e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Основные средства улучшения ЭМО

Автор: Тхай О.Л.

1. Улучшение системы заземления

Мероприятия по улучшению системы заземления обычно преследуют три цели:

- обеспечение электробезопасности персонала,
- снижение аварийных и молниевых потенциалов, опасных для электронной аппаратуры и ее кабелей,
- повышение защиты аппаратуры от высокочастотных полей и помех.

Обеспечение электробезопасности персонала в рамках данного файла специально не рассматривается. Отметим лишь, что снижение аварийных и молниевых потенциалов на элементах заземляющего устройства до уровней, безопасных для аппаратуры, обычно обеспечивает и снижение напряжений шага и прикосновения. Поэтому ниже рассматривается оптимизация системы заземления с точки зрения достижения двух последних целей.

1.1 Снижение аварийных и молниевых потенциалов

Наиболее серьезным недостатком существующего заземления может быть неприемлемо высокое значение сопротивления заземляющего устройства в целом. В этом случае при коротком замыкании или ударе молнии все электронное оборудование, присоединенное к данному заземляющему устройству, приобретает высокий потенциал. Прежде всего, это представляет опасность для аппаратуры, связанной проводными коммуникациями с аппаратурой на других объектах, расположенных достаточно далеко (т.е., в зоне нулевого потенциала). Кроме того, в случае, если заземление нейтрали трансформатора питания производится на другое заземляющее устройство, возникает опасность и для цепей питания аппаратуры.

Высокое значение сопротивления заземляющего устройства в целом может быть обусловлено двумя причинами: высоким сопротивлением растеканию заземлителя и высоким сопротивлением заземляющего проводника.

Рассмотрим сначала первый случай. Для снижения сопротивления растеканию можно рекомендовать установку дополнительных заземлителей, связанных с существующим заземляющим устройством. Конфигурация дополнительных заземлителей может быть различной. Обычно используются вертикальные металлические штыри или трубы, а также заглубленные в землю горизонтальные металлические полосы или уголки, образующие структуру типа сетки. Перед реализацией таких мероприятий проводят расчет, позволяющий приблизительно оценить их эффективность.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Иногда низкое значение сопротивления растеканию обеспечивается естественными заземлителями (трубопроводами, экранами и броней кабелей и т.п.). Однако к использованию таких заземлителей следует относиться с большой осторожностью.

Во-первых, в некоторых случаях это представляет опасность выноса потенциала по трубопроводам или экранам кабелей. В результате выноса потенциала может появиться угроза для безопасности персонала, занятого, например, ремонтными работами.

Во-вторых, протекание значительных токов по естественным заземлителям может вызвать их повреждение. Кабели имеют определенную термическую стойкость, поэтому при превышении допустимого значения тока происходит их термическое повреждение. Что же касается трубопроводов, то в некоторых случаях протекание по ним переменного тока может способствовать коррозии.

В третьих, используемые естественные заземлители обычно находятся в ведении другой организации, и могут быть подвергнуты демонтажу или реконструкции без уведомления владельца заземляющего устройства. Например, замена отдельных фрагментов металлических трубопроводов на пластиковые может сделать эти трубопроводы абсолютно бесполезными с точки зрения заземления.

И, наконец, не следует забывать о возможности обратного выноса потенциала по естественным заземлителям с других объектов.

Из сказанного следует, что, хотя естественные заземлители все равно будут присоединены к заземляющему устройству, они не должны играть определяющую роль в обеспечении требуемого значения сопротивления растеканию. Исключением являются, пожалуй, лишь строительные металлоконструкции, непосредственно связанные с объектом.

Нужно отметить, что обычно проблема высокого сопротивления растеканию возникает в областях с высоким удельным сопротивлением грунта (гористые местности, вечная мерзлота, пустыня и т.п.). В обычных условиях высокое сопротивление растеканию встречается довольно редко. Часто результаты измерений, свидетельствующие о высоком значении сопротивления растеканию, являются следствием либо влияния помех, либо неудачного выбора в качестве точки измерения элемента, имеющего неудовлетворительную связь с остальным заземляющим устройством.

Высокое сопротивление заземляющего проводника иногда бывает обусловлено его недостаточным сечением. Однако чаще причиной оказывается чрезмерная (порядка сотен метров) длина этого проводника. В этом случае даже увеличение сечения не дает ожидаемого результата, поскольку основной вклад в сопротивление вносит реактивная составляющая сопротивления. Это особенно сильно проявляется при измерениях в высокочастотной области.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

На больших энергопредприятиях (электростанциях, подстанциях и т.п.) чаще встречаются случаи, когда сопротивление растеканию заземляющего устройства лежит в пределах нормы, но его отдельные элементы имеют неудовлетворительную связь со всем заземляющим устройством. В этом случае для ликвидации опасных разностей потенциалов в пределах заземляющего устройства необходимо восстановить связи между его элементами. Для некоторых элементов дефекты могут быть обнаружены при визуальном осмотре (обычно некачественная сварка в месте присоединения заземляющего проводника к заземлителю). Такие дефекты могут быть легко устранены. Если же дефект не может быть обнаружен визуальным осмотром, необходимо проложить дополнительные заземлители, восстанавливающие утраченные связи между элементами ЗУ. Заземление следует выполнять путем прокладки дополнительных заглубленных горизонтальных заземлителей, связывающих дефектный элемент ЗУ с другими элементами, имеющими нормальную связь с ЗУ. Ввод в заземлитель присоединяется кратчайшим путем к горизонтальным заземлителям, которые прокладываются на расстоянии 0,8-1,5 метра от фундамента заземляемой электроустановки. Получившаяся конструкция должна удовлетворять следующим требованиям:

– В радиусе 3-х метров от места присоединения заземляющего проводника к заземлителям должно обеспечиваться растекание тока не менее чем в четырех направлениях вдоль проводников, образующих сетчатый заземлитель энергообъекта.
– Непосредственно у места присоединения заземляющего проводника к заземляющему устройству должно обеспечиваться растекание токов не менее чем в двух направлениях.

В некоторых случаях для защиты трасс кабелей от аварийных и молниевых потенциалов используют дополнительные заземлители, играющие роль «барьеров». Пример схемы с использованием такого заземлителя приведен на рисунке 1.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

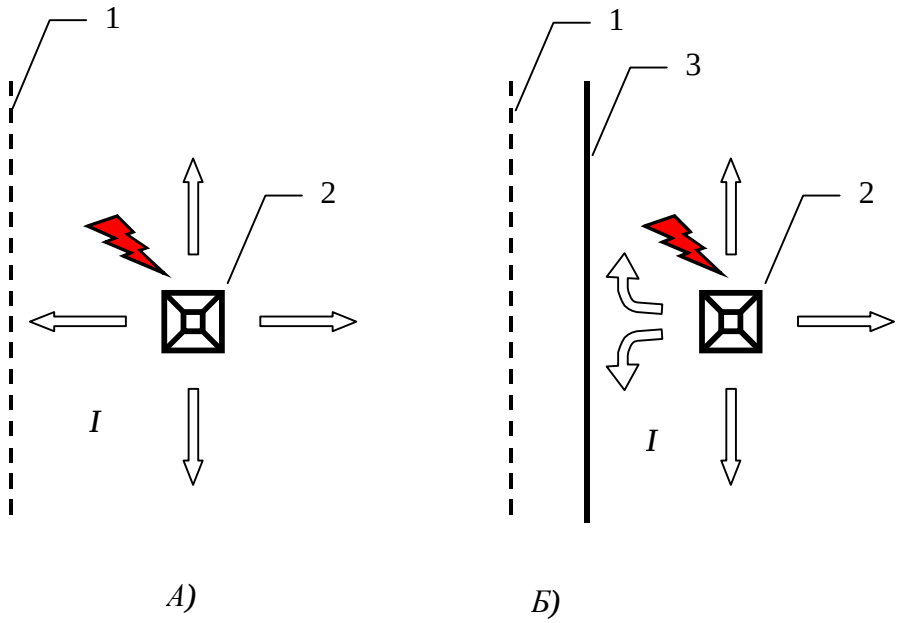


Рисунок 1-1. Прокладка дополнительного заземлителя для защиты трассы кабелей. А) - растекание тока при отсутствии, Б) - при наличии заземлителя. 1 - трасса кабеля, 2- источник потенциала (например, молниеотводная мачта), 3 - дополнительный заземлитель.

Здесь заземлитель отводит ток короткого замыкания или молнии в зону нулевого потенциала, не давая ему достичь кабельной трассы. Соответственно, потенциал вдоль трассы кабелей в случае Б) будет ниже, чем в случае А).

1.2 Оптимизация заземления для защиты от высокочастотных помех

Часто улучшение системы заземления позволяет снизить опасность для аппаратуры со стороны высокочастотных помех. Источники высокочастотных помех в цепях заземления можно разделить на два класса:

– источники кондуктивных помех, непосредственно подключенные к данному заземляющему устройству;

– источники наводок в цепях заземления.

Рассмотрим сначала ситуацию с **кондуктивными помехами**.

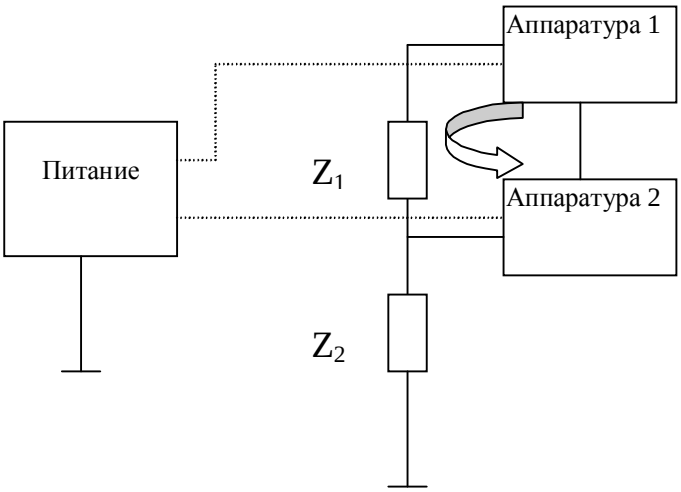
Во многих случаях конструкция силовой или информационной аппаратуры подразумевает использование заземляющего проводника в качестве цепи возврата тока к источнику. Особенно сильно это проявляется в схемах, где осуществляется зануление (т.е. нейтраль или «ноль» фактически используется в качестве заземляющего проводника). Помехи в цепях заземления могут создаваться при работе элементов типа логических ключей, заземленных

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

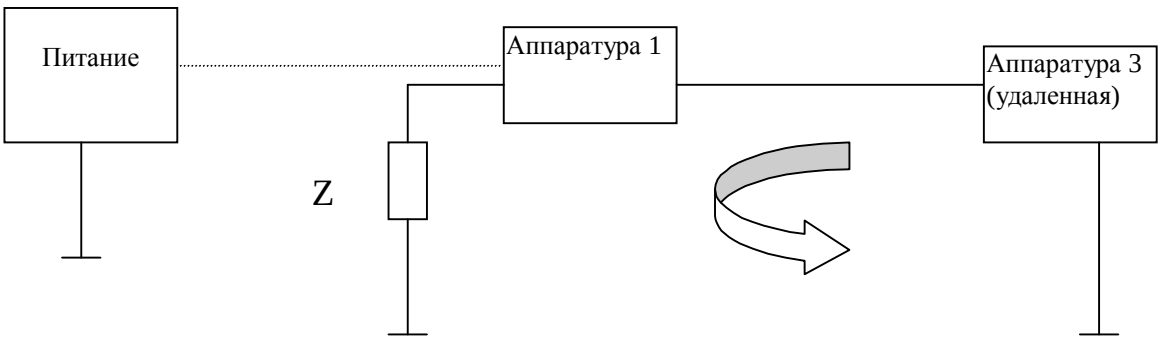
e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

передающих антенн, блоков питания, вследствие канализации помех из других цепей фильтрами и т.п. Похожие помехи также создаются при электростатическом разряде с тела человека на заземленные проводящие элементы. Спектр кондуктивных помех в цепях заземления может лежать в очень широкой области: от 50 Гц до гигагерц в зависимости от конкретных источников.

Рассмотрим, каким образом такие помехи могут мешать работе аппаратуры.



А)



Б)

Рисунок 1-2. Механизмы влияния помех от источников в цепях заземления.

В случае А) на рис. 1-2 предполагается, что аппаратура 1 и 2 размещается на одном объекте и подключается к заземлителю последовательно: отрезок заземляющего проводника сопротивлением Z_1 связывает аппаратуру 1 с аппаратурой 2, а вторая часть заземляющего проводника (сопротивлением Z_2) связывает аппаратуру 2 с заземлителем. Тогда при стекании токов первого

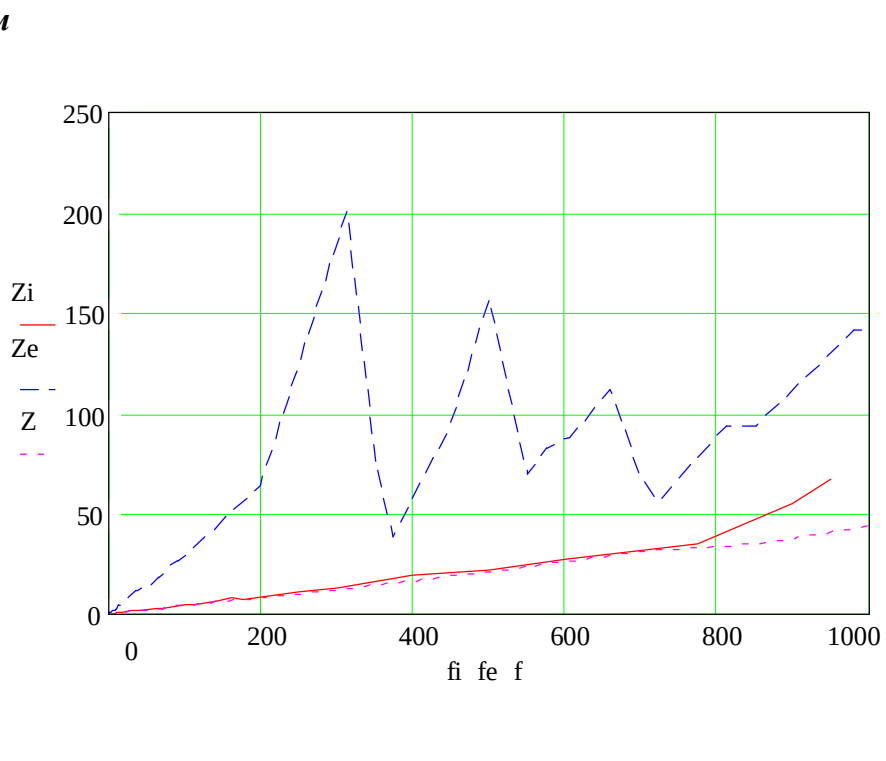
PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

устройства в землю создается падение напряжения на сопротивлении Z_1. Это напряжение оказывается приложенным к информационным цепям, связывающим блоки 1 и 2. Если информационные цепи выполнены по существенно несимметричной схеме (например, для передачи сигнала используются экран и жила кабеля), напряжение помехи может быть воспринято как ложный сигнал. Даже в формально симметричной схеме (например, при использовании «витой пары») несимметрия входных цепей аппаратуры может вызвать преобразование помехи «провод-земля» в помеху «провод–провод». В реальности ситуация часто усугубляется тем, что имеется целая цепочка устройств, подключенных последовательно к общему заземляющему проводнику. При этом все они могут влиять друг на друга, причем самое большое влияние будет оказываться на кабели, связывающие первое и последнее устройство в цепочке.

Аналогичная ситуация показана на схеме Б) рис. 1-2, где аппаратура 1 связана с аппаратурой 2 на другом объекте длинным кабелем. Ток, стекая с аппаратуры 1 в землю через сопротивление Z, создает на нем падение напряжения, которое в итоге оказывается приложенным к кабелю связи.

При рассмотрении схем А) и Б) нужно иметь в виду, что сопротивление заземлителя и заземляющих проводников является малым только на промышленной частоте. С ростом частоты оно резко возрастает (см. рисунок 1-3) за счет погонной индуктивности заземляющего проводника и элементов заземлителя.



PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Рисунок 1-3. Сопротивления различных заземляющих устройств одного здания: Zi - внутреннее заземляющее устройство (связано с металлоконструкциями здания), Ze - внешнее заземляющее устройство (заземлитель трансформаторной подстанции связан со зданием заземляющим проводником, связанное со зданием длинным заземляющим проводником), Z - суммарное сопротивление (оба устройства включены параллельно).

Особенно большим сопротивление может оказаться при длинах заземляющих проводников порядка $n*l/4$, когда наблюдается эффект «стоячей волны». При этом сопротивление заземляющего проводника может принимать сколь угодно большие значения. Поэтому в настоящее время *не рекомендуется использовать заземляющие проводники длиной более* $l/20$, где l – ожидаемая длина волны помехи. В реальности это означает, что частоте помех порядка 1 МГц длина заземляющего проводника не должна превышать примерно 15 м.

В ситуации А) на рисунке 1-2 для уменьшения взаимовлияния аппаратуры можно перейти от последовательного присоединения аппаратуры к общему заземляющему проводнику (типа «шина», вариант 1 на рисунке 1-4) к параллельному соединению (типа «звезда», вариант 2 на рисунке 1-4). При использовании схемы «звезда» длины отдельных заземляющих проводников до точки присоединения к общему заземляющему проводнику обычно оказываются меньше, чем для схемы «шина». Поскольку сопротивление на низких частотах пропорционально длине проводника, это позволяет снизить значения сопротивлений типа сопротивления Z_1 на схеме А) рисунка 1-2. В свою очередь, снизятся и помехи в цепях связи между блоками аппаратуры.

Чтобы снизить погонную индуктивность, рекомендуется использовать заземляющие проводники большого сечения. Идеальным является использование медных полос.

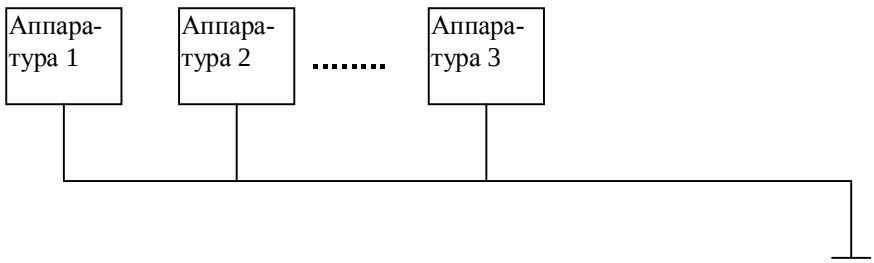
В особенно серьезных случаях, когда требуется исключить появление высокочастотных помех в цепях заземления (особенно, когда рабочие частоты аппаратуры велики – больше 10 МГц), оптимальным является заземление на общую плоскость – вариант 3 на рисунке 1-4. Для этого пол помещения, где размещаются блоки аппаратуры, покрывается тонкими металлическими листами, имеющими хорошую электрическую связь друг с другом по всем линиям соприкосновения. Присоединение блоков аппаратуры к самим листам выполняется короткими (не более метра) ленточными проводниками. Вместо листов иногда используют систему заземляющих проводников, образующую структуру типа сетки.

ЗАМЕЧАНИЕ. Похожая схема используется при выполнении многих испытаний на ЭМС

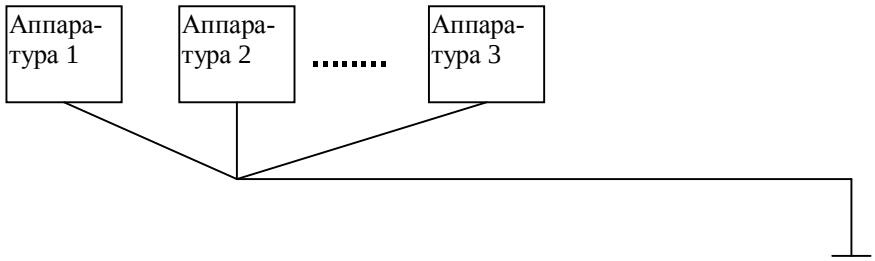
PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

1)



2)



3)

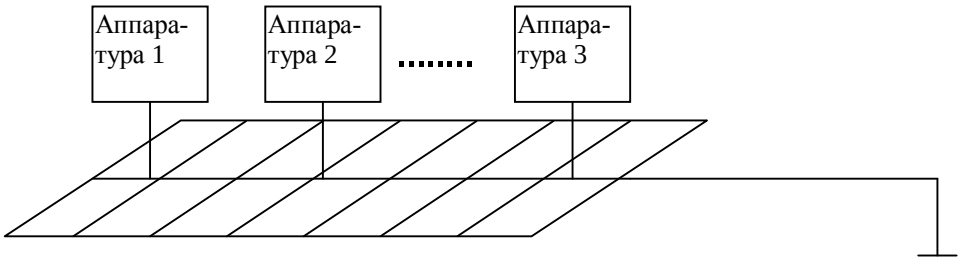


Рисунок 1-4. Различные схемы заземления аппаратуры

ЗАМЕЧАНИЕ. На практике редко удается реализовать ту или иную топологию системы заземления в чистом виде. Обычно реальные системы заземления имеют иерархическую структуру («иерархическая звезда» или «звезда – шина»).

В случае Б на рисунке 1-2 (когда имеются линии связи с удаленной аппаратурой) снизить до приемлемых значений импеданс Z часто не удается. Поэтому здесь на первый план выходят мероприятия по защите линий связи. В частности, хороший эффект дает применение схем с высокой степенью симметрии по входам, использование фильтрации, применение оптической развязки. Разумеется, эти мероприятия дают хороший эффект и в случае А).

В некоторых случаях хорошим решением может быть создание двух отдельных систем заземления. Первая (обычное защитное заземление) используется для заземления силовых установок, фильтров внешних цепей и других объектов, являющихся источниками значительных помех. Вторая (рабочее заземление) используется для заземления информационной аппаратуры, чувствительной к помехам. Обе системы присоединяются к общему заземлителю или двум разным заземлителям. Такое решение в некоторых случаях может быть

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

довольно эффективным. Необходимо, правда, учитывать, что при этом между элементами различных систем заземления могут появляться значительные потенциалы, представляющие угрозу для аппаратуры, а иногда и человека. Это особенно актуально, когда две системы заземления используют разные точки ввода в заземлитель и, тем более, различные заземлители. Кроме того, соединение любыми кабелями элементов, входящих в разные системы заземления, приводит к образованию замкнутых контуров, в которых могут возбуждаться высокочастотные токи помех (см. ниже).

Рассмотрим теперь проблему **наводок в цепях заземления**.

Сравнительно длинные заземляющие проводники представляют собой хорошие антенны в широком диапазоне частот. При этом причиной наводок могут быть как внешние источники (радио и телевизионные передатчики, силовые электроустановки, коммутационные операции в силовых сетях и т.п.), так и находящиеся внутри здания (сотовые и радио- телефоны, средства локальной радиосвязи, блоки питания аппаратуры, сильно «шумящие» высокочастотные электронные узлы и т.п).

Механизм воздействия наводок в цепях заземления на аппаратуру примерно тот же, что и кондуктивных. Во-первых, возникающие падения напряжения на элементах заземляющего устройства оказываются в итоге приложенными к входам аппаратуры. Во-вторых, возможно протекание токов помех по корпусам и шасси аппаратуры. Особое внимание следует уделить проблеме образования замкнутых контуров, в которых могут протекать токи радиочастотных помех. Чаще всего такие контура образуются заземляющими проводниками, экранами кабелей, корпусами и шасси аппаратуры.

Чтобы понять механизм воздействия токов помех, рассмотрим рисунок 1-5:

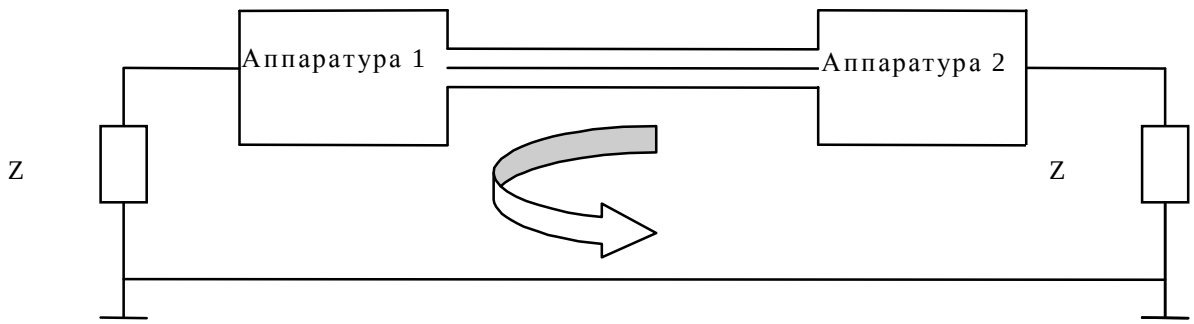


Рисунок 1-5. Протекание токов помех в замкнутых контурах системы заземления.

Имеется замкнутый контур, образованный цепями заземления аппаратуры 1 и 2 и заземленным на обоих концах экраном кабеля, связывающего блоки

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

аппаратуры. Внешние радиочастотные помехи наводят в этом контуре ЭДС. Наличие ЭДС приводит к возникновению тока, протекающего через заземляющие проводники, экран соединительного кабеля и корпуса приборов. Это приводит к появлению помех на входах, а также протеканию токов помех по корпусам аппаратуры.

Для борьбы с помехами на входах наиболее предпочтительным выглядит вариант, когда экран кабеля не несет никакой сигнальной нагрузки, а внутри проходят симметричные цепи. Пример такого кабеля – экранированная витая пара. Тогда проблема помех во входных цепях обычно оказывается решенной, но остается проблема протекания токов помех по корпусам аппаратуры. Для ее решения на низких частотах иногда используют одностороннее заземление экрана кабеля, когда экран соединяется с корпусом аппаратуры лишь с одной стороны. В этом случае, однако, повышается помеха «провод–земля» на входе аппаратуры. На высоких частотах такая схема вообще неэффективна, поскольку связь экрана с корпусом аппаратуры с другой стороны все равно осуществляется через паразитные емкости. Подробнее о заземлении экранов кабелей – см. раздел 5.

Для подавления радиочастотных токов можно использовать фильтрацию. Простейшим вариантом является использование ферритовых «бус». Подробнее о фильтрации – см. раздел 4.

По результатам этого раздела можно выделить следующие рекомендации по организации заземления аппаратуры в здании:

1. На частотах ниже 5–10 МГц предпочтительной схемой заземления является «звезда» или «иерархическая звезда». При больших частотах для повышения помехоустойчивости рекомендуется схема с заземляющей плоскостью. Схему типа «шина» следует применять лишь в случаях, когда вопросы защиты от помех не принципиальны. В ряде случаев допускается применение комбинированной топологии.
2. Заземляющие проводники должны быть как можно короче. Сечение должно быть большим; оптимальная форма – лента или полоса.
3. Для уменьшения длины заземляющего проводника аппаратуру проводной связи с удаленными объектами лучше размещать на первом этаже здания.
4. Категорически не рекомендуется использовать зануление.
5. Там, где это возможно, следует избегать использования заземляющих проводников длиной более $\lambda/20$.
6. При использовании отдельных систем рабочего и защитного заземления нужно следить, чтобы высокий уровень помех между ними не оказался приложенным к чувствительным элементам аппаратуры. Должно быть обеспечено корректное использование обоих систем заземления в процессе эксплуатации и модернизации объекта.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Рекомендации, которым нужно следовать при прокладке цепей обмена информацией и питания приводятся ниже.

2. Оптимизация прокладки цепей управления, связи и питания

Иногда решение проблемы ЭМС обеспечивается простым изменением прокладки кабелей питания и обмена информацией.

Во-первых, по возможности следует избегать прохождения кабелей по территории с высокими уровнями аварийных или молниевых потенциалов и внешних полей. Особенно это касается сближения проложенных по земле кабелей с молниеотводными мачтами, линиями электропередачи, распределительными устройствами подстанций, электротранспортом и т.п. Так, например, расстояние от кабельной трассы до молниеотводных мачт должно быть не менее 10 – 15 метров. Внутри зданий не следует прокладывать информационные кабели вблизи силовых щитов, электродвигателей, мощных установок кондиционирования и т.п.

В некоторых случаях сближения кабелей с источниками помех избежать не удается. Тогда следует минимизировать суммарную длину участков кабелей, подверженных влиянию помех. Например, пересечение кабелей связи с железными дорогами и ЛЭП всегда должно осуществляться под углом, близким к прямому.

Иногда вынужденное сближение кабелей с источниками помех требует проведения дополнительных защитных мероприятий. Так, например, при сближении кабелей с молниеотводной мачтой их прокладку необходимо производить на изолирующих опорах, чтобы избежать пробоя изоляции кабелей при сильном повышении потенциала подстилающей земли. На концах такого кабеля обычно устанавливаются разрядники или другие защитные элементы, защищающие присоединенную к нему аппаратуру от наведенных при ударе молнии помех.

Рассмотрим теперь вопросы, связанные с совместной прокладкой кабелей различного назначения.

Причиной, по которой к совместной прокладке цепей различного назначения следует относиться с осторожностью, является емкостная и индуктивная связь между цепями. В отдельных случаях также возможен электрический пробой между различными цепями. Благодаря большой длине участков совместной прокладки, уровни наводимых помех могут оказаться значительными. Источниками наводок могут быть как полезные сигналы в других кабелях, так и помехи, появившиеся в этих кабелях в силу тех или иных обстоятельств.

ПРИМЕР. Рассмотрим, вариант совместной прокладки силовых кабелей и цепей передачи цифровой информации. При нормальной работе системы электропитания в информационных цепях наводится ЭДС помехи частотой 50 Гц. В силу того, что частоты передачи цифровой информации значительно выше, а ЭДС помехи невелика, такая ситуация не представляет угрозы для нормальной работы информационной системы. Пусть теперь в цепь питания включается какой-нибудь источник импульсных помех (например, электродвигатель с сильным искрением щеток). В результате в информационных цепях также наведутся

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

импульсные помехи, частота которых будет уже близка частотам передачи информации. Если при этом учесть, что индуктивная и емкостная связь увеличивается с ростом частоты, то мы получим ситуацию, в которой появление сбоев в работе информационной системы будет вполне реальным.

Иногда опасность представляет совместная прокладка экранированных и неэкранированных кабелей, поскольку по экранам могут протекать значительные токи помех.

Можно рекомендовать разделять цепи минимум на две группы: с высоким и низким уровнем помех. К первым следует отнести силовые цепи, цепи различного назначения, проходящие по территории с высоким уровнем помех (например, распределительным устройствам подстанций), а также цепи, идущие на удаленные объекты, и т.п. К второй группе обычно относят информационные цепи, сигналы в которых имеют незначительную амплитуду, а ожидаемая амплитуда помех мала. Пример таких цепей – кабели локальной вычислительной сети, расположенной в пределах одного здания. Иногда ко второй группе относят и кабели питания информационной техники при условии, что для нее имеется отдельная система питания, отделенная от общей сети питания фильтром или источником бесперебойного питания (ИБП).

Цепи первой и второй группы должны прокладываться отдельно друг от друга. Сближения допускаются только в крайних случаях и на небольших участках. Пересечения должны выполняться под прямым углом и (желательно) на разных уровнях.

Для предотвращения влияния токов помех в экранах кабелей первой группы на другие цепи и аппаратуру обычно практикуют повторное заземление их экранов в месте ввода в здание.

И, наконец, при прокладке цепей передачи информации, питания и заземления нужно учитывать требования защиты от высокочастотных помех в цепях заземления (разд. 1.2).

Теперь можно сформулировать набор правил, соблюдение которых в ходе проектирования, строительства или реконструкции объекта способно избавить от многих проблем, связанных с ЭМС. В простейшем варианте, эти правила таковы:

1. По возможности, избегать прокладки кабелей по территориям, на которых ожидается высокий уровень помех.
2. Не объединять вместе (в одном кабельном лотке или коробе) кабели передачи информации и силовые кабели, а также другие цепи, способные быть источниками значительных помех.
3. Геометрия прокладки трасс информационных кабелей, цепей питания и заземления должна быть примерно одна и та же. Это позволяет избежать образования петель значительной площади, в которых индуцируется ЭДС помехи. В то же время, по соображениям защиты информационных цепей от помех со стороны цепей питания и заземления, между ними все же должно выдерживаться некоторое минимальное расстояние (обычно − от нескольких

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

десятков сантиметров до 1 метра).

4. По возможности, для передачи сигналов рекомендуется использовать экранированные симметричные цепи. Экран кабеля не следует использовать в качестве сигнальной цепи.
7. Присоединение экрана кабеля к корпусу аппаратуры должно выполняться специальным разъемом по всей окружности кабеля. Использование «косичек» из оплетки или отдельных проводов нежелательно, поскольку они имеют большое сопротивление на высокой частоте.
8. При наличии информационных кабелей, идущих на удаленные объекты, необходимо предпринимать специальные меры по их защите от помех «провод – земля». Желательно использование оптической развязки с высоким уровнем симметрии по входам.

Разумеется, строгое соблюдение этих правил возможно далеко не всегда. Однако любое отклонение от них должно быть, по крайней мере, мотивированным. В таких случаях желательно обратить особое внимание на проблему ЭМС и обеспечить дополнительную защиту уязвимых элементов системы (например, с помощью фильтров и устройств ограничения перенапряжений).

3. Организация системы питания

При выборе схемы питания аппаратуры нужно решить, требуется ли:

- Защита аппаратуры от кратковременных помех по цепям питания и
- Обеспечение бесперебойной работы аппаратуры при длительном отключении внешнего питания.

На всех объектах, где может размещаться аппаратура связи, имеется сеть собственных нужд (380/220 В). На энергопредприятиях часто доступно питание оперативным током (постоянное напряжение 220 В) от аккумуляторной батареи. Наконец, в некоторых случаях используется питание постоянным напряжением 48 В от специальной связевой аккумуляторной батареи.

В некоторых случаях (обычно когда на объекте установлена компьютерная система АСУ или просто ЛВС) имеется централизованный источник бесперебойного питания (ИБП) 220 В 50 Гц.

Питание непосредственно от сети собственных нужд является самым ненадежным. Как правило, помехи в этой сети могут быть значительными, а вероятность отключения питания при авариях – довольно высокой.

Сеть оперативного тока обеспечивает бесперебойное питание, но уровень помех может быть также высок.

Использование батареи связи в большинстве случаев обеспечивает низкий уровень помех и бесперебойность питания.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Отдельно нужно сказать о питании от централизованного ИБП. С одной стороны, использование одного мощного ИБП для питания большинства компонентов информационной системы имеет ряд очевидных преимуществ. Так, обеспечивается общность условий питания для всех компонентов системы, и в случае отключения внешнего электропитания она может продолжать работу как единое целое. Мощные ИБП, предназначенные для питания больших информационных систем, обычно обладают лучшими характеристиками (большее время работы в автономном режиме, возможность перехода на питание от дизель-генератора и т.п.), чем маломощные. И, наконец, выбор централизованной схемы питания может быть более выгоден экономически.

В то же время, централизованная схема имеет ряд недостатков. Это касается, в первую очередь, защиты от внутренних помех, а также внешних электромагнитных полей. Действительно, к выходу ИБП оказывается подсоединенной достаточно сложная электрическая цепь, содержащая длинные коммуникации, восприимчивые к внешним наводкам. Что касается внутренних помех, то их влияние оказывается наиболее сильным при недостаточной мощности ИБП (обычно проблема нехватки мощности возникает как результат проведения незапланированных изначально расширений информационной системы). В этом случае встроенная в ИБП система стабилизации выходного напряжения оказывается неспособной парировать помехи, возникающие, например, при включении мощных потребителей энергии.

ПРИМЕР. Измерения, проведенные в сети питания ЛВС одного из энергопредприятий, показали, что включение одного лазерного принтера вызывает переходный процесс с перенапряжением порядка 700–800 В.

Таким образом, в некоторых случаях установка нескольких отдельных ИБП, питающих аппаратуру высокой важности, может оказаться предпочтительнее, чем установка централизованного ИБП.

При анализе характеристик ИБП, помимо основных параметров (время автономной работы, мощность и т.д.) нужно обращать внимание на его собственную помехозащищенность. Во-первых, воздействие помех может привести к отказу элементов самого ИБП (обычно − управляющей электроники). Во-вторых, помехи в кабеле питания на входе ИБП иногда могут проникать на его выход, и далее − на подключенную аппаратуру. Особенно это касается ИБП, не использующих принцип *непрерывного двойного преобразования*. Непрерывное двойное преобразование означает, что переменный ток на входе ИБП преобразуется сначала в постоянный ток зарядки аккумуляторных батарей. Затем постоянный ток батареи преобразуется в переменный и подается на выход ИБП. Простейшей альтернативой схеме на основе принципа двойного преобразования является схема, где при наличии питания на входе ИБП оно передается прямо на выход. Лишь при пропадании питания на входе происходит переключение на питание от аккумуляторной батареи через преобразователь.

Подведем некоторые итоги.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

1. Если аппаратура питается от батареи связи (48 В) то, как правило, для нее не требуется проведения дополнительных мероприятий по защите по цепям питания. Исключением являются два случая: когда к выходу батареи связи подключаются цепи значительной (несколько десятков метров и более) протяженности, и когда один полюс батареи и корпус подключенной к ней аппаратуры заземляются на разные вводы в заземлитель. Тогда может понадобиться дополнительная защита от помех в цепях питания, обычно осуществляемая путем установки фильтров и средств защиты от перенапряжений.

2. При питании аппаратуры оперативным током возможно воздействие значительных импульсных помех на входы питания аппаратуры. Поэтому, если сама аппаратура не обладает достаточной помехоустойчивостью, рекомендуется установка фильтров и средств защиты от перенапряжений. В некоторых случаях может быть предусмотрена отдельная батарея для питания элементов высокой важности.

3. Если питание аппаратуры осуществляется переменным напряжением 220 В, то непосредственное включение в сеть собственных нужд возможно лишь если аппаратура обладает высокой помехоустойчивостью, а ее отключение при отключении внешнего питания допустимо. Если помехоустойчивость аппаратуры недостаточна, используют фильтры и устройства защиты.

4. Защита аппаратуры с питанием переменным током от длительных отключений питания обеспечивается путем подключения к ИБП. ИБП может быть локальным (только для питания данной аппаратуры) или централизованным. В случае централизованного ИБП может потребоваться дополнительная защита аппаратуры от помех.

В любом случае, в месте ввода питания в здание имеет смысл установить защитные элементы (например, варисторы), обеспечивающие снижение внешних помех по цепям питания.

4. Фильтрация и подавление переходных помех

Для подавления помех могут использоваться различные устройства, включаемые в цепи обмена информацией и питания. Эти устройства можно разделить на три класса:

- Линейные фильтры с реактивными элементами,
- Устройства ограничения перенапряжений на базе нелинейных элементов,
- Оптические защитные устройства.

По типу исполнения такие устройства могут быть внешними или встроенными в аппаратуру. Здесь будут рассматриваться в основном внешние устройства.
Линейные фильтры с реактивными элементами

Линейные фильтры с реактивными элементами представляют собой пассивные R−L−C цепочки, частотные характеристики которых обеспечивают низкое затухание сигнала в рабочей полосе частот аппаратуры и высокое − вне этой

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

полосы. Широко используется понятие *полосы пропускания* фильтра. Полосой пропускания называется интервал частот, на котором ослабление сигнала происходит не более чем в √2 раз.

Рассмотрим простейший фильтр, состоящий из единственной емкости *C*, включенной параллельно нагрузке − приемнику сигнала $R_{пр}$ (рисунок 4-1)

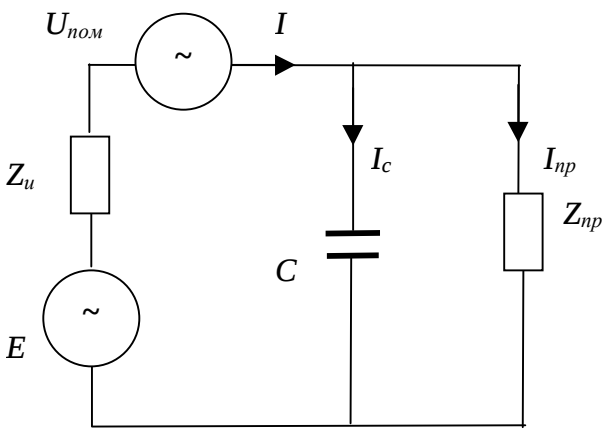


Рисунок 4-1. Простейший фильтр

Кроме нагрузки, в цепь включен источник сигнала *E* с внутренним сопротивлением $R_и$ и источник напряжения помехи $U_{пом}$. В качестве полезного сигнала рассматривается напряжение на нагрузке (приемнике) $U_{пр}$.

При отсутствии фильтра напряжение на нагрузке определялось бы соотношением

$$U_{пр} = \frac{ER_{пр}}{R_{пр} + R_и} + \frac{U_{пом} R_{пр}}{R_{пр} + R_и}$$

При наличии фильтра напряжение на нагрузке

$$U_{пр} = \frac{ER_{пр}}{R_{пр} + R_и(1 + jwCR_{пр})} + \frac{U_{пом} R_{пр}}{R_{пр} + R_и(1 + jw_{пом}CR_{пр})}$$

Видно, что без фильтра коэффициенты при *E* и $U_{пом}$ совпадают, то есть отношение сигнал/шум на нагрузке полностью определяется отношением сигнал/шум в линии. Во втором случае это уже не так, поскольку коэффициенты зависят от частот полезного сигнала ω и помехи $\omega_{пом}$. При этом чем выше частота помехи, тем сильнее она ослабляется. Действительно, модуль напряжения помехи на нагрузке определяется соотношением

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

$$|U_{пн}| = \frac{|U_{пом}|}{1 + \frac{R_и}{R_{пр}}\sqrt{1 + (w_{пом} C R_{пр})^2}}$$

Видно, что при частоте $\omega_{пом}>0$ напряжение помехи на нагрузке будет уменьшаться с ростом частоты. Таким образом, если частота помехи значительно выше частот в спектре полезного сигнала, такой фильтр будет полезен. Из анализа формулы видно, что эффективность фильтра существенно зависит от величин нагрузки и внутреннего сопротивления источника. При очень малом внутреннем сопротивлении источника фильтр практически неэффективен.

Физически эффективность такого фильтра объясняется тем, что напряжение помехи шунтируется емкостью *C*. Шунтирующие же свойства емкости тем лучше, чем выше частота.

На рисунке 4-2 показаны частотные характеристики − зависимости отношения напряжения помехи на нагрузке $|U_{пн}|$ к исходному напряжению помехи $|U_{пом}|$ от круговой частоты помехи $\omega_{пом.}$ Принято C = 1 мкФ, а сопротивления источника и приемника могут меняться. Обычно такие характеристики изображаются в логарифмическом масштабе, но здесь сохранена линейная шкала с целью обеспечения большей наглядности результата.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

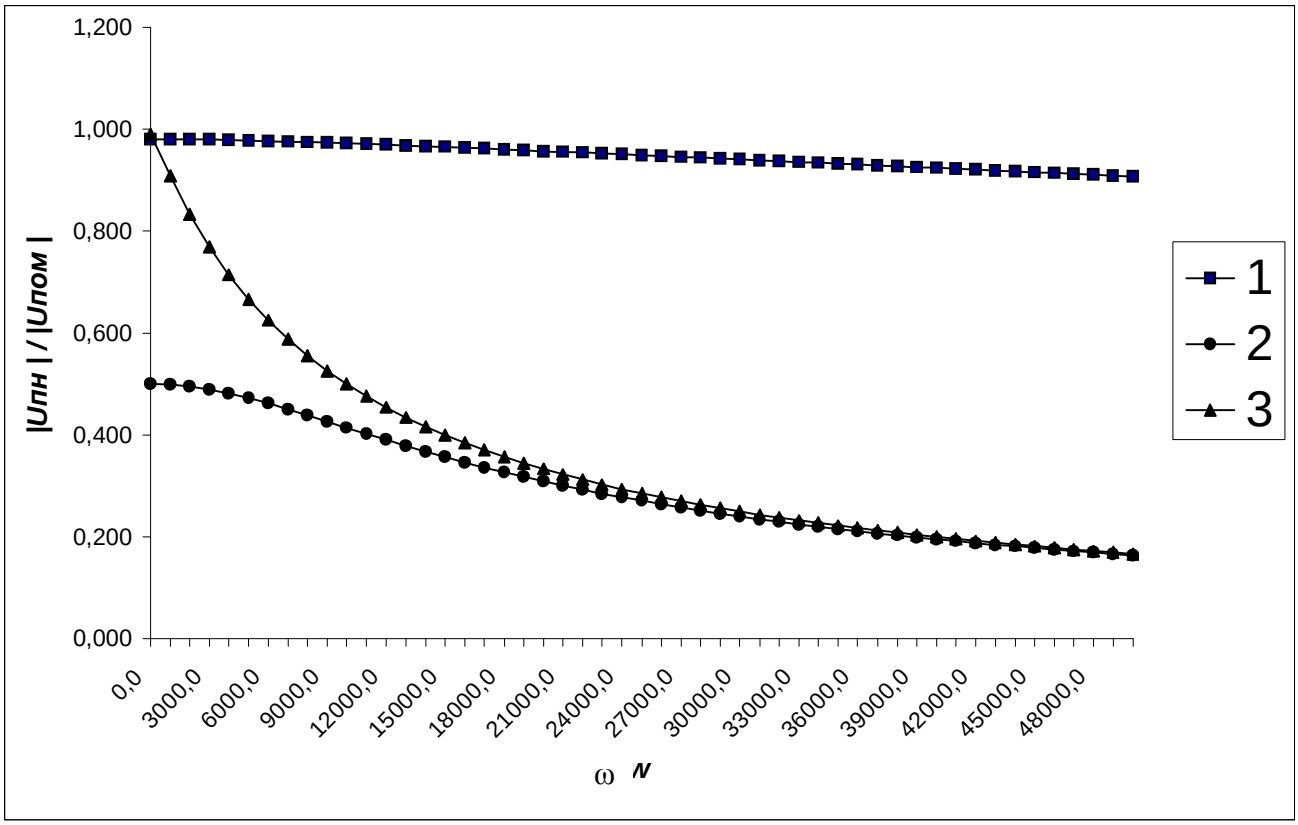


Рисунок 4-2. Частотные характеристики фильтра, состоящего из одной емкости, для различных значений внутреннего сопротивления источника $R_и$ и приемника $R_{пр}$.

Кривая 1: $R_и$ = 2 Ом, $R_{пр}$ =100 Ом;

Кривая 2: $R_и$ = $R_{пр}$ =100 Ом;

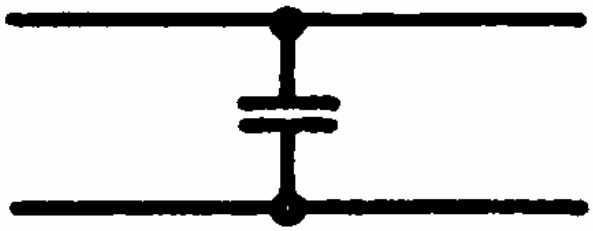
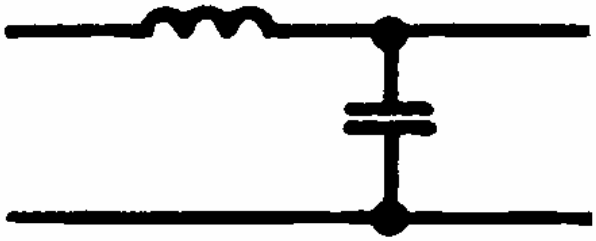
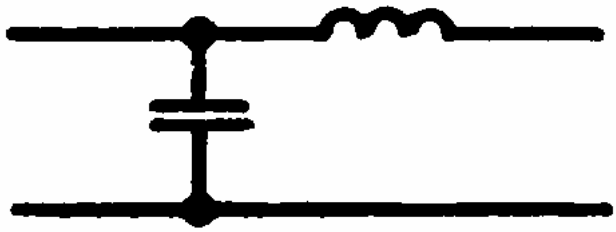
Кривая 3: $R_и$ = 100 Ом, $R_{пр}$ =10 кОм.

Анализ кривых на рисунке показывает, что характеристики такого простейшего фильтра (включая ширину полосы пропускания) существенно зависят от параметров источника и приемника сигнала. Так, наилучшее затухание высокочастотных помех обеспечивается при большом сопротивлении приемника и значительном внутреннем сопротивлении источника, а наихудшее – при малом внутреннем сопротивлении источника. Ситуация осложняется тем, что в реальности внутреннее сопротивление источника помехи обычно точно не известно. Сопротивление приемника может меняться в зависимости от режима работы устройства (это справедливо, например, для цепей питания). Поэтому обычно применяют более сложные фильтры, позволяющие снизить влияние нестабильности параметров источника и приемника сигнала на характеристики фильтра (см., например, таблицу 4-1).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Таблица 4-1. Выбор структуры фильтра

Сопротивление источника	Сопротивление приемника	Возможная схема фильтра
Мало	Мало	
Велико	Велико	
Мало	Велико	
Велико	Мало	

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Неизвестно или мало	Неизвестно или мало	
Неизвестно или велико	Неизвестно или велико	

Все рассмотренные фильтры предназначены для борьбы с помехами, попадающими на входы аппаратуры по схеме «провод–провод». Для подавления помех «провод–земля» схемы несколько усложняют. На рисунке 4-3 приведена схема фильтра, обеспечивающего подавление высокочастотных помех «провод – земля». Легко понять, что подавление помех «провод-провод» в этом случае также обеспечивается. Чтобы повысить эффективность подавления помех «провод – провод» можно включить еще одну емкость параллельно нагрузке.

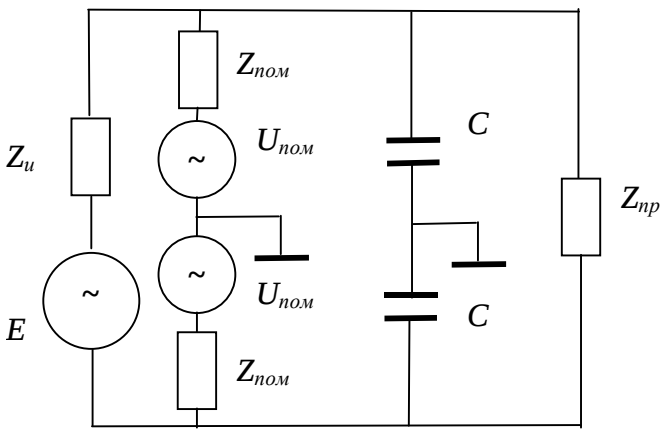


Рисунок 4-3. Простейший фильтр для подавления высокочастотных помех «провод–земля» и «провод–провод»

Однако недостаток схемы фильтра рис. 4-1 с шунтирующими емкостями здесь

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

усугубляется. Действительно, основным недостатком шунтирующей емкости является низкая эффективность при низком внутреннем сопротивлении источника. В случае помехи «провод−провод» внутреннее сопротивление источника полезного сигнала являлось общим для полезного сигнала и помехи. Здесь же основную роль играет внутренне сопротивление источника помехи $Z_{пом}$, которое может меняться в широких пределах. Поэтому в реальности схему обычно дополняют индуктивностями, включаемыми в каждый провод на входе аппаратуры.

Из сказанного следует, что к выбору схемы фильтра нужно подходить очень внимательно.

Принимая решение об использовании фильтров для подавления высокочастотных (особенно импульсных) помех необходимо всегда учитывать, что в реальности сопротивления всех элементов схем, подводящих кабелей, источников помех и т.п. никогда не бывают чисто активными. Кроме того, любая емкость всегда имеет паразитную индуктивность, а индуктивность − паразитную емкость. Реактивные составляющие сопротивлений, паразитные индуктивности и емкости способны кардинальным образом изменить поведение фильтра на высоких частотах за счет появления резонансных пиков частотной характеристики. Этим часто объясняется неожиданно низкая эффективность фильтров для подавления импульсных помех. Поскольку энергетический спектр импульса обычно довольно широк, часть его может попасть в область резонансных пиков. В результате импульс помехи проникает через фильтр, хотя и сильно деформируется.

Основными элементами фильтров являются конденсаторы и катушки индуктивности. Для высокочастотных фильтров очень важен правильный выбор этих элементов, обеспечивающий минимальные значения паразитных емкостей и индуктивностей.

Иногда в качестве фильтров используют специальные устройства довольно остроумной конструкции. Рассмотрим некоторые из них.

Ферритовые «бусы» используются для борьбы с высокочастотными помехами «провод−земля». Они представляют собой гирлянды колец из ферромагнитного керамического материала − феррита, надетые на симметричный кабель, как показано на рисунке 4-4.

Рассмотрим принцип действия ферритовых «бус».

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

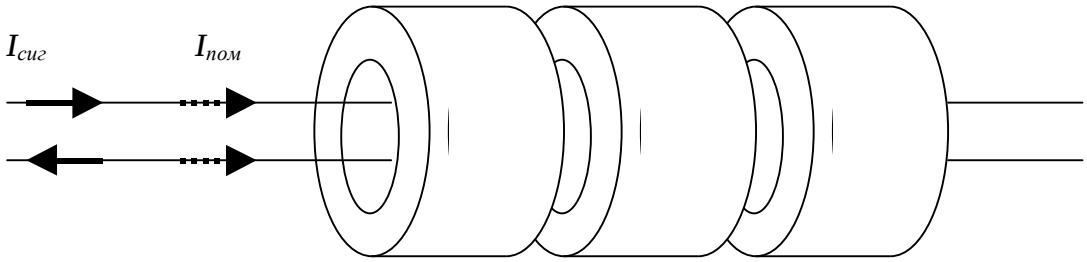


Рисунок 4-4. Ферритовые «бусы».

В каждый момент времени ток помехи в каждом проводе имеет одно и то же направление. Он создает магнитное поле, охватывающее кабель с током. Поля от разных проводников складываются, создавая суммарное поле, концентрические силовые линии которого охватывают кабель. Это поле создается и в ферритовом кольце, где ферромагнитные свойства материала значительно увеличивают магнитную индукцию $B=\mu H$, где H − напряженность магнитного поля, а μ − магнитная проницаемость феррита, превосходящая в тысячи раз магнитную проницаемость вакуума. Далее, по закону электромагнитной индукции, в обоих проводах создается ЭДС, направленная противоположно току помехи и пропорциональная dB/dt. В результате, ток помехи будет ослаблен.

Что же касается полезного сигнала, то создаваемое им магнитное поле будет относительно мало, поскольку токи в близкорасположенных проводах направлены навстречу друг другу, и создаваемые ими поля почти полностью компенсируют друг друга.

Использование «бус» приводит к значительному расходу ферритовых шайб. Поэтому часто используют схему с двумя одинаковыми обмотками на общем тороидальном ферритовом сердечнике (рис.4-5).

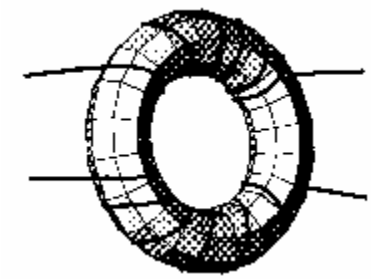


Рис. 4-5. Схема, эквивалентная ферритовым «бусам».

Разделительные трансформаторы широко используются для борьбы с низкочастотными помехами «провод − земля» типа аварийных потенциалов.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Обычный разделительный трансформатор представляет собой трансформатор с коэффициентом трансформации 1 и высокими значениями сопротивления изоляции и напряжения пробоя между обмотками. Рисунок 4-6 поясняет, каким образом разделительный трансформатор позволяет организовать защиту от воздействия аварийных потенциалов на входы питания аппаратуры.

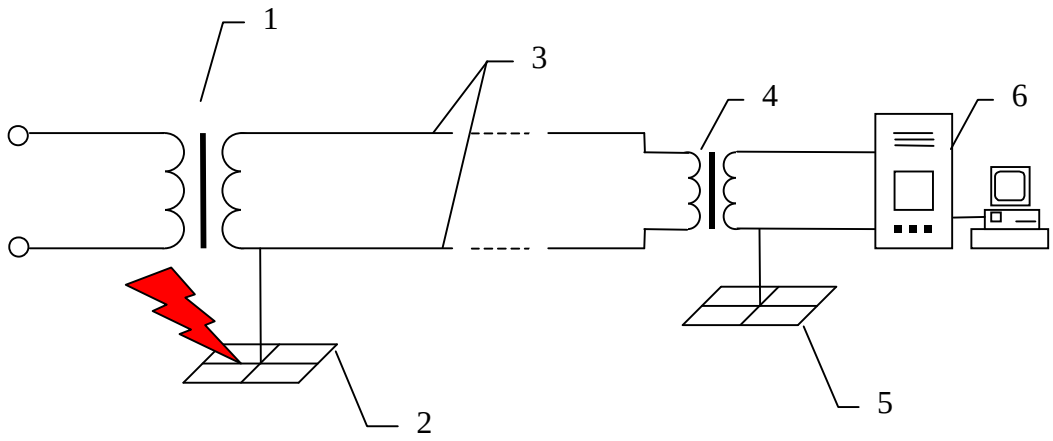


Рисунок 4-6. Защита оборудования от выноса аварийного потенциала по цепям питания с помощью разделительного трансформатора. 1 – питающий трансформатор, 2 – заземляющее устройство питающей подстанции, на которое произошло короткое замыкание, 3 – кабель питания объекта, на котором установлена аппаратура, 4 – разделительный трансформатор, 5 – заземляющее устройство здания, 6 – аппаратура.

Устройства ограничения перенапряжений на базе нелинейных элементов.
Как отмечалось в предыдущем разделе, подавление импульсных помех с помощью фильтров эффективно отнюдь не всегда. Поэтому на входе устройств, которые могут подвергаться воздействию значительных импульсных помех, обычно устанавливают специальные нелинейные элементы защиты. Аналогично фильтрам, они могут быть как встроенными в аппаратуру, так и устанавливаемыми дополнительно на этапе системной интеграции.

Широко используются защитные элементы следующих типов:

1. Воздушные искровые разрядники.
2. Газовые разрядники.
1. Варисторы.
2. Диоды Зенера.

Их применение обсуждается ниже.

Воздушные искровые разрядники предоставляют короткий путь для протекания больших токов в обход входных цепей аппаратуры, для чего используется эффект пробоя воздушного промежутка.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Протекание тока продолжается до тех пор, пока он не уменьшится до уровня, недостаточного для поддержания разряда. Основным достоинством таких устройств является их способность значительно снижать энергию помех большой мощности. На рисунке 4-7 показана типичная картина подавления разрядником микросекундной импульсной помехи (МИП), наложенной на синусоидальное напряжение питания.

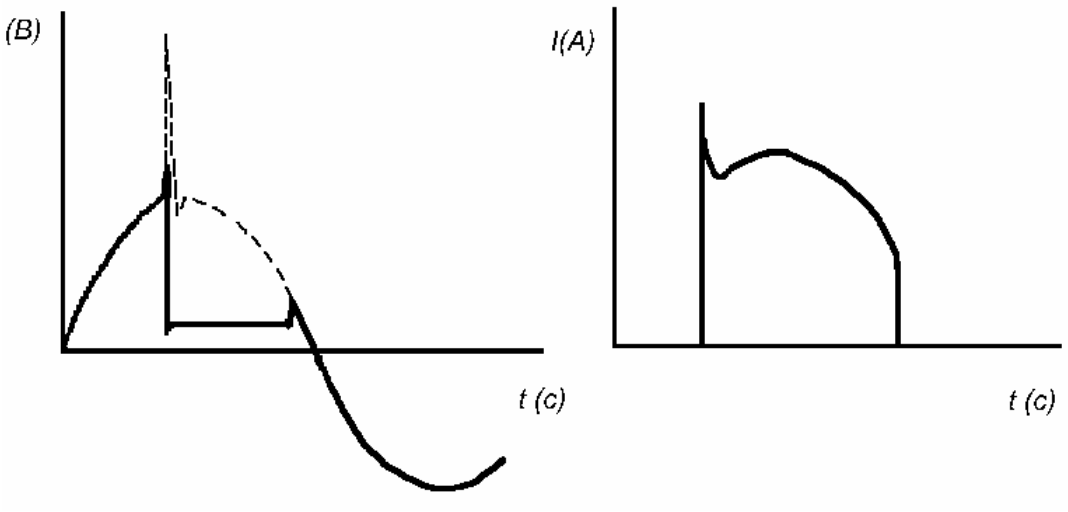


Рисунок 4-7. Графики напряжения и тока разрядника. Пунктиром показана форма кривой напряжения при отсутствии разрядника.

Поскольку напряжение на входе аппаратуры равно напряжению на параллельно включенном разряднике, обеспечивается защита от импульсов напряжения.

При выборе разрядника нужно учитывать два момента. Во-первых, поскольку разрядник не включается то тех пор, пока напряжение на нем не достигнет уровня пробоя, некоторый начальный скачок напряжения все же остается. Это время запаздывания, в течение которого нагрузка оказывается незащищенной, может достигать нескольких микросекунд. В принципе, это ограничение можно обойти, выбирая элементы с как можно более низким напряжением пробоя. Однако изготовление таких устройств обычно сопряжено с трудностями, поскольку технологически сложно выдержать столь точно малые интервалы между проводниками. Многие такие изделия могут просто не функционировать при низких напряжениях. Например, для защиты по цепям питания 230 В, разработчики обычно выбирают разрядники на напряжение порядка 500 В. Поэтому полная защита не обеспечивается (любая помеха с амплитудой менее 500 В вообще беспрепятственно попадает на вход аппаратуры).

Вторая проблема связана с током последействия. Обычно он протекает через разрядник до тех пор, пока напряжение в защищаемой цепи не упадет практически до нуля. В цепях переменного тока это гарантированно происходит в течение полупериода основной частоты. Однако в цепях с постоянным или

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

медленно меняющимся напряжением (например, в цепях питания постоянным током) ток последействия может протекать в течение недопустимо большого времени, что делает применение разрядников весьма проблематичным. Поскольку значения тока, протекающего через сработавший разрядник, могут достигать сотен А, иногда последовательно разряднику включают мощные сопротивления, ограничивающие ток. Их наличие сокращает время протекания тока последействия, однако эффективность разрядника снижается.

Отметим также, что при срабатывании разрядника происходит его износ за счет частичного разрушения и окисления контактов при разряде. Это может привести к нежелательным последствиям, в том числе ухудшению защитных свойств разрядника или даже короткому замыканию.

Газовые разрядники по принципу действия аналогичны воздушным. Единственное отличие – то, что межконтактный промежуток заполняется газом, позволяющим обеспечить меньшее по сравнению с воздухом напряжение пробоя промежутка между электродами. Дополнительно уменьшается износ разрядника, поскольку газ не содержит кислорода и других химически активных компонентов. Это дает газовым разрядникам некоторое преимущество перед воздушными. Однако, если в силу той или иной причины герметичность корпуса газового разрядника будет нарушена, устройство станет фактически неработоспособным. Поэтому довольно часто используют параллельное включение газового и воздушного разрядника с целью обеспечения избыточности.

Диоды также могут использоваться для подавления помех. Широко используются специальные *защитные стабилитроны (лавинные диоды)*, в зарубежной аппаратуре обычно называемые *диодами Зенера для подавления переходных помех* (Transient Absorbing Zener diodes – TAZ). Их отличительной особенностью является большая ширина зоны p-n перехода, что обеспечивает возможность рассеивать значительные мощности помех. Обычные стабилитроны, в случае их использования для защиты оборудования, часто не выдерживают помех и разрушаются.

Сейчас существуют защитные стабилитроны с диапазоном напряжений примерно от 5 до 500 В. Достоинством таких диодов является очень малое время срабатывания (порядка наносекунд), что делает возможным их использование для подавления наносекундных импульсных помех. Часто диодную защиту устанавливают после разрядника или варистора. В этом случае большая часть энергии импульса задерживается разрядником или варистором, а диодная защита обеспечивает подавление начального скачка напряжения в течение времени, необходимого для срабатывания разрядника или варистора.

Варисторы – специальные нелинейные элементы на основе оксидов металлов – очень часто применяются для подавления импульсных помех большой энергии. По своим свойствам они во многом аналогичны стабилитронам, но имеют большее время срабатывания (около 50 нс.). При этом варисторы способны рассеивать значительную энергию, что делает их пригодными для борьбы с

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

микросекундными импульсными помехами.

Основным недостатком варисторов является их деградация. Рассеивание на варисторе значительной энергии ведет к ухудшению его характеристик. Обычно кривые деградации поставляются изготовителем и должны быть внимательно рассмотрены при выборе защиты. Следует иметь в виду, что в конце жизненного цикла варистора обычно значительно возрастает его ток утечки, после чего наступает короткое замыкание.

К сожалению, никто еще не изобрел универсального устройства подавления всех видов переходных помех. Приводимая ниже таблица дает общие сведения по назначению тех или иных устройств. При выборе средств защиты определяющими являются такие характеристики импульсной помехи как длительность, крутизна фронта, энергия и амплитуда импульса. При рассмотрении вопросов, связанных с деградацией защитных элементов, необходимо знать также примерную частоту появления помех.

Таблица 4-2. Выбор средств защиты от перенапряжений

Тип помехи	Время нарастания импульса	Энергия импульса	Предпочтительные средства подавления
Электростатический разряд (ЭСР)	Малое	Низкая	Защитные стабилитроны
Наносекундные импульсные помехи	Среднее	Средняя	Защитные стабилитроны, варисторы, газовые разрядники.
Микросекундные и коммутационные импульсные помехи	Большое	Высокая или средняя	Варисторы, газовые и воздушные разрядники.
Аварийные потенциалы	Очень большое	Высокая	Газовые и воздушные разрядники

Поскольку в реальности аппаратура обычно подвергается действию различных помех, часто устанавливают комбинированную защиту, используя одновременно разрядники и диоды Зенера или варисторы. Схема может быть также дополнена линейными фильтрами. Располагаться элементы защиты должны по правилу: чем выше быстродействие и ниже порог срабатывания, тем ближе к входу аппаратуры данный элемент должен ставиться.

В системах с высокими требованиями к уровню надежности элементы защиты, подверженные деградации (в первую очередь, разрядники и варисторы), должны своевременно заменяться. Там, где надежность не столь существенна, необходимо, по крайней мере, всегда иметь запас таких элементов, обеспечивающий быстрое восстановление отказавшей защиты.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Оптические защитные устройства

Принцип действия таких устройств заключается в преобразовании электрического сигнала в световой и обратно. При этом полезный эффект может достигаться за счет двух факторов:

- обеспечения гальванической развязки между различными участками в тракте передачи сигнала и
- невосприимчивости световых сигналов к воздействию обычных электромагнитных помех.

Оптическая гальваническая развязка обеспечивает эффективную защиту от помех «провод − земля». Традиционными элементами, обеспечивающими оптическую развязку, являются оптроны − полупроводниковые приборы, представляющие собой комбинацию светоизлучающего диода и приемного светочувствительного элемента, разделенных прозрачным диэлектрическим промежутком. Электрическая прочность этого промежутка, а также паразитная емкость между входом и выходом определяют эффективность оптрона для подавления помех «провод − земля».

Применяя оптроны следует помнить о том, что защита от помех «провод − провод» ими обеспечивается слабо. Если помеха «провод − провод» лежит в пределах рабочего диапазона напряжений оптрона, то она преобразуется точно так же, как и полезный сигнал. Другим недостатком оптронов являются искажения, вносимые ими в передаваемый сигнал благодаря инерционности и нелинейности. Поэтому их обычно применяют для защиты цепей, сигналы в которых носят дискретный характер.

В последнее время для решения проблем электромагнитной совместимости стали использовать волоконно-оптические кабели. Использование подобных кабелей позволяет обеспечить как оптическую развязку с защитой от помех «провод − земля», так и организовать прокладку сигнальных кабелей по территории с высоким уровнем электромагнитных помех (например, распределительному устройству подстанции, генераторному залу электростанции и т.п.). Основным препятствием на пути к широкому внедрению оптических кабелей связи и кабельных вставок остается их относительная дороговизна. Тем не менее, во многих случаях использование оптического волокна для критических коммуникаций является наилучшим выбором. Иногда для передачи сигналов на небольшие расстояния в условиях высокого уровня электромагнитных помех вместо оптических кабелей используют инфракрасные приемники и передатчики. Подобные устройства знакомы большинству читателей по пультам дистанционного управления телевизоров, аудиотехники и т.п. Их достоинством является относительная дешевизна, а недостатком − меньшая, чем у оптических кабелей, защищенность от неблагоприятных внешних воздействий и малый радиус действия.

При применении волоконно-оптических линий связи нужно обращать особое внимание на организацию питания оптоэлектронных преобразователей по

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

обоим концам оптического участка линии связи. Действительно, если их питание осуществляется от одного и того же питающего трансформатора без разделительных трансформаторов, аппаратура по обе стороны оптического канала остается гальванически связанной через общую систему питания, что может свести на нет все преимущества оптической передачи сигнала.

5. Экранирование

Основы теории

Экран представляет собой барьер между источником электромагнитного поля и его потенциальным приемником. В качестве такого барьера обычно используют металлические или металлизированные поверхности с хорошей удельной проводимостью и (или) магнитной проницаемостью. Существует достаточно развитая теория расчета эффективности сплошных металлических экранов различной формы. На практике, однако, экран никогда не бывает столь же эффективным, как в теории. Это происходит из-за того, что в реальности экраны имеют отверстия для ввода кабелей, вентиляции, установки дисплеев и окон, и т.д. Кроме, того, сборка экранов часто происходит из отдельных панелей, между которыми остаются зазоры.

Эффективность экранирования выражает способность материала защищать от электромагнитного излучения. Для электрического поля она определяется следующим образом:

$$S_E[dB] = 20\lg\frac{E_0}{E_1}$$

где E_0 – напряженность электрического поля в точке непосредственно за экраном при отсутствии экрана, а E_1 – напряженность электрического поля в той же точке, но уже при наличии экрана.

Аналогично для магнитного поля:

$$S_H[dB] = 20\lg\frac{H_0}{H_1}$$

где H_0 – напряженность магнитного поля в точке непосредственно за экраном при отсутствии экрана, а H_1 – напряженность магнитного поля в той же точке, но уже при наличии экрана.

Механизм действия экрана довольно сложен. Чтобы понять его, рассмотрим простейшие случаи:

Экранирование электростатического поля. Рассмотрим металлическую поверхность, помещенную во внешнее электростатическое поле E (рис. 5-1). Под действием внешнего поля в толще металла произойдет перераспределение

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

свободных электронов, т.е., потечет ток. Он будет течь до тех пор, пока электрическое поле во всех точках металлической поверхности не станет равным нулю, то есть созданное перераспределившимися в металле зарядами поле *E'* не будет полностью компенсировать внешнее поле. Очевидно, что и вблизи от данной металлической поверхности суммарное поле будет мало. Более того, если поверхность замкнута, поле внутри нее будет вообще равно нулю, то есть эффективность экранирования электростатического поля металлическим экраном равна бесконечности!

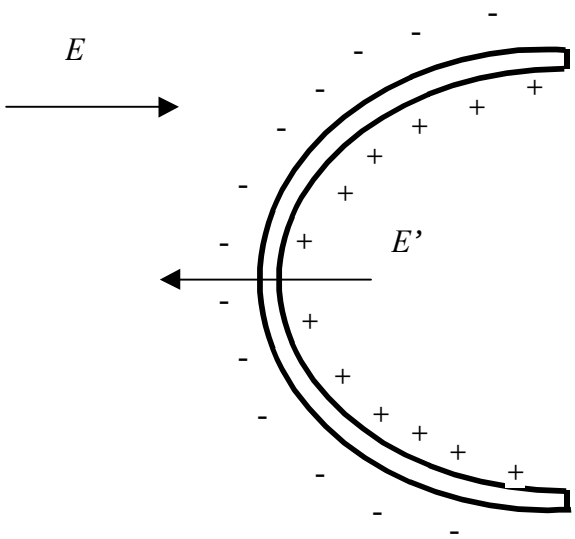


Рисунок 5-1. Экранирование электростатического поля

Экранирование постоянного магнитного поля. Если экранирование электростатического поля не представляет собой серьезной проблемы, то постоянное магнитное поле экранировать очень трудно. Единственным эффектом, который может быть использован для экранирования, здесь является замыкание силовых линий магнитного поля через ферромагнитный экран (рис. 5-2).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

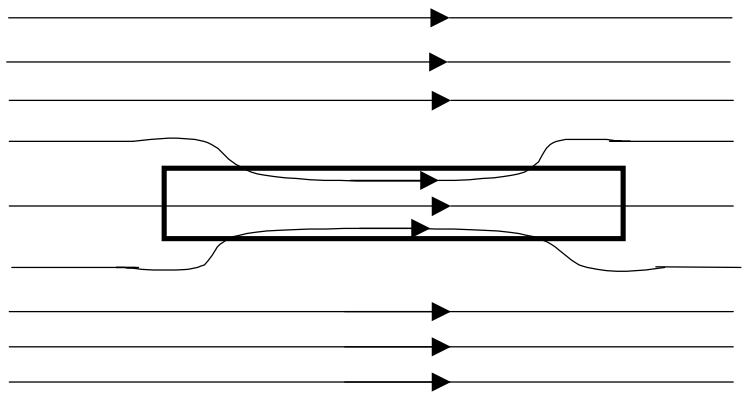


Рисунок 5-2. Экранирование постоянного магнитного поля.

Действительно, плотность магнитного потока (магнитная индукция *B*) в ферромагнитном материале в μ раз больше, чем в воздухе, где μ − относительная магнитная проницаемость этого материала. Поле как бы «замыкается» через экран, освобождая область вокруг него. Однако этот эффект заметно проявляется лишь при большой толщине экрана с высокой магнитной проницаемостью. Эффективность экранирования можно приближенно определить по формуле

$$S_H = 1 + \frac{2 \cdot t \cdot \mu}{3 \cdot R \cdot \mu o}$$

где *t* − толщина экрана, а *R* − расстояние от источника поля до экрана; μ_0.− абсолютная магнитная проницаемость вакуума ($4\pi 10^{-7}$ Гн/м). Так, для экрана из электротехнической стали толщиной 0,5 мм на расстоянии 2 м от источника, расчет по этой формуле дает эффективность экранирования порядка всего лишь 1,3 дБ.

Экранирование переменного магнитного поля. Механизм экранирования переменного магнитного поля совершенно другой. Здесь ключевую роль играют вихревые электрические токи, создаваемые по закону электромагнитной индукции в толще материала экрана вследствие действия закона электромагнитной индукции. Эти токи создают, в свою очередь, магнитное поле *H'*, направленное противоположно внешнему магнитному полю *H* и частично его компенсирующее (рис. 5-3).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

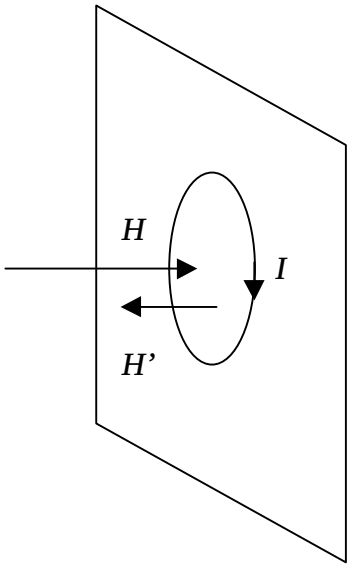


Рисунок 5-3. Экранирование переменного магнитного поля.

Эффективность экранирования будет, очевидно, тем выше, чем выше магнитная проницаемость и проводимость материала экрана, а также частота поля.

Вообще говоря, любое переменное поле является уже комбинацией электрического и магнитного, а потому для него действуют все упомянутые механизмы экранирования. При рассмотрении проникновения поля в экран обычно используют волновую терминологию. В соответствии с ней, для переменного поля эффективность экранирования можно представить в виде суммы трех составляющих:

$$S = A + R + B \qquad (5\text{-}1)$$

Здесь A – потери на поглощение в материале (дБ), R – потери на отражение (дБ), B – поправка, учитывающая многократные отражения в тонком экране. Следующий рисунок 5-4 иллюстрирует природу этих составляющих:

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

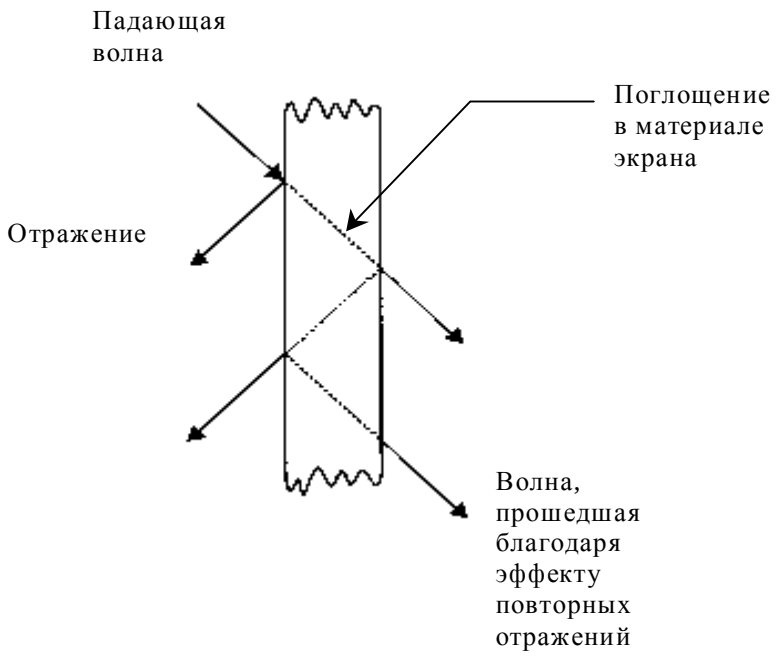


Рисунок 5-4. Экранирование переменного электромагнитного поля.

Потери на поглощение. Когда электромагнитная волна проходит через экран, ее амплитуда экспоненциально затухает:

$$E = E_0 e^{-t/d}$$

$$H = H_0 e^{-t/d}$$

где E_0 и H_0 – начальные напряженности поля; t – расстояние, пройденное в среде (м), δ – величина, известная как глубина проникновения поля в материал, определяемая по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{2}{wmm_0 s}} \qquad (5\text{-}2)$$

Здесь w – круговая частота (в радианах в секунду), $m\mu_0$ – магнитная проницаемость материала (Гн/м), s – проводимость материала (См/м). По смыслу δ есть ни что иное, как расстояние, на котором поле при прохождении в материале экрана уменьшается в e раз.

Таким образом, видно, что для экранирования хороши материалы с высокой магнитной проницаемостью и (или) проводимостью. Другим важным фактором является толщина экрана. Чтобы экран осуществлял достаточно эффективное поглощение, он должен иметь толщину в несколько раз больше глубины проникновения.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

При внимательном взгляде на формулу (5-2) для глубины проникновения поля в экран заметим, что δ стремится к нулю при стремлении к нулю частоты ω. Это означает, что поглощение поля в материале экрана становится мало на низких частотах и вообще отсутствует для постоянных электрических и магнитных полей.

Окончательно, вклад потерь в материале экрана в общую эффективность экранирования (5-1) мы теперь можем вычислять по формуле:

$$A = 8{,}7\frac{t}{d} \qquad (5\text{-}3)$$

Важным фактом является то, что потери на затухание не зависят от волнового импеданса электромагнитного поля *E/H*, а также от расстояния от источника поля до экрана.

Потери на отражение. В отличие от потерь на затухание, потери на отражение *зависят* от волнового импеданса *E/H*. Для дальнего поля, где волновой импеданс всегда равен 377 Ом, можно использовать следующее выражение для потерь на отражение:

$$R = 168 + 10\lg\left(\frac{s_r}{mf}\right) \qquad (5\text{-}4)$$

где σ_r – относительная удельная проводимость материала экрана (получается делением абсолютной величины проводимости на удельную проводимость меди, равную $5{,}8*10^7$ См/м), μ – относительная магнитная проницаемость материала экрана.

В ближнем же поле следует пользоваться одним из следующих выражений, в зависимости от того, является ли поле высокоимпедансным (т.е., преимущественно электрическим) или низкоимпедансным (преимущественно магнитным).

$$R_e = 322 + 10\lg\left(\frac{s_r}{m_r f^3 r^2}\right)$$
$$R_m = 14{,}6 + 10\lg\left(\frac{f r^2 s_r}{m_r}\right) \qquad (5\text{-}5)$$

где R_e и R_m – потери на отражение (дБ) соответственно для электрического и магнитного полей, r – расстояние между экраном и источником (м).

Многократные отражения. Если глубина проникновения поля в экран δ меньше толщины экрана, эффект повторных отражений может оказывать заметное влияние на эффективность экранирования. Для таких экранов величина поправки на повторные отражения определяется выражением:

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

$$B = 20\lg(1 - e^{\frac{-2t}{d}}) \qquad (5\text{-}6)$$

где t – толщина экрана (м), d – глубина проникновения поля в экран (м). Поправка на повторные отражения при $t<\delta$ имеет знак «минус», поскольку повторные отражения увеличивают поле за экраном, снижая тем самым эффективность экранирования.

Отметим некоторые характерные особенности экранирования электромагнитных полей, вытекающие из формул (5-1) – (5-5) и общих соображений.

1. Эффективность экранирования как электрического, так и магнитного поля на высоких частотах, как правило, высока. Так, например, на частоте 1 МГц экран из электротехнической стали толщиной 0,5 мм обеспечивает затухание порядка 1000 дБ только лишь за счет поглощения A энергии в материале экрана (без учета отражений). На таких частотах истинная эффективность экранирования определяется, в первую очередь, неидеальностью экранов (наличием швов, отверстий и т.п.). Эти вопросы будут затронуты ниже.
2. С уменьшением частоты до десятков кГц и ниже эффективность экранирования за счет поглощения энергии падает. Значительный вклад в суммарную эффективность экранирования начинают вносить слагаемые R и B, учитывающие отражения и повторные отражения. При этом экран обычно оказывается в ближней зоне источника, поскольку длина волны на низких частотах велика. Для источника в ближней зоне эффективность экранирования зависит от импеданса электромагнитного поля и расстояние от экрана до источника.
3. Высокоимпедансное (т.е., преимущественно электрическое) поле на низких частотах экранируется хорошо. С ростом частоты эффективность экранирования такого поля падает за счет того, что уменьшаются потери на отражение. Однако при дальнейшем увеличении частоты эффективность экранирования вновь увеличивается, но уже за счет возросшего поглощения энергии поля материалом экрана.
4. Низкоимпедансное (т.е., преимущественно магнитное) поле на низких частотах экранируется очень плохо. С ростом частоты эффективность экранирования магнитного поля монотонно возрастает.
5. В ближней зоне эффективность экранирования зависит от расстояния между источником поля и экраном. Для обеспечения наилучшего экранирования электрического поля это расстояние должно быть как можно меньше, а для магнитного – наоборот, больше.
6. Формулы (5-1) – (5-6) являются приближенными. Точный расчет поля за экраном требует привлечения мощного математического аппарата и индивидуален для каждого экрана и источника..

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Зависимости эффективности экранирования электрического и магнитного поля от частоты приведены на рис. 5-5. В качестве материала экрана выбран медный лист толщиной 1 мм, расстояние до источника − 1 м. Следует иметь в виду, что относительная магнитная проницаемость меди − 1. Для ферромагнитных материалов эффективность экранирования может быть в 1,5 − 2 раза выше, однако качественная картина поведения кривых останется той же.

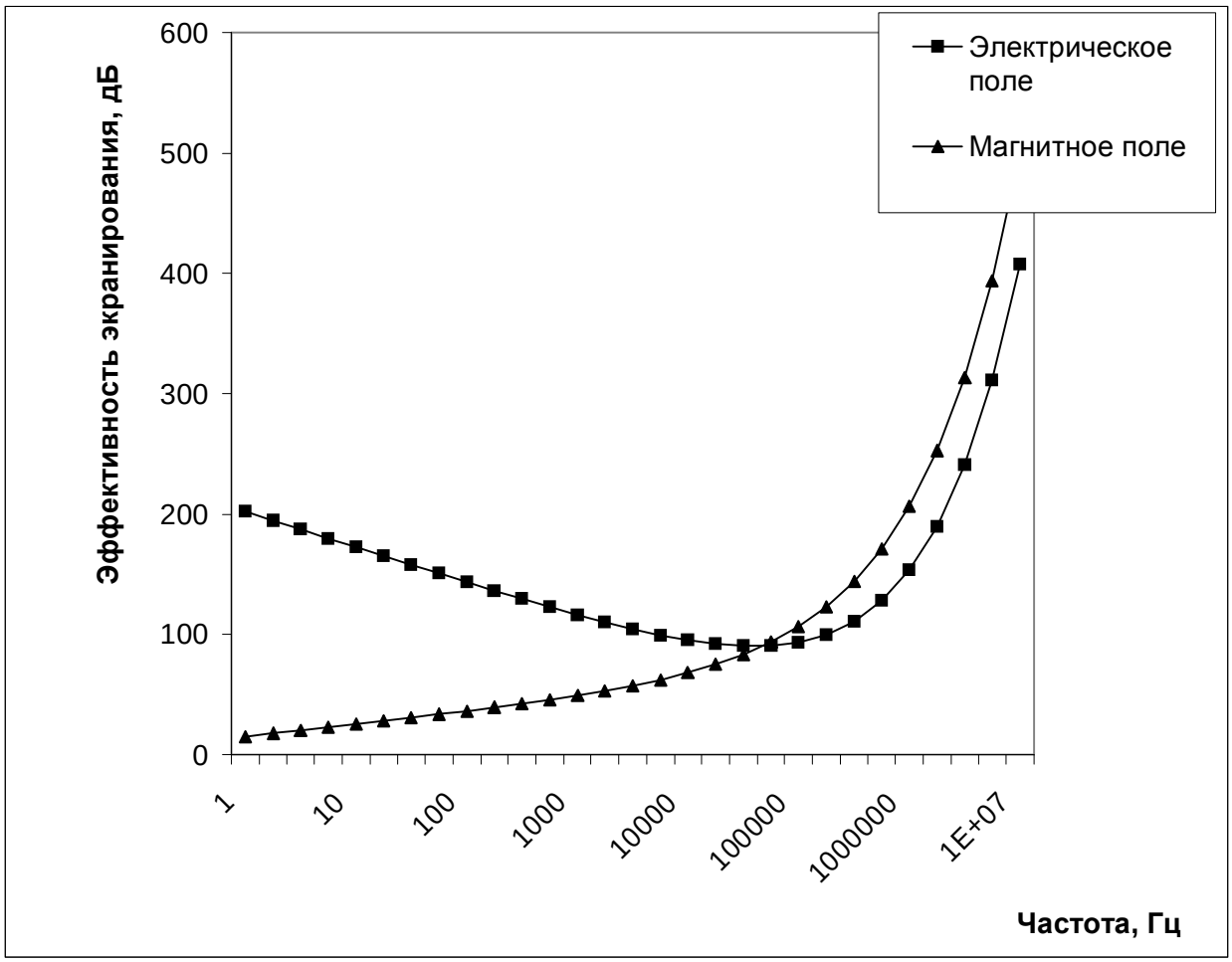


Рисунок 5-5. Типичные кривые эффективности экранирования

Влияние отверстий в экранах

Очевидно, что сплошные экраны существуют лишь в теории. Реальный экран имеет окна, двери, отверстия для ввода кабелей, присоединения измерительных приборов и органов управления. Монтаж экранов из отдельных металлических листов или секций часто приводит к появлению щелей в их конструкции.

Чтобы понять, как такие отверстия могут влиять на эффективность экрана, вернемся к рисунку 5-3, где показан механизм экранирования переменного магнитного поля. Ясно, что для обеспечения протекания вихревых токов, создающих компенсирующее магнитное поле, экран должен быть сплошным.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Любая щель в экране разрывает токовую петлю, снижая тем самым эффективность экранирования.

Обычно реальную опасность представляют отверстия, максимальный линейный размер которых не менее λ/100, где λ − длина волны экранируемого поля. Поскольку на частоте 100 Мгц, например, длина волны составляет порядка 3 м, реальную опасность на этой частоте представляют отверстия размером не более 3 см. Следует, правда, учитывать, что рассматривается именно максимальный размер, т.е., например, щель длиной 5 см и шириной 0,1 мм уже представляет опасность, хотя она может быть не заметна при визуальном осмотре..

Влияние одиночного большого (по сравнению с длиной волны) отверстия можно приближенно оценить, добавив дополнительный (отрицательный) член в выражение эффективности экранирование (5-1):

$$L = 20\lg\left(\frac{l}{2L}\right) \qquad (5\text{-}7)$$

Здесь L − максимальный линейный размер отверстия, λ − длина волны, $L>\lambda$.

Наличие более чем одного отверстия снижает эффективность экранирования еще сильнее. Нужно, однако, иметь в виду, что несколько близкорасположенных отверстий снижают эффективность экранирования слабее, чем одно большое отверстие той же площади.

Формула (5-7) справедлива в области сравнительно высоких частот (сотни кГц и выше). На низких частотах ее использование некорректно. Однако и при экранировании низкочастотных полей следует избегать отверстий размером больше нескольких сантиметров.

Практические рекомендации по экранированию аппаратуры и помещений

Экранирование обычно преследует две цели: обеспечение надежной работы аппаратуры и защиту обслуживающего персонала от вредных электромагнитных полей. Опасность электромагнитных полей для электронной аппаратуры сомнений не вызывает. Опасность значительных уровней как электрического, так и магнитного поля для человеческого организма в настоящее время также доказана и признана на официальном уровне.

При проведении экранирования необходимо четко знать ответ на вопросы:

1. защиту от каких полей требуется обеспечить и
2. до какого уровня следует снизить влияющие поля.

При грамотном проектировании аппаратуры и объектов, на которых она будет размещаться, потребность в дополнительном экранировании возникает сравнительно редко, поскольку экранирующих свойств корпуса аппаратуры оказывается достаточно для защиты от сравнительно слабых полей в местах ее установки. Лишь в некоторых случаях, когда во чтобы то ни стало необходимо

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

разместить не предназначенную для этого электронную аппаратуру вблизи от мощных источников электромагнитных полей, возникает потребность в дополнительном экранировании.

Однако, к сожалению, нормы электромагнитной совместимости при проектировании энергопредприятий принимаются во внимание далеко не всегда. В результате приходится постоянно сталкиваться с ситуациями когда, например, силовая ошиновка проходит буквально в нескольких метрах от помещения узла связи или распределительного щита подстанции. Экранированию может подвергаться как приемник помехи, так и ее источник. Осуществление экранирования источника является предпочтительным, поскольку обеспечивается защита всего окружающего пространства, а не только отдельного помещения или бокса с аппаратурой. Впрочем, экранирование источника возможно далеко не всегда.

При защите от высокочастотных полей (таких, как поля от средств радиопередачи, коммутационные поля, частично − поля при ударе молнии) сплошной металлический экран обеспечивает, как правило, достаточную эффективность экранирования. Первоочередной заботой проектировщика в этом случае становится предотвращение снижения эффективности экранирования из-за отверстий в экране. В первую очередь, необходимо обеспечить надежный электрический контакт между всеми конструктивными элементами экрана по всей поверхности их соприкосновения. Идеальным в этом смысле решением является пайка или сварка. Использование винтов или заклепок также допустимо, однако, во-первых, интервал между ними должен быть минимальным (не больше нескольких сантиметров) и, во вторых, перед соединением стыки поверхностей должны быть зачищены от краски, масла и грязи. Соединяемые поверхности должны быть ровными.

Двери в такие помещения должны в закрытом состоянии иметь контакт с основным экраном минимум через каждые несколько сантиметров поверхности соприкосновения. Для этого используют специальные металлизированные прокладки или пружинные контакты. Отверстий в экранах должно быть как можно меньше. Следует избегать крупных отверстий, для чего, например, окна и вентиляционные отверстия нужно затягивать металлической сеткой, а для каждого кабеля предусмотреть отдельный ввод. Используемая металлическая сетка должна быть со сварной ячейкой. Электрический контакт с остальным экраном должен обеспечиваться по всему периметру такой сетки.

При защите от низкочастотных полей проблема отверстий в экране стоит не так остро, хотя электрическая целостность экрана все же должна обеспечиваться. Наиболее серьезной проблемой здесь оказывается экранирование низкочастотного магнитного поля (обычно − промышленной частоты). Поскольку эффективность экранирования такого поля принципиально низка, только сплошной экран из ферромагнитного материала значительной толщины способен обеспечить приемлемую эффективность экранирования. Если высокий уровень магнитного поля промышленной частоты объясняется влиянием цепей

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

питания низкого напряжения, предпочтительным вариантом является их экранирование путем заключения в толстостенную металлическую трубу.

По требованиям электробезопасности, экран должен заземляться. Заземляющие проводники установленной внутри экранированного помещения или бокса аппаратуры сначала объединяются вместе, а затем присоединяются к той же системе заземления, что и экран. Заземление экранов кабелей, входящих в экранированное помещение, должно происходить либо до точки их входа в экранированное помещение, либо на внешнюю поверхность экрана этого помещения. Проникновение экранов кабелей внутрь экранированного помещения следует считать недопустимым.

Наряду с техническими мероприятиями по экранированию, необходимо выполнение некоторых требований организационного характера. Простейшее из них − двери в экранируемое помещение должны быть плотно закрыты при нормальной эксплуатации и обслуживания находящейся там аппаратуры

В заключение этого раздела отметим, что экранирование помещений и отдельных боксов является довольно дорогим решением. Поэтому, прежде чем приступать к его реализации, следует проанализировать альтернативные варианты защиты, связанные с изменением взаимного расположения источников и приемников полей помех.

Экранирование кабелей

Кабели обычно являются самыми длинными проводящими элементами в составе оборудования. Поэтому они оказываются наилучшими антеннами, способными улавливать сигналы помех. Кроме того, в то время как сама аппаратура обычно размещается в сравнительно хорошо защищенном от помех помещении, присоединенные к ней кабели очень часто проходят вблизи от мощных источников электрических и магнитных полей.

С целью обеспечения лучшей защиты от помех все чаще используют экранированные кабели. Обычный экранированный кабель имеет специальный металлический экран, окружающий жилы и не используемый при передаче информации. Коаксиальные кабели, использующие экран как рабочую цепь, в полном смысле слова экранированными не являются, и их помехозащищенность оказывается часто даже ниже, чем у симметричных неэкранированных кабелей типа «витая пара». Экранирующие свойства кабеля зависят от ряда факторов, среди которых первое место занимают свойства материала экрана и заземление этого экрана по концам кабеля. Рассмотрим сначала свойства материала экрана кабеля.

Практически все существующие экранированные кабели относятся к одному из трех следующих типов:

1. Кабели со сплошным металлическим экраном,
2. Кабели в оплетке,

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

3. Кабели в экране из металлической фольги.

Сплошной металлический экран кабеля представляет собой гибкую тонкостенную металлическую трубку, в которую заключены жилы. Оплетка представляет собой плетеный «чулок» из множества тонких проволочек, охватывающий экранируемые жилы. И, наконец, экран из фольги делается путем намотки длинной ленты металлической фольги по спирали на экранируемые жилы.

Некоторые кабели сверху еще покрываются броней путем навивки толстой металлической ленты.

Эффективность экранирования на низких (до сотен кГц) частотах примерно одинакова для всех трех типов кабелей. На более высоких частотах эффективность начинает возрастать для кабеля со сплошным экраном и падать − для кабеля в оплетке. Экранирующие свойства кабеля с экраном из фольги существенно зависят от его качества: если качественный новый кабель ведет себя примерно как кабель со сплошным экраном, то некачественный или старый кабель, где контакт между соприкасающимися слоями фольги не слишком хорош, больше похож на кабель в оплетке.

Из сказанного следует, что наилучшим выбором являются кабели со сплошным экраном. Однако такие кабели дороги, а их прокладка связана с определенными трудностями. Поэтому обычно используют кабели с экраном из фольги.

Выбор кабеля зависит еще и от термической стойкости его экрана и электрической прочности изоляции. Но прежде всего необходимо рассмотреть вопрос о том, как осуществляется заземление экрана кабеля.

Формулы для эффективности экранирования, рассмотренные выше, никак не учитывают заземление экрана. Однако эти формулы получены в предположении, что экран является сплошным и замкнутым. Для экрана кабеля это, вообще говоря, не так. Отсутствие заземления экрана кабеля с одного или обоих концов в некоторых случаях разрывает путь для протекания токов, компенсирующих внешнее поле. Вообще говоря, правильная организация заземления экранов кабелей до сих пор является предметом дискуссий. Чтобы понять сущность возникающих при этом проблем, рассмотрим сначала, как действуют экраны кабелей в различных случаях.

Экранирование электрического поля. Рассмотрим случай, когда экранируемый кабель находится в электрическом поле другой цепи (например, силового кабеля). Частоту будем считать достаточно низкой для того, чтобы волновые эффекты не вносили искажений в рассматриваемую картину.

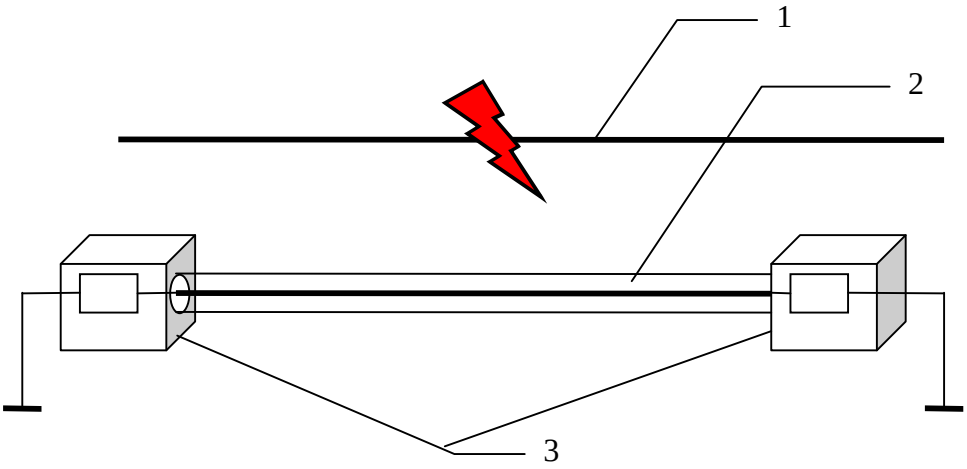
Тогда для моделирования связи между линиями используют их погонную взаимную емкость, которую будем обозначать $C_в$. Рассматриваемая исходная схема и схема замещения показаны на рис. 5-6.

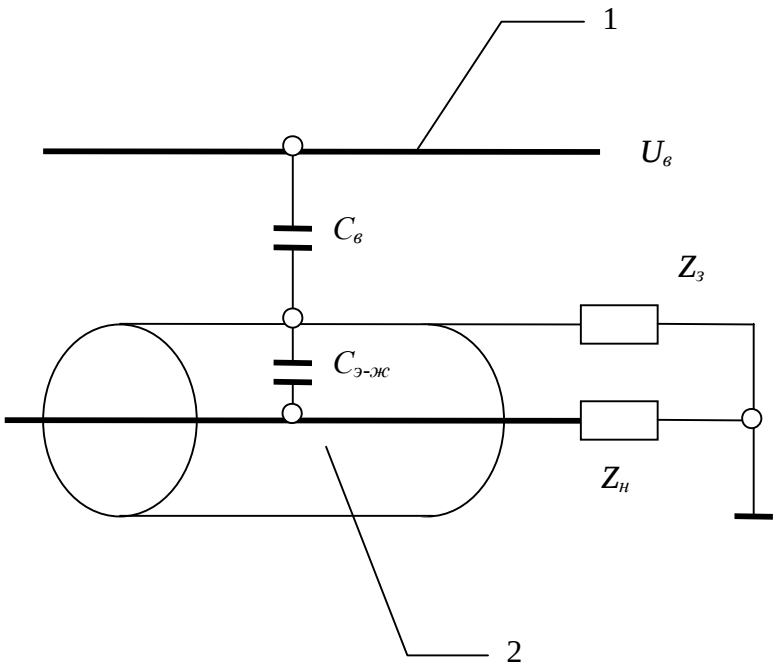
Напряжение влияющей линии $U_в$ попадает на экран кабеля через взаимную емкость $C_в$. Далее оно оказывается приложенным к двум параллельно

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

присоединенным к земле ветвям цепи. Первая из них содержит комплексное сопротивление $Z_з$, представляющее собой полное сопротивление стеканию тока на землю через экран кабеля. Вторая ветвь соответствует пути стекания тока помехи в землю через емкость $C_{э\text{-}ж}$ между экраном и жилой, далее – по жиле до источника и затем – в землю через сопротивление нагрузки $Z_н$ в режиме «провод – земля». Наша задача – сделать ток помехи в нагрузке минимальным. Очевидно, что проще всего это сделать путем снижения сопротивления $Z_з$, для чего нужно надежно заземлить экран хотя бы на одном конце.





PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

Рисунок 5-6. Влияние электрического поля постороннего кабеля на экранированный кабель связи. 1 − влияющая линия, 2 − экранированный кабель (показана только одна жила), 3 − аппаратура связи.

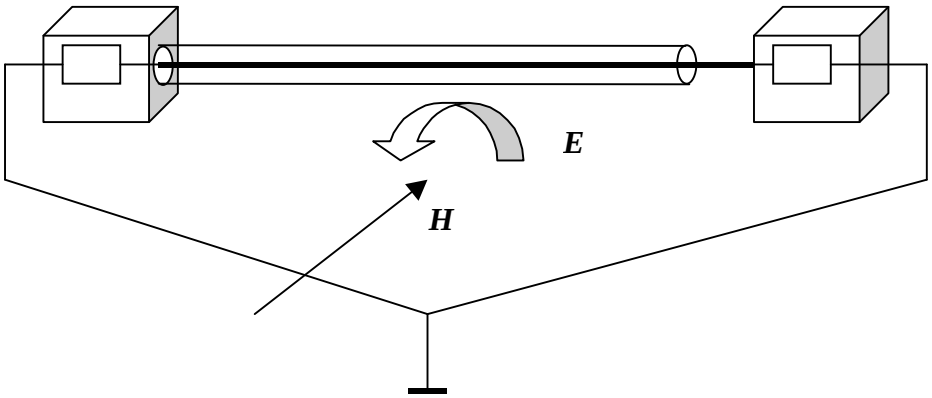
В этом случае надежно заземленный экран фактически шунтирует ток помехи в нагрузке. Нужно, правда, учитывать, что протекание тока по экрану кабеля и корпусу аппаратуры также является помехой.

Экранирование магнитного поля. Рассмотрим теперь случай, когда экранированный кабель находится под действием внешнего магнитного поля (рис. 5-7). В контуре, образованным этим кабелем и элементами системы заземления, наводится некоторая ЭДС *E*. Пусть экран кабеля заземлен с одного конца, как в случае А) на рисунке 5-7. Тогда токи, создаваемые в замкнутом контуре ЭДС помехи, будут протекать через нагрузку правого (на рисунке) блока аппаратуры. Далее, часть тока перейдет в экран кабеля через емкость между ним и жилой и вернется в землю через заземление экрана. Другая часть тока останется в жиле и уйдет в землю через нагрузку левого блока аппаратуры. Ясно, что в этом случае эффективность экранирования оказывается невысокой, поскольку значительная часть тока помехи протекает через нагрузку.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

А)



Б)

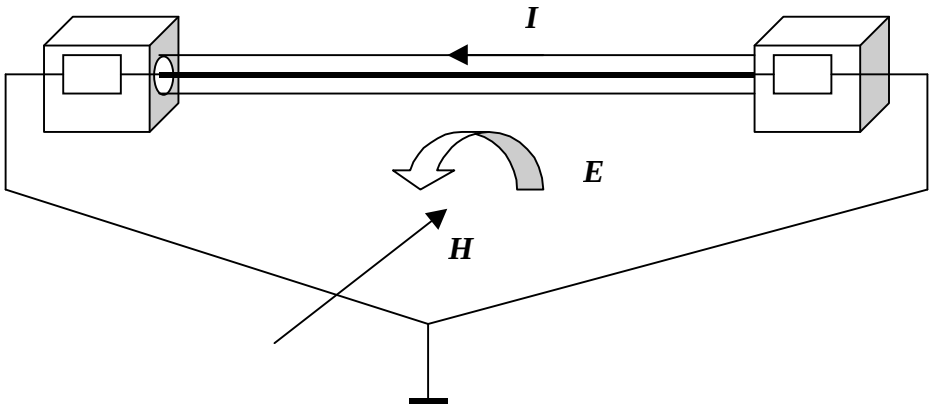


Рисунок 5-7. Действие магнитного поля на кабель, заземленный с одного конца (А) и с обоих концов (Б).

Если теперь заземлить кабель на обоих концах, то ток в замкнутом контуре будет течь в основном по экрану и корпусам аппаратуры, минуя жилу и сопротивления нагрузки. Поэтому в данном случае эффективность экранирования должна быть выше, чем в случае, когда экран заземляется только с одной стороны.

На основании сказанного может показаться, что схема с двухсторонним заземлением экрана является абсолютно предпочтительной. На самом деле некоторые обстоятельства могут сделать ее использование нежелательным.

Среди таких обстоятельств в первую очередь нужно отметить возможность протекания больших токов по кабельным экранам. Это может происходить, в частности, если два конца экрана кабеля заземляются на различные заземляющие устройства. То же самое возможно и в пределах одного заземляющего устройства больших размеров (например, на подстанции). Текущие при этом по экранам кабелей токи могут не только наводить помехи в

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

e-mail: ezop@ezop.ru
тел. (095)133-33-18

жилах, но и физически повреждать кабели за счет сильного нагревания. Особенно опасно протекание таких токов по тонким экранам из металлической фольги. Поэтому в настоящее время на энергопредприятиях кабели с экраном типа фольги или оплетки, проходящие вне здания, принято заземлять только на одном конце, обычно − со стороны, где меньше ожидаемые уровни потенциалов на элементах заземляющего устройства. Последнее важно, поскольку в противном случае возможен вынос потенциала по экранам кабелей. Только кабели с металлической броней, способной выдерживать значительные токи, являются исключением. Броню таких кабелей принято заземлять с обоих концов.

Использование двухстороннего заземления экрана также может быть нежелательным в случаях, когда аппаратура имеет хорошую защиту от помех «провод−земля» (в силу высокой степени симметрии по входам), но при этом достаточно чувствительна к протеканию токов помех по заземленным корпусам и шасси. Важной величиной является ожидаемое внутреннее сопротивление источника помехи. Если это сопротивление очень мало, то протекающий по экрану ток может принести больше ущерба, чем вся ЭДС помехи, приложенная ко входу по схеме «провод − земля».

Двухстороннее заземление может быть нежелательным и тогда, когда одно из присоединенных к кабелю устройств вообще не имеет связи с землей (например, телефонный аппарат или приставка). Тогда двухстороннее заземление приводит к образованию петли с возможностью протекания по ней значительных токов помех.

Наконец, на высоких частотах, когда линия является *электрически длинной* (т.е., ее длина соизмерима с длиной волны помехи), эффективность схемы заземления экрана на конкретной частоте зависит от распределения узлов и пучностей напряжения по длине линии. В этом случае обычно лишь эксперимент может дать ответ на вопрос, какую схему заземления следует считать предпочтительной.

Из сказанного ясно, что не существует единого решения в вопросе об оптимальной схеме заземления экранов кабелей. В принципе, двухстороннее заземление выглядит предпочтительнее, но, прежде чем его использовать, нужно тщательно проанализировать возможные последствия. Очень большую роль играет также организация системы заземления. В идеале, геометрия прокладки заземляющих проводников и экранированных кабелей должна быть одна и та же, а расстояние между ними − не порядка нескольких десятков сантиметров.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com