеспечено (1) заземлением питания переменного тока (зеленый провод) при питании от однофазного переменного тока (см. рис. 3.2) или (2) отдельным заземляющим проводником, проложенным вместе с силовым кабелем (или металлическим кабелепроводом) при питании от трехфазного переменного тока.

Внутренние сигналы должны быть заземлены в соответствии с типом схемы и частотой работы. Поскольку изолированная система не имеет входов/выходов с другим заземленным оборудованием, заземление сигналов ввода/вывода не требуется.

3.3.2 Кластерные системы

Кластерная система имеет несколько корпусов оборудования (шкафы, стойки, каркасы и т. д.), расположенных на небольшой площади, например в шкафу для оборудования или в одной комнате, как показано на

рис. 3.25. Между отдельными элементами системы, не показанными на рис. 3.25, может существовать множество соединительных кабелей ввода/вывода, но не с любой другой заземленной системой. Примерами кластерных систем являются небольшой центр обработки данных, мини-компьютер с множеством крупных периферийных устройств или компонентная стереосистема с разбросанными по комнате компонентами.

3.3.2.1 Защитное заземление кластерных систем. Для обеспечения безопасности корпуса оборудования должны быть подключены к заземлению сети переменного тока. Это соединение может быть выполнено различными способами. Стойки могут быть заземлены в одной точке, а могут быть заземлены в нескольких точках. При одноточечном заземлении стойки могут быть соединены последовательно (или гирляндами), а могут быть соединены параллельно (или звездой). Если используется последовательное соединение, как показано на рис. 3-15, потенциал шкафа будет зависеть от тока заземления, связанного с другим шкафом.

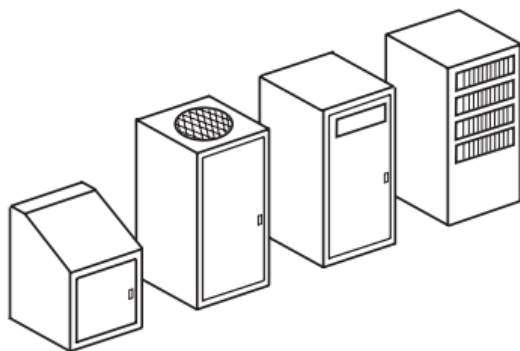


Рисунок 3.25 - Четыре шкафа с оборудованием, образующие кластерную систему

Как уже говорилось в разделе 3.2.1, последовательно соединенное одноточечное заземление является наименее желательным и обычно не подходит для соединения стоек с оборудованием, содержащим чувствительное электронное оборудование.

Лучше использовать параллельное или звездообразное заземление, как показано на рис. 3.16. В этом случае каждая стойка оборудования подключается к главной шине заземления с помощью отдельного заземляющего проводника. Поскольку по каждому проводнику заземления оборудования протекает меньший ток, чем при последовательном соединении, падение напряжения на проводниках заземления уменьшается, и потенциал заземления шкафа зависит только от его собственного тока заземления. Во многих случаях такой подход обеспечивает более чем адекватные шумовые характеристики.

3.3.2.2 Заземление сигналов в кластерных системах.

Внутренние сигналы должны быть заземлены в соответствии с типом схемы и частотой работы. Заземление сигналов между элементами может быть одноточечным, многоточечным или гибридным, в зависимости от характеристик задействованных сигналов. При одноточечной привязке сигнальное заземление обычно обеспечивается существующими заземляющими проводниками оборудования, требуемыми НЭК. В многоточечном случае заземление сигнала может обеспечиваться экранами кабелей (плохо), вспомогательными заземляющими проводниками или широкими металлическими лентами (лучше), а также проволочной сеткой или сплошной металлической плоскостью (лучше). Для нечувствительного электронного оборудования в благоприятной окружающей среде заземление сигнала с помощью кабельных экранов или вспомогательных заземляющих проводников часто является приемлемым. Для чувствительного электронного оборудования в жестких условиях эксплуатации следует серьезно рассмотреть возможность использования широких металлических лент, сеток или плоскостей заземления.

Безусловно, наилучшим способом получения низкоомного сигнального заземления в самом широком диапазоне частот между отдельными устройствами является их соединение с помощью сплошной металлической заземляющей плоскости, как показано на рис. 3-26. Импеданс плоскости будет на три-четыре порядка меньше, чем у любого отдельного провода. В этом случае получается настоящая многоточечная система заземления, которую часто называют *контрольная точка нулевого сигнала (ОПНС)*. Второй лучший подход - использование сетки заземления. Сетку можно рассматривать как плоскость с отверстиями. Пока отверстия малы по сравнению с длиной волны ($< \lambda/20$) на самой высокой частоте, представляющей интерес, сетка будет приближаться к характеристикам плоскости и часто проще в реализации.

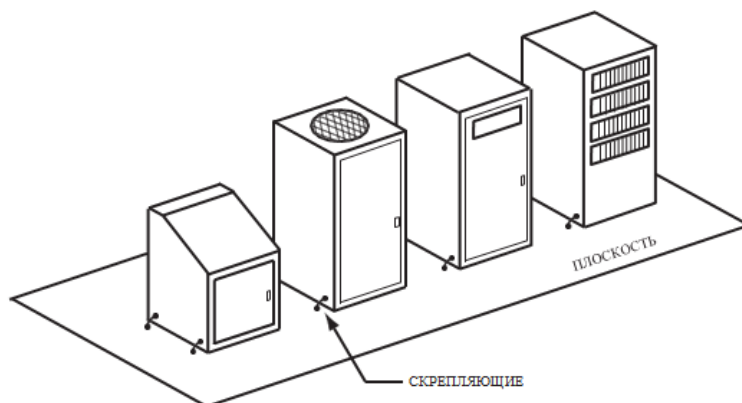


Рисунок 3.26 - ОПНС - это оптимальный способ обеспечить низкоомное соединение заземления между отдельными корпусами оборудования, эффективное в самом широком диапазоне частот

В многоточечной системе заземления каждый шкаф или стойка с электронным оборудованием должны быть сначала заземлены с помощью кондуктора заземления оборудования, предписанного НЭК. Кроме того, каждая стойка или шкаф подключаются к другому заземлению, в данном случае к ОПНС. На рисунке 3.27 показано это. Помните, что вместо плоскости можно использовать решетку. Такой подход эффективен в диапазоне от постоянного тока до высоких частот, и это, несомненно, оптимальная конфигурация.

Хотя ОПНС работают очень хорошо, они не идеальны. Они, как и все конфигурации проводников, имеют резонанс. Когда длина проводника или пути тока становится равной четверти длины волны (или нечетной кратности), он будет иметь высокий импеданс. Однако в случае ОПНС или решетки, когда один путь тока становится длиной в четверть волны, существуют другие параллельные пути, которые не являются длиной в четверть волны. Поэтому ток в земле будет идти по этим параллельным путям с меньшим сопротивлением, а не по высокоомному пути длиной в четверть волны. Таким образом, даже с учетом резонанса импеданс ОПНС будет меньше, чем у любого другого однопроводникового варианта.

Для молниезащиты ОПНС *не* должен быть изолирован от каких-либо объектов или конструкций. Он должен быть соединен с каждым проникающим в него предметом, таким как трубы, металлические каналы, строительная сталь и так далее. ОПНС также должен быть соединен с любым металлическим объектом, расположенным в пределах 6 футов от него. Это правило важно для предотвращения вспышки молнии.

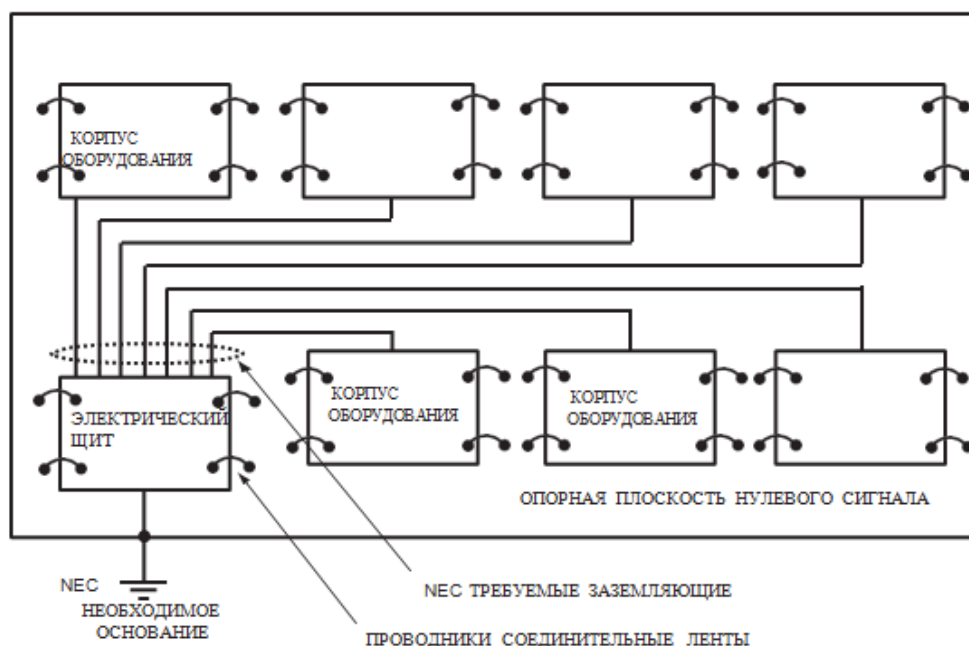


Рисунок 3.27 - Реализация структуры заземления ОПНС при сохранении требуемых НЭК заземляющих проводников оборудования

3.3.2.3 Заземляющие хомуты. Чтобы минимизировать индуктивность, корпуса оборудования должны быть соединены с ОПНС в нескольких точках (минимум четыре - хорошее правило) с помощью коротких хомутов с отношением длины к ширине 3:1 или меньше. Увеличение диаметра круглого проводника не приводит к значительному снижению его индуктивности из-за логарифмической зависимости между диаметром и индуктивностью.

Вместо круглого проводника для соединения корпусов с ОПНС следует использовать короткую плоскую прямоугольную ленту. Индуктивность плоского прямоугольного проводника составляет

$$L = 0.002l \left[2.303 \log \left(\frac{2l}{\omega + t} \right) + 0.5 + 0.235 \left(\frac{\omega + t}{l} \right) \right], \quad (3.8)$$

где L - индуктивность в мГн, l - длина, ω - ширина и t - толщина плоского ремешка (все в сантиметрах). В случае прямоугольного проводника отношение длины к ширине может существенно влиять на индуктивность ленты. Для ленты определенной длины индуктивность уменьшается по мере увеличения ширины ленты. На рисунке 3.28 показана индуктивность проводника длиной 10 см и толщиной 0,1 см в зависимости от отношения длины к ширине, в процентах от индуктивности при отношении длины к ширине 100:1.

Уравнение 3.8 также показывает, что при увеличении длины ремешка индуктивность будет увеличиваться независимо от отношения длины к ширине из-за члена l перед скобками. Однако для ремешка фиксированной длины индуктивность будет уменьшаться в зависимости от отношения длины к ширине, как показано на рис. 3.28 и в таблице 3.1. Поэтому для получения хороших высокочастотных характеристик следует использовать короткую ленту с наименьшим отношением длины к ширине.

Заземляющий провод может быть изготовлен из цельного металла или оплетки. Оплетка часто предпочтительнее цельного металла, когда требуется гибкость. Однако оплетка подвержена коррозии между отдельными жилами, что увеличивает ее импеданс. Медная оплетка, если она используется, должна быть луженой или посеребренной, чтобы уменьшить эту проблему. Луженая или плакированная оплетка, находящаяся в хорошем состоянии, должна работать так же хорошо, как и цельный ремешок в данном случае.

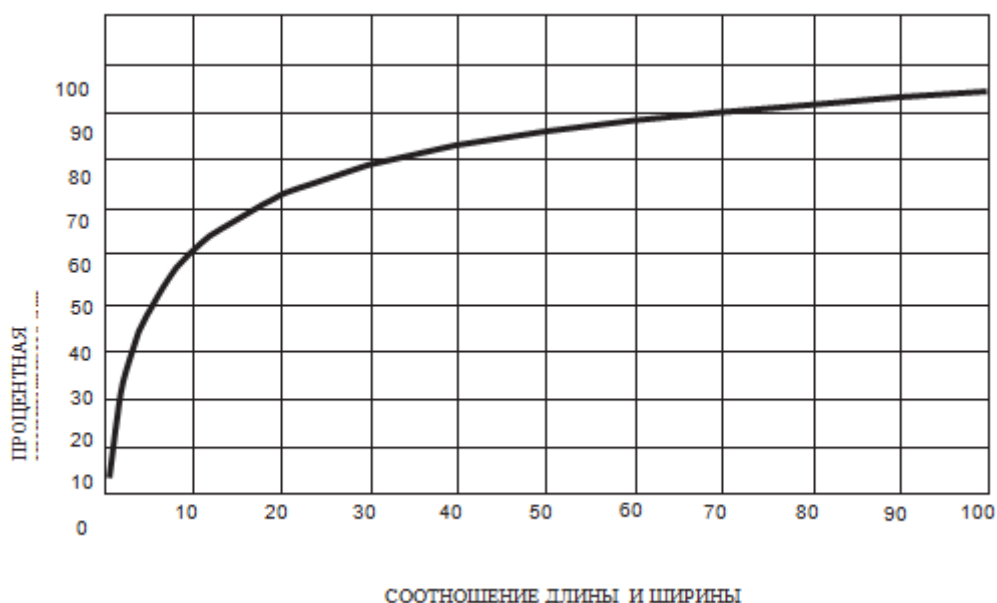


Рисунок 3.28 - Индуктивность заземляющей ленты прямоугольного сечения в зависимости от отношения ее длины к ширине.

Индуктивность показана в процентах от индуктивности ленты с отношением длины к ширине 100:1

Таблица 3.1. Процентное уменьшение индуктивности в зависимости от отношения длины к ширине проводника прямоугольного сечения фиксированной длины.

Соотношение длины и ширины	Процентное уменьшение индуктивности
100:1	0
50:1	8
20:1	21
10:1	33
5:1	45
3:1	54
2:1	61

Дополнительное снижение индуктивности может быть достигнуто при использовании нескольких заземляющих лент. Индуктивность двух параллельно соединенных лент будет вдвое меньше индуктивности одной ленты, при условии, что они разнесены так, что взаимная индуктивность пренебрежимо мала. Это уменьшение индуктивности линейно зависит от количества используемых лент. Четыре широко разнесенные ленты заземления будут иметь индуктивность, равную четверти индуктивности одной ленты.

Поэтому для заземления высокочастотного оборудования с наименьшим сопротивлением следует использовать несколько

заземляющих лент минимальной длины и с наименьшим отношением длины к ширине.

Шкафы с оборудованием часто намеренно или ненамеренно (например, в результате окраски поверхности шкафа) изолированы от плоскости заземления, на которой они находятся. Поэтому единственное электрическое соединение с плоскостью заземления осуществляется через соединительные ленты. В такой ситуации возникает проблема резонанса, как показано на рис. 3-29, вызванная паразитной емкостью между корпусом и плоскостью заземления. Эта емкость будет резонировать с индуктивностью ленты заземления на частоте

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.9)$$

где L - индуктивность ленты заземления, а C - паразитная емкость между корпусом и плоскостью заземления. Поскольку это параллельный резонанс, импеданс при резонансе будет очень большим, таким образом эффективно отсоединяя корпус от плоскости. Нередко резонанс находится в диапазоне частот от 10 до 50 МГц. Желательно, чтобы резонанс ленты заземления находился на частоте выше рабочих частот системы. Чтобы повысить резонансную частоту, необходимо уменьшить емкость и/или индуктивность. Индуктивность можно уменьшить, используя множество коротких, широких заземляющих лент. Поднятие корпуса с изолятором на большую высоту над плоскостью заземления уменьшит емкость.

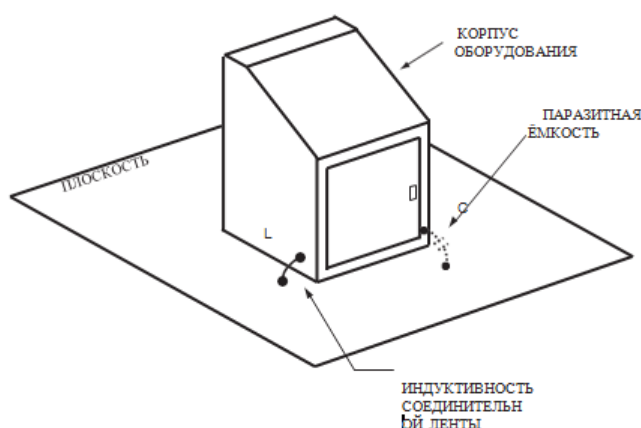


Рисунок 3.29 - Резонанс соединительной ленты может возникнуть из-за параллельного сочетания индуктивности соединительной ленты и паразитной емкости корпуса

3.3.2.4 Межблочная прокладка кабелей. Сигнальные и силовые кабели между отдельными элементами должны прокладываться вблизи ОПНС, как показано на рис. 3.30В, а не в воздухе над корпусами, как показано на рис. 3.30А. Такой подход позволяет минимизировать площадь между кабелями и опорной плоскостью, что минимизирует наводки синфазных помех на кабели. В некоторых случаях (например, в компьютерных залах) ОПНС или решетка являются частью фальшпола; в этих случаях кабели можно проложить под ОПНС, как показано в варианте 2 на рис. 3.30В.

Чтобы понять, как эти концепции заземления оборудования могут быть применены не только к большим стойкам с электроникой, давайте применим концепции кластерных систем к продукту в небольшом корпусе размером с «хлебную коробку», состоящему из нескольких отдельных модулей и печатных плат, соединенных между собой кабелями. Это может быть модуль блока питания, модуль дисководов, модуль жидкокристаллического дисплея (ЖК-дисплея) и множество печатных плат. Какой способ крепления, заземления и соединения модулей и печатных плат будет оптимальным?

Помните, что заземление иерархично, и хотя один корпус является изолированной системой в макромасштабе, если рассматривать только элементы внутри корпуса, то их можно рассматривать как кластерную систему в микромасштабе.

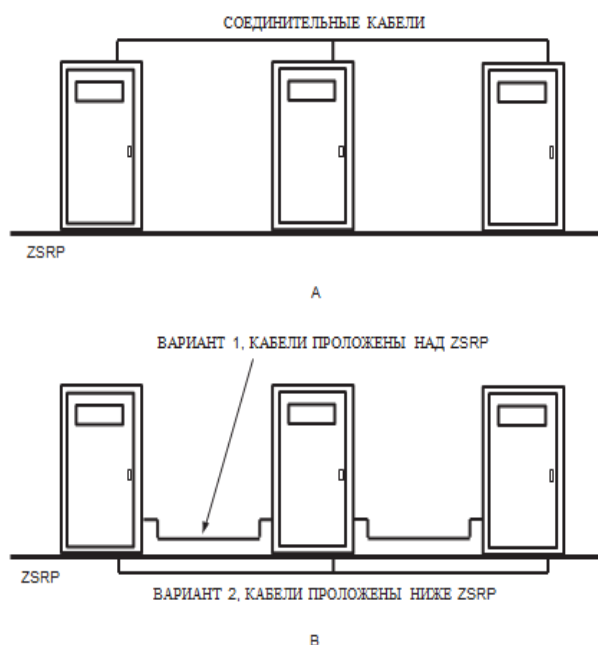


Рисунок 3.30. (А) Плохая прокладка межблочных кабелей и (В) предпочтительная прокладка межблочных кабелей

3.3.3 Распределенные системы

Распределенная система имеет несколько корпусов оборудования (шкафы, стойки, каркасы для оборудования и т. д.), которые физически разделены, например, находятся в разных помещениях, зданиях и т. д., как показано на рис. 3.31. Между отдельными элементами системы также имеется множество соединительных кабелей ввода-вывода, и эти кабели часто бывают длинными, превышающими одну двадцатую длины волны в частот, представляющих интерес. Примерами распределенных систем являются промышленное оборудование для управления технологическими процессами и крупные компьютерные сети на базе мэйнфреймов. Элементы системы получают питание от разных источников, например, от разных цепей ответвления, если они находятся в одном здании, или даже от разных трансформаторных подстанций, если элементы расположены в разных зданиях.

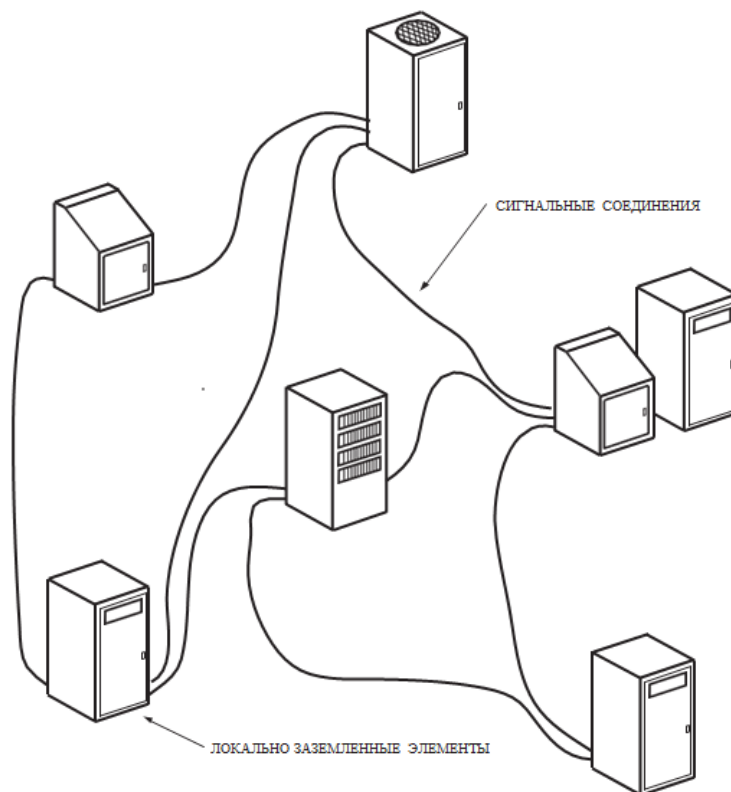


Рисунок 3.31 - Распределенная система, состоящая из множества широко разнесенных элементов

3.3.3.1 Заземление распределенных систем. В распределенной системе различные элементы обычно имеют отдельные заземления питания переменного тока, безопасности и молниезащиты. Однако элемент или элементы, расположенные в каждом месте, можно рассматривать как изолированную или кластерную систему, и они

заземляются соответствующим образом для этого типа системы.

Внутренние сигналы должны быть заземлены в соответствии с типом схемы и частотой работы. Основной проблемой, связанной с распределенной системой, является обработка сигналов, которые должны соединяться между отдельными элементами системы. Все сигнальные порты и соединительные кабели должны рассматриваться как находящиеся в жесткой (шумной) среде и обрабатываться соответствующим образом с использованием принципов, рассмотренных в главе 2 о кабелях и главе 4 о балансировке и фильтрации.

Основные соображения, связанные с определением применимой обработки ввода-вывода, следующие: Каковы характеристики сигнала? Какой тип кабеля и/или фильтрации будет использоваться? Является ли сигнал аналоговым или цифровым? Какова его частота и амплитуда? Сбалансированный или несбалансированный сигнал?

(Сбалансированные сигналы более устойчивы к помехам, чем несбалансированные). Будет ли кабельное соединение представлять собой отдельные провода, витые пары (экранированные или неэкранированные), ленточный кабель или коаксиальный кабель? Если используются экраны, должны ли они быть заземлены на одном конце, на обоих концах или гибридно заземлены? Еще одно важное соображение - можно ли или нужно ли использовать какую-либо форму изоляции или фильтрации? Например, может ли сигнал быть трансформаторным или оптически связанным с кабелем? Для обработки сигналов ввода-вывода и минимизации шумовой связи можно также использовать фильтры и дроссели общей моды.

В этой ситуации проблемой могут стать контуры заземления. В разделе 3.4 рассматривается этот вопрос и способы его решения. Все соединяемые сигналы должны быть проанализированы для определения необходимой степени защиты. Некоторые межсоединения, в зависимости от частоты, амплитуды, характеристик сигнала и т. д., могут не требовать специальных защитных мер.

3.3.3.2 Общие аккумуляторные системы. Распространенная система с распределенными батареями - это система, в которой конструкция (шасси, корпус, планер и т. д.) используется для возврата постоянного тока. Такую конфигурацию часто можно встретить в автомобилях и самолетах. В системах этого типа конструкция часто становится опорным сигналом. Поскольку все токи земли (силовые и сигнальные) протекают через конструкцию, общая импедансная связь может стать серьезной проблемой. Любая разность напряжений, существующая между различными точками конструкции в результате этой общей импедансной связи в земле, будет возникать последовательно со всеми сигнальными соединениями, связанными с

землей (односторонними). С точки зрения шумов и помех такая система не очень желательна и в лучшем случае может быть проблематичной.

Основная проблема, связанная с распределенной системой с общей батареей, заключается в обработке сигналов, которые должны соединяться между отдельными элементами системы. Все соединительные сигналы должны быть проанализированы, чтобы определить степень защиты, если таковая требуется. Большое значение имеет величина напряжения шума по сравнению с уровнем сигнала в цепи. Если отношение сигнал/шум таково, что работа схемы может быть нарушена, то необходимо принять меры для обеспечения адекватной защиты от синфазного шума земли. Чувствительные сигналы следует обрабатывать так, как описано в разделе 3.4 для контуров заземления. Поскольку балансные соединения более защищены от помех, чем односторонние, их следует серьезно рассмотреть в данной ситуации.

Обеспечение питания оборудования с помощью витой пары всегда лучше, чем с помощью возврата на шасси. Однако если витая пара используется параллельно с ответной частью шасси, она будет не так эффективна, как без ответной части шасси. Однако использование витой пары все равно дает некоторые преимущества. Она уменьшит наводки дифференциального режима магнитного поля в проводах питания. Хотя низкочастотные возвратные токи все равно будут возвращаться через шасси (при условии, что оно имеет меньшее сопротивление, чем возвратный проводник в витой паре), высокочастотные шумовые токи будут возвращаться через витую пару (поскольку она обеспечивает путь с меньшей индуктивностью) и будут излучаться не так эффективно и, возможно, создавать помехи для другого оборудования. Кроме того, если заземление шасси плохое (высокий импеданс) или деградирует со временем, ток питания может вернуться по витой паре, что обеспечивает повышенную надежность.

3.3.3.3 Центральная система с расширениями. Частным случаем распределенной системы является центральная система с расширениями. Такая система, показанная на рис. 3.32, состоит из центрального элемента или элементов, соединенных, обычно в виде звезды, с удаленными элементами, которые могут находиться на большом расстоянии от центрального элемента. От распределенной системы она отличается тем, что удаленные элементы, которые обычно невелики, не питаются и не заземляются локально; скорее, они получают питание от центрального элемента. Обычно это низкочастотные системы. Лучшим примером системы такого типа является телефонная сеть; другим примером может быть программируемый логический контроллер (ПЛК) на заводе с

удаленными незаземленными датчиками и/или исполнительными механизмами.

Центральный элемент должен быть заземлен как изолированная или кластерная система, в зависимости от того, что подходит для данной конфигурации. Кроме того, кабели к удаленным элементам должны быть обработаны для предотвращения наводки и/или излучения помех, как обсуждалось в главе 2.

3.4 Грунтовые лопаты

Контур заземления иногда могут быть источником шума и помех. Это особенно актуально, когда несколько точек заземления разнесены на большое расстояние и подключены к земле питания переменного тока, или когда низкоуровневые аналоговые цепи используются.

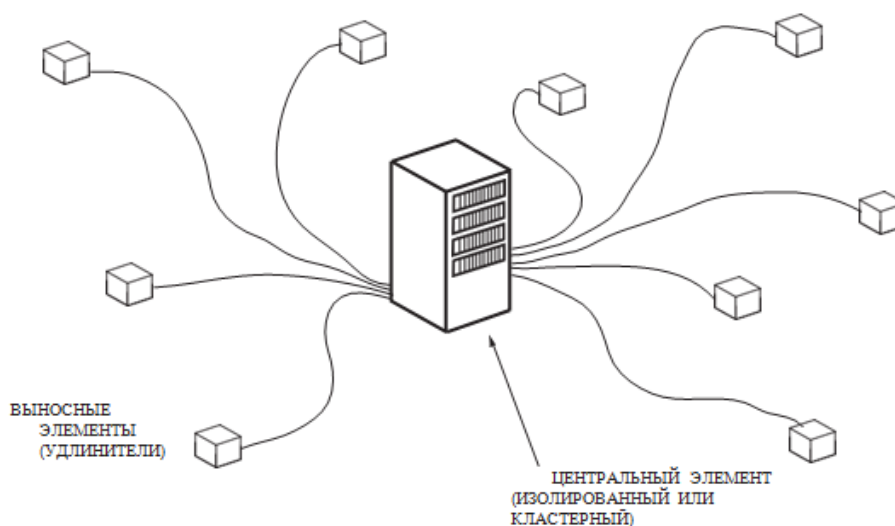


Рисунок 3.32 - Центральная система с дополнительными устройствами. Расширители не имеют локального заземления и получают питание от центральной системы

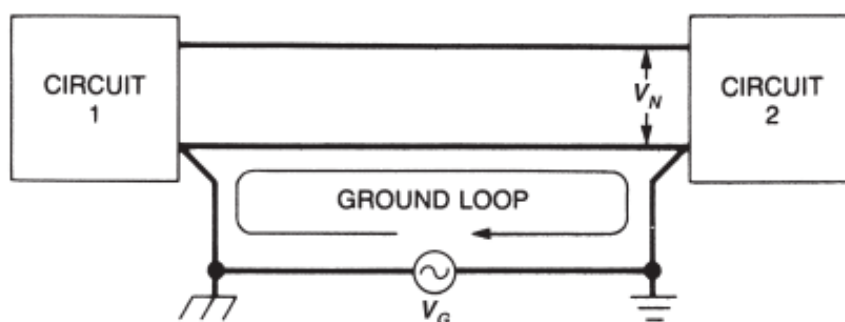


Рисунок 3.33 - Контур заземления между двумя цепями

В таких случаях может потребоваться обеспечить определенную дискриминацию или изоляцию от помех, возникающих на пути к земле.

На рисунке 3.33 показана система, заземленная в двух разных точках. На рисунке показаны два разных символа заземления, чтобы подчеркнуть тот факт, что две физически разделенные точки заземления, скорее всего, будут находиться на разных потенциалах. Такая конфигурация имеет три следующие потенциальные проблемы:

1. Разница потенциалов земли V_G между двумя заземлениями может привести к появлению в цепи напряжения помех V_N , как показано на рис. 3-33. Потенциал земли обычно является результатом других токов, протекающих через сопротивление земли.

2. Любые сильные магнитные поля могут навести напряжение помех в контуре, образованном сигнальными проводниками и землей, который на рис. 3-33 обозначен как "контур заземления".

3. Сигнальный ток имеет несколько путей возврата и может, особенно при низкой частоте, протекать через заземление и не возвращаться по обратному сигнальному проводнику.

Пункт 3 редко является проблемой на высокой частоте, поскольку большая петля, связанная с контуром возврата на землю, будет иметь гораздо большую индуктивность, чем меньшая петля, если ток возвращается по проводнику возврата сигнала. Следовательно, ток высокочастотного сигнала будет возвращаться по проводнику возврата сигнала, а не в землю.

Важна величина напряжения шума по сравнению с уровнем сигнала в цепи. Если отношение сигнал/шум таково, что работа схемы нарушается, необходимо принять меры для исправления ситуации. Однако во многих случаях ничего особенного делать не нужно.

Все контуры заземления не являются плохими, и проектировщику не следует паранойить по поводу наличия контура заземления. Большинство контуров заземления являются доброкачественными. Большинство реальных проблем с контуром заземления возникает на низких частотах, ниже 100 кГц, и они обычно связаны с чувствительными аналоговыми схемами, такими как аудио- или инструментальные системы. Классическим примером этого является гул 50/60 Гц в аудиосистеме. Петли заземления редко являются проблемой на высоких частотах, выше 100 кГц, или в цифровых логических системах. Опыт показывает, что попытки избежать контуров заземления вызывают больше проблем, чем сами контуры заземления. Некоторые контуры заземления на самом деле полезны, например, в случае, когда экран кабеля заземлен с обоих концов для обеспечения экранирования магнитного поля, как обсуждалось в разделе 2.5.

Если контуры заземления являются проблемой, то с ними можно бороться одним из трех следующих способов:

1. Избегайте их, используя одноточечные или гибридные заземления. Эта техника обычно эффективна только на низких частотах, а при попытке использовать ее на высоких частотах ситуация становится еще хуже.

2. Устраните их, минимизировав сопротивление заземления (например, с помощью ОПНС) и/или увеличив шумовой запас схемы (например, повысив уровень напряжения сигнала или используя сбалансированную схему).

3. Разбейте их, используя одну из описанных ниже техник.

Контур заземления, показанный на рис. 3.33, может быть разорван одним из следующих способов:

1. Трансформеры
2. Дроссели с сильным общим током
3. Оптические соединители

На рисунке 3.34 показаны цепи 1 и 2, изолированные с помощью трансформатора. Напряжение шума на земле теперь появляется между первичной и вторичной обмотками трансформатора, а не на входе схемы. Оставшаяся шумовая связь, если она есть, теперь зависит в основном от паразитной емкости между обмотками трансформатора, и ее можно еще больше уменьшить, поместив между обмотками трансформатора экран Фарадея.

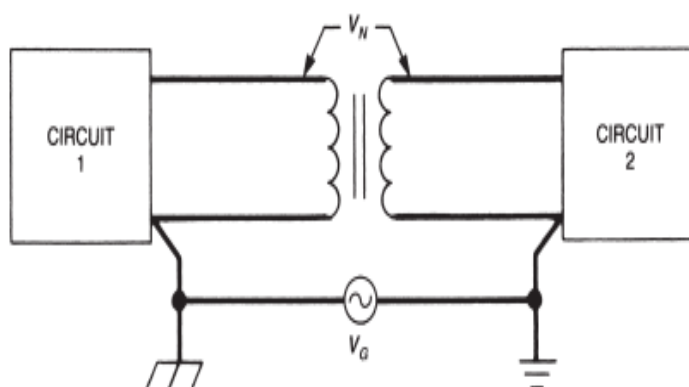


Рисунок 3.34 - Трансформатор, используемый для разрыва контура заземления между двумя цепями

Хотя трансформаторы обеспечивают отличные результаты, они имеют некоторые недостатки. Они часто большие, имеют ограниченную частотную характеристику, не обеспечивают непрерывность постоянного

тока и дорого стоят. Кроме того, если между цепями подключено несколько сигналов, то требуется несколько трансформаторов.

Большинство профессионального аудиооборудования использует балансный интерфейс, чтобы минимизировать восприимчивость к помехам и контурам заземления. Однако в большинстве бытового аудиооборудования используется менее дорогой небалансный интерфейс. Несбалансированный интерфейс гораздо больше подвержен влиянию синфазной связи (см. рис. 2.25), возникающей из-за контуров заземления, которые могут образоваться при соединении различных частей оборудования. Для устранения или разрыва контура заземления в соединительных сигнальных проводах часто используются изолирующие трансформаторы. На рисунке 3.35 показан двойной высококачественный разделительный трансформатор, который можно использовать для устранения гула и шума, вызванных контурами заземления в таких аудиоприложениях. Показанный модуль представляет собой сдвоенный блок, предназначенный для стереофонических соединений, в которых используются фоноштекеры RCA. Трансформаторы имеют мумиевые внешние экраны для уменьшения наводок магнитного поля, а также экраны Фарадея между первичной и вторичной обмотками для уменьшения межобмоточной емкости. Показанное устройство имеет частотную характеристику от 10 Гц до 10 МГц со вносимыми потерями менее 0,5 дБ и коэффициентом подавления общего шума 120 дБ на частоте 60 Гц и 70 дБ на частоте 20 кГц.

Обратите внимание, что при использовании изоляции для разрыва контура заземления, изоляция должна применяться к сигнальным соединениям, а не достигаться путем изоляции (разрыва) защитного заземления сети переменного тока. Последний подход является нарушением НЭК и может быть очень опасным.

На рис. 3.36 две цепи изолированы трансформатором, подключенным в качестве дросселя общей моды, который пропускает сигналы постоянного тока и сигналы дифференциальной моды, отклоняя при этом сигналы общей моды переменного тока. По сути, это трансформатор, повернутый на 90° и подключенный последовательно с сигнальными проводами. Теперь шумовое напряжение общего режима появляется на обмотках трансформатора (дросселя), а не на входе схемы.

Поскольку дроссель общей моды не влияет на передаваемый дифференциально-модовый сигнал, на один и тот же сердечник можно намотать несколько сигнальных проводов без наводок. Работа дросселя общей моды анализируется в разделах 3.5 и 3.6.

Оптическая связь (оптические изоляторы или оптоволокно), как показано на рис. 3.37, является еще одним очень эффективным

методом устранения синфазных помех, поскольку она разрывает металлический путь между двумя заземлениями. Он наиболее полезен, когда между двумя заземлениями существует большая разница в напряжении, даже в некоторых случаях сотни вольт. Нежелательное напряжение синфазного шума появляется на оптическом соединителе, а не на входе схемы.

Оптические соединители, как показано на рис. 3.37, особенно полезны в цифровых схемах. Они не так полезны в аналоговых схемах, поскольку линейность через муфту не всегда удовлетворительна. Однако аналоговые схемы были разработаны с использованием методов оптической обратной связи, чтобы компенсировать нелинейность, присущую соединителю.



Рисунок 3.35 - Двухканальный (стерео) аудиоразделительный трансформаторный блок, используемый для устранения гула, вызванного контуром заземления в аудиосистеме

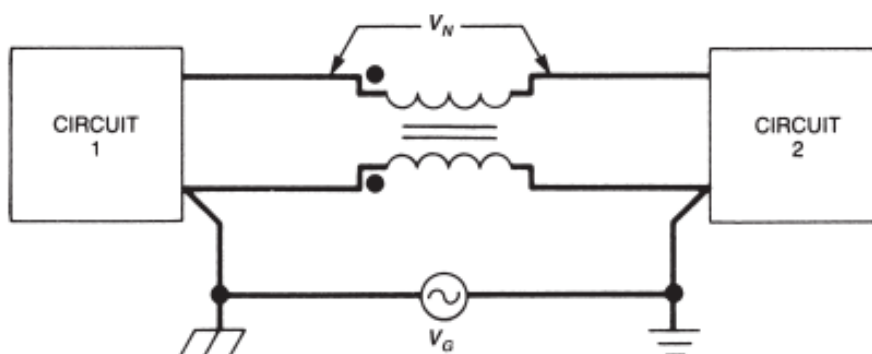


Рисунок 3.36 - Дроссель общего режима, используемый для разрыва контура заземления между двумя цепями

Изолирующие усилители (с внутренним трансформатором или оптической связью), однако, также доступны для использования в чувствительных аналоговых схемах.

Балансные схемы, как показано на рис. 3.38, позволяют повысить помехоустойчивость схемы, поскольку они способны различать напряжение шума общей моды и напряжение сигнала дифференциальной моды. В этом случае напряжение общего режима вызывает одинаковые токи в обеих половинах сбалансированной схемы, и сбалансированный приемник реагирует только на разницу между двумя входами. Чем лучше баланс, тем больше степень подавления общего режима. С ростом частоты добиться высокой степени баланса становится все сложнее. Балансировка рассматривается в главе 4.

Если напряжение синфазного шума находится на частоте, отличной от частоты желаемого сигнала, частотно-селективное гибридное заземление может быть использовано для предотвращения возникновения контура заземления на проблемной частоте.

Трансформатор можно использовать в качестве дросселя общей моды (также называемого продольным дросселем, нейтрализующим трансформатором или балуном) при подключении, как показано на рис. 3.39. Трансформатор, подключенный таким образом, имеет низкий импеданс для тока сигнала и обеспечивает связь по постоянному току. Однако для любого синфазного шумового тока трансформатор имеет высокий импеданс.

Сигнальный ток, показанный на рис. 3.39, течет одинаково по двум проводникам, но в противоположных направлениях. Это желаемый ток, который также известен как ток дифференциальной цепи или ток металлической цепи. Токи помех текут в одном направлении по обоим проводникам и называются токами общего режима.

Характеристики цепи для дросселя общего режима рис. 3.39. можно проанализировать, обратившись к эквивалентной схеме на рис. 3.39. Генератор напряжения V_s представляет собой сигнальное напряжение, которое подключено к нагрузке R_L проводниками с сопротивлениями R_{C1} и R_{C2} . Дроссель общего режима представлен двумя индуктивностями L_1 и L_2 и взаимной индуктивностью M . Если обе обмотки одинаковы и тесно соединены на одном сердечнике, то L_1 , L_2 и M равны. Генератор напряжения V_G представляет собой синфазное напряжение либо от магнитного связи в контуре заземления или от дифференциального напряжения на земле. Поскольку сопротивление проводника R_{C1} включено последовательно с R_L и имеет гораздо меньшую величину, им можно пренебречь.

Схема рис. 3.39 может быть перерисована, как показано на рис. 3.40. Этот Рисунок похож на схему рис. 2.22. Там было показано, что на частотах, превышающих $\omega = 5R_{C2} / L_2$, практически весь ток I_S возвращается к источнику через второй проводник, а не через плоскость земли. Если L_2 выбрано так, что самая низкая частота сигнала больше $5R_{C2} / L_2$ рад/с, то $I_G = 0$. При этих условиях напряжения вокруг верхнего контура рис. 3.40 можно просуммировать следующим образом:

$$V_S = j\omega(L_1 + L_2)I_S - 2j\omega MI_S + (R_L + R_{C2})I_S \quad (3.10)$$

Вспомнив, что $L_1 = L_2 = M$ и решив для I_S , получаем

$$I_S = \frac{V_S}{R_L + R_{C2}} = \frac{V_S}{R_L} \quad (3.11)$$

при условии, что R_L намного больше R_{C2} . Уравнение 3.11 соответствует уравнению, которое было бы получено при отсутствии дросселя. Поэтому оно не влияет на передачу сигнала до тех пор, пока индуктивность дросселя достаточно велика, чтобы частота сигнала была больше, чем $5R_{C2} / L_2$.

Реакцию схемы рис. 3.39 на напряжение синфазного сигнала V_G можно определить, рассмотрев эквивалентную схему, показанную на рис. 3.41. Если бы дросселя не было, то напряжение полного шума V_G появилось бы через R_L .

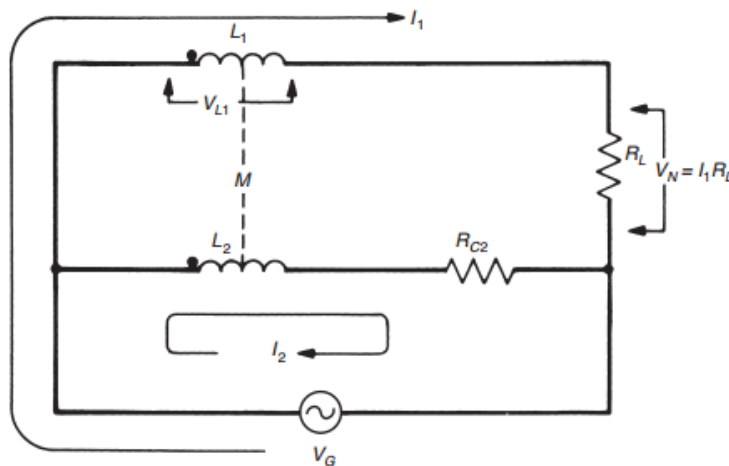


Рисунок 3.41 - Эквивалентная схема для рис. 3.39 для анализа реакции на напряжение общего режима V_G

При наличии дросселя напряжение шума, развиваемое через R_L , может быть определено путем составления уравнений вокруг двух

контуров, показанных на рисунке. Суммирование напряжений на внешнем контуре дает

$$V_G = j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 + I_1 R_L \quad (3.12)$$

Сумма напряжений в нижнем контуре равна

$$V_G = j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 + R_{C2} I_2 \quad (3.13)$$

Уравнение 3.13 может быть решено для I_2 , что дает следующий результат:

$$I_2 = \frac{V_G - j\omega M I_1}{j\omega L_2 + R_{C2}} \quad (3.14)$$

Вспомнив, что $L_1 = L_2 = M = L$, подставим уравнение 3.14 в уравнение 3.12 и решим для I_1 , получим

$$I_1 = \frac{V_G R_{C2}}{j\omega L(R_{C2} + R_L) + R_{C2} R_L} \quad (3.15)$$

Напряжение шума V_N равно $I R_{L1}$, а поскольку R_{C2} обычно намного меньше R_L , мы можем написать

$$V_N = \frac{\frac{V_G R_{C2}}{L}}{j\omega + \frac{R_{C2}}{L}} \quad (3.16)$$

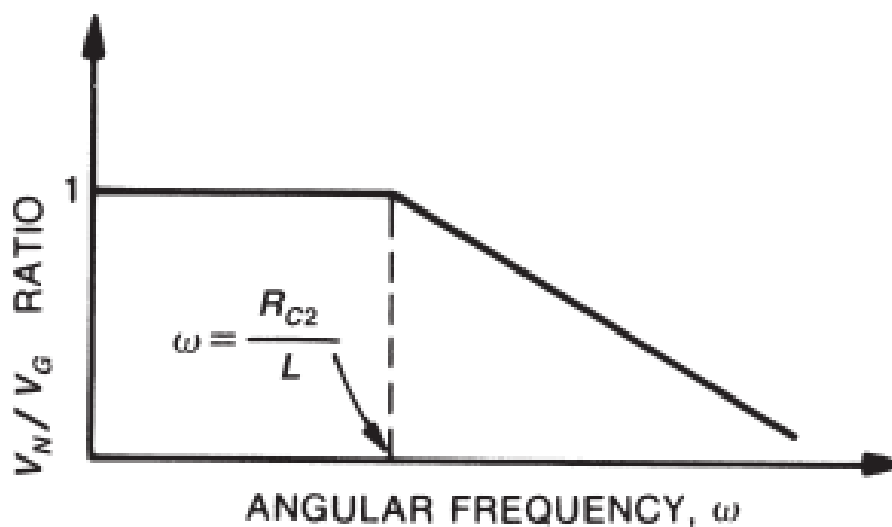


Рисунок 3.42 - Напряжение шума может быть значительным, если R_{C2} велико

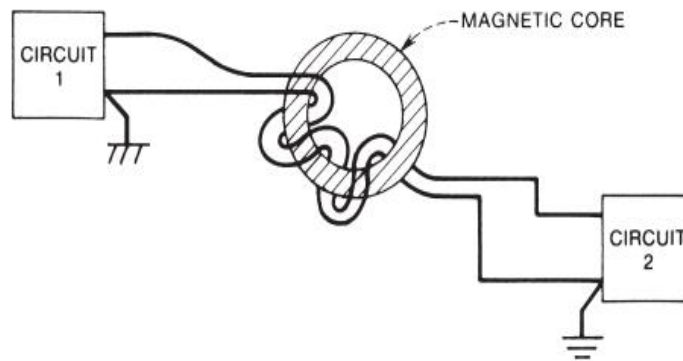


Рисунок 3.43 - Простой способ разместить в цепи дроссель общего режима - намотать оба проводника вокруг тороидального магнитопровода. Вместо показанных проводников можно также использовать коаксиальный кабель

Асимптотический график V_N / V_G показан на рис. 3.42. Чтобы минимизировать это напряжение шума, R_{C2} должно быть как можно меньше, а индуктивность дросселя L должна быть такой, чтобы

$$L \gg \frac{R_{C2}}{\omega} \quad (3.17)$$

где ω - частота шума. Дроссель также должен быть достаточно большим, чтобы любой несимметричный постоянный ток, протекающий в цепи, не вызывал насыщения.

Дроссель, показанный на рис. 3.39, можно легко изготовить; просто намотайте проводники, соединяющие две цепи, вокруг магнитного сердечника, как показано на рис. 3.43. На частотах выше 30 МГц часто эффективен дроссель с одним членом. Сигнальные проводники более чем одной цепи могут быть намотаны на один и тот же сердечник без интерференции сигнальных цепей (перекрестных наводок). Таким образом, один сердечник может быть использован для обеспечения дросселя общей моды для многих цепей.

3.5 Высокочастотный анализ дросселя с общим модом

Предыдущий анализ дросселя с синфазной нагрузкой был низкочастотным и не учитывал влияние паразитной емкости. Если дроссель будет использоваться на высоких частотах (> 10 МГц), то необходимо учитывать паразитную емкость обмоток. На рис. 3.44 показана эквивалентная схема двухпроводной линии передачи, содержащей дроссель с общим модом (L_1 и L_2). R_{C1} и R_{C2} представляют собой сопротивление обмоток дросселя плюс кабельных

проводников, а C_S - паразитную емкость по обмоткам дросселя. Z_L - это импеданс общего режима кабеля, а V_{CM} - напряжение общего режима, действующее на кабель. В данном анализе Z_L - это не импеданс дифференциальной моды, а импеданс кабеля, действующего в качестве антенны, который может изменяться от 35 до 350 Ом.

Вносимые потери (IL) дросселя можно определить как отношение тока общей моды без дросселя к току общей моды с дросселем. Для $R_{C1} = R_{C2} = R$ и $L_1 = L_2 = L$, IL дросселя можно записать как

$$IL = Z_L \sqrt{\frac{[2R(1-\omega^2 LC_S)]^2 + R^4(\omega C_S)^2}{[R^2 + 2R(Z_L - \omega^2 LC_S Z_L)]^2 + [2R\omega L + \omega C_S R^2 Z_L]^2}} \quad (3.18)$$

На рисунках 3.45 и 3.46 представлены графики уравнения 3.18 для случая, когда $R_{C1} = R_{C2} = 5\Omega$, а $Z_L = 200\Omega$. На рисунке 3.45 показаны вносимые потери для дросселя 10 мГ для различных значений шунтирующей емкости, а на рисунке 3.46 - вносимые потери для дросселя с шунтирующей емкостью 5 пФ и различными значениями индуктивности. Как видно из этих двух рисунков, вносимые потери на частотах выше 70 МГц не сильно зависят от индуктивности дросселя; однако она значительно изменяется в зависимости от емкости шунта. Поэтому наиболее важным параметром при определении характеристик дросселя является шунтирующая емкость, а не значение индуктивности. На самом деле, большинство дросселей, используемых в этих приложениях, находятся за пределами саморезонанса. Наличие паразитной емкости сильно ограничивает максимальные вносимые потери на высоких частотах. Трудно получить более 6-12 дБ вносимых потерь на частотах выше 30 МГц с помощью этой техники.

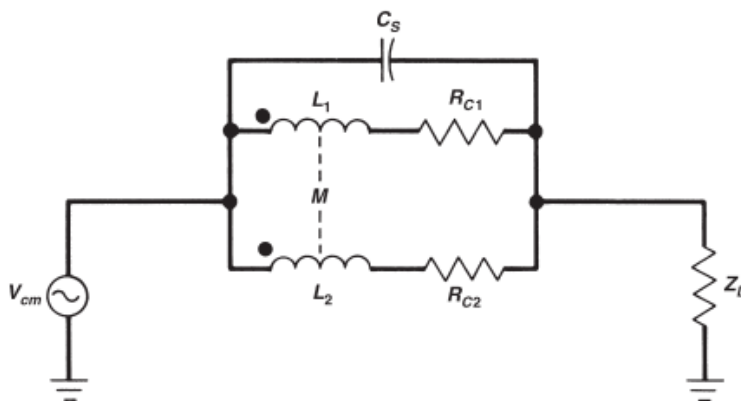


Рисунок 3.44 - Эквивалентная схема синфазного дросселя с паразитной шунтирующей емкостью C_S

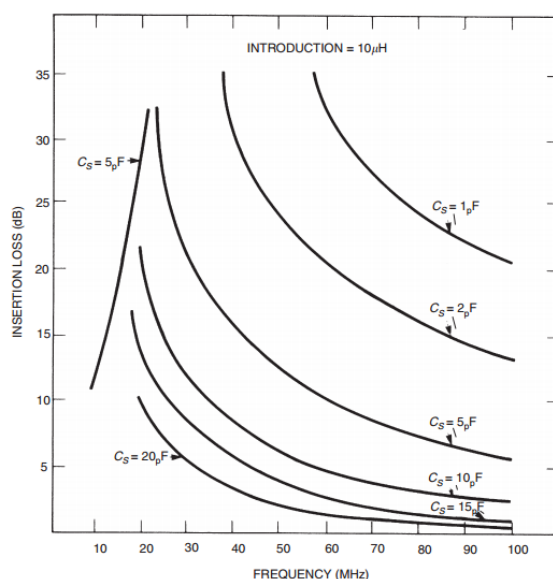


Рисунок 3.45 - Вносимые потери дросселя с общим модом 10 мГн при различных значениях шунтирующей емкости

На этих частотах дроссель можно рассматривать как разомкнутую цепь для токов синфазного шума. Поэтому общий ток синфазного шума в кабеле определяется паразитной емкостью, а не индуктивностью дросселя.

3.6 Единая точка заземления для цепи

Способ создания антенны, дипольной или монополярной, заключается в том, что между двумя кусками металла подается РЧ-потенциал; см. приложение D. Емкость между двумя кусками металла обеспечит путь для рф-тока. Антенны излучают энергию, а также принимают ее очень эффективно. На самом деле, на некоторых частотах эффективность дипольной антенны может превышать 98 %. Кстати, неважно, под каким потенциалом находятся половинки антенны; важно лишь, чтобы между ними существовала разность потенциалов. Чтобы предотвратить излучение, нужно соединить два куска металла так, чтобы они находились под одним потенциалом и, следовательно, не могли излучать - ведь без напряжения не будет протекать ток.

Многие системы содержат несколько земляных плоскостей, например, отдельные аналоговые и цифровые земляные плоскости, которые соединяются только в одной точке, возможно только у источника питания, как показано на рис. 17.2. Наличие в системе отдельных опорных плоскостей - хороший способ убедиться в том, что в системе спроектированы эффективные антенны. *Почти во всех случаях система будет работать лучше, как с функциональной точки зрения, так и с точки зрения ЭМС, при использовании одной опорной плоскости.*

ГЛАВА 4. БАЛАНСИРОВКА И ФИЛЬТРАЦИЯ

4.1 Балансировка

Сбалансированная цепь - это двухпроводная цепь, в которой оба сигнальных проводника и все подключенные к ним цепи имеют одинаковый ненулевой импеданс по отношению к эталону (обычно земле) и всем остальным проводникам. Цель балансировки - сделать шумовую наводку одинаковой в обоих проводниках; в этом случае это будет сигнал общей моды, который можно заставить погасить в нагрузке. Если импедансы двух сигнальных проводников к земле неравны, то система не сбалансирована. Поэтому схема с заземленным обратным проводником является несимметричной, и иногда ее называют односторонней.

Балансировка - это часто упускаемый из виду, хотя во многих случаях экономически эффективный метод снижения шума, который можно использовать вместе с экранированием, когда необходимо снизить шум ниже уровня, достижимого только с помощью экранирования. Кроме того, в некоторых случаях она может использоваться вместо экранирования в качестве основного метода снижения шума.

Чтобы сбалансированная схема была наиболее эффективной для снижения синфазных помех, необходимо, чтобы не только заделки были сбалансированы, но и межсоединения (кабель) были сбалансированы. Использование трансформаторов или дифференциальных усилителей - это два возможных подхода к обеспечению балансной заделки.

Отличным примером эффективности сбалансированной системы для снижения шума является телефонная система, где уровень сигнала обычно составляет несколько сотен милливольт. Телефонные кабели, состоящие из неэкранированных витых пар, часто проложены параллельно высоковольтным (от 4 до 14 кВ) линиям электропередачи переменного тока на протяжении многих миль, и в телефонной системе редко слышен гул 50/60 Гц. Это результат того, что телефонная система является сбалансированной системой; и источник, и нагрузка сбалансированы. В тех редких случаях, когда гул слышен, это связано с тем, что в линиях возник дисбаланс (например, вода попала в кабель), и проблема исчезнет, как только баланс будет восстановлен.

Рассмотрим цепь, показанную на рис. 4.1. Если R_{s1} равно R_{s2} , то источник сбалансирован, а если R_{L1} равно R_{L2} , то сбалансирована нагрузка. При этих условиях цепь будет сбалансирована, поскольку оба сигнальных проводника имеют одинаковое сопротивление относительно земли. Обратите внимание, что не обязательно, чтобы V_{s1}

было равно V_{s2} . Один или оба генератора могут быть даже равны нулю, и цепь все равно будет сбалансирована.

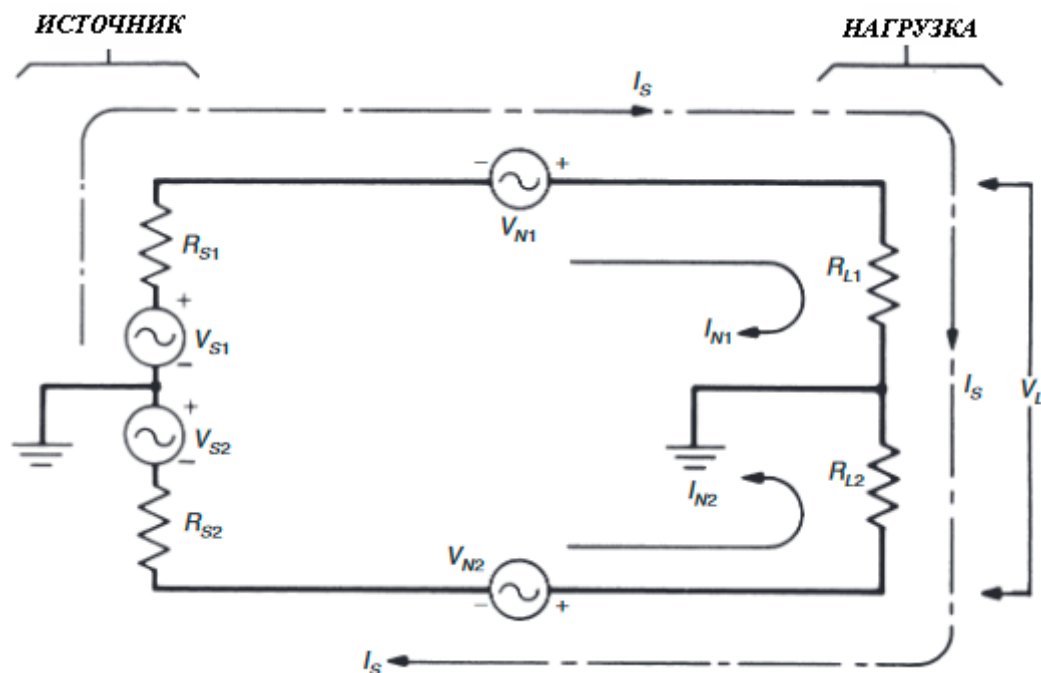


Рисунок 4.1 - Сбалансированная цепь с индуктивным и емкостным шумовыми напряжениями и разностью потенциалов земли между источником и нагрузкой

На рис. 4.1 последовательно с проводниками показаны два напряжения синфазного шума V_{N1} и V_{N2} . Эти шумовые напряжения создают шумовые токи I_{N1} и I_{N2} . Источники V_{s1} и V_{s2} вместе создают сигнальный ток I_s . Общее напряжение V_L , создаваемое на нагрузке, равно следующему:

$$V_L = I_{N1}R_{L1} - I_{N2}R_{L2} + I_s(R_{L1} + R_{L2}) \quad (4.1)$$

Первые два представляют собой напряжения шума, а третий член - напряжение желаемого сигнала. Если I_{N1} равно I_{N2} , а R_{L1} равно R_{L2} , то напряжение шума на нагрузке равно нулю. Тогда уравнение 4.1 сводится к который представляет собой напряжение, обусловленное только сигнальным током I_s

$$V_L = I_s(R_{L1} + R_{L2}) \quad (4.2)$$

На рисунке 4.1 для упрощения обсуждения показаны только резистивные заделки. В действительности важны как резистивный, так и реактивный баланс. Рисунок 4.2 является более общим, поскольку на

нем показаны как резистивные, так и емкостные заделки.

В сбалансированной цепи, показанной на рис. 4.2, V_1 и V_2 представляют собой индуктивные напряжения наводки, а генераторы тока I_1 и I_2 представляют собой шум, емкостно связанный с цепью. Разность потенциалов земли между источником и нагрузкой представлена V_{cm} . Если два сигнальных проводника 1 и 2 расположены рядом друг с другом, а еще лучше скручены вместе, то два индуктивно связанных шумовых напряжения V_1 и V_2 должны быть равны и аннулироваться на нагрузке.

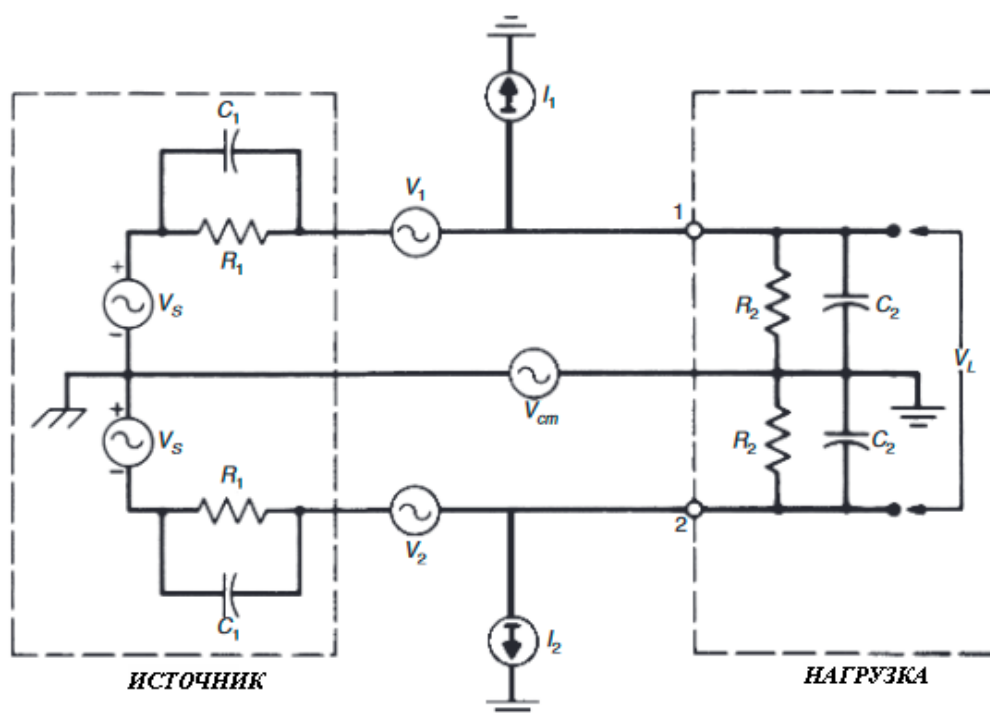


Рисунок 4.2 -Сбалансированная цепь с индуктивным и емкостным шумовыми напряжениями и разностью потенциалов земли между источником и нагрузкой

Напряжение шума между клеммами нагрузки 1 и 2, возникающее в результате емкостной связи, можно определить, обратившись к рис. 4.3. Конденсаторы C_{31} и C_{32} представляют собой емкостную связь от источника шума, в данном случае проводника 3. Импедансы R_{c1} и R_{c2} представляют собой полное сопротивление заземления проводников 1 и 2, соответственно.

Емкостное напряжение помех V_{N1} , индуцированное в проводнике 1 из-за напряжения V_3 на проводнике 3, равно (уравнение 2.2)

$$V_{N1} = j\omega R_{c1} C_{31} V_3 \quad (4.3)$$

Напряжение помех, индуцированное в проводнике 2 из-за V_3 , равно

$$V_{N2} = j\omega R_{c2} C_{32} V_3 \quad (4.4)$$

Если цепь сбалансирована, то сопротивления R_{c1} и R_{c2} равны. Если проводники 1 и 2 расположены рядом друг с другом, а еще лучше скручены вместе, то емкость C_{31} должна быть почти равна C_{32} . При таких условиях, V_{N1} приблизительно равно V_{N2} , и напряжения помех, связанные с емкостной связью, в нагрузке аннулируются.

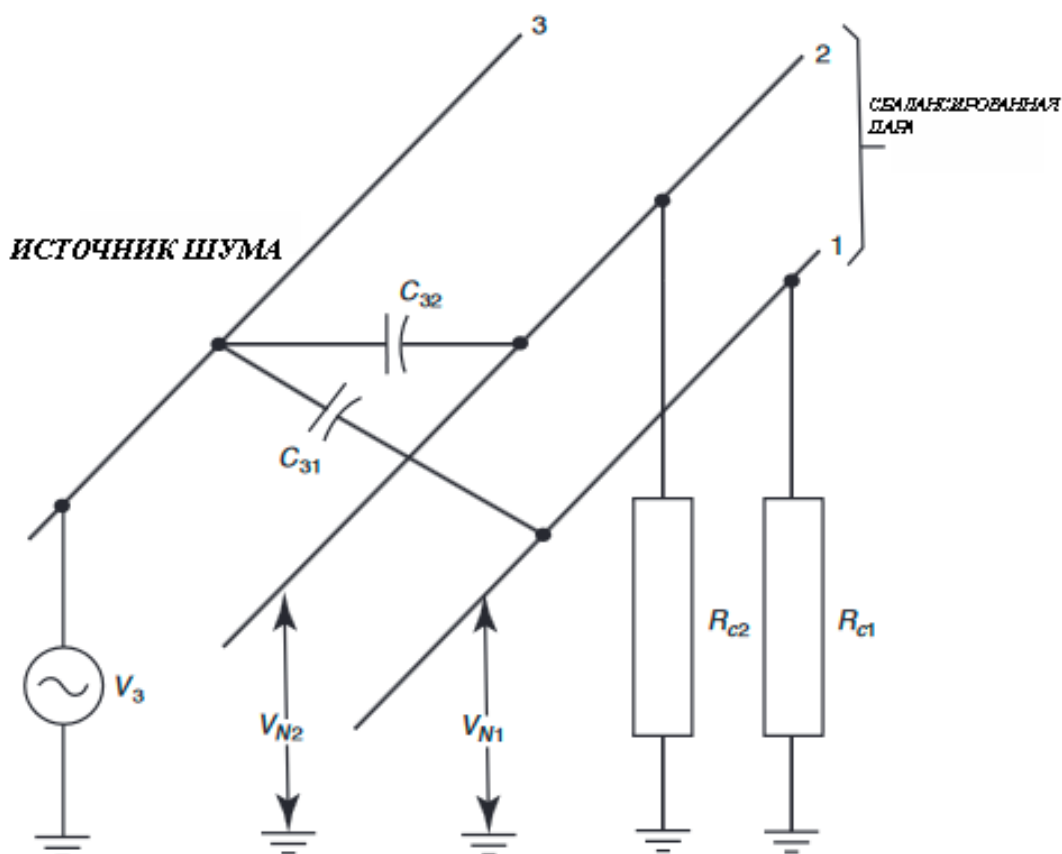


Рисунок 4.3 - Емкостная наводка в сбалансированных проводниках

Если заделки сбалансированы, то кабель витой пары может обеспечить защиту от емкостной связи. Поскольку витая пара также защищает от магнитных полей, независимо от того, сбалансированы заделки или нет (см. раздел 2.12), сбалансированная цепь с использованием витой пары будет защищать как от магнитных, так и от электрических полей, даже без экрана на проводниках. Однако экраны все же могут быть желательны, поскольку трудно добиться идеального баланса, и может потребоваться дополнительная защита.

На рис. 4.2 следует отметить, что разность потенциалов земли V_{cm} между источником и нагрузкой создает равные напряжения на клеммах 1 и 2 на нагрузке. Эти напряжения аннулируются и не создают нового

шумового напряжения на нагрузке.

4.1.1 Коэффициент отклонения синфазного сигнала

Коэффициент отклонения синфазного сигнала (КОСС) - это показатель, который может использоваться для количественной оценки степени сбалансированности или эффективности сбалансированной схемы в подавлении напряжений синфазного шума.

На рисунке 4.4 показана сбалансированная схема, к которой приложено напряжение общей моды V_{cm} . Если бы баланс был идеальным, то на входе усилителя не появилось бы дифференциально-модовое напряжение V_{dm} . Однако из-за небольшого дисбаланса, присутствующего в системе, небольшое напряжение шума дифференциального режима V_{dm} , которое является следствием напряжения общего режима V_{cm} .

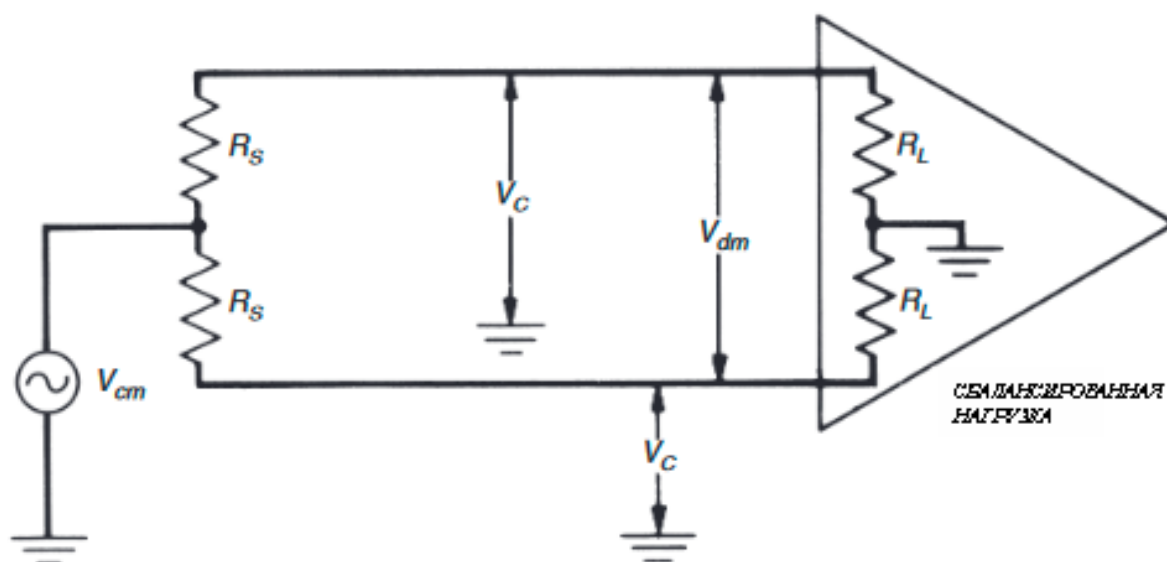


Рисунок 4.4. Схема, используемая для определения КОСС

КОСС, или баланс, в дБ, определяется как

$$\text{КОСС} = 20 \log \left(\frac{V_c}{V_{dm}} \right) \text{ дБ.} \quad (4.5)$$

Чем лучше баланс, тем выше КОСС и тем большего снижения синфазного шума можно добиться. Как правило, от 40 до 80 дБ КОСС можно ожидать от хорошо спроектированной схемы. КОСС лучше этого диапазона возможен, но может потребоваться индивидуальная обрезка схемы и специальные кабели. Если сопротивление источника R_S мало по сравнению с сопротивлением нагрузки R_L , что обычно и

происходит, то напряжение V_c с любого проводника на землю на входе усилителя будет почти равно V_{cm} , и его можно использовать вместо V_{cm} в уравнении 4.5, что дает следующее альтернативное определение КОСС:

$$\text{КОСС} = 20 \log \left(\frac{V_c}{V_{dm}} \right) \quad (4.6)$$

Если источник и нагрузка физически разделены значительным расстоянием (например, телефонная система), то определение в уравнении 4.6 обычно предпочтительнее, поскольку измерение V_c и V_{dm} может быть выполнено на одном и том же конце цепи.

В идеальной сбалансированной системе синфазный шум не попадает в цепь. Однако в реальном мире небольшие дисбалансы ограничивают возможности подавления шума; к ним относятся дисбаланс источника, дисбаланс нагрузки, дисбаланс кабеля, а также баланс любого паразитного или блуждающего импеданса. Необходимо учитывать как резистивный, так и реактивный баланс. Реактивный баланс становится более важным с увеличением частоты.

Во многих практических приложениях нагрузка сбалансирована, а источник - нет. КОСС, вызванный *несбалансированным сопротивлением источника* DR_s , можно определить, обратившись к рис. 4.5. В этом случае КОСС будет равен

Если R_L намного больше, чем $R_s + DR_s$, что обычно и происходит, то уравнение 4.7 можно переписать как

Если несимметричный источник (один конец источника заземлен) используется со сбалансированной нагрузкой, то DR_s будет равно полному сопротивлению источника R_s .

Например, если R_L равно 10 кОм, а DR_s - 10 Ом, то КОСС составит 60 дБ. Вредное влияние дисбаланса источника на шумовые характеристики схемы, показанной на рис. 4.5, можно уменьшить следующим образом:

- Снижение напряжения общего мода
- Уменьшение дисбаланса источника DR_s
- Увеличение импеданса нагрузки с общим модом R_L

КОСС, вызванный *несимметричным сопротивлением нагрузки*, можно определить, обратившись к рис. 4.6, где DR_L представляет собой несимметрию резисторов нагрузки.

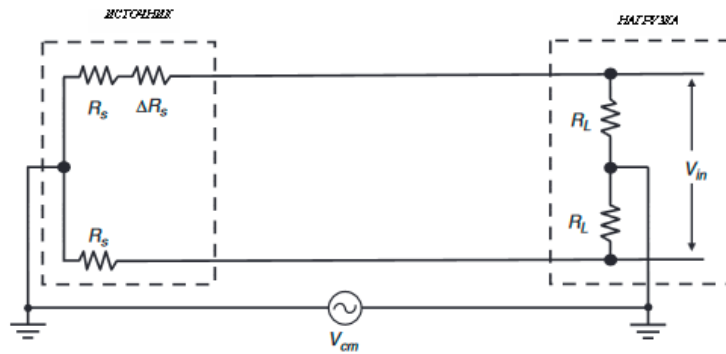


Рисунок 4.5 - Схема, используемая для демонстрации влияния несимметричного сопротивления источника на КОСС сбалансированной схемы

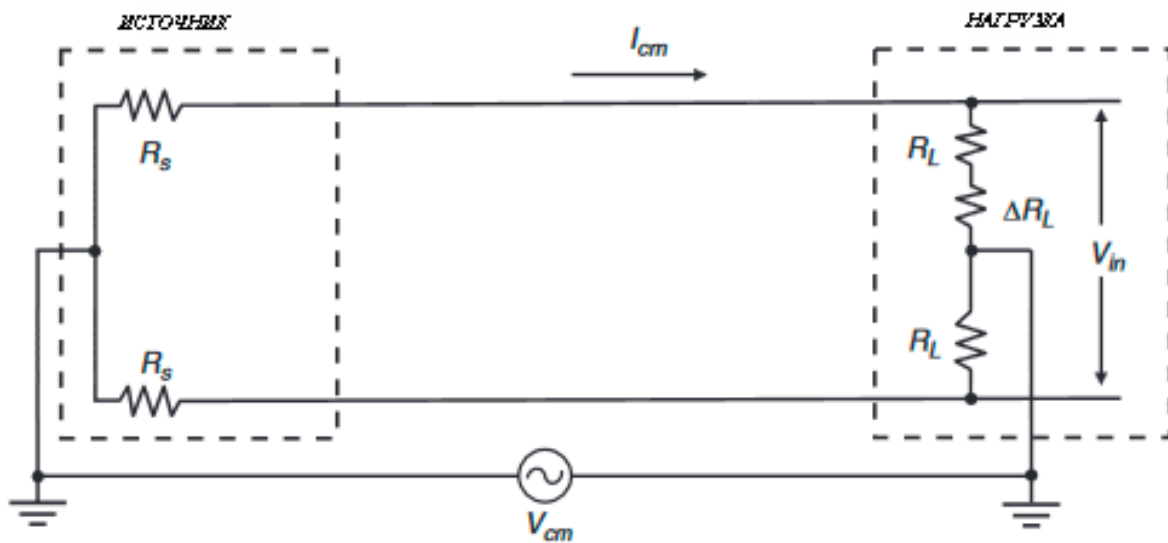


Рисунок 4.6 - Схема, используемая для демонстрации влияния несимметричного сопротивления нагрузки на КОСС в сбалансированной цепи

КОСС будет равен

$$\text{КОСС} = 20 \log \left[\frac{(R_L + R_s + \Delta R_L)(R_L + R_s)}{R_s \Delta R_L} \right] \quad (4.7)$$

Для R_L , значительно превышающего R_s , уравнение 4.8 сводится к

$$\text{КОСС} = 20 \log \left[\left(\frac{R_L}{R_s} \right) \left(\frac{R_L + \Delta R_L}{\Delta R_L} \right) \right] \quad (4.8)$$

Например, если R_s равно 100 О, R_L равно 10 кОм, а ΔR_L равно 100 О, то КОСС будет равен 80 дБ. Из уравнения 4-10 следует, что

КОСС зависит от отношения R_L / R_s ; чем оно больше, тем выше уровень подавления шума, независимо от значения DR_L . Поэтому низкий импеданс источника при высоком импедансе нагрузки обеспечит наибольший КОСС. В идеале мы хотели бы иметь нулевой импеданс источника и бесконечный импеданс нагрузки.

Из уравнений 4.8 и 4.9 можно сделать вывод, что большое сопротивление нагрузки максимизирует КОСС для случая как дисбаланса источника, так и дисбаланса нагрузки. Это верно, потому что если бы сопротивление нагрузки было бесконечным, то никакой ток не протекал бы и никакое падение напряжения шума не возникало бы через несимметричное сопротивление источника или нагрузки для передачи в цепь.

Если нагрузочные резисторы на рис. 4.6 на самом деле являются дискретными резисторами с допуском $x\%$, то в худшем случае один нагрузочный резистор может быть на $x\%$ выше, а другой - на $x\%$ ниже. Если p - допуск резистора (выраженный числом, а не процентами), то $DR_L = 2 p R_L$ или $DR_L / R_L = 2 p$. Таким образом, для случая $R_L \gg DR_L$ член $DR_L / (R_L + DR_L)$ в уравнении 4.9 представляет собой вдвое большее значение допуска на резистор. Уравнение 4.9 может быть переписано в виде

$$\text{КОСС} = 20 \log \left[\left(\frac{1}{2p} \right) \left(\frac{R_L}{R_s} \right) \right] \quad (4.9)$$

где p - допуск нагрузочных резисторов, выраженный в числовом виде. Например, если R_s равно 500 Ом, а нагрузочные резисторы R_L - каждый по 10 кОм, 1%-ные резисторы, то КОСС в худшем случае может составить до 60 дБ.

4.1.2 Кабельный баланс

Что касается соединительного кабеля, то между двумя проводниками должен поддерживаться резистивный и реактивный баланс. Поэтому сопротивление и реактивность каждого проводника должны быть равны. Во многих случаях дисбаланс цепи больше, чем дисбаланс кабеля. Однако, когда требуется большая величина подавления общих мод, более 100 дБ, или используются очень длинные кабели, необходимо учитывать недостатки кабеля.

Резистивный дисбаланс большинства кабелей пренебрежимо мал, и обычно им можно пренебречь. Емкостной дисбаланс обычно находится в диапазоне от 3 до 5 %. На низких частотах этот дисбаланс обычно можно игнорировать, поскольку емкостные реакции намного больше, чем другие импедансы в цепи. Однако на высоких частотах

емкостной дисбаланс, возможно, придется учитывать.

Индуктивные дисбалансы практически не встречаются в кабелях с экраном из оплетки, если они правильно заделаны. Однако неправильная заделка экранов кабелей, то есть отсутствие контакта 360° с экраном, может стать проблемой.

Кабели с экраном из фольги, содержащие дренажный провод, имеют значительно больший индуктивный дисбаланс, чем кабели с экраном из оплетки, из-за наличия тока в дренажном проводе. Дренажный провод обычно находится физически ближе к одному из сигнальных проводников и, следовательно, более тесно связан с ним, чем с другим. Поскольку сопротивление дренажного провода более чем на порядок меньше сопротивления экрана из алюминиевой фольги, на низкой частоте почти весь ток экрана течет по дренажному проводу, а не по экрану. Это может вызвать значительный дисбаланс в индуктивной связи с сигнальными проводниками.

Выше 10 МГц скин-эффект заставляет ток экрана течь по фольге, и индуктивный дисбаланс значительно уменьшается. Однако если экранированный фольгой кабель заделан через дренажный провод, что обычно и происходит, индуктивный дисбаланс снова появится вблизи концов кабеля, поскольку ток экрана уже не будет равномерно распределен по сечению экрана из фольги. Из-за двух вышеупомянутых проблем - индуктивного дисбаланса, возникающего из-за тока в дренажном проводе, и/или неправильной заделки экрана - экранированные фольгой кабели с дренажными проводами не следует использовать в чувствительных цепях, требующих подавления синфазных помех в большом количестве.

Эффекты балансировки и экранирования являются аддитивными. Экранирование может использоваться для уменьшения наводок на общий режим в сигнальных проводах, а балансировка уменьшает часть напряжения общего режима, которое преобразуется в напряжение дифференциального режима и подключается к нагрузке.

Предположим, что цепь построена с балансом 60 дБ, а кабель не экранирован. Предположим также, что каждый проводник получает напряжение синфазного шума 300 мВ за счет связи электрических полей. Из-за балансировки шум, передаваемый в нагрузку, будет на 60 дБ ниже этого значения, или 300 мВ. Если теперь вокруг проводников установить заземленный экран с эффективностью экранирования 40 дБ, то напряжение синфазного сигнала на каждом проводнике снизится до 3 мВ. Шум, передаваемый в нагрузку, будет на 60 дБ ниже, чем из-за баланса, или на 3 мВ. Таким образом, общее снижение шума составит 100 дБ – 40 дБ за счет экранирования и 60 дБ за счет балансировки.

Баланс цепи зависит от частоты. Обычно, чем выше частота, тем сложнее поддерживать баланс, потому что паразитная емкость

оказывает большее влияние на баланс цепи на высокой частоте.

4.1.3 Баланс системы

Знание КОСС, обеспечиваемого отдельными компонентами, составляющими систему, не всегда позволяет предсказать общий КОСС системы при объединении компонентов. Например, дисбаланс двух компонентов может дополнять друг друга таким образом, что комбинированный КОСС будет больше, чем КОСС любого из отдельных компонентов. Однако баланс компонентов может быть таким, что комбинированный КОСС будет меньше, чем КОСС любого из отдельных компонентов.

Один из способов гарантировать хороший баланс системы - указать КОСС для каждого компонента выше, чем желаемый КОСС системы. Однако этот метод может не дать наиболее экономичной системы. Если для построения системы используется несколько отдельных компонентов, один из способов оценить общий КОСС системы - принять его равным КОСС наихудшего компонента. Этот метод особенно полезен, если КОСС наихудшего компонента на 6 дБ или более ниже, чем у других компонентов.

Поскольку кабель витой пары по своей природе имеет сбалансированную конфигурацию, витая пара или экранированная витая пара часто используются в качестве соединительных кабелей в сбалансированной системе. Коаксиальный кабель (коаксиал), однако, по своей сути является несимметричным. Если коаксиальный кабель должен использоваться в сбалансированной системе, то можно использовать два кабеля, как показано на рис. 4-7.

4.1.4 Сбалансированные нагрузки

4.1.4.1 Дифференциальные усилители. Дифференциальные усилители часто используются в качестве нагрузки в балансных системах. На рисунке 4-8 показана схема базового дифференциального усилителя. Он состоит из операционного усилителя (или оп-усилителя), показанного треугольным блоком, окруженного обратной связью и несколькими резисторами, которые определяют производительность схемы. Оптический усилитель имеет дифференциальный вход и односторонний выход. Характеристики *идеального* операционного усилителя следующие:

- Очень большой коэффициент усиления по напряжению A , который в идеале приближается к бесконечности
- Бесконечное входное сопротивление R_{in} между $+$ и $-$ входными

клеммами.

- Нулевое выходное сопротивление R_o
- Бесконечный КОСС

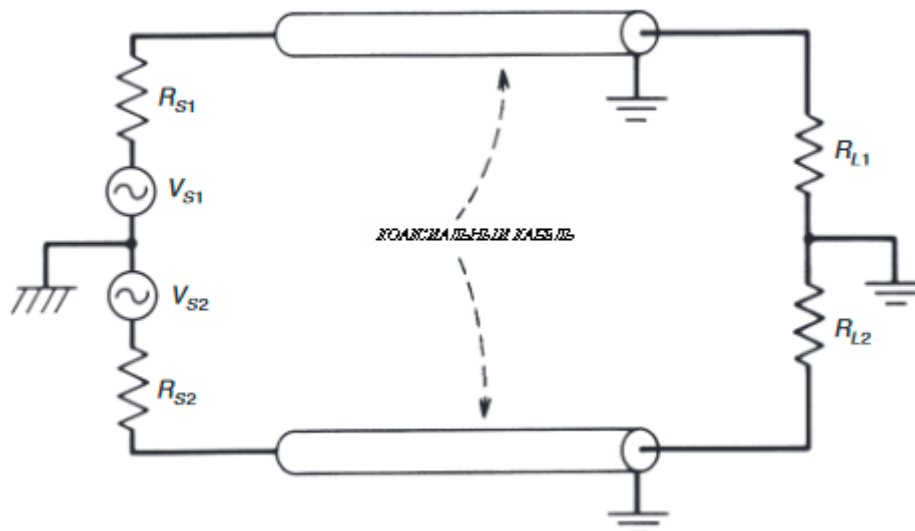


Рисунок 4.7 - Использование коаксиального кабеля в балансной схеме

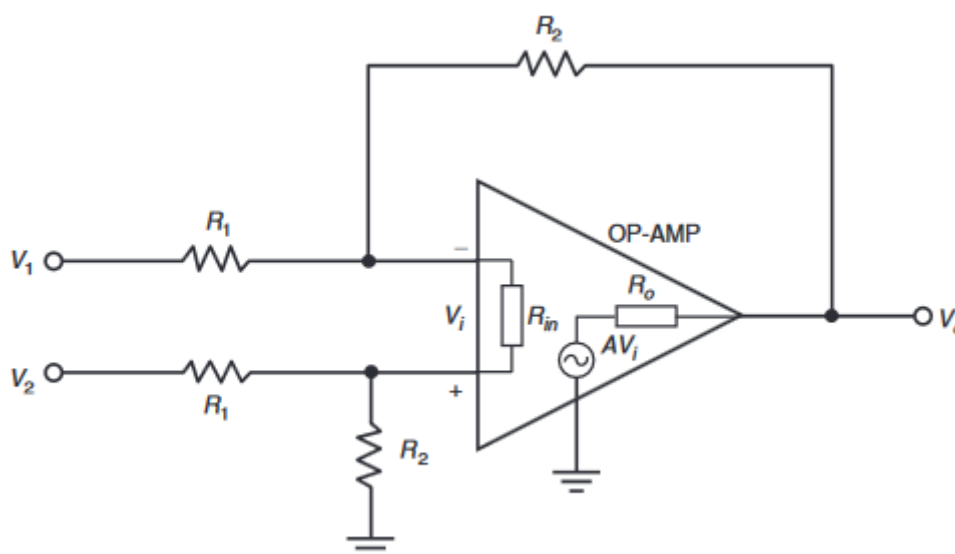


Рисунок 4.8 - Базовая схема дифференциального усилителя

Эти идеальные характеристики оп-ампа никогда не реализуются на практике, но к ним можно приблизиться. Типичный операционный усилитель может иметь коэффициент усиления по постоянному току (dc) 100 000, входным сопротивлением в несколько мегаом и выходным сопротивлением в несколько ом. КОСС одного только операционного усилителя, без дополнительных резисторов обратной связи, обычно находится в диапазоне 70-80 дБ. Когда резисторы добавляются для

формирования практического усилителя, предположение об идеальном блоке усиления (оп-усилителе) значительно упрощает анализ. Добавляя обратную связь и дополнительные резисторы, можно сконфигурировать операционный усилитель как односторонний, дифференциальный, инвертирующий или неинвертирующий усилитель.

Усилитель, показанный на рис. 4.8, представляет собой инвертирующий усилитель с дифференциальным входом.

Коэффициент усиления по напряжению в дифференциальном режиме усилителя равен

$$A_{dm} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.10)$$

Обратная связь, подключенная к отрицательной входной клемме, приводит напряжение между + и входными клеммами к низкому значению, теоретически к нулю. Поскольку напряжение между положительными и отрицательными клеммами усилителя невелико (в идеале равно нулю), входной импеданс дифференциального режима между входными клеммами V_1 и V_2 просто равен

$$R_{in(dm)} = 2R_1. \quad (4.11)$$

Обратите внимание, что через вход операционного усилителя фактически не течет ток, поскольку в идеале его импеданс бесконечен; входной ток фактически течет через резистор обратной связи на выход и обратно через резисторы R_2 и R_1 , подключенные к положительному выводу усилителя.

Входной импеданс общего режима между двумя входными клеммами (V_1 и V_2 связаны вместе) и землей равен

$$R_{in(dm)} = \frac{(R_1 + R_2)}{2} \quad (4.12)$$

На рисунке 4.6 можно изобразить дифференциальный усилитель, управляемый от сбалансированного источника, если R_L на рисунке 4.6 будет равно $R_1 + R_2$ на рисунке 4.8. Тогда эквивалентное дифференциальное входное напряжение V_{in} (на рис. 4.6) будет равно напряжению между V_1 и V_2 (на рис. 4.8). Входное напряжение V_{in} , создаваемое напряжением общего режима V_{cm} (как показано на рис. 4.6), будет равно входному току общего режима I_{cm} , умноженному на дисбаланс сопротивления нагрузки DR_L , или $V_{in} = I_{cm} D (R_1 + R_2)$. Ток I_{cm} равен $V_{cm} / [R_s + D(R_1 + R_2) + (R_1 + R_2)]$. Для случая $R_2 \gg R_1$, $R_2 \gg D(R_1 + R_2)$ и $R_2 \gg R_s$, эквивалентное

входное напряжение дифференциального режима усилителя равно

$$V_{in} = \frac{\Delta R_2}{R_2} (V_{cm}) \quad (4.13)$$

Выходное напряжение усилителя V_{out} , создаваемое напряжением общей моды V_{cm} , будет равно V_{in} из уравнения 4.13, умноженному на дифференциальный коэффициент усиления A_{dm} усилителя (уравнение 4.10), или

$$V_{out} = \frac{\Delta R_2}{R_2} (A_{dm} V_{cm}) \quad (4.14)$$

Таким образом, коэффициент усиления по напряжению общего мода составит

$$A_{cm} = \frac{V_{out}}{V_{cm}} = \frac{\Delta R_2}{R_2} (A_{dm}) = \frac{\Delta R_2}{R_1} \quad (4.15a)$$

Выражение $\Delta R_2 / R_2$ в уравнении 4.15a представляет собой, в худшем случае, удвоенный допуск резистора R_2 . Если допуск резистора равен p (выражается числом, а не процентами), то уравнение 4-15a может быть переписано как

$$A_{cm} = 2p A_{dm} = \frac{2p R_2}{R_1} \quad (4.15b)$$

КОСС дифференциального усилителя можно определить, подставив V_{in} (уравнение 4.13) для V_{dm} в уравнении 4.3, что дает

$$\text{КОСС} = 20 \log \left(\frac{V_{cm}}{V_{in}} \right) = 20 \log \left(\frac{R_2}{\Delta R_2} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{2p} \right) \quad (4.16)$$

Если дифференциальный усилитель, показанный на рис. 4.8, построен с использованием 0,1% резисторов для R_1 и R_2 КОСС, исходя из уравнения 4.16, будет равен 54 дБ.

Во многих КОСС дифференциального усилителя определяется как

$$\text{КОСС} = 20 \log \left(\frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right) \quad (4.17)$$

Подстановка уравнения 4-15b в уравнение 4-1 для A_{cm} дает КОСС = $20 \log (1/2p)$, что согласуется с уравнением 4-16.

При использовании согласованных резисторов и питании от сбалансированного источника дифференциальный усилитель может

обеспечить высокий КОСС. Однако при питании от несбалансированного источника, как показано на рис. 4-9, что часто случается, КОСС значительно ухудшается из-за дисбаланса источника. КОСС сбалансированной схемы, управляемой от несимметричного источника, приведен в уравнении 4.8. Это уравнение можно переписать для схемы дифференциального усилителя, показанной на рис. 4.9, следующим образом для случая $R_2 \gg R_1$

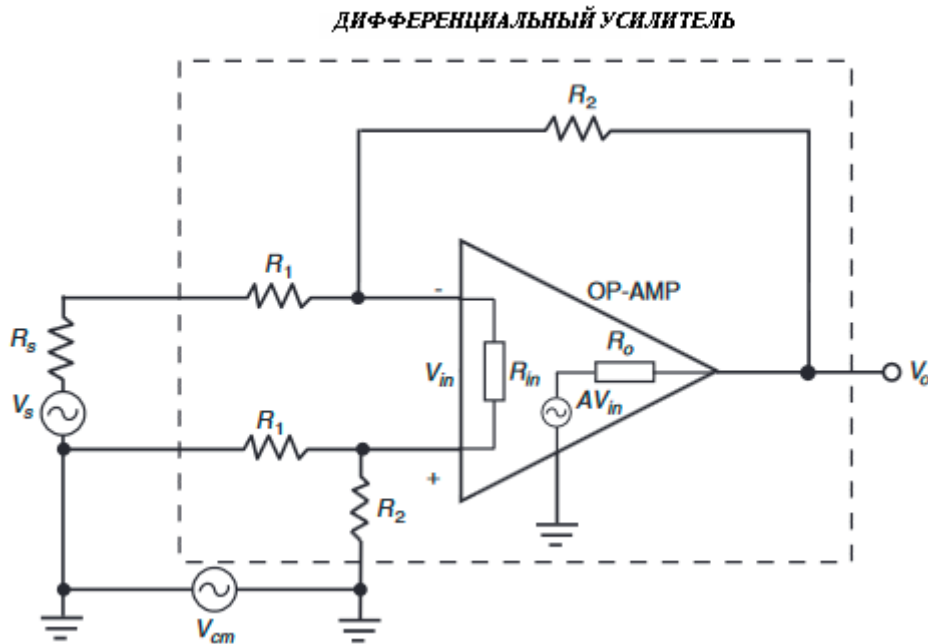


Рисунок 4.9 - Дифференциальный усилитель, управляемый от несимметричного источника.

$$\text{КОСС} = 20 \log \left(\frac{R_2}{R_s} \right) \quad (4.18)$$

На рис. 4/9, если $R_s = 500$ Ом, а $R_2 = 100$ кО, то из уравнения 4.18 следует, что КОСС = 46 дБ. Из уравнения 4.18 видно, что увеличение входного сопротивления дифференциального усилителя пропорционально увеличивает КОСС. Уменьшение сопротивления источника R_s также увеличит КОСС усилителя.

Поэтому лучший способ улучшить КОСС дифференциального усилителя, работающего от несимметричного источника, - увеличить входной импеданс усилителя до значения в несколько мегаом или больше. Если бы в предыдущем примере R_2 был равен 2 МОм вместо 100 кОм, то КОСС составил бы 72 дБ, то есть улучшение составило бы 26 дБ. Однако такие резисторы большого номинала обычно нецелесообразны и являются источником теплового шума на входе. Величина теплового шума в резисторе зависит от квадратного корня из

величины сопротивления.

4.1.4.2. *Приборные усилители.* Альтернативный подход заключается в добавлении двух высокоимпедансных буферных усилителей к входам стандартного дифференциального усилителя. Высокоомный неинвертирующий буфер можно сделать из стандартного операционного усилителя, подав входной сигнал на положительный вывод, а обратную связь - на отрицательный. Этот метод позволяет получить классический инструментальный усилитель, как показано на рис. 4.10.

Конфигурация инструментального усилителя также имеет преимущество в том, что регулировка усиления осуществляется одним резистором (kR_f), вместо того, чтобы изменять соотношение двух пары резисторов.

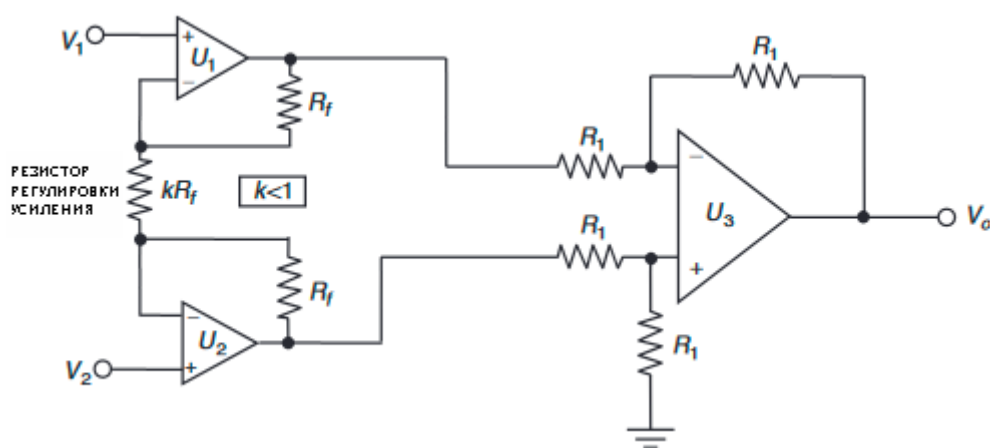


Рисунок 4.10. Приборный усилитель

В этом случае входной импеданс инструментального усилителя равен входному импедансу операционного усилителя, поскольку на положительный входной вывод операционных усилителей не подается обратная связь. При такой конфигурации возможно входное сопротивление более мегаома.

Если входы инструментального усилителя связаны с переменным током (АС), в схему рис. 4.10 между входами буфера и землей необходимо добавить дополнительные шунтирующие резисторы, чтобы обеспечить путь для протекания токов смещения входных транзисторов. Поэтому следует использовать транзисторы с очень низким током смещения или FET-оптические усилители. Входной импеданс сильной моды в этом случае будет параллельной комбинацией этих входных резисторов и входного импеданса ОУ.

В инструментальном усилителе коэффициент усиления находится в буферных усилителях (U_1 и U_2), а дифференциальный усилитель (U_3) имеет коэффициент усиления, равный единице. Буферные

усилители имеют коэффициент усиления по общей моде, равный 1, и коэффициент усиления по дифференциальной моде, равный $A_{dm} = 1 + (2/k)$, где k - константа, меньшая единицы.

Поскольку буферы имеют коэффициент усиления по общей моде, равный единице, вся подавление общей моды происходит в дифференциальном усилителе U_3 . В таблице 4.1 приведены коэффициенты усиления двух каскадов инструментального усилителя.

Из уравнения 4.17 следует, что КОСС инструментального усилителя составляет

$$\text{КОСС} = 20 \log \left(\frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right) = 20 \log \left(\frac{A_{dm}}{2p} \right) = 20 \log \left(\frac{1+2/k}{2p} \right) \quad (4.19)$$

Сравнивая уравнение 4.19 с уравнением 4.16а, мы видим, что при одинаковых допусках резисторов инструментальный усилитель имеет КОСС на $20 \log (A_{dm})$ больше, чем эквивалентный дифференциальный усилитель. Для инструментального усилителя с коэффициентом усиления 100, использующего резисторы 0,1%, КОСС составит 94 дБ. Дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления 100, использующий 0,1 % резисторов, будет иметь (из уравнения 4-18а) КОСС только 54 дБ.

Таблица 4.1. Дифференциально-модовые и синфазные коэффициенты усиления каскадов инструментального усилителя, показанных на рис. 4.10.

Усиление	Буферные усилители (U_1 и U_2)	Дифференциальный усилитель (U_3)	Итого для инструментального усилителя
A_{dm}	$1+(2/k)$	1	$1+(2/k)$
A_{cm}	1	$2p$	$2p$

Примечание: p - допуск резисторов R_1 , выраженный в числовом виде

Таблица 4.2. КОСС, в дБ, для инструментального усилителя

Допуск на резистор	$A_{dm} = 1$	$A_{dm} = 10$	$A_{dm} = 100$	$A_{dm} = 1000$
1%	34	54	74	94
0.1%	54	74	94	114
0.01%	74	94	114	134

В дифференциальном усилителе на входе усилителя происходит преобразование сигнала общего режима в сигнал дифференциального режима за счет допусков резисторов. Этот преобразованный сигнал

общей моды (теперь уже сигнал дифференциальной моды) усиливается за счет коэффициента усиления дифференциальной моды усилителя. В инструментальном усилителе аналогичное преобразование происходит на входе дифференциального усилителя (U_3 на рис. 4.10), но у этого усилителя коэффициент усиления дифференциального режима равен единице, поэтому усиление преобразованного сигнала общего режима не происходит.

Поэтому улучшение КОСС инструментального усилителя обусловлено тем, что усиление в буферах U_1 и U_2 происходит до преобразования общей моды в дифференциальную, которое происходит на входе дифференциального усилителя с единичным коэффициентом усиления U_3 .

В таблице 4.2 приведены значения КОСС для инструментального усилителя в зависимости от допуска резистора и коэффициента усиления дифференциального режима.

4.1.4.3 Входы с трансформаторной связью. Другой подход к получению высокого входного импеданса по общей моде заключается в использовании трансформатора. Трансформатор можно использовать с дифференциальным усилителем или даже с односторонним усилителем, как показано на рис. 4.11. При использовании трансформатора низкочастотный входной импеданс общей моды будет определяться сопротивлением изоляции (которое очень велико) между первичной и вторичной обмотками трансформатора. На высокой частоте межобмоточная емкость трансформатора также может влиять на входной импеданс общей моды. Трансформаторы также обеспечивают гальваническую развязку между источником и нагрузкой. Трансформаторы, однако, как правило, большие и дорогие, но хорошо работают.

4.1.4.4 Заделка экранов входного кабеля. Как уже говорилось, экраны кабелей обычно должны быть заземлены с обоих концов. Однако при использовании схем усилителей с высоким входным импедансом, таких как инструментальные усилители, экран входного кабеля часто подключается только к земле источника, а не к земле нагрузки. Если экран подключен к земле нагрузки или усилителя, то высокий входной импеданс усилителя будет шунтирован емкостью кабеля, что снизит входной импеданс усилителя и уменьшит КОСС системы. Если же экран кабеля заземлен на источник, то емкость кабеля шунтирует сопротивление источника, которое и так невелико, и не снижает КОСС. Однако такой подход часто приводит к увеличению излучения изделия, если в нем также присутствуют высокочастотные или цифровые схемы. Поэтому необходимо найти компромисс между максимальным КОСС и излучением. Чтобы минимизировать излучение, экран должен быть заземлен с обоих концов.

4.2 Фильтрация

Фильтры используются для изменения характеристик сигналов или, в некоторых случаях, для их устранения. Фильтры могут быть дифференциального или общего режима. Фильтры сигнальной линии, или дифференциально-модовые, хорошо изучены. Существует множество книг и статей по их проектированию. Фильтры общего режима, однако, часто считаются загадочными и не очень понятными.

4.2.1 Фильтры общих мод

Фильтры общего режима обычно используются для подавления помех в кабелях, позволяя при этом беспрепятственно пропускать сигнал дифференциального режима. Почему фильтры общего режима сложнее проектировать, чем фильтры дифференциального режима? В основном есть три причины:

- Обычно мы не знаем импеданс источника.
- Обычно мы не знаем импеданс нагрузки.
- Фильтр не должен исказить намеренный сигнал (сигнал дифференциальной моды) в кабеле.

Эффективность фильтра зависит от импеданса источника и нагрузки, между которыми он работает. Для фильтра дифференциального режима обычно легко найти информацию о выходном импедансе драйвера и входном импедансе нагрузки. Однако для сигналов с общей модой источником является шум, создаваемый схемой (нигде не документированный), а нагрузкой - обычно какой-нибудь кабель, выполняющий роль антенны, импеданс которого обычно не известен и меняется в зависимости от частоты, длины кабеля, диаметра проводников и прокладки кабеля.

В случае фильтра общих мод импедансом источника обычно является импеданс заземления печатной платы (PCB) (который мал и увеличивается с частотой, поскольку является индуктивным), а нагрузкой - импеданс кабеля, выполняющего роль антенны (который, за исключением резонанса кабеля, велик). Таким образом, хотя мы не можем точно знать импедансы источника и нагрузки, мы имеем представление об их величине и частотных характеристиках.

Чтобы фильтр общей моды не искажал намеренный сигнал дифференциальной моды, полоса пропускания фильтра дифференциальной моды должна быть такой, чтобы она удовлетворяла следующим требованиям:

- Для узкополосных сигналов самая высокая частота
- В случае широкополосных цифровых сигналов - $1/\pi$ t_r частота

сигнала (где tr - время нарастания).

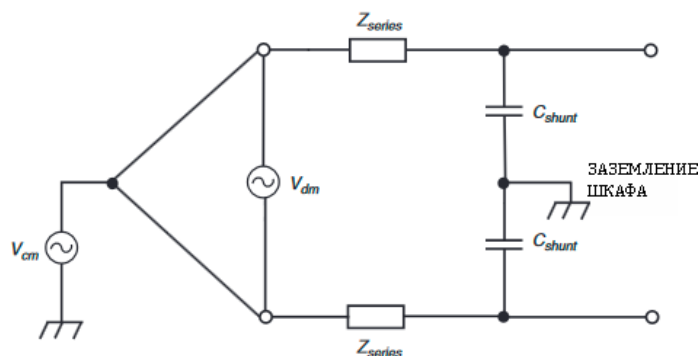


Рисунок 4.12 - Двухэлементный фильтр общих мод в сигнальном и обратном проводах

Фильтры дифференциального режима или сигнальной линии (например, фильтры тактовой линии и т. д.) следует размещать как можно ближе к источнику или драйверу. Однако фильтры общих мод должны располагаться как можно ближе к месту входа или выхода кабеля из корпуса.

На рисунке 4.12 показан простой двухэлементный фильтр низких частот, состоящий из последовательного и шунтирующего элементов. Фильтр вставляется как в сигнальный проводник, так и в его обратный проводник. На рисунке также показан источник напряжения общего режима (шум) и дифференциального режима (сигнал), подключенный к фильтру.

Для источника напряжения общего режима два шунтирующих конденсатора соединены параллельно, и их общая емкость составляет $2 C_{shunt}$. Для источника напряжения дифференциального режима два конденсатора соединены последовательно, и их общая емкость составляет $C_{shunt} / 2$. Таким образом, источник общего режима имеет в четыре раза большую емкость, чем источник дифференциального режима. Этот результат хорош, поскольку мы хотим, чтобы шунтирующая емкость фильтра оказывала большее влияние на сигнал общего режима, чем на сигнал дифференциального режима.

Однако к источнику общего режима два последовательных импеданса подключены параллельно, и их общее сопротивление составляет $Z_{series}/2$. Для источника дифференциального режима два последовательных импеданса соединены последовательно, и их общая емкость составляет $2 Z_{series}$. Таким образом, источник дифференциального режима испытывает в четыре раза большее последовательное сопротивление, чем источник общего режима. Это плохой результат, поскольку мы хотим, чтобы последовательный импеданс фильтра оказывал

большее влияние на напряжение общего режима, чем на напряжение дифференциального режима. В результате последовательный элемент в фильтре общей моды обычно конфигурируется как дроссель общей моды (см. раздел 3.5), в этом случае импеданс дифференциальной моды равен нулю, а последовательный импеданс влияет только на сигнал общей моды, но не на сигнал дифференциальной моды.

Фильтры общих мод обычно представляют собой фильтры низких частот, состоящие от одного до трех элементов, расположенных по одной из следующих топологий:

Одноэлементные фильтры

- Элемент одной серии
- Одиночный шунтирующий элемент

Многоэлементные фильтры

- L-фильтр (один последовательный и один шунтирующий элемент)
- T-фильтр (два последовательных элемента и один шунтирующий элемент)
- p-фильтр (два шунтирующих элемента и один последовательный элемент)

Преимущество одноэлементных фильтров в том, что для их изготовления требуется только один компонент. Преимущество многоэлементных фильтров в том, что они часто эффективны там, где одноэлементные фильтры не работают, и часто могут обеспечить большее ослабление, чем одноэлементный фильтр.

Шунтирующий элемент в фильтре почти всегда представляет собой конденсатор, величина которого определяется диапазоном частот, на которых должен работать фильтр. Последовательный элемент может быть резистором, индуктором или ферритом. Если падение постоянного напряжения может быть допустимым, можно использовать резистор. Если падение постоянного напряжения не может быть допустимым, то следует использовать индуктор или феррит, оба из которых будут иметь нулевое или очень маленькое падение постоянного напряжения. На низких частотах (от 10 до 30 МГц) следует использовать индуктор, на высоких - феррит. Индукторы, будучи компонентами с высоким коэффициентом трансформации, могут иметь проблемы с резонансом, о чем говорилось в разделе 4.3.1. Иногда последовательно с индуктором можно добавить резистор небольшого номинала, чтобы снизить его добротность. Феррит, сконфигурированный как дроссель общей моды, имеет дополнительное преимущество - он не влияет на сигнал дифференциальной моды.

Затухание фильтра возникает в результате несоответствия импеданса. Из вышеприведенного обсуждения мы знаем, что импеданс источника обычно низкий, а импеданс нагрузки, за исключением резонанса, обычно высокий. Поэтому L-фильтр с высокоомным элементом (последовательным элементом), направленным на низкий импеданс

источника, и низкоомным элементом (шунтирующим конденсатором), направленным на высокий импеданс нагрузки, должен быть наиболее эффективным.

Для эффективной работы последовательного фильтрующего элемента его импеданс должен быть больше, чем сумма импедансов источника и нагрузки. Для эффективности шунтирующего элемента фильтра его импеданс должен быть меньше, чем параллельная комбинация импедансов источника и нагрузки.

Поэтому возможны три случая: (1) импедансы источника и нагрузки низкие, в этом случае эффективен последовательный элемент; (2) импедансы источника и нагрузки высокие, в этом случае эффективен шунтирующий конденсатор; (3) один из импедансов, источника или нагрузки, низкий, а другой высокий (и неважно, какой именно), в этом случае фильтр из одного элемента не будет эффективен, и необходимо использовать многоэлементный фильтр.

Последовательные элементы будут наиболее эффективны вблизи резонанса кабеля (где импедансы источника и нагрузки низки), в то время как шунтирующие конденсаторы будут наиболее эффективны выше резонансной частоты кабеля (когда импеданс источника умеренный или высокий, а импеданс нагрузки высокий). Кабель имеет несколько резонансных точек, где импеданс падает до низкого уровня, и эффективным будет последовательный элемент. В случае кабеля, действующего как диполь, при первом резонансе кабель будет иметь импеданс около 70 Ом, а для монополя - около 35 Ом. Что касается многоступенчатых фильтров, то чем больше ступеней имеет фильтр, тем меньше его затухание зависит от конечных импедансов.

Шунтирующим конденсаторам необходимо низкоомное соединение с землей, но какой землей? При борьбе с синфазными помехами, возникающими на земле печатной платы, конденсаторы фильтра должны быть подключены к земле корпуса или шасси. Если земля схемы и земля шасси связаны вместе в области ввода/вывода (I/O) печатной платы, что рекомендуется, то земля шасси и земля схемы будут одинаковыми в этой точке.

Обратите внимание, что фильтры общих мод должны быть применены ко всем проводникам, выходящим или входящим в корпус оборудования, включая заземляющие проводники цепи. При использовании шунтирующих конденсаторов один конденсатор должен быть подключен между каждым проводником, включая проводник заземления. В случае последовательного резистора или индуктора один компонент должен быть подключен последовательно к каждому из проводников, включая проводник заземления. Однако в случае с ферритовым сердечником один компонент можно использовать для обработки всех проводников в кабеле, пропустив все проводники через

один ферритовый сердечник. Это основное преимущество ферритов: один компонент может лечить множество проводников.

Когда последовательный элемент и шунтирующий конденсатор используются вместе в L-фильтре, последовательный элемент должен быть размещен на стороне цепи фильтра (поскольку это низкоомная сторона), а конденсатор - на стороне кабеля (поскольку это высокоомная сторона). Такая конфигурация необходима, поскольку конденсатор не может работать против низкого импеданса источника на земле схемы. Если высокоомный последовательный элемент размещен на стороне цепи шунтирующего конденсатора, то он эффективно повышает импеданс источника до уровня, при котором конденсатор может быть эффективным. Если феррит размещен на кабельной стороне конденсатора, то он увеличивает и без того большой импеданс кабеля и практически не влияет на работу фильтра.

4.2.2 Паразитные эффекты в фильтрах

Рассмотрим р-фильтр нижних частот, показанный на рис. 4.13. Фильтр состоит из последовательного импеданса и двух шунтирующих конденсаторов. Паразитная емкость C_p показана через последовательный импеданс Z_1 , а паразитные индуктивности L_{p1} и L_{p2} показаны последовательно с двумя конденсаторами C_1 и C_2 соответственно. С увеличением частоты достигается точка, в которой последовательный элемент становится емкостным, а два шунтирующих элемента - индуктивными. В этот момент фильтр низких частот превращается в фильтр высоких частот. Проектировщик должен убедиться, что это преобразование из фильтра низких частот в фильтр высоких частот не происходит в интересующем его диапазоне частот.

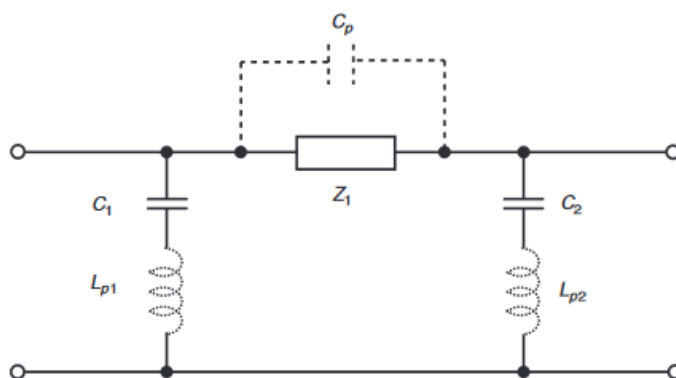


Рисунок 4.13 - Низкочастотный р-фильтр с паразитной характеристикой

Частота, на которой происходит это преобразование, зависит от схемы фильтра. При плохой компоновке фильтра эта частота может составлять десятки мегагерц или меньше. При хорошей схеме фильтра эта частота может составлять сотни мегагерц и более. Схема имеет значение!

Выше некоторой частоты все фильтры низких частот превращаются в фильтры высоких частот. И наоборот, выше некоторой частоты все фильтры высоких частот становятся фильтрами низких частот из-за паразитных эффектов.

Во многих случаях, на высоких частотах, контроль паразитных характеристик более важен для работы фильтра, чем стоимость предполагаемых элементов.

4.3 Развязка источника питания

В большинстве электронных систем система распределения питания постоянного тока является общей для многих схем. Поэтому важно спроектировать систему распределения питания постоянного тока таким образом, чтобы она не являлась каналом для связи помех между подключенными к ней цепями. Задача системы распределения питания - подавать практически постоянное постоянное напряжение на все нагрузки в условиях изменяющихся токов нагрузки. Кроме того, любые шумовые сигналы переменного тока, генерируемые нагрузкой, не должны создавать переменное напряжение на шине постоянного тока.

В идеале источник питания - это источник напряжения с нулевым импедансом. К сожалению, на практике источники питания не имеют нулевого импеданса, поэтому они представляют собой источник помех для подключенных к ним цепей. Источники питания не только имеют конечный импеданс, но и проводники, используемые для их подключения к цепям, увеличивают этот импеданс. На рисунке 4.14 показана типичная система распределения питания, как она может выглядеть на схеме. Источник постоянного тока - батарея, источник питания или преобразователь - имеет предохранитель и соединен с переменной нагрузкой R_L парой проводников. Через нагрузку также может быть подключен локальный развязывающий конденсатор C .

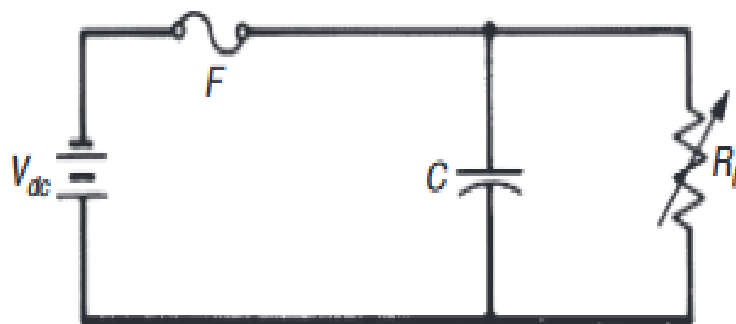


Рисунок 4.14 - Система распределения питания постоянного тока, как она может выглядеть на схеме

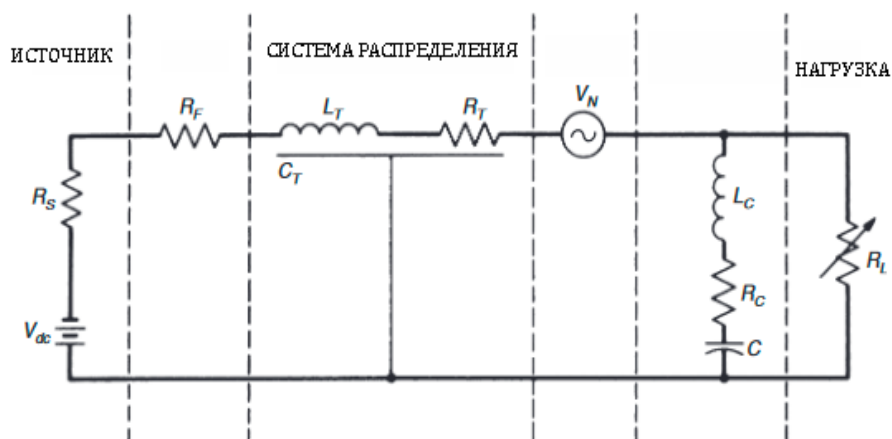


Рисунок 4.15 - Реальная схема системы распределения электроэнергии постоянного тока, включая паразитные элементы

Для детального анализа упрощенная схема рис. 4.14 может быть расширена до схемы рис. 4.15. Здесь R_s представляет собой сопротивление источника питания и является функцией регулирования источника питания. Резистор R_F представляет собой сопротивление предохранителя. Компоненты R_T , L_T и C_T представляют собой распределенное сопротивление, индуктивность и емкость линии передачи, используемой для подключения источника питания к нагрузке, соответственно. Напряжение V_N представляет собой шум, наведенный в проводке от других цепей. Развязывающий конденсатор C имеет сопротивление R_C и индуктивность L_C , связанные с ним. Резистор R_L представляет собой нагрузку.

Шумовая наводка V_N может быть минимизирована с помощью методов, рассмотренных ранее в главах 2 и 3. Влияние развязывающего конденсатора обсуждается в разделе 4.3.1. Когда конденсатор фильтра и V_N исключены из рис. 4.15, остается схема рис. 4.16. Эта схема может быть использована для определения производительности системы распределения электроэнергии. Задачу можно упростить, разделив анализ рис. 4-16 на две части. Во-первых, определить статические характеристики системы, или характеристики постоянного тока, и, во-вторых, определить переходные характеристики системы, или характеристики шума.

Статическое падение напряжения определяется максимальным током нагрузки и сопротивлениями R_s , R_F и R_T . Сопротивление источника R_s можно уменьшить, улучшив регулировку источника питания. Сопротивление R_T линии распределения электроэнергии зависит от площади поперечного сечения A и длины l проводников, а также от удельного сопротивления (ρ) материала проводников,

$$R_T = \rho \frac{l}{A} \quad (4.20)$$

Удельное сопротивление r равно $1,724 \times 10^{-8}$ Ом -метров для меди. Минимальное постоянное напряжение нагрузки составляет

$$V_{L(min)} = V_{dc(min)} - I_{L(max)}(R_s + R_F + R_T)_{max} \quad (4.21)$$

Переходные шумовые напряжения в цепи распределения электроэнергии возникают при внезапном изменении тока нагрузки. Если предполагается, что изменение тока происходит мгновенно, то величина результирующего изменения напряжения зависит от характеристического импеданса (Z_0) линии передачи:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \quad (4.22)$$

Тогда мгновенное изменение напряжения ΔV_L на нагрузке составит

$$\Delta V_L = \Delta I_L Z_0 \quad (4.23)$$

Предположение о мгновенном изменении тока реалистично для цифровых схем, но не обязательно для аналоговых. Однако даже в случае аналоговых схем характеристический импеданс линии электропередачи постоянного тока может быть использован в качестве показателя для сравнения шумовых характеристик различных систем распределения электроэнергии. Для достижения наилучших шумовых характеристик желательно использовать линию передачи системы распределения питания с как можно более низким характеристическим импедансом - обычно 1 Ом или меньше. Уравнение 4.22 показывает, что линия должна иметь высокую емкость и низкую индуктивность.

Индуктивность можно уменьшить, используя проводник прямоугольного сечения вместо круглого и располагая питающий и обратный проводники как можно ближе друг к другу. Обе эти меры также увеличивают емкость линии, как и изоляция проводников материалом с высокой диэлектрической проницаемостью. На рисунке 4.17 приведен характеристический импеданс для различных конфигураций проводников. Эти уравнения можно использовать, даже если неравенства, перечисленные на рисунке, не выполняются. Однако при таких условиях эти уравнения дают более высокие значения Z_0 , чем фактическое значение, поскольку в них не учитывается наличие дрожания. Типичные значения относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) для различных материалов приведены в таблице 4.3. Оптимальной линией распределения электроэнергии будет линия с параллельными плоскими проводниками, как можно более широкими, расположенными один на другом и как можно ближе друг к другу.

Таблица 4-3. Относительные диэлектрические константы различных материалов.

Материал	ϵ^r
Воздух	1.0
Пенополистирол	1.03
Вспененный полиэтилен	1.6
Сотовый полиэтилен	1.8
Тефлонса	2.1
Полиэтилен	2.3
Полистирол	2.5
Нейлон	3.0
Силиконовая резина	3.1
Полиэстер	3.2
Поливинилхлорид	3.5
Эпоксидная смола	3.6
Делринт	3.7
Geteksb	3.9
Эпоксидное стекло	4.5
Майларса	5.0
Полиуретан	7.0
Стекло	7.5

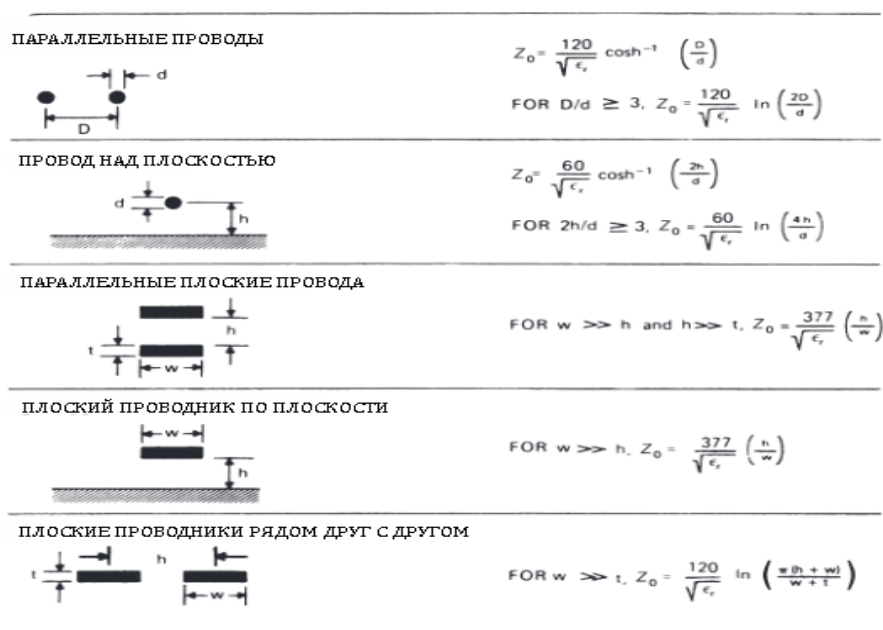


Рисунок 4.17 - Характеристический импеданс для различных конфигураций проводников

Чтобы продемонстрировать трудности, связанные с созданием систем распределения электроэнергии с очень низким характеристическим сопротивлением, полезно привести несколько числовых примеров.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

Тема: Пути распространения электромагнитных помех.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электромагнитные помехи (ЭМП) можно разделить на емкостные, индуктивные и кондуктивные, в зависимости от того, как ЭМП распространяются от источника помех к приемнику, который может быть подвержен ЭМП через цепи и оборудование. Индуктивные помехи также могут возникать в области действия высокочастотных электромагнитных полей. Когда электромагнитное поле распространяется через непроводящую среду в виде электрического или магнитного поля, его называют емкостным или индуктивным ЭМП. Кондуктивные возмущения возникают в проводящих цепях, таких как земля или металлические конструкции, и распространяются через элементы сети. Эти возмущения в многопроводящих цепях можно разделить на два типа: линия-земля (несимметричные, общий режим) и линия-линия (симметричные, дифференциальный режим). (симметричный, дифференциальный режим). В первом случае помехи возникают между всеми проводниками в цепи и землей, а во втором - между различными проводниками в одной цепи. Основными путями распространения электромагнитных помех являются:

1. Гальваническая связь, которая возникает, когда две цепи имеют общее сопротивление (например, часть провода, сопротивление спая, двухполюсника и т.д.) [2].

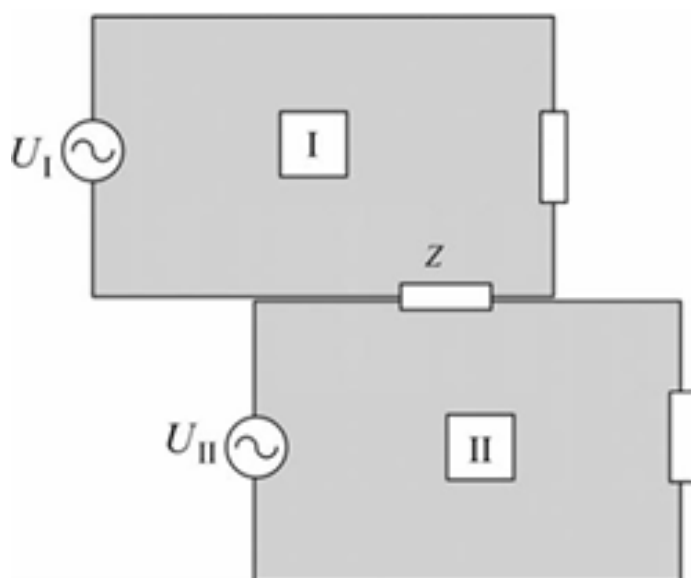


Рисунок 1 – Гальванический путь передачи ЭМС

2. Ёмкостная связь. Ёмкостная связь возникает между двумя контурами, проводники которых находятся под различными потенциалами.

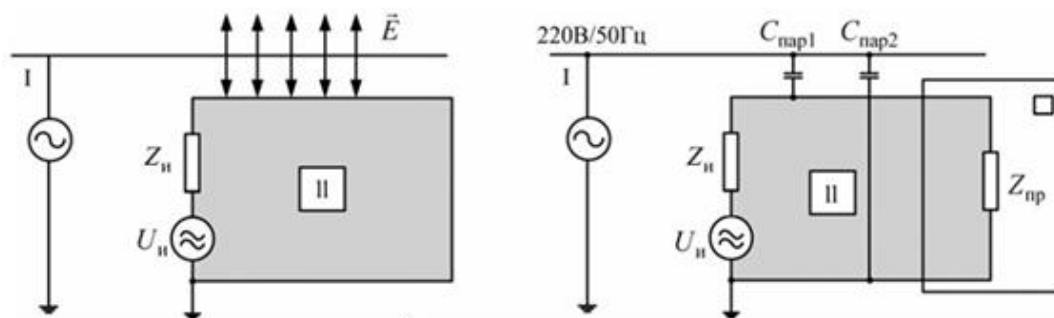


Рисунок 2 – Ёмкостной путь передачи ЭМС 3. Магнитная связь. Магнитная или индуктивная связь возникает между двумя или несколькими контурами тока

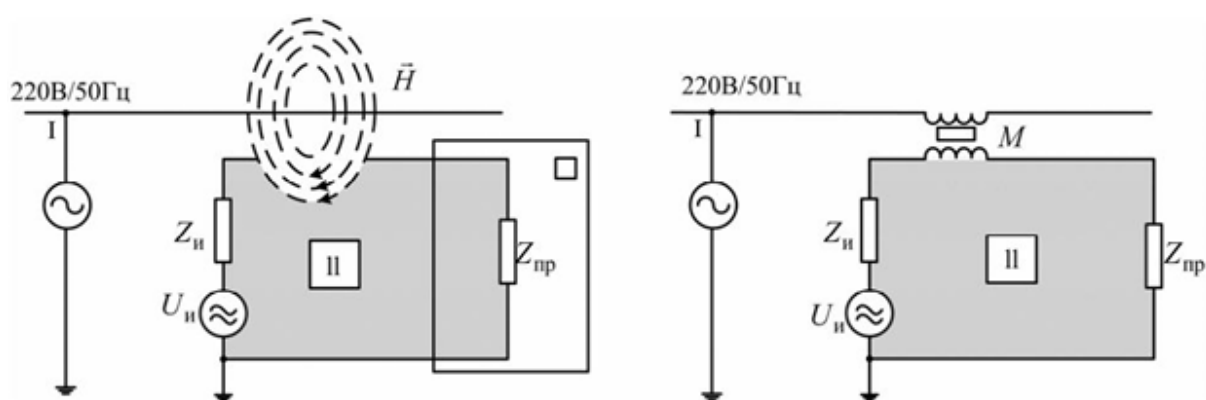


Рисунок 3 – Индуктивный путь передачи ЭМП

4. Передача через электромагнитное излучение. Этот процесс происходит через электромагнитные волны, создаваемые передатчиком (рисунок 5).



Рисунок 5- Связь через электромагнитное излучение

Электромагнитные помехи могут проникать в прибор как вместе с полезными сигналами, так и с напряжением питания через провода (U , I), либо по полемому пути (E , H), а также через антенны. Помимо внешних

помех, вызываемых источниками, могут возникать и внутренние помехи, которые распространяются по проводам или внутри системы. Важно помнить, что прибор автоматизации может одновременно быть как чувствительным к помехам, так и источником их излучения (рисунок 6).

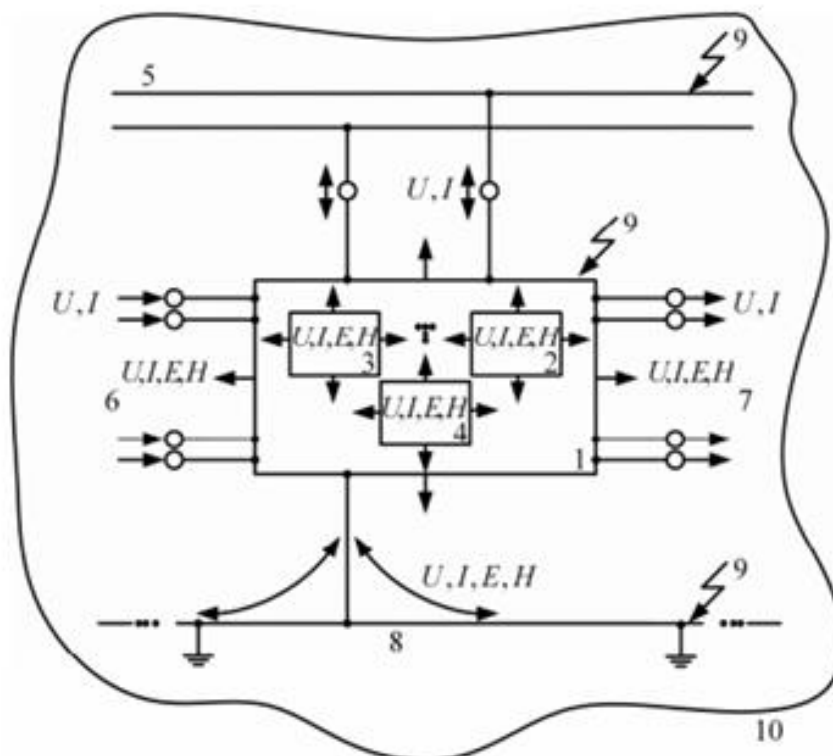


Рисунок 6 - Внешние и внутренние источники помех, типы помех, поступающих в устройство и исходящих из него : 1 – прибор автоматизации; 2, 3, 4 – элементы прибора, внутренние источники ЭМП; 5 – сеть электропитания; 6, 7 – информационные входы; 8 – заземление; 9 – ЭМП, передающиеся по контуру заземления, разряды статического электричества, к.з. в питающей сети; 10 – ЭМ обстановка

Основными причинами сбоев внутренней системы являются напряжение питания 50 Гц, колебания потенциала в линиях питания электронного оборудования, изменения сигналов в линиях управления и передачи данных, высоко- или низкочастотные тактовые сигналы, коммутационные процессы в индуктивных компонентах, таких как герконы на печатных платах, магнитные поля в движущихся механизмах с накопителями энергии, контактные площадки искровые разряды при замыкании и размыкании контактов, а также резонансные явления при замыкании контактов. Кроме того, в автоматическом оборудовании переходное сопротивление контактов, шумы в активных и пассивных компонентах, дрейф параметров элементов, колебания времени переключения логических устройств, потеря сигналов при передаче,

отражения на линиях, вибрация контактов и микрофонные эффекты, пьезоэлектрические смещения при сжатии и изгибе изоляторов, напряжение на контактах, соединение проводников цепей и термоэлектрические эффекты, а также другие электрические факторы, которые могут вызвать сбои в работе. Эти паразитные эффекты должны быть учтены и приняты соответствующие меры при проектировании и производстве электронных средств автоматизации.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите причины появления внутренних помех в системе.
2. Перечислите источники помех, виды помех, поступающих в устройство и исходящих из него помех.
3. Как происходит механизм распространения помехи?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

Тема: Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Представление периодических функций времени в частотной области осуществляется с использованием ряда Фурье. Синусоидальные и косинусоидальные помехи (гармонические процессы) могут быть описаны как в временной, так и в частотной области (см. рис. 1). В частотной области помехи характеризуются угловой частотой ω и частотой колебаний f , при этом $\omega = 2\pi f$. Несинусоидальные периодические функции, такие как пилообразные или прямоугольные импульсы напряжения или тока выпрямителей, которые иногда можно описать аналитически, могут быть представлены в частотной области как сумма синусоидальных и косинусоидальных колебаний, то есть с помощью ряда Фурье [2].

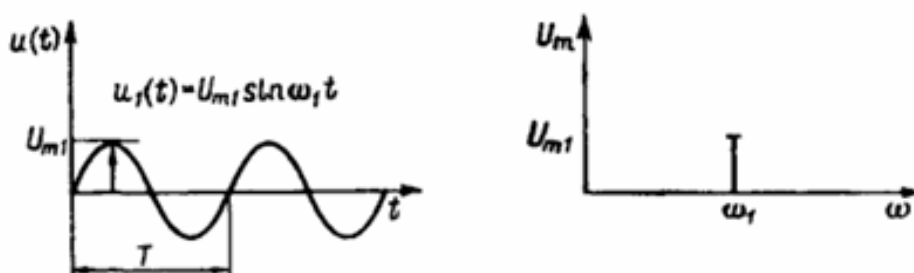


Рисунок 1 – Представление синусоидальной помехи во временной и частотной областях

Например, можно представить несимметричное прямоугольное напряжение как результат наложения основного колебания с частотой $f_1 = 1/T$ и множества гармонических колебаний uv с частотами f_1 и v . Амплитуда этих колебаний изменяется в зависимости от частоты, образуя

дискретный линейчатый спектр (см. рис. 2). Наименьшая частота в этом спектре — основная частота. Частоты высших гармоник являются целыми кратными основной частоте, например, $f_3=3f_1$.

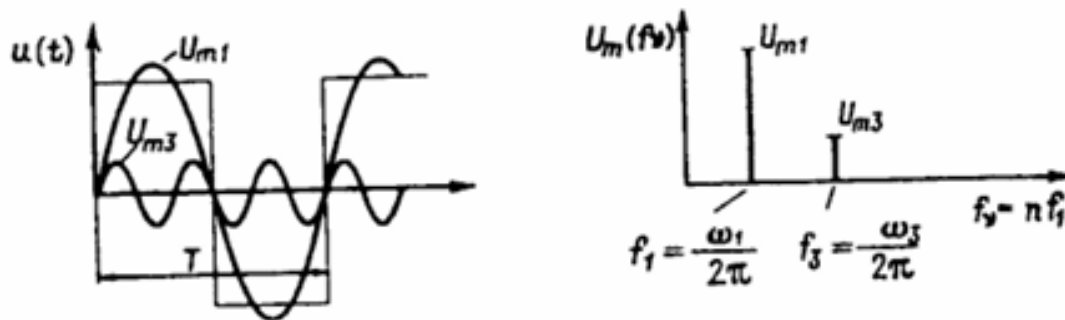


Рисунок 2 – Периодическая несинусоидальная функция

Аналитически ряд Фурье любой функции времени может быть представлен в различных формах: Нормальная:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U'_n \cos n\omega t + U''_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

$$U'_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad U''_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n\omega_1 t) dt, \quad U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (2)$$

Коэффициенты U_n и U_0 - амплитуды отдельных колебаний. Составляющая 0 U соответствует среднему арифметическому значению функции времени (постоянная составляющая).

Амплитудно-фазовая: Так как синусоидальные колебания с соответствующим фазовым сдвигом могут быть представлены и как косинусоидальные, например $\sin(90^\circ \pm \alpha) = \pm \cos \alpha$, вместо нормальной формы часто применяют амплитудно-фазовую форму:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (3)$$

где

$$U_n = \sqrt{U_n'^2 + U_n''^2}; \quad \varphi_n = -\arctg(U_n' / U_n'') \quad (4)$$

комплексная. Если дополнять вышеприведенные уравнения мнимой частью и заменить тригонометрические функции по формуле Эйлера $\cos x + j \sin x = e^{jx}$ экспоненциальными функциями, получаем уравнение в комплексной форме:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega_1 t} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{C}_{+n} e^{jn\omega_1 t} + \dot{C}_{-n} e^{-jn\omega_1 t}) \quad (5)$$

где

$$\dot{C}_n(\pm n\omega_1) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = |\dot{C}_n| e^{j\varphi_n} = C_n e^{j\varphi_n}, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

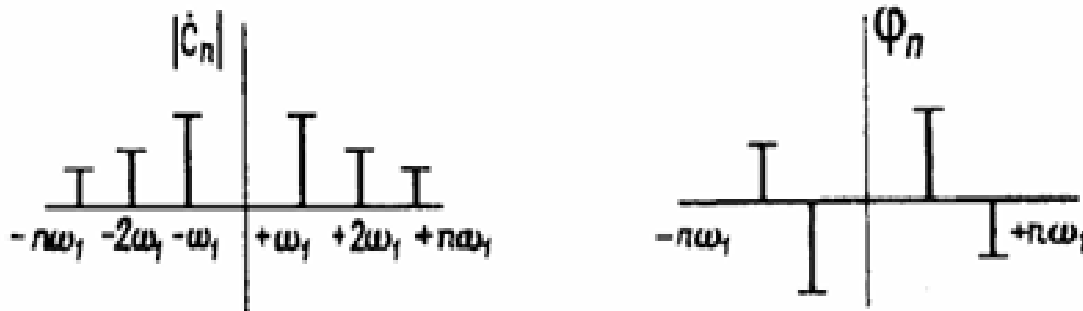


Рисунок 3 – Амплитудный и фазовый спектры комплексного ряда Фурье
Поскольку функция $u(t)$, представляемая комплексным рядом Фурье (3), остается действительной, в правой части вводятся отрицательные частоты для того, чтобы мнимые части сократились.

Учет отрицательных частот приводит к двустороннему спектру (см. рис. 3). Идентичные вещественные части слагаемых в (3) для положительных и отрицательных частот $\pm n\omega_1$ образуют физически измеримую амплитуду U_n , причем

$$|C_{+n}| + |C_{-n}| = U_n, \quad C_0 = U_0. \quad (7)$$

При анализе ЭМС вместо двустороннего математического спектра $C_n = f(\pm n\omega)$ часто используют односторонний "физический" спектр, в котором амплитуды представлены только для положительных n и отличаются от амплитуд двустороннего спектра на коэффициент 2. Амплитуды одностороннего спектра измеримы, и они совпадают с амплитудами коэффициентов для косинусоидальной формы, то есть представляют собой реальные части векторов переменного напряжения той же частоты. На рисунке 4 показаны импульсы прямоугольной формы для двух периодически изменяющихся напряжений с одинаковой основной частотой, но различной скважностью, а также соответствующие линейчатые спектры. Из этого можно сделать вывод, что наименьшая частота f_1 является основной частотой, и ее значение связано с периодом T по формуле $f = 1/T$. Амплитуды высших гармоник имеют одинаковый интервал $\Delta f = f_1 = 1/T$, и их частоты кратны основной частоте: $f_n = n \cdot f_1$.

$$2|\dot{C}_n| = f(\pm n\omega_1) \quad (8)$$

Ряд Фурье для последовательности прямоугольных импульсов имеет вид:

$$u(t) = U_m \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T}{2n\pi\tau} \left(\sin \frac{2n\pi\tau}{T} \cos n\omega_1 t + \left(1 - \cos \frac{2n\pi\tau}{T} \right) \sin n\omega_1 t \right) \right] \quad (9)$$

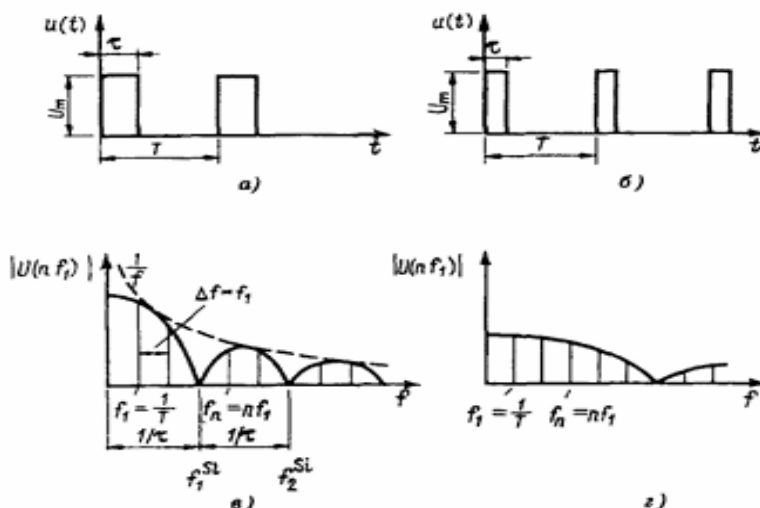


Рисунок 4 – Линейчатые спектры двух периодических последовательностей прямоугольных импульсов напряжений с личной скважностью (1:2): функция $\text{Si}(x)$ – огибающая спектральных амплитуд (сплошная кривая); функция $1/f$ – огибающая функции $\text{Si}(x)$ (пунктирная кривая) [2].

Коэффициенты (спектральные амплитуды) (без постоянной составляющей) определяются формулой:

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau / T)}{(n\pi\tau / T)} \quad (10)$$

Огибающая спектральных амплитуд следует функции $\text{Si}(x) = \sin(x)/x$. Первое значение нуля этой функции соответствует обратной величине длительности импульса

$$f_1^{\text{Si}=0} = 1/\tau \quad (11)$$

Другие нулевые значения следуют с интервалом $n f_1^{\text{Si}=0}$. На практике нулевые значения появляются не столь явно выраженными, как на рисунке 4, так как из-за неизбежных асимметрий (например, экспоненциальных нарастаний и спада прямоугольных импульсов) они сглаживаются.

Постоянный коэффициент при функции $\text{Si}(x)$, равный $2U_m\tau/T$ при неизменном периоде, пропорционален площади импульса $U_m\tau$. Таким

образом, узкие импульсы с высокой частотой при низких частотах могут иметь такой же спектр, как более широкие импульсы с низкой частотой. В примере выше спектральные амплитуды, из-за меньшей площади импульса на 50%, имеют только половину первоначального значения. Огибающая амплитуда функции $\text{Si}(x)$ пропорциональна функции $1/x$. Для прямоугольных импульсов с бесконечно длительным периодом T спектральные линии и максимумы функции $\text{Si}(x)$ бесконечно сближаются, образуя известный спектр $1/f$ для ступенчатой функции.

Аналогично можно рассматривать и другие формы импульсов с различными огибающими, например, треугольные импульсы, огибающая которых выражается функцией $\text{Si}^2(x)$.

Представление непериодических функций времени в частотной области осуществляется через интеграл Фурье. Ряд Фурье позволяет представлять в частотной области только периодические функции времени. Однако часто возникают непериодические функции, такие как те, что возникают при коммутационных процессах, молниях, разрядах статического электричества и других явлениях. Для определения спектра непериодической импульсной функции нужно выполнить предельный переход, используя комплексную форму записи ряда Фурье для периодических функций (с пределами интегрирования от $-T/2$ до $+T/2$).

$$u(t)_{\text{пер}} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t} \quad (12)$$

Так как в линейчатом спектре ряда Фурье расстояние между спектральными линиями соответствует

$$\Delta f = \Delta\omega / 2\pi = f_1 = 1/T \quad (13)$$

Можно также записать

$$u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\Delta\omega \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t} \quad (14)$$

Далее выполняется предельный переход при $\infty \rightarrow T$ и $0 \rightarrow \Delta\omega$. При этом конечное расстояние между спектральными линиями $\omega \Delta$ за знаком суммы переходит в бесконечно малое расстояние ωd , дискретная переменная $\omega \Delta n$ в непрерывную переменную ω , а сумма – в интеграл. Таким образом, получают интеграл Фурье для непериодической функции:

Затем выполняется предельный переход при $\infty \rightarrow T$ и $0 \rightarrow \Delta\omega$. В результате конечное расстояние между спектральными линиями $\omega \Delta$ за знаком суммы переходит в бесконечно малое расстояние ωd дискретная

переменная $\omega \Delta t$ становится непрерывной переменной ω , а сумма превращается в интеграл. Таким образом, получается интеграл Фурье для непериодической функции.

$$u(t)_{\text{непер.}} = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt \right)}_{\dot{X}(\omega)} e^{-j\omega t} d\omega \quad (15)$$

$$\dot{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt$$

где $\dot{X}(\omega)$ - представляет собой преобразование Фурье функции $u(t)$ называемое спектральной плотностью; $X(\omega)$ носит название плотности распределения амплитуд. Для непериодической функции $u(t)$ обратное преобразование Фурье имеет вид:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{X}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (16)$$

Следовательно, преобразование Фурье и его обращение взаимобратны с точностью до множителя $1/2\pi$. Название «спектральная плотность» происходит от того, что спектральная функция $X(\omega)$ идентична линейчатому спектру C_n , отнесенному к расстоянию между соседними частотами. Так как $T = 2\pi/\omega = 1/\Delta f$, получаем

Если отнести амплитуды C_n к Δf и образовать предельное значение для $T \rightarrow \infty$ (соответственно $\Delta f \rightarrow 0$), получим

$$\lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta f \rightarrow 0}} \frac{\dot{C}_n}{\Delta\omega} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt = \dot{X}(\omega) \quad (17)$$

иначе говоря, спектральную плотность.

Если, например, линейчатый спектр C_n измеряется в вольтах, то спектральная плотность $X(\omega)$ сравнимого однократного процесса имеет размерность В/Гц. Очевидно, непериодические процессы тоже могут быть представлены как наложение синусоидальных или косинусоидальных колебаний. Однако в отличие от периодических процессов здесь участвуют все частоты от $-\infty$ до $+\infty$ с амплитудами $X(\omega)d\omega$. Так как при однократных процессах содержащаяся в одном импульсе конечная энергия распределяется на бесконечное множество частот, то амплитуда отдельной спектральной составляющей должна быть бесконечно малой. Чтобы избежать этой неопределенности, относят энергию импульса к частоте и получают, таким образом, спектральную плотность, предельное значение которой при $\Delta f \rightarrow 0$, остается конечным и как раз соответствует преобразованию Фурье.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

Какие параметры описывают помеху в частотной области?

Как выглядит синусоидальная помеха в временной и частотной областях?

Как характеризуется периодическая несинусоидальная функция?

Как можно представить ряд Фурье любой функции времени в различных формах?

В каких ситуациях ряд Фурье позволяет представить непериодические функции в частотной области?

Как определить спектр непериодической импульсной функции?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

Тема: Разряды статического электричества

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Под разрядами статического электричества понимают процессы выравнивания зарядов между отдельными телами, несущими разные электростатические заряды. Они обычно сопровождаются короткими и искровыми разрядными явлениями. При возникновении искр могут воспламениться горючие газы или пары, а вызванные разрядами токи и поля могут повредить электронный элемент, вывести из строя электронное оборудование или нарушить его работу. Первое названное воздействие относится к области пожаро- и взрывобезопасности, а последние – к области электромагнитной совместимости. Заряды статического электричества могут возникать за счет индукции и трения [2].

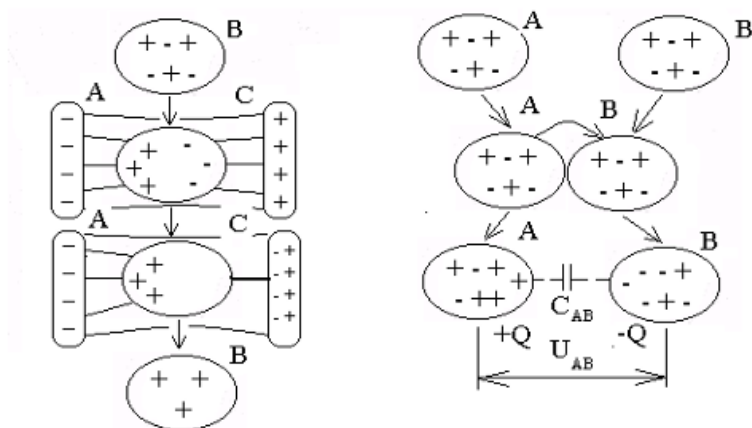


Рисунок 1. А) Электризация за счет индукции; Б) Электризация за счет трения

Рисунок 1 иллюстрирует принцип электризации через индукцию. Пусть нейтральное тело «В» попадает в электростатическое поле,

создаваемое двумя заряженными телами А и С. В результате в теле В происходит поляризация зарядов. Если затем перенести отрицательные заряды тела В на тело С через проводник, то тело В останется положительно заряженным, даже если внешнее поле исчезнет. Электростатические заряды наиболее часто возникают при электризации тел трением (рисунок 2). Это происходит, когда два нейтральных тела А и В вступают в контакт, трутся друг о друга, а затем разделяются. Одно тело отдает электроны другому и становится положительно заряженным, в то время как второе, получив электроны, заряжается отрицательно. Токи, возникающие при заряде, варьируются от сотен пикоампер ($100 \cdot 10^{-12}$ А) до нескольких микроампер (10^{-6} А), а электрические заряды — от 3 нКл до 5 мкКл. Разность потенциалов между телами определяется по окончании процесса разделения зарядов через отношение заряда Q к емкости САВ между телами: $U_{AB} = Q/C_{AB}$. Поскольку емкость между заряженными телами очень мала (несколько пикофарад), напряжение между ними может достигать очень высоких значений, до 10-20 кВ. Примеры электризации тел трением представлены в таблице 1.

Значения напряжений, возникающих за счет трения на различных телах

Причины возникновения	Напряжение, В
Человек, идущий по полу линолеума	200–9000
Извлечение микросхемы из пластикового пакета	до 20000
Извлечение микросхемы из пенопластовой тары	до 11000
Человек, идущий по нейлоновому ковру	10000–15000
Человек, работающий за верстаком	100–3000

На рисунке 3 приведена зависимость потенциала человека при ходьбе по полу при прохождении 6 м по полу с поливинилхлоридным (1) и резиновом (2) покрытием. Значения напряжений, измеренные на одном из предприятий электронной 100–3000 промышленности при влажности воздуха 24 % и температуре 21 °С.

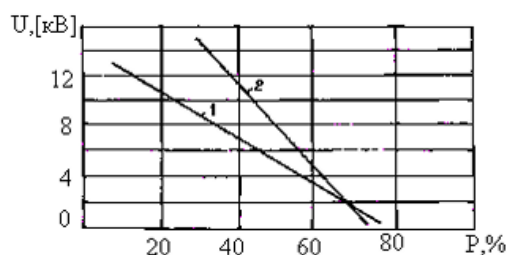


Рисунок 3 - Зависимость от влажности Р потенциала человека при ходьбе по полу

С электронными компонентами, включая микросхемы, необходимо обращаться с особой осторожностью, чтобы избежать их повреждения из-за электростатического разряда. Важно учитывать электростатический заряд тела человека при работе с микросхемами. Тело человека имеет емкость относительно земли, которая составляет от 100 до 300 пФ. Если человек перемещается по полу с синтетическим покрытием, эта емкость может зарядиться до максимального напряжения $U_{\max} = 15 \text{ кВ}$ и накопить соответствующую энергию [2].

$$W = (C \cdot U_{\max}^2) : 2 = (10-30) \text{ мДж.} \quad (18)$$

Когда человек приближается к заземленному корпусу электронного устройства, может произойти искровой разряд. Каждый такой разряд сопровождается созданием электрических и магнитных полей. Основными методами защиты от вредного воздействия электростатических разрядов являются предотвращение накопления зарядов, их отвод или нейтрализация, а также минимизация полевых и разрядных эффектов. В таблице 2 указаны ключевые параметры электромагнитных импульсов различного происхождения.

Параметры электромагнитных импульсов

Параметр	Молния на расстоянии от места удара, м		Разряд статического электричества на расстоянии от канала разряда, см		Коммутационные Процессы в электроэнергетических устройствах на расстоянии 10 м от устройства
	10	100	10	20	
Е, кВ/м	100–300	40	4	1	1–100
Н, А/м	1000–3000	160	15	4	до 300
Т _г , нс	1000	1000	0,2	20	10–50
Частота спектра	1 кГц – 5 МГц		до 1 ГГц		1–100 МГц
Область действия	Локальная, несколько километров		Точечная, несколько сантиметров		Локальная, десятки метров

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте пояснение принципу электризации путем индукции.
2. Дайте пояснение электризации тел трением

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

Тема: Уровни помех. Использование ЭМС-номограммы при описании помех

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для эффективного планирования мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости необходимо учитывать следующие данные:

электромагнитная обстановка, которая определяется амплитудными и частотными спектрами напряжений и токов источников помех, а также напряженностью поля;

механизм передачи помех и его количественная оценка через коэффициенты затухания или передаточные функции;

восприимчивость или чувствительность приемника помех, характеризующаяся пороговыми значениями помех в зависимости от частоты или времени [1,5,6].

Для количественной оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) используются логарифмические шкалы для напряжений, токов, напряженностей электрического или магнитного поля и мощностей в относительных единицах, что позволяет удобно отображать соотношения величин, которые могут различаться на несколько порядков. Различают два понятия: уровень и степень передачи помехи. Уровень определяется как отношение величины (например, напряжения U_x) к постоянному базовому значению (например, $U_0 = 1$ мкВ). Степень передачи отражает отношение входных и выходных величин системы, характеризуя ее передаточные свойства. Это логарифм обратных значений коэффициентов передачи, таких как коэффициенты затухания мощности, ослабления из-за экранирования или снижения противофазной помехи относительно синфазной [2].

С применением десятичного логарифма $\log_{10} = \lg$ определяют в децибелах, например, следующие величины, принимая базовыми величинами $U_0=1$ мкВ, $I_0=1$ мкА, $E_0=1$ мкВ/м, $H_0=1$ мкА/м, $P_0=1$ нВт:

а) напряжение: $U_{дБ} = 20 \lg(U_x/U_0)$, где $U_0 = 1$ мкВ;

б) ток: $I_{дБ} = 20 \lg(I_x/I_0)$, где $I_0 = 1$ мкА;

в) напряженность электрического поля: $E_{дБ} = 20 \lg(E_x/E_0)$, где $E_0 = 1$ мкВ/м;

г) напряженность магнитного поля: $H_{дБ} = 20 \lg(H_x/H_0)$, где $H_0 = 1$ мкА/м;

д) мощность: $P_{дБ} = 20 \lg(P_x/P_0)$, где $P_0 = 1$ нВт.

Вышеуказанные уровни были определены с применением постоянной базовой величины и поэтому обобщенно называются

абсолютными уровнями. Они характеризуют значения конкретных величин [1, 4, 5, 6]. Чтобы подчеркнуть, что величина является базовой в ее обозначение, помимо дБ вводятся дополнительные индексы мкВ, мкА, например, дБмкВ, дБмкА и т.д. Подобно тому, как при использовании десятичного логарифма $\lg$ были образованы отношения величин в децибелах (дБ) при помощи натурального логарифма $\ln$ можно образовать отношение величин в неперах (Нп):

$$1 \text{ Нп} = e = (U_x/U_0).$$

Между непером и децибелом существуют соотношения: $\frac{1}{2} \ln(U_x/U_0)$, $\text{Нп} = 201 \lg(U_x/U_0)$, дБ, или $1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}$; $1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}$.

Таким образом, применяя натуральный логарифм и принимая базовые значения, можно аналогичным образом определить отношение величин в неперах ($1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}$). В контексте электромагнитной совместимости различают два типа уровней помех: абсолютный и относительный. Абсолютный уровень определяется для различных значений, таких как уровень помех, пороговое значение помехи и уровень полезного сигнала, которые отнесены к определенной базовой величине (например, в мкВ). Пример соотношений уровней полезного сигнала и помех в зависимости от частоты показан на рисунке 1. Уровень помехи представляет собой относительное значение помехи (рисунок 1), при этом пределы допустимых уровней регламентируются стандартами DIN/VDE, ГОСТ, ОСТ. Пороговое значение помехи — это минимальное относительное значение полезного сигнала, превышение которого на приемнике воспринимается как помеха. Уровень полезного сигнала — это 100% относительное значение полезного сигнала. Относительный уровень выражается как разница уровней в виде интервала. Интервал помехи представляет собой разницу между уровнями полезного сигнала и порогового значения помехи (рисунок 1), которая вычисляется как логарифм отношения значений полезного сигнала и порогового значения помехи. Интервал допустимых помех — это разница между пороговыми значениями помехи и действующим значением помехи, вычисляемая также как логарифм отношения порогового и действующего значения. Для аналоговых сигналов интервал помехи должен быть не менее 40 дБ, для радио и телевидения — от 30 до 60 дБ, а для телефонии — около 10 дБ. Точные значения устанавливаются в соответствующих нормах (DIN/VDE), которые основаны на международном сотрудничестве в рамках МЭК или CISPR с учетом частоты воздействия [2].

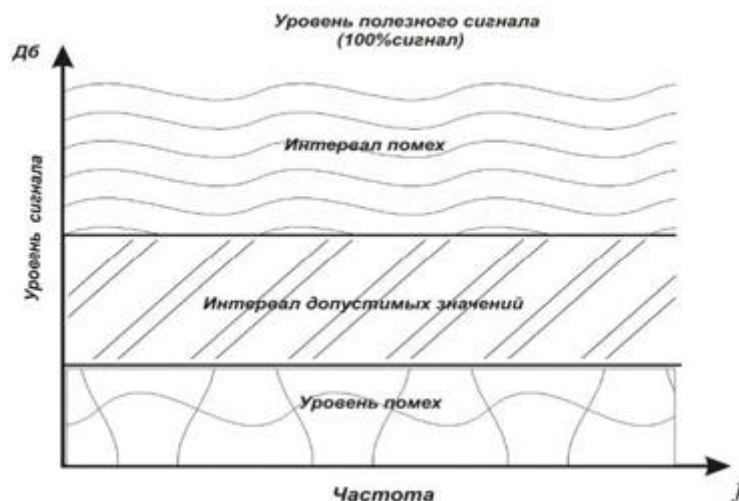


Рисунок 1 – Уровни и интервалы помех

ЭМС-номограмма — это инструмент, используемый для описания распространения импульсных помех, их затухания вдоль пути и воздействия на различные части системы, подверженные помехам. Поскольку передаточные характеристики путей связи и средств подавления помех удобнее всего представлять в частотной области, для перехода от временной области к частотной используется преобразование Фурье. Для быстрой и наглядной реализации преобразования Фурье применяется ЭМС-номограмма. Она используется для следующих целей:

- графического определения огибающей плотности распределения амплитуд заданного импульса помехи стандартной формы, что позволяет оценить наихудший случай (графическое преобразование "временная область — частотная область");
- синтеза формы импульса, эквивалентного помехе, из заданного спектра помехи (графическое обратное преобразование "частотная область — временная область");
- учета частотозависимых передаточных свойств путей связи и средств защиты от помех.

Примером может служить трапецевидный импульс (рисунок 2). С помощью преобразования Фурье плотность распределения амплитуд (рисунок 2) можно определить с использованием соответствующего выражения [2].

$$U(f) = 2U_m \tau \frac{\text{Sin}\pi f \tau}{\pi f \tau} \frac{\text{Sin}\pi f \tau_k}{\pi f \tau_k} \quad (19)$$

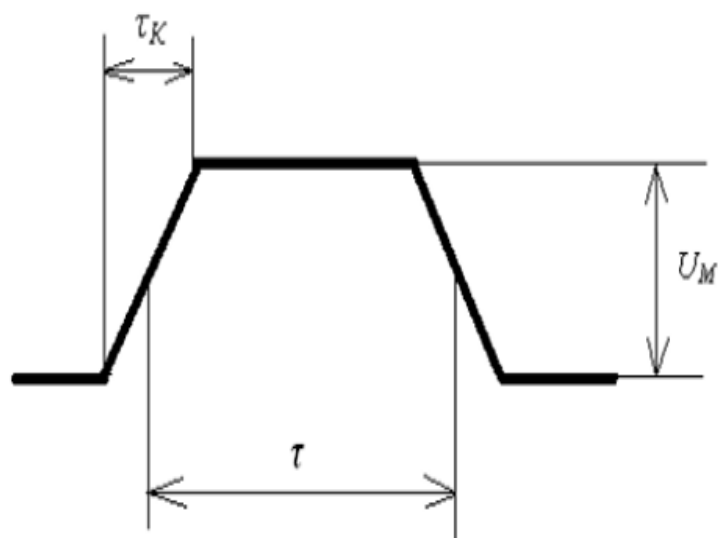


Рисунок 2- Трапециевидный импульс

При $\tau_k=0$ трапециевидный импульс преобразуется в прямоугольный, при $\tau=0$ - в треугольный. Таким образом, трапециевидный импульс включает большую часть встречающихся в практике импульсов. ЭМС - номограмма базируется на аппроксимации огибающей плотности распределения амплитудной плотности тремя отрезками прямой (рисунок 3).

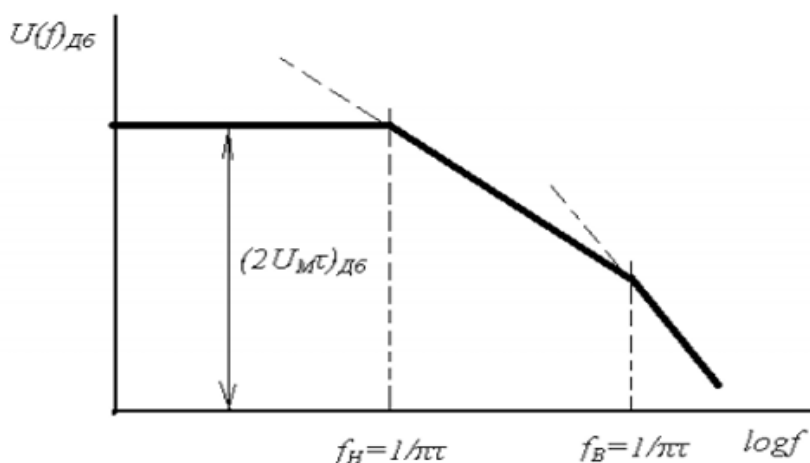


Рисунок 3 – Огибающая «физической» плотности распределения амплитуд трапециевидного импульса (линейная аппроксимация): f_H – нижняя; f_B – верхняя сопрягающая частоты

Для низкочастотного диапазона $f \leq f_H$ ($f_H=1/\pi\tau$) огибающая параллельна оси абсцисс, так как синус приблизительно равен своему аргументу: $U(f) = 2\pi\tau = \text{const}$. Плотность распределения амплитуд гармоник (в дБ) зависит исключительно от площади импульса:

$$U(f)_{дБ} = 20 \lg \left(\frac{2U_m \tau}{A_0} \right), \text{ где } A_0 = 1 \text{ мкВ} \cdot \text{с}$$

Плотность распределения амплитуд гармоник в (дБ) зависит исключительно от площади импульса:

$$U(f)_{дБ} = 20 \lg \left(\frac{2U_m \tau}{A_0} \right) \quad (20)$$

Где $A_0 = 1 \text{ мкВ} \cdot \text{с}$

$$1/\pi\tau < f < 1/\pi\tau_k$$

Для среднего диапазона

$$U(f) = \frac{2U_m \tau}{\pi f \tau} = \frac{2U_m}{\pi f} \quad (21)$$

То есть спад амплитуды с частотой составляет 20 дБ/декаду

$$u(f)_{дБ} = 20 \lg \frac{2U_m}{\pi f A_0} \quad (22)$$

$$f > f_B \quad (f_B = 1/\pi\tau_k)$$

В высокочастотном диапазоне

$$U(f) = 2U_m \tau \frac{1}{\pi f \tau} \frac{1}{\pi f \tau_k}, \quad \text{или}$$

$$u(f)_{дБ} = 20 \lg \frac{2U_m}{\pi^2 f^2 \tau_k A_0} \quad (23)$$

То есть 40 дБ/декаду

Для перехода из частотной области во временную необходимо найти площадь импульса

$$U_m \tau = \frac{1}{2} 10^{\frac{u(f)_{дБ}}{20}} [\text{мкВ} \cdot \text{с}]. \quad (24)$$

Плотность распределения амплитуд импульса определяем по формуле

$$U = \frac{\pi f_B}{2} 10^{\frac{U(f_B)_{дБ}}{20}} [\text{мкВ}] \quad (25)$$

Крутизну фронта нарастания импульса можно определить по формуле

$$U_m / \tau_k = \frac{\pi^2 f_B^2}{2} 10^{U(f_B)_{дБ}/20} [\text{мкВ/с}] \quad (26)$$

Длительность импульса определится из соотношения

$$\tau = 1/\pi f_H \cdot \quad (27)$$

А время нарастания

$$\tau_k = 1/\pi f_B \cdot \quad (28)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом устанавливаются уровни помех?
2. В чем заключается различие между абсолютным и относительным уровнями помех?
3. Почему при оценке уровней помех используются логарифмические единицы?
5. Что такое помехоподавление и как его измеряют?
6. Что представляет собой ЭМС-номограмма и каковы ее применения?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

Тема: Помехозащитные устройства. Экранирование

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Экранирование электромагнитных полей играет важную роль в обеспечении информационной безопасности, защите здоровья, электромагнитной совместимости и экологии. Одним из способов проникновения электромагнитных помех в вторичные цепи является наличие ёмкостных или индуктивных связей между цепями. Для ослабления таких связей используется экранирование электромагнитных полей. Электрическое поле обычно ослабляется с помощью материалов с высокой проводимостью, в то время как магнитное поле ослабляется экранами из ферромагнитных материалов. Высокочастотные поля можно экранировать как ферромагнитными, так и высокопроводящими немагнитными материалами. Такие материалы часто стоят дорого, что делает экранирование помещений дорогим решением. Однако появились новые композиционные материалы, которые могут быть более эффективными и дешевыми [2].

Экранирование помогает ослабить влияние электрических, магнитных и электромагнитных полей, предотвращая их воздействие на элементы, устройства, кабели и помещения, а также ограничивает излучение помех от электрических и электронных средств. Экран

устанавливается между источником и приемником помех, снижая напряженности электрического и магнитного поля за экраном. Это явление можно объяснить тем, что на поверхности экрана индуцируются заряды или токи, которые создают поле, ослабляющее воздействующее поле.

Эффективность экранирования зависит от частоты поля, электропроводности и магнитной проницаемости материала экрана, а также от его формы и размеров. Экранирование также происходит частично за счет поглощения энергии поля материалом экрана и частично за счет отражения падающей волны. Важно учитывать, что эффективность экранирования может снизиться из-за дефектов и отверстий в экране (трещины, дверные и вентиляционные проемы, кабельные вводы, отверстия для обслуживания и сигнализации). Кроме того, внутри экранированных пространств могут возникать резонансные эффекты, так как экранированные приборы с проводящими стенками могут вести себя как объемные резонаторы.

Для экранирования используются как немагнитные металлы, например медь, так и ферромагнитные материалы. Экранирующие свойства немагнитных материалов (с магнитной проницаемостью $\mu_r = 1$ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 0,6-1$) основаны на магнитных полях, создаваемых вихревыми токами. Эти экраны хорошо демпфируют электрические поля, но практически не воздействуют на постоянные магнитные поля и ослабляют низкочастотные переменные поля. Ферромагнитные экраны (с $\mu_r > 1$ и $\epsilon_r \neq 1$) менее эффективны для ослабления электрических полей на низких частотах, но они могут ослаблять постоянные магнитные поля. С увеличением частоты экранирующее действие таких материалов возрастает как для электрических, так и для магнитных полей. Существует широкий выбор экранирующих материалов и устройств, поставляемых в различных формах в зависимости от решаемых задач.

Для экранирования используются различные материалы и конструкции, такие как:

- Болтами крепящиеся пластины и привариваемые тонкие стальные и медные листы, применяемые для изготовления экранированных корпусов и покрытия стен помещений.
- Тонкая фольга из мягко-магнитных сплавов с высокой магнитной проницаемостью, которая легко режется и деформируется, используемая для создания образцов и серийных приборов.
- Металлические ленты и оплетки, предназначенные для экранирования кабелей.
- Плетёные металлические шланги, используемые для дополнительного экранирования кабелей и кабельных жгутов.

- Сотовые металлические структуры, применяемые в воздухо-проницаемых экранирующих элементах, например, в экранированных кабинетах.

- Металлические сетки, проводящая прозрачная фольга и стекла с запылённым металлом для окон в рамках комплексного высокочастотного экранирования.

- Распылённые серебряные, никелевые или медные покрытия, наносимые на пластмассовые корпуса.

- Пластмассовые комбинированные материалы с проводящими добавками, такими как металлический порошок или углеродные нити, используемые для изготовления экранированных корпусов.

Без дополнительной защиты монолитное здание может ослабить внешнее ЭМП на 6-10 дБ, а железобетонные конструкции при усилении могут ослабить внешнее ЭМП на 25-30 дБ. Для повышения эффективности экранирования шкафов, отсеков и помещений необходимо герметизировать входы, щели, швы, дверные проемы и другие элементы, которые могут пропускать высокочастотное излучение. Эти уплотнения должны быть изготовлены из материалов, обеспечивающих непрерывность вихревых токов в полевых условиях, высокую электропроводность, устойчивость к механическим и функциональным нагрузкам, а также минимальную устойчивость к контакту с металлическими элементами конструкции.

Для изготовления уплотнений могут использоваться следующие материалы и изделия:

- Эластомеры с электропроводящими добавками, например, силиконовая резина с частицами углерода, никеля или серебра, в виде пластин, кольцевых канатов или трубок.

- Цельнометаллические плетеные изделия, такие как чулки, прокладки и двойные прокладки с сердечником из эластомера для уплотнения крышек и стенок коробок.

- Пропитанные резиной оплетки для уплотнения электрических соединений.

- Листы силиконовой резины с вертикальной металлической резьбой на поверхности

- Пружинные блоки из бериллиевой бронзы для уплотнения дверей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Назовите материалы по изготовлению экранов.

2. Что влияет на показатели эффективности экранирования?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

Тема: Помехозащитные устройства. Фильтры

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Помехоподавляющие фильтры — это устройства, предназначенные для ослабления помех, поступающих через проводные соединения. Их эффективное использование возможно, когда спектры полезного сигнала и помехи достаточно различаются, что позволяет настроить фильтр таким образом, чтобы подавить помеху без значительного искажения полезного сигнала. Демпфирование достигается путем деления напряжения. Рассмотрим это на простом примере [2].

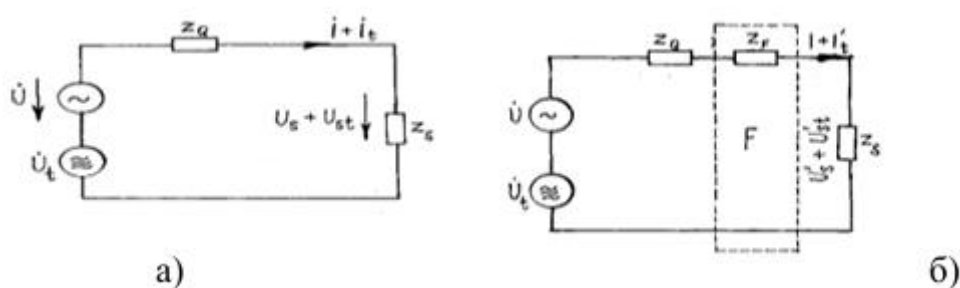


Рисунок 1 - Цепь без фильтра (а) и с фильтром F (б)

Если в низкочастотный контур полезного сигнала (полезный сигнал U , I , рисунке 1, а) поступает высокочастотное напряжение помехи U_t , то на полном сопротивлении приемника Z_s появляется составляющая напряжения помехи

$$\overline{U_{st}} = \overline{U_t} \cdot \frac{Z_s}{Z_s + Z_Q}. \quad (29)$$

Введение зависящего от частоты продольного полного сопротивления Z_F (ωL) (рисунок 1,б), представляющего для низкочастотного тока I очень малое сопротивление, а для высокочастотного тока I_t — очень большое сопротивление, обеспечивает ослабление помехи, а составляющая напряжения помехи снижается до уровня

$$\overline{U'_{st}} = \overline{U_t} \cdot \frac{Z_s}{Z_s + Z_F + Z_Q} \quad (30)$$

Достижимый эффект затухания можно характеризовать коэффициентом затухания — отношением падений напряжений на Z_s при наличии Z_F и без него:

$$\left| \frac{\overline{U}_{st}}{\overline{U}'_{st}} \right| = \left| \frac{Z_s + Z_F + Z_Q}{Z_s} \right| \quad (31)$$

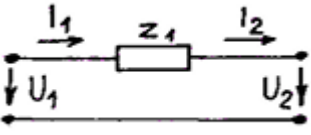
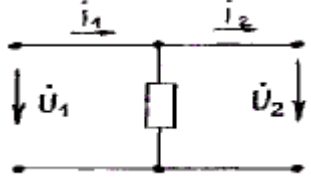
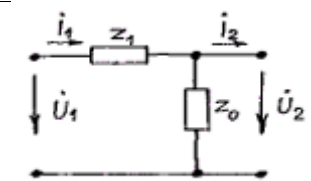
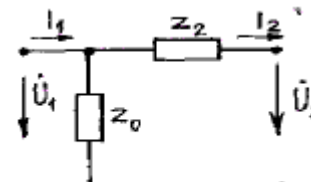
Коэффициент затухания приводится, как правило, в виде логарифма отношения напряжений и выражается в децибелах:

$$K_e = 20 \cdot \lg \left| \frac{\overline{U}_{st}}{\overline{U}'_{st}} \right| \quad (32)$$

Согласно этому выражению, эффект затухания зависит не только от сопротивления Z_F , но и от полных сопротивлений Z_Q и Z_S . В общем случае фильтр F любой структуры представляет собой четырехполюсник, объединяющий источник помехи и приемник. Для расчета фильтров используют известные соотношения для четырехполюсника:

$$\begin{aligned} \overline{U}_1 &= A_{11} \cdot \overline{U}_2 + A_{12} \cdot \overline{I}_2 \\ \overline{I}_1 &= A_{21} \cdot \overline{U}_2 + A_{22} \cdot \overline{I}_2, \end{aligned} \quad (33)$$

Параметры четырехполюсников простейших схем фильтров

Схема	Коэффициент			
	A11	A12	A21	A22
	1	Z1	0	1
	1	0	1/Z0	1
	1+Z1/Z0	Z1	1/Z0	1
	1	Z2	1/Z0	1+Z2/Z0

	$1+Z_1/Z_0$	$Z_1+(Z_1Z_2/Z_0)$	$1/Z_0$	$1+Z_2/Z_0$
	$1+Z_0/Z_2$	Z_0	$1/Z_1+1/Z_2+Z_0/Z_1Z_2$	$1+Z_0/Z_1$

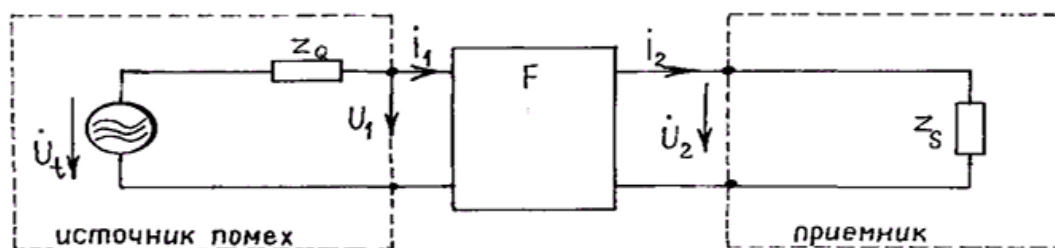


Рисунок 2 - Токовый контур с фильтром

Для схемы, представленной на рисунке 2, можно записать:

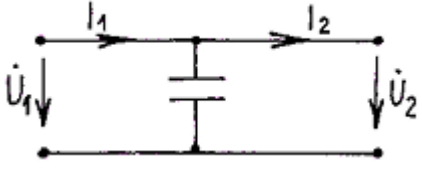
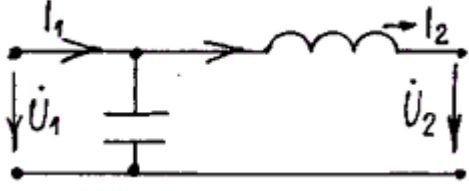
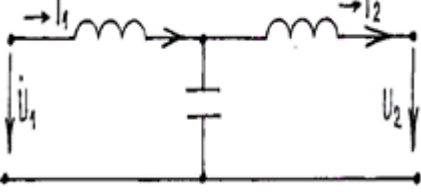
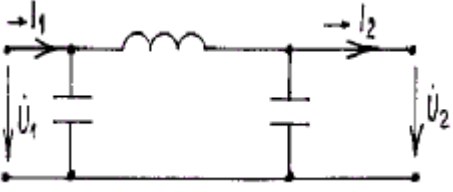
$$\begin{aligned}\overline{U_t} &= \overline{U_1} + Z_Q \cdot \overline{I_1} \\ \overline{U_2} &= Z_S \cdot \overline{I_2}.\end{aligned}\quad (34)$$

Поэтому коэффициент затухания в фильтре любой структуры в соответствии с формулами данными можно выразить следующим образом:

$$K_e = 20 \cdot \lg \left| \frac{Z_s}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{11} + \frac{1}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{12} + \frac{Z_Q \cdot Z_s}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{21} + \frac{Z_Q}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{22} \right|. \quad (35)$$

Таким образом, коэффициент затухания зависит как от параметров фильтра (A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22}), так и от полных сопротивлений источника и приемника помех. В зависимости от конкретных условий коэффициент затухания может значительно варьироваться даже для одного и того же фильтра. Поэтому невозможно определить универсальную характеристику фильтра, не учитывая конкретные условия, и значения коэффициента затухания, приведенные в справочниках, обычно относятся к специфическим случаям согласования системы ($Z_Q = Z_S$) и средним значениям сопротивлений Z_Q и Z_S , таким как 50, 60, 150 или 600 Ом. Если приблизительно известны значения Z_Q и Z_S , то выбор подходящей фильтровой структуры можно осуществить, опираясь на следующие рекомендации. (таблицы 2).

Таблица 2 Рекомендации по выбору структуры фильтра

Сопротивление источника	Схема	Сопротивление приемника
Мало		Мало
Велико		Велико
Велико		Мало
Мало, неизвестно		Мало, неизвестно
Велико, неизвестно		Велико, неизвестно

Основными компонентами фильтров являются катушки индуктивности и конденсаторы, которые могут использоваться как по отдельности, так и в сочетании для подавления помех. Фильтры могут быть выполнены в различных формах в зависимости от номинального напряжения и тока, включая устройства для монтажа в помещениях, встраиваемые в шкафы, разъемы или чип-элементы для установки на печатных платах. Существует несколько типов помехозащитных конденсаторов, которые изготавливаются для различных применений:

а) конденсатор с двумя выводами;



б) конденсатор с тремя выводами;



в) конденсатор-четыре полюсник;

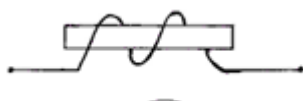


г) многоэлементный конденсатор;

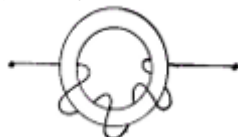


Помехозащитные катушки с рабочим током I_P , и синфазным током помехи I_C ;

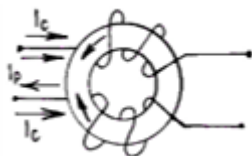
а) стержневые катушки



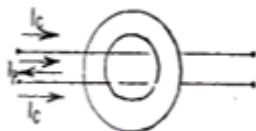
б) катушка с кольцевым сердечником;



в); кольцевая катушка с двумя встречными обмоткам и компенсацией магнитного потока, создаваемого рабочим током;



г) ферритовые кольца.



Двухполюсные конденсаторы, в зависимости от их подключения в цепь, могут использоваться для защиты как от синфазных, так и от противофазных помех.

Четыреполюсные конденсаторы предназначены для предотвращения инверсно-фазовых помех, а многосекционные конденсаторы эффективны для предотвращения как инверсно-фазовых, так и синфазных помех. Катушки индуктивности имеют низкое активное сопротивление и низкую паразитную емкость и выпускаются с закрытыми и открытыми сердечниками. Катушки индуктивности с тороидальными или стержневыми сердечниками эффективны для подавления синфазных и противофазных сигналов. Магнитная цепь этих катушек не замкнута, поэтому проницаемость и индуктивность в значительной степени не зависят от тока. Фильтры сетевых помех пропускают низкочастотные

сигналы, но подавляют высокочастотные помехи и используются для защиты оборудования от сетевых помех и снижения уровня помех, излучаемых оборудованием. При выборе элементов вертикального фильтра следует учитывать потребляемый ток. Общее сопротивление источника и приемника помех обычно неизвестно, но обычно можно предположить, что сопротивление источника питания мало, а сопротивление нагрузки велико.

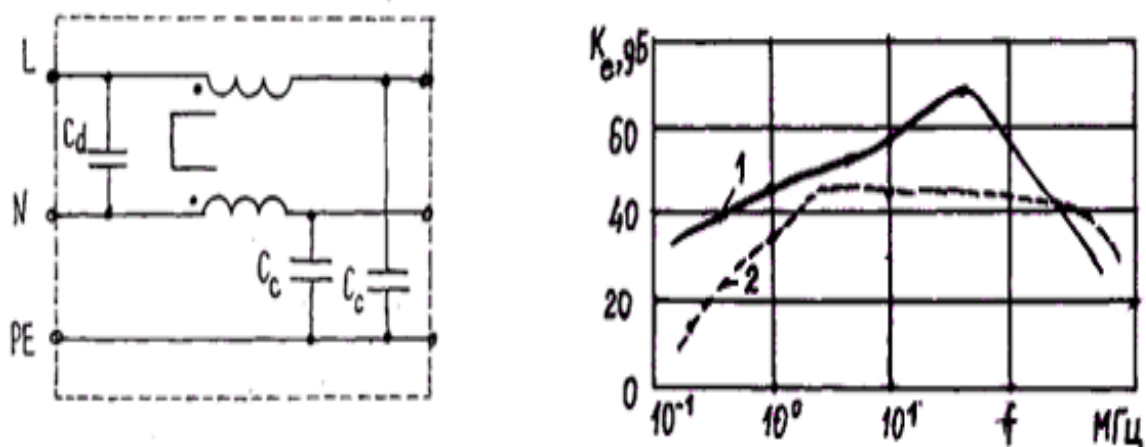


Рисунок 4 - Пример сетевого фильтра на 220 В, ток 1 А, а) схема, б) частотные зависимости: 1 – противофазные помехи, 2 – синфазные помехи

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите схемы фильтров.
2. Назовите рекомендации по выбору структуры фильтра.
3. Как производится выбор продольного элемента сетевого фильтра.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

Тема: Электромагнитная обстановка на энергетических и промышленных объектах

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Надежность функционирования энергетических и промышленных объектов во многом зависит от бесперебойной работы электронной (в основном цифровой) аппаратуры, используемой для защиты, автоматики, связи и других целей. Современные объекты обладают особенностями, при которых электронная аппаратура часто подвергается воздействию высоких уровней электромагнитных помех. Рассмотрим

влияние электромагнитных помех (ЭМО) на энергетические объекты, используя в качестве примера подстанцию. (рисунок 1)

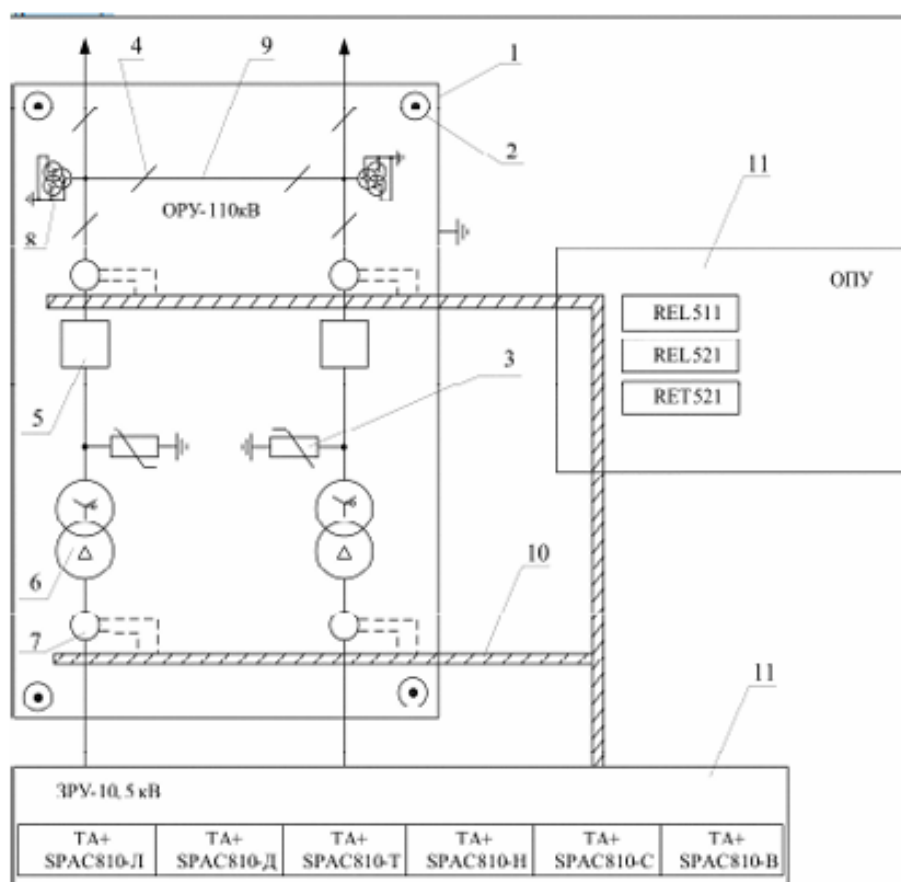


Рисунок 1 - Принципиальная схема расположения терминалов защиты

- 1 – контур заземления; 2 – молниеотвод; 3 – ОПН; 4 – разъединитель;
 5 – выключатель; 6 – трансформатор; 7 – трансформатор тока;
 8 – трансформатор напряжения; 9 – шина; 10 – кабельный лоток;
 11 – общестанционный пункт управления

Методическое руководство СО 34.35.311-2004 регламентирует оценку электромагнитной обстановки (ЭМО) в электроустановках. Руководство предназначено для решения важной и сложной задачи. Настоящие методические указания предназначены для решения важной и сложной задачи: определения наиболее неблагоприятных условий электромагнитных помех (ЭМИ) в месте размещения микропроцессорного оборудования, характеризующихся наибольшими электромагнитными помехами (ЭМИ), которые практически возможны; проверки электромагнитной совместимости (ЭМС) в действующих установках; установления требований к уровню жесткости для испытаний на помехоустойчивость. В настоящем руководстве описаны методы измерения и расчета уровней ЭМС, вызванных различными факторами,

такими как оценка импульсных помех при коммутации и коротком замыкании электрооборудования. В них также указаны рабочие программы испытаний, протоколы, классификация ЭМИ, уровни и степень жесткости испытаний оборудования на помехоустойчивость, а также технические средства воздействия и измерения [2].

Основным источником ЭМО на энергетических объектах являются следующие виды помех:

Короткие замыкания (КЗ):

При прохождении значительных токов короткого замыкания через заземляющее устройство (ЗУ) в сетях высокого напряжения возникают следующие эффекты:

а) перепады потенциалов в пределах ЗУ, что приводит к разности потенциалов на вторичных кабелях, как внутри ЗУ, так и за его пределами, что воздействует на аппаратуру;

б) протекание тока КЗ через силовые ошиновки и элементы ЗУ создаёт магнитное поле, амплитуда которого может достигать сотен ампер на метр (А/м). Это поле вызывает наводки на вторичные кабели, если они находятся рядом с трассой тока КЗ. В реальности оба этих фактора могут действовать одновременно, создавая значительные перенапряжения, которые представляют угрозу для аппаратуры и изоляции кабелей.

Грозовые разряды

Токи молнии могут распространяться через заземление информационных технологий и компоненты систем электроснабжения или в непосредственной близости от них. Например, в ходе расследования причин отказов оборудования в центре управления было установлено, что отказы телекоммуникаций, автоматизированных систем управления и компонентов системы сигнализации были вызваны воздействием на оборудование импульсных электромагнитных полей. Грубая оценка показала, что напряженность магнитного поля в месте расположения оборудования находилась в диапазоне от 300 до 1 000 А/м, что опасно как для компьютеров и офисных АТС, так и для специализированного промышленного оборудования. Особенно опасны разряды молнии, падающие на мачты радиосвязи вблизи контролируемых объектов. Это может привести к повышению потенциала земли в зданиях, кабельных трассах и лотках, прохождению токов молнии через экраны высокочастотных кабелей и металлоконструкции зданий, наводкам во вторичных кабелях, воздействию электромагнитного поля на оборудование и проникновению импульсов в электрическую систему через силовые цепи оборудования на мачте. На тепловых электростанциях (ТЭЦ и ГРЭС) опасность могут представлять разряды молнии, возникающие в

трубопроводах. Удары молнии в громоотводы и кабели могут создавать опасность заземления на пути оборудования, измерительных трансформаторов и вторичных цепей, что приводит к опасной разности потенциалов, влияющей на изоляцию вторичных цепей и вводы оборудования. Кроме того, разряды молниеприемников на прожекторных столбах могут распространять помехи по вторичной сети.

Переходные процессы в работе высоковольтного оборудования (в том числе, вызванные коммутациями)

Коммутационные операции выключателей и разъединителей в высоковольтных сетях генерируют высокочастотные переходные процессы. Эти процессы имеют свои параметры для каждого объекта и каждой конкретной коммутационной операции. Высокочастотные токи и перенапряжения распространяются через оборудование по шинам и создают электромагнитные поля, которые также наводятся во вторичных кабелях и во внутренних схемах оборудования. Коммутационные помехи могут проникать во вторичные кабели через трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и высокочастотные фильтры связи. Это особенно серьезно на компактных подстанциях с элегазовой изоляцией, где высоковольтное оборудование и чувствительная электроника находятся в непосредственной близости друг от друга. Уровень коммутационных помех зависит от ряда факторов, включая геометрию объекта, тип первичного оборудования, условия заземления и маршрутизацию вторичных цепей. Истинный уровень этих помех можно узнать только с помощью измерений. Поэтому измерение коммутационных помех является важной частью оценки ЭМС [2].

Неправильная компоновка подстанции

Схемы передачи данных и электронное оборудование могут находиться в непосредственной близости от электрического оборудования, такого как контакторы и мощные реле, что вызывает проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС), особенно при коммутации электрических цепей. Помехи от коммутации высоковольтного оборудования могут проникать во вторичные цепи трансформаторов тока и трансформаторов, индуктируя их во множество вторичных цепей, включая силовые цепи и цепи связи, и генерируя пусковые токи и потенциалы в компонентах заземляющих устройств. Во время работы распределительных устройств высокочастотные переходные процессы в шинах коммутации вызывают высокочастотные токи и перенапряжения в первичной сети. Аналогичная ситуация возникает при коротких замыканиях (КЗ), поскольку токи КЗ содержат высокочастотные

импульсные составляющие в дополнение к низкочастотным. Каждый элемент первичной сети обладает индуктивностью и емкостью, образуя колебательные контуры, которые возбуждают высокочастотные колебания при коммутационных операциях. Эти возмущения могут проникать во вторичные цепи через различные механизмы связи (ток, индуктивность, емкость) и далее в аппаратные устройства. Особенно в случае изолированных распределительных устройств эти возмущения могут иметь множественные последствия, поскольку во время работы распределительного устройства воздушный зазор неоднократно нарушается. Опасные возмущения могут возникать и при переключениях в электросетях с напряжением до 1 кВ. Например, возмущения тока в индуктивных нагрузках, таких как обмотки контакторов. Механизм возникновения возмущений с амплитудой до нескольких киловольт аналогичен системе зажигания двигателя внутреннего сгорания. При прерывании тока в обмотке за счет электромагнитной индукции возникает перенапряжение, которое теоретически достигает бесконечности при кратковременном прекращении тока, но на практике ограничивается силой воздушного зазора в коммутационном аппарате. Паразитные конденсаторы или специально включенные конденсаторы могут уменьшить величину перенапряжения.

Внутренние источники помех в помещениях

Переключение электромеханического оборудования различного назначения также создает шум. Помехи при коммутации низковольтных цепей Осциллографы показывают, что коммутация реле, электроприводов и другого оборудования может вызывать коммутационные помехи на частотах, обычно гораздо более высоких (до нескольких сотен мегагерц и выше), чем те, которые возникают при коммутации высоковольтного оборудования. Низкочастотные магнитные поля (до 1 кВ и выше) могут возникать при нормальной работе силового оборудования. В случае компактного расположения электрического и электронного оборудования эти магнитные поля могут оказывать постоянное воздействие на оборудование и создавать высокие уровни магнитного поля. В некоторых случаях некачественная конструкция вспомогательных систем оборудования также может повысить уровень магнитных полей на промышленных частотах. Амплитуда этих магнитных полей обычно достаточно мала, чтобы не вызвать отказ или неисправность оборудования, но может негативно повлиять на дисплеи (например, вызвать «дрожание» изображения) и в конечном итоге привести к быстрой утомляемости персонала, обслуживающего автоматизированные рабочие места. Кроме того, эти магнитные поля могут превышать гигиенические нормы [2].

Радиосредства

В последние годы были зафиксированы случаи выхода из строя электронного оборудования из-за воздействия высокочастотных электромагнитных полей в электросетях. В некоторых случаях высокочастотные электромагнитные поля могут негативно влиять на оборудование. Напряженность электрического поля, создаваемого источником радиочастотного излучения, значительно уменьшается с увеличением расстояния от передающей антенны. Поэтому электрическое поле, создаваемое портативным радиоприемником в непосредственной близости от оборудования, может быть более опасным, чем электрическое поле, создаваемое мощным радиоприемником, находящимся на расстоянии нескольких сотен метров. Антенны, используемые для радиорелейной и космической связи, обычно являются направленными и, если они правильно установлены, не представляют опасности для оборудования.

Низкое качество напряжения питания

Существует ряд причин, приводящих к ухудшению качества напряжения, подаваемого в цепи переменного и постоянного тока. Наиболее распространенными причинами являются недостаточная мощность питания, нелинейные нагрузки (например, источники питания электронного оборудования) и кратковременные скачки напряжения (например, при работе электроприводов). Проблемы с качеством электроэнергии особенно часто возникают на подстанциях, питающих мощные нелинейные нагрузки, например, на тяговых и промышленных подстанциях. Еще одной причиной проблем с качеством электроэнергии является использование устаревших источников бесперебойного питания (ИБП), инверторов и стабилизаторов напряжения. Электростатические разряды представляют угрозу для современного оборудования из-за их высокочастотных импульсов (<1 нс). Такие импульсы несут в себе небольшое количество энергии, но имеют высокую амплитуду, что может оказать пагубное влияние на аппаратное обеспечение, особенно на логические компоненты [2].

Штатные режимы работы электроустановок, при которых протекают большие токи через заземляющее устройство (ЗУ)

Протекание значительных токов через заземляющее устройство объекта обычно не является штатной ситуацией, однако в некоторых случаях это всё же происходит. В таком случае на заземляющем устройстве может постоянно присутствовать некоторый потенциал, который может вызвать помехи, в том числе в цепях связи с другими объектами. При больших размерах объекта или плохом состоянии его

заземляющего устройства могут возникать значительные разности потенциалов даже на территории объекта. Плохое заземление на подстанциях может привести к возникновению не только высоких остаточных напряжений, но и опасных шаговых напряжений.

Перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью

В сети 6-35 кВ в процессе эксплуатации компенсируются токи замыкания изоляции на нейтраль или емкостного замыкания на землю. Если значение емкостного тока замыкания на землю превышает установленную норму (30 А для сетей 6 кВ, 20 А для сетей 10 кВ, 10 А для сетей 35 кВ), то для его компенсации устанавливается дугогасительное устройство. Даже в случае однофазного замыкания на землю (033) сети с изолированными или компенсированными нейтралью могут эксплуатироваться в течение длительного времени. Старение оборудования снижает уровень изоляции и повышает риск многофазных замыканий. В сетях 6-35 кВ внутренние перенапряжения могут возникать при различных операциях, таких как включение и отключение воздушных и кабельных линий, отключение разгруженных трансформаторов, замыкания на землю и автоматическое повторное включение (АР). Для обеспечения соответствия электрооборудования в таких сетях требуемому уровню ЭМС можно использовать следующие методы

1. Применение нелинейных молниеотводов (ограничителей перенапряжений) для защиты от ударов молнии и коммутационных перенапряжений;

2. Повышение электрической прочности изоляции воздушных линий электропередачи путем замены неизолированных проводов на защитные, использования полимерных изоляторов из силиконовой резины или увеличения количества изоляторов в гирляндной цепи;

3. Снижение сопротивления заземления

4. Повышение надежности и селективности защиты от однофазных замыканий на землю (033)

5. Увеличение количества операций автоматического повторного включения на воздушных линиях электропередачи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите особенности электромагнитную обстановку на подстанции.

2. Перечислите основные виды помех на Энергохозяйствах.

3. Назовите меры обеспечения допустимого уровня ЭМС электрооборудования сетей

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

Тема: Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В странах, в том числе и в России, активно разрабатываются нормы напряженности электромагнитных полей, в частности, по уровню электрических и магнитных полей и мощности высокочастотных магнитных полей, безопасных для здоровья человека. Рациональность этих стандартов приобретает все большее значение. С одной стороны, разрабатываются более строгие стандарты, включая более высокие пределы безопасности, с учетом потенциально вредных механизмов воздействия, которые еще не изучены наукой (например, слабые, но длительные магнитные поля промышленной частоты); с другой стороны, оценивается реальная опасность магнитных полей для здоровья и устанавливаются приемлемые уровни напряженности и времени пребывания в магнитном поле. Существующие стандарты пересматриваются с целью установления более разумных пределов. Эти вопросы тесно связаны с экономическими аспектами, поскольку соблюдение санитарных и строительных норм, а также создание запретных зон для высоковольтных линий электропередач требует больших затрат.

Стандарты воздействия электромагнитных полей на человека активно пересматриваются. Стандартные документы часто пересматриваются и изменяются, а их правовой статус становится все более динамичным. В настоящее время для определения допустимых уровней магнитных и электрических полей используются научно доказанные механизмы воздействия на организм: при частотах ниже 10 кГц - изменение разности потенциалов клеточных мембран, при более высоких частотах - нагрев тканей. За эталонные значения приняты безопасная плотность тока (10 мА/м^2) в тканях в диапазоне частот 4-1000 Гц и удельная энергия (4 Вт/кг) на частотах выше 10 кГц; при частоте 50 Гц это соответствует напряженности поля 20 кВ/м и 4 кА/м .

Для регулирования допустимых напряженностей поля и времени воздействия на рабочих местах и для населения были введены коэффициенты безопасности. Например, были разработаны стандарты на тепловое воздействие высокочастотных электрических полей с удельной энергией ниже одной десятой безопасного значения ($0,4 \text{ Вт/кг}$). Для низких частот коэффициенты безопасности варьируются от 2,5 до более чем 10 раз. Например, в России санитарные нормы для зданий ограничивают напряженность электрических полей до $0,5 \text{ кВ/м}$, а для линий электропередачи на границах зон отчуждения - до 1 кВ/м . В других странах, например в США, стандарты варьируются от 1 кВ/м до 3 кВ/м в

зависимости от штата. В Австралии исключение сделано для линий электропередачи напряжением 500 кВ, где на границе запретной зоны допускается до 5 кВ/м.

Стандарты допустимых напряженностей полей промышленной частоты для рабочих мест и жителей также различаются в зависимости от страны. В некоторых странах, включая Казахстан, стандарты допустимых напряженностей магнитного поля промышленной частоты для населения еще не разработаны. Однако предварительные стандарты ENV50166, предложенные CENELEC, в настоящее время считаются наиболее разумными и всеобъемлющими. Эти стандарты действуют с 1995 года и действительны в течение трех лет, после чего они могут стать основными стандартами или быть отменены.

Базовая напряженность для непрерывного воздействия составляет 42 кВ/м для постоянных электрических полей в соответствии с ENV 50166 и 30 кВ/м для переменных электрических полей с частотой 0,1-4 Гц. Плотность тока между 4 и 1000 Гц составляет 10 мА/м², что соответствует напряженности 20 кВ/м и 4 кА/м. Для магнитных полей базовое значение напряженности составляет 1,6 МА/м. Впервые установлены нормы для токов, проходящих через тело человека, подвергающегося воздействию электрических полей промышленной частоты. Первая категория - 6,1 кВ/м и 159 А/м, в этом случае необходимо информировать работника об электрическом поле; вторая категория - 12,3 кВ/м и 320 А/м, в этом случае необходимо ограничить продолжительность пребывания работника в поле; третья категория - 19,6 кВ/м и 480 А/м, в этом случае необходимо предупредить об опасности. Когда необходимо предупредить об опасности. Для населения значение интенсивности должно быть в 2,5 раза ниже, чем на рабочем месте.

В Казахстане санитарно-эпидемиологические правила СанПиН устанавливают предельно допустимые значения электромагнитных полей на рабочих местах. Впервые в правилах удвоен уровень допустимого геомагнитного ослабления во время рабочей смены. Предельные значения постоянных магнитных полей составляют 24 кА/м в течение до 10 минут, 16 кА/м в течение от 11 до 60 минут и 8 кА/м в течение от 61 до 480 минут. Допустимая напряженность электрического поля частотой 50 Гц в течение всей смены составляет 5 кВ/м, которая может быть увеличена до 20 кВ/м при сокращении времени воздействия; при напряженности свыше 25 кВ/м использование средств защиты обязательно. Стандарт для промышленных частотных магнитных полей, действующих на все тело человека, также устанавливает предельно допустимые уровни в зависимости от продолжительности воздействия поля.

Таблица 3

Напряженность электрического поля кВ/м	Допустимая продолжительность пребывания персонала в течение суток, мин.
5	Без ограничения (в течение рабочего дня)
10	180
15	80
20-25	10

Если требования не соблюдаются, требуются различные меры по защите рабочего места. Для распределительных устройств на подстанциях ЕНУ, помимо расчетов, будут проведены измерения напряженности поля в различных местах после ввода в эксплуатацию. При необходимости экранирование будет усилено. При проведении технического обслуживания используются съемные экраны. К компоновке распределительного устройства предъявляются определенные требования. Например, шины не должны располагаться над автоматическими выключателями, чтобы обеспечить безопасность при техническом обслуживании.

Для линий электропередачи сверхвысокого напряжения, где могут находиться посторонние организации или местные жители, допустимые напряженности электрического поля под ЛЭП не учитывают временные затраты и на основании обследований установлены следующие критерии: 20 кВ/м - запретные зоны (например, болота, склоны), 15 кВ/м - ничейные земли, 10 кВ/м - дорожные развязки, 5 кВ/м - жилые районы. и 5 кВ/м - жилые районы. Допустимое напряжение на границах жилых зон также нормируется на уровне 0,5 кВ/м, чтобы люди могли оставаться в этой зоне всю жизнь без ограничений.

Для целей данного расчета напряжение не превышает 8,5 кВ/м на линии 330 кВ и 14 кВ/м на линии 500 кВ. Напряженность электрического поля максимальна непосредственно под линией и быстро уменьшается с увеличением расстояния от линии. Зона максимального воздействия электрического поля из-за провисания проводника находится в середине пролета, а зона минимального воздействия - на опоре, где проводник достигает максимальной высоты подвеса. Поэтому рекомендуется располагать дороги, скотопрогоны, тротуары, телекоммуникационные и низковольтные линии вблизи опор. В охранных зонах линий, где напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м, запрещается строительство постоянных и временных жилых и производственных зданий, а также предусматривается режим работы обслуживающего персонала. Если необходимо снизить напряжение в местах пересечения линии с дорогой, заземление может быть выполнено путем натяжения кабельного экрана на железобетонные столбы. Экранирование кабеля

также может использоваться для снятия напряжения на границах жилых районов.

Напряженности под линиями для всех линий СВН значительно превышают допустимую величину для населенных мест (5 кВ/м). Поскольку этот норматив распространяется только на новые линии, это может создать трудности при строительстве новых линий от крупных ТЭС и АЭС, расположенных в городах или поселках, так как для этого потребуется обеспечить минимальное расстояние от проводов до земли: 12 м для ЛЭП 330 кВ, 16,5 м для ЛЭП 500 кВ и 22 м для ЛЭП 750 кВ. В некоторых случаях, с учетом наличия более низких напряжений на шинах станций и выводах, могут быть экономически целесообразны комбинированные линии, где под проводами более высокого напряжения расположены провода с более низким напряжением, что позволяет сдвигать системы напряжений на 120° за счет изменения фазировки. Такое решение также может повысить пропускную способность линии.

В густонаселенных районах такие решения можно использовать для всей линии электропередачи, поскольку они не только снижают напряженность поля, но и увеличивают пропускную способность. Еще одним фактором, влияющим на условия работы в охраняемых зонах, является ток, возникающий при прикосновении к токопроводящему объекту. Учитывая, что с объектом могут контактировать мужчины, женщины и дети, величина этого тока должна быть безопасной для местного населения. По данным США, безопасным считается ток 9 мА для мужчин, 6,5 мА для женщин и 4,5 мА для детей; требования стандарта ENV50166 еще более строгие: 3,5 мА на рабочем месте и 1,5 мА для населения. Ток, возникающий при контакте человека с проводом, зависит от напряжения сети, емкости объекта по отношению к линии и активного сопротивления человека. Эмпирически этот ток можно выразить следующим образом...

$$I_{np} = K_{\phi} VE \quad (36)$$

Где K_{ϕ} - коэффициент формы объекта; V - объем объекта; E - напряженность поля на уровне 1,8 м над землей. Таким образом, стекающий ток пропорционален напряженности поля и объему объекта. Например, при напряженности поля 15 кВ/м ток, стекающий с комбайна СК-4 с прицепом, составляет 6—6,5 мА, а с крупных автобусов — 5-6 мА, что может быть опасно для женщин и детей. Это регулирует условия труда и пребывания местных жителей в охранной зоне линий напряжением 750 кВ и выше. В частности, все сельскохозяйственные машины и механизмы должны быть оснащены двумя заземляющими цепями с утяжеленными грузами на концах для обеспечения постоянного контакта с землей и использования заглубляемых заземлителей.

Также стоит отметить, что эффективным методом снижения напряженности поля под воздушными линиями электропередачи являются растительные массивы. Измерения показали, что в зоне сплошных растительных насаждений высотой 3-4 м напряженность поля под линиями не отличается от напряженности поля на земле в ясный день. В садах, например, с яблонями или вишнями, с расстоянием между деревьями 6-8 м напряженность поля под линией в междурядьях снижается в 2-3 раза по сравнению с полями. В кроне деревьев напряженность поля совпадает с напряженностью на земле в ясный день.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какую роль играют электрические процессы в жизнедеятельности живых организмов?
2. Каковы источники электрических и магнитных полей в электроустановках, промышленности, на транспорте и в быту?
3. Каковы механизмы воздействия электрических и магнитных полей на живые организмы?
4. Каковы стандартные пределы напряженности электрических и магнитных полей для рабочих мест и населения?
5. Как коронные разряды влияют на окружающую среду?
6. как электрические провода влияют на линии связи?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9

Тема: Качество электрической энергии и его обеспечение

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Качество электрической энергии оказывает существенное влияние на поведение потребителей электроэнергии и их технико-экономические характеристики. Рассмотрим типичный пример негативного влияния отклонений от стандартов качества электроэнергии. Как известно, основную долю нагрузки в электросистеме (около 60 %) составляют электродвигатели. Снижение частоты в системе вызывает уменьшение скорости вращения всех работающих электродвигателей, что ведет к снижению производительности связанных с ними механизмов и ухудшению экономических показателей работы. В случае значительного увеличения частоты, например, при сбросе нагрузки, возможны повреждения оборудования. Пониженная частота также влияет на срок службы оборудования с элементами из стали (таких как электродвигатели, трансформаторы и реакторы со стальными магнитопроводами) из-за

повышения тока намагничивания и дополнительного нагрева стальных сердечников.

При снижении напряжения в сети для ламп накаливания световой поток уменьшается, что снижает освещенность рабочей поверхности. Например, при напряжении $0,9U_{ном}$ освещенность уменьшается на 40 %, что влияет на производительность труда. Если напряжение повышается до $1,1U_{ном}$, освещенность увеличивается на 40 %, но это сокращает срок службы лампы в 4 раза.

Для асинхронных двигателей работа зависит от напряжения на их зажимах. При снижении напряжения на 15 % ($0,85U_{ном}$) момент на валу уменьшается до 72 % от номинального, и коэффициент запаса по устойчивости также снижается, что может привести к остановке двигателя. В условиях пониженного напряжения возрастает ток, потребляемый двигателем, что ведет к перегреву его изоляции и сокращению срока службы. Например, работа с напряжением $0,9U_{ном}$ снижает срок службы двигателя вдвое. Повышение напряжения увеличивает потребление реактивной мощности [2].

Снижение напряжения на терминале электротермической установки ухудшает работу, увеличивает продолжительность технического процесса и производственные затраты. Серьезные отклонения напряжения приводят к сбоям в техническом процессе. Например, снижение напряжения до $0,9 U_{ном}$ увеличивает время сварки на 20 %, а дефекты сварного шва возникают при выходе напряжения за пределы диапазона от $0,9$ до $1,1 U_{ном}$. Полные дефекты в металлических швах возникают при отклонениях напряжения более чем на $\pm 5\%$, а для коррозионно-стойких и жаропрочных сталей - более чем на $\pm 10\%$.

На электролизных заводах перепады напряжения приводят к снижению производительности, увеличению энергопотребления и производственных затрат.

Основными проблемами качества электроэнергии являются ситуации падения или повышения напряжения, длительные искажения формы кривой напряжения и переходные явления.



Рисунок 1 – Основные случаи ухудшения качества электроэнергии

Длительное отклонение сетевого напряжения от нормального значения сокращает срок службы двигателя и блока питания. Низкое напряжение особенно опасно, так как оно значительно увеличивает потребление тока. Низкое напряжение также может нарушить работу компьютеров и микроконтроллеров и привести к их выходу из строя. Наиболее серьезные последствия вызывает полное исчезновение напряжения питания. Кратковременные скачки и провалы напряжения вызываются переходными процессами в электрических системах и могут быть разделены на две группы: 1) импульсные скачки, вызванные коммутацией активных и индуктивных нагрузок, и 2) гармонические переходные процессы, вызванные коммутацией емкостных нагрузок. Эти переходные процессы сопровождаются высокочастотными помехами, которые вызывают сбои в работе электронного оборудования. Перенапряжения могут привести к неисправностям потребителей, если не обеспечить надлежащую защиту. Это предъявляет высокие требования к коммутационным устройствам, особенно к устройствам защиты, с точки зрения скорости и селективности. Длительное искажение кривой напряжения также оказывает неблагоприятное воздействие на силовое электрооборудование и измерительные приборы. Особенно опасны искажения в виде «зазубрин», которые возникают при переключении тиристоров и диодов на мощных источниках искажений. Наибольшую опасность представляют искажения напряжения при пересечении нуля, которые могут вызвать дополнительное переключение диодов на маломощных источниках, ускорить старение конденсаторов, привести к сбоям в работе электронных часов, нарушить работу принтеров и другого оборудования. Основным нормативным документом, определяющим требования к качеству электроэнергии в сетях общего назначения, является ГОСТ 13109-97 «Стандарты на качество электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения» [2].

В соответствии с ГОСТ 13109-97 некоторые показатели качества электроэнергии (ПКЭ) отражают нарушения, возникающие при стабильной работе электрооборудования как электроснабжающей организации, так и потребителя, связанные с особенностями процессов генерации, передачи, распределения и потребления электроэнергии. К таким нарушениям относятся отклонения напряжения и частоты, искажения синусоиды напряжения, асимметрия и флуктуации напряжения. Для этих показателей ГОСТ устанавливает допустимые значения. Другие ПКЭ характеризуются кратковременными возмущениями, возникающими в сети из-за коммутационных процессов, грозowych и атмосферных явлений, а также работы систем защиты и автоматики после аварийных ситуаций. К ним относятся перепады и импульсы напряжения, а также кратковременные перерывы в электроснабжении; ГОСТ не устанавливает конкретных значений для этих показателей, но их параметры должны

измеряться и собираться в виде статистических данных для оценки вероятности возникновения кратковременных возмущений в сети. Если показатели качества электроэнергии не соответствуют установленным стандартам, электроснабжающая организация несет ответственность перед потребителем.

В целом, ПКЭ отражает степень искажения напряжения в сети из-за кондуктивных помех, исходящих как от электроснабжающей организации, так и от потребителей. Проблема качества электроэнергии в России имеет свои особенности. В развитых западных странах подключение мощных нелинейных нагрузок, искажающих формы тока и напряжения, возможно только при соблюдении стандартов качества и использовании корректирующего оборудования. Суммарная мощность таких нелинейных нагрузок не должна превышать 3-5 % от общей мощности сети. Иная ситуация была в бывшем Советском Союзе, где подобные подключения потребителей часто носили хаотичный характер. Например, при вводе в эксплуатацию здания электролиза Братского алюминиевого завода, являющегося важным источником искажений, его мощность составляла более 30 % от мощности потребителей Иркутского Нерго. Аналогичная ситуация сложилась при подключении подстанций на Байкало-Амурской магистрали. В результате российская энергосистема оказалась перенасыщена искажающими устройствами, а в некоторых регионах, например в Восточной Сибири, возникла уникальная проблема искажения кривой «ток-напряжение». Соблюдение норм качества электроэнергии позволяет экономить материальные, топливные и энергетические ресурсы и снижать производственные затраты, связанные с утилизацией и использованием продукции из-за низкого качества электроэнергии. ГОСТ 13109-97 устанавливает два вида норм для ПКЭ: нормально-допустимые и предельно допустимые. Оценка соответствия показателей качества электроэнергии этим критериям проводится за расчетный период, соответствующий 24 часам. Основными параметрами качества электроэнергии являются частота и напряжение, которые определяются балансом активной и реактивной мощности в системе. При дефиците активной мощности частота системы падает, что приводит к уменьшению скорости вращения электродвигателей. В случае дефицита активной мощности более 30% возникает быстрый спад частоты, что может привести к «лавине частоты». Напряжение в узле системы зависит от баланса реактивной мощности в сети. ГОСТ 13109-97 перечисляет 11 показателей качества электроэнергии, среди которых установившееся отклонение напряжения, размах его изменений, коэффициент искажения синусоидальности и другие параметры, включая длительность провала напряжения и импульсные напряжения [2].

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Назовите основные причины ухудшения качества электроэнергии
2. Что относится к показателям качества электроэнергии
3. Охарактеризуйте влияние качества электрической энергии на электрооборудование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение электромагнитной совместимости (ЭМС) является неотъемлемой частью современного технического образования. Это связано с постоянно растущей зависимостью общества от электронных устройств и систем, работающих в сложной электромагнитной среде. Глубокое понимание принципов и методов обеспечения ЭМС позволяет решать задачи, связанные с проектированием надежных и устойчивых к помехам систем, что критически важно в таких областях, как телекоммуникации, энергетика, медицина, транспорт и военная техника.

В рамках данного учебного пособия рассмотрены теоретические основы ЭМС, классификация электромагнитных помех, методы защиты и стандарты, регулирующие параметры электромагнитной совместимости. Практическая часть материала охватывает анализ реальных примеров и технологий, что делает изучение данной дисциплины более прикладным и понятным.

Основные выводы, которые студент должен вынести из данного пособия:

- ЭМС — это ключевой фактор успешного функционирования электронных систем;
- профилактика электромагнитных помех значительно эффективнее и экономичнее их устранения;
- соблюдение стандартов ЭМС является обязательным условием проектирования и эксплуатации современных устройств.

Мы надеемся, что изложенный материал станет надежным инструментом для студентов и инженеров, способствуя их профессиональному росту и успешной работе в области разработки и эксплуатации электронных систем.

Дальнейшее углубление знаний и практических навыков в области ЭМС будет способствовать повышению качества, надежности и безопасности инженерных решений в различных отраслях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ott, Henry W. Electromagnetic compatibility engineering / Henry W. Ott. – 1936 Rev. ed.p. cm.
2. Ростова, А.Т. Электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах для студентов по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Практикум – Пятигорск : Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – 45 с.
3. Попов, В. М. Электромагнитная совместимость : учебное пособие / В. А. Афонькина, Е. Н. Епишков, Е. И. Кривошеева. — Челябинск : ЮУрГАУ, 2022. — 144 с. — ISBN 978-5-88156-915-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/363866>
4. Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Новосибирск : НГТУ, 2017. — 196 с. — ISBN 978-5-7782-3367-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118157>
5. Федосов, Д. С. Электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах : учебное пособие / Д. С. Федосов. — Иркутск : ИРНИТУ, 2021. — 162 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/325484>
6. Гурьев, С.В. Основы электромагнитной совместимости. — Москва: Радио и связь, 2005.
7. Попов, В.В. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В.В.Сухоруков — СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
8. Саенко, И.В. Электромагнитная совместимость: Учебное пособие. — Москва: МИФИ, 2018.
9. Шаталов, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, И. И. Боровлев. – СтГАУ. Ставрополь : АГРУС, 2012. – 200 с.
10. Холдинг, Л. Основы электромагнитной совместимости. — Москва: Энергоатомиздат, 2009.
11. Клингельс, Э. Руководство по защите от электромагнитных помех. — Пер. с англ. — Москва: Мир, 2006.
12. Орешкин, В.Е. Электромагнитная совместимость и защита информационных систем: Учебник. — Москва: Физматлит, 2017.
13. Мартыненко, С.Н. Основы теории электромагнитных помех. — Новосибирск: НГТУ, 2013.
14. Серов, А.И. Методы обеспечения электромагнитной совместимости в радиоэлектронике. — Москва: Радиотехника, 2015.

15. Чижов, Л.И., Основы электромагнитной совместимости электронных систем. / С.В. Шелест — Киев: Наукова думка, 2010.
16. Розенберг, Л.Д. Электромагнитная совместимость устройств электронной аппаратуры. — Москва: Радио и связь, 2004.
17. Шендеров, А.А. Электромагнитная совместимость технических средств. / Е.А.Латышев — Москва: Вузовская книга, 2019.
18. Козырев, А.И. Моделирование процессов в электромагнитной совместимости. / А.В.Лепихин — Самара: СамГТУ, 2016.
19. Шаталов, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике /А. Ф. Шаталов [и др.]. – Ставрополь : АГРУС, 2014. – 60 с
20. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия, совместимость технических средств, электромагнитная норма качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – Москва : Стандартиформ, 2014.

Учебное издание

Джапарова Динара Амангельдиевна
старший преподаватель, кандидат технических наук

Ғұсманова Айсәуле Русланқызы
преподаватель, магистр

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Подписано к печати 23.12.2024 г.
Формат 60х84 1/16 Бумага листовая 80 м/г
Объем 11,75 п.л. Заказ №251
Тираж 500 экз.

***Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных оригиналов***

в НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический
университет имени Жангир хана»
090009, г.Уральск, Жангир хана, 51