

# ОБЗОР ТРЕБОВАНИЙ К ЗАЗЕМЛЕНИЮ

СТИВ ФЕРГЮСОН (STEVE FERGUSON), главный консультант, Compliance Direction

*Каковы требования к электрическим контактам и заземлению, обеспечивающим соответствие разным стандартам по электромагнитной совместимости электронного оборудования? Быстрый и простой ответ на этот вопрос невозможен, поскольку следует понимать, оборудование какого типа используется и в каком конкретном приложении. В статье рассматриваются основные принципы защиты, действующие в отношении систем заземления оборудования.*

## ВВЕДЕНИЕ

Многие инженеры придерживаются общего правила, в соответствии с которым для обеспечения испытаний на электромагнитную совместимость (ЭМС) необходимо, чтобы сопротивление каждого соединения с испытательным оборудованием не превышало 2,5 мОм. Однако такой подход без учета фактической конфигурации аппаратуры не позволяет получить удовлетворительные результаты. Намного хуже, если это несоответствие обнаруживается в полевых условиях, когда приходится заниматься трудоемкой отладкой оборудования.

Оборудование для проведения испытаний на совместимость должно в достаточной мере соответствовать фактическому и реальным условиям эксплуатации, чтобы наверняка определить, что необходимо доработать в тестируемом изделии. Стандарт MIL-STD-461G позволил сделать большой шаг в этом направлении, обязав осуществлять проверку электрических соединений. Этот стандарт не устанавливает конкретных значений (за исключением тех, которые характеризуют соединения между заземляющей плоскостью и корпусом, а также между эквивалентом сети (LISN) и этой плоскостью), подтверждающих пригодность испытательного оборудования к использованию в соответствии с его назначением. Однако даже с учетом этого изменения высококвалифицированные инженеры по-прежнему придерживаются давнишнего правила о пресловутых 2,5 мОм в полном соответствии с тем, чему их когда-то учили.

## НАЗНАЧЕНИЕ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

Назначение заземления в том, чтобы обеспечить электрическое соединение с общей землей, уменьшив разность потенциалов, из-за которой появляется опасность поражения током и напряжение шума. Заземление позволяет:

- установить токопроводящий путь для молнии, чтобы защитить объект, людей и оборудование;
- уменьшить напряжение в доступных точках до безопасного уровня, позволив в т.ч. избежать появления условий отказа и воздействия грозовых разрядов;
- осуществлять управление шумом за счет меньшей разницы напряжений между источником и приемником сигналов.

Во многих руководствах в качестве опорной точки считается нулевой потенциал земли, и этот выбор оправдан в отношении оборудования. Однако в тех случаях, когда речь идет о транспорте и портативных устройствах, землей называется точка, потенциал которой считается равным 0 В относительно тела пассажиров или пользователей.

Чтобы потенциал земли был нулевым, сопротивление проводника между устройством и землей должно отсутствовать, чего на практике добиться нельзя. Проводники имеют сопротивление, распределенное вдоль их длины. Поскольку каждый электрический контакт проводников имеет сопротивление, сопротивление соединений должно быть минимальным, чтобы разность потенциалов была очень малой. Очевидно, что заземление и соединения напрямую связаны, однако обеспечение минимального импеданса соединений цепи под напряжением позволяет предотвратить падение напряжения вдоль проводников.

Мы не станем подробно рассматривать все факторы, определяющие эффективность заземления. Поскольку у него многоцелевое назначение, мы лишь установим, как эти факторы влияют на выполнение других требований к системе заземления, которая должна быть эффективной и справляться с поставленной задачей.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Заземление часто используется для защиты от поражения электрическим током, которое может возникнуть в условиях отказов. Во многих нормативных документах для электрического оборудования имеется требование о предоставлении средств защиты. Если же заземление нецелесообразно в каких-то ситуациях, используются другие средства защиты.

При наличии напряжения опасного уровня импеданс заземления настолько мал, что его потенциал не оказывает поражающего воздействия на тело человека. Что следует заземлить? Открытые проводники, которые могут оказаться под напряжением в условиях отказа. Например, металлический шкаф с оборудованием находится под напряжением, если со шкафом соприкасается оголенный провод, выпавший из-за вибраций из наконечника обжимного контакта. В отсутствие защитного заземления оборудование перестанет работать, если тело ремонтника, контактирующего с силовым выводом, становится проводником тока на землю

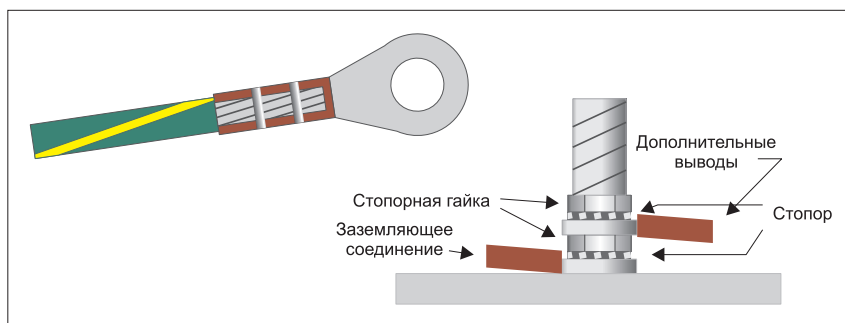


Рис. 1. Типовой пример защитного заземления

при контакте с шасси. Если защитное заземление подключено правильно, срабатывает размыкатель цепи, отключающий электропитание оборудования.

Как правило, подключение шасси может осуществляться с помощью третьего земляного провода в шнуре питания от сети переменного тока, который соединяется с заземляющим контактом розетки. Этот контакт реализуется таким образом, чтобы он был первым соединением с шасси и имел защиту независимо от других заземляющих соединений с помощью стопора (см. рис. 1). Например, третий провод во входном соединителе шнура питания подводится к клемме защитного заземления на шасси и защищается отдельно от других клемм в этой контактной точке. Остальные клеммы защищаются в индивидуальном порядке. Не следует забывать, что контакт обжимного типа имеет две точки для обжима.

Сечение провода должно выдерживать ток короткого замыкания. Какова должна быть допустимая нагрузка по току? Если шнур питания не отсоединяется, допустимая нагрузка по току на третий провод должна быть равна нагрузке фазного провода, исходя из предположения, что фазный провод в результате возгорания разомкнется к тому времени, когда сгорит и разомкнется заземляющий провод. Однако в более общем смысле мы гарантированно предохраняем фазный вывод (но никогда не предохраняем заземление). Если шнур съемный, допускается, что его можно заменить другим с проводом иного калибра, отличного от исходного. В этом случае полагаются на автоматический размыкатель цепи. Поскольку, как правило, к обычным розеткам подводится цепь на 15 или 20 А, сечение проводов подбирается с учетом этих значений. Для заземления в таком случае часто выбирается провод 12 AWG, чтобы обеспечить соответствующую допустимую нагрузку.

Каковы требования к электрическим соединениям? Большинство стандартов требует, чтобы сопротивление соединений не превышало 100 мОм в случае соединения между клеммой защитного заземления и заземлением оборудования (платформы). Давайте проанализируем тракт и определим, какие способы соединения подходят для съемного шнура питания переменного тока. Клемма на рисунке 1 (шпилька заземления) соединяется с металлическим шасси и с закрепленным кабельным наконечником. Этот наконечник с двойным обжимом

соединяется с проводом. Длина провода составляет около 10 см до входного контакта переменного тока устройства, подключенного к самозапирающемуся наконечнику на входе. Соединительный штифт на входе подключается к шнуру питания длиной около 1,8 м и к клемме розетки переменного тока оборудования. В тракте заземления имеются шесть соединений и провод длиной 1,9 м. Поскольку сопротивление 1,9-м провода 14 AWG составляет около 63 мОм, остается немногим менее 40 мОм на шесть переходов, или около 6 мОм на контактную точку. Нетрудно обеспечить такую величину сопротивления для соединения, если не учитывать загрязнения или неплотные соединения в тракте, но этот расчет подтверждает необходимость в жестких соединениях.

Заметим, что имеются и другие элементы конструкции, например дверцы, направляющие выдвижных ящиков и панели шасси, которым требуется гарантированное заземление, обеспечивающее надежное соединение с землей.

#### МОЛНИЕЗАЩИТА

Заземление обеспечивает определенную степень защиты от грозовых разрядов, а также защиту оборудования от повреждений. Упомянутые выше требования к электробезопасности включают прохождение разрядов молнии через систему заземления. Переходный процесс, возникший в результате грозового разряда, может индуцироваться на оборудование через внешние кабели, антенные интерфейсы или линии электропередач, где компоненты защиты от переходных процессов направляют ток молнии в обход обо-

рудования на землю. Меры по борьбе с последствиями от разрядов молний часто применяются в тех случаях, когда разрядные токи проникают в оборудование или платформу, но система заземления оборудования должна контролировать наведенные токи в переходных процессах.

Электропроводка и соединения как составляющие части системы заземления подвержены переходным процессам высокого напряжения и тока, индуцированными молнией. Помехи переходного процесса, наведенные линией электропередачи (см. рис. 2), поступают в схему распределения питания внутри оборудования, в котором ограничители напряжения их уменьшают, а система заземления отводит. Изоляция проводки заземления должна выдерживать высокое напряжение переходного процесса в системе заземления, вызванное молнией. Такая устойчивость оценивается путем испытания высоким напряжением, поданным между внешними соединениями и заземляющей системой. Требуется, чтобы дуга не распространилась на систему заземления (заметим, что при проведении испытания высоким напряжением отключены подаватели помех, вызванных переходным процессом). В зависимости от параметров схемы напряжение пробоя достигает 10 кВ.

Прямой разряд на систему молниезащиты оборудования вызывает в молниеотводе большой ток в течение короткого переходного процесса. Собственно говоря, напряжение переходного процесса, вызванное ударом молнии, обычно находится в пределах от нескольких вольт до нескольких киловольт, но ток может оказаться

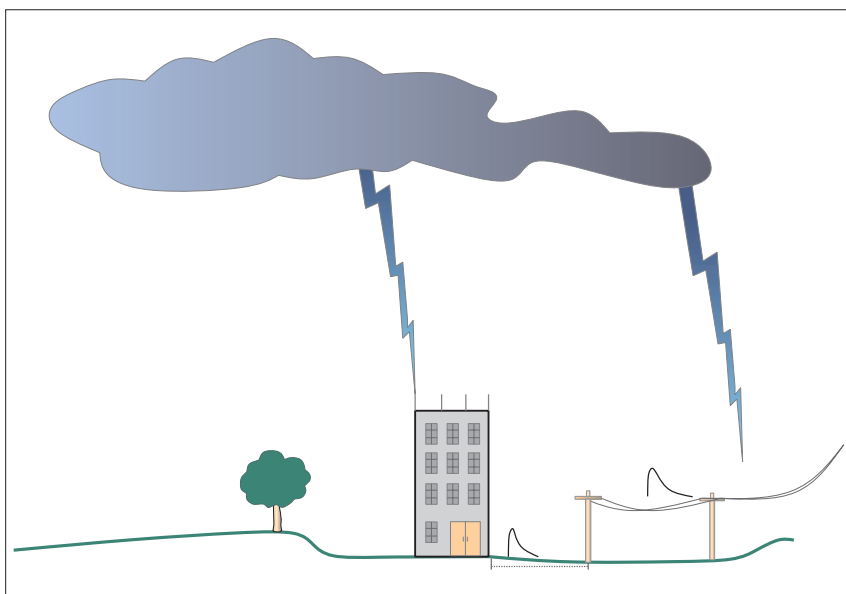


Рис. 2. В результате воздействия молний на электропроводку и линию электропередачи в оборудовании возникают помехи переходного процесса

значительным в случае пробоя. Если полное сопротивление токоотвода велико, электромагнитная индукция значительно возрастает, когда величина напряжения в контакте достигает 100–200 кВ; при этом величина тока, протекающего через токоотвод в переходном процессе, может превысить 40 кА. Как известно, в течение нескольких миллисекунд происходят до 20 ударов молнии. Поскольку время нарастания сигнала помехи в переходном процессе обычно составляет около 2 мс, индуктивность токоотвода играет значительную роль в общем импедансе на частотах в несколько сотен кГц.

Оснащение системы молниезащиты заземлением требует учета многих аспектов, влияющих на работоспособность оборудования. Допустимая нагрузка проводников по току должна быть такой, чтобы не возникало отказов, обусловленных почти мгновенным повышением температуры при рассеивании омической мощности, а также непрерывным протеканием тока при множественных ударах в отсутствие времени на восстановление. При монтаже схемы следует избегать появления контактов с высоким сопротивлением. Такие контакты устойчивы к воздействиям окружающей среды, к тепловому расширению и сжатию, что пагубно отражается на соединениях. Длительность переходного процесса указывает на необходимость учитывать проблемы, связанные с толщиной поверхностного слоя, для управления общим реактивным сопротивлением проводников.

Таким образом, для защиты от молний требуются меры контроля, т. к. часто

упускается из виду то, что некоторые элементы оборудования были повреждены грозовыми разрядами и потому перестали работать эффективно. Мы также должны учитывать, что удары молний не всегда приходятся на самую высокую точку застройки.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Наличие корректно выполненного заземления – часть многих мер по контролю ЭМС. Качество заземления связано с экранированием и характеристиками фильтра. Как правило, на практике приходится иметь дело с помехами на более высоких частотах, чем предусматривают меры безопасности или защиты от молний.

Поскольку ток течет по замкнутому контуру, схеме требуется обратный тракт для возврата тока к его источнику. Обычно предоставляется несколько типов подключения к земле для изоляции цифровых цепей от аналоговых. При этом следует предусмотреть общую точку заземления. При проектировании возвратного тракта и заземления рекомендуется минимизировать площадь контура, чтобы уменьшить излучение схемы; при этом ток должен непрерывно протекать по проводникам без разрывов импеданса.

Фильтрам часто требуется заземляющий тракт для шунтирования шумового тока, поступающего или покидающего оборудование (см. рис. 3). Если сопротивление соединения  $Z_B$  велико, шум проходит через емкость между линией питания и землей в зависимости от частотных характеристик схемы. Обычно требуется, чтобы сопротивле-

ние каждого соединения было очень низким, а общий импеданс – намного меньше импеданса емкости между линией питания и землей. Чтобы импеданс был небольшим, учитывается индуктивное сопротивление и паразитная емкость всего тракта.

Поскольку для обеспечения ЭМС часто требуется, чтобы заземление имело хорошие характеристики на высоких частотах, учет поверхностного эффекта в проводнике становится важным фактором. Поверхностный эффект позволяет отделить возвратный тракт сигнала от экранирующей оболочки коаксиального кабеля, когда обратный ток сигнала протекает по внутренней поверхности, а шумовой ток – по внешней, как показано на рисунке 4. Толщина скин-слоя может повлиять на выбор заземляющей перемычки: часто выбираются перемычки с малым отношением их длины к ширине, чтобы уменьшить индуктивность. В целях безопасности конструкции допустимая токовая нагрузка на перемычку должна быть достаточно высокой, чтобы она выдерживала ток на меньших частотах.

Экраны должны быть заземлены, чтобы повысить эффективность защиты за счет рассогласования импеданса излучаемого поля. Незаземленный экран часто работает как антенна, излучающая сигналы с поверхности. Проводное соединение между дверцей и шасси устройства может иметь низкое сопротивление и соответствовать требованиям безопасности, но излучать на высоких частотах при большом импедансе. Уменьшить это излучение позволяет заземление по всему периметру дверцы устройства.

Вернемся теперь к упомянутому в начале статьи мифу о 2,5 мОм. В течение многих лет требовалось, чтобы сопротивление системы заземления не превышало 2,5 мОм. Считалось, что сопротивление между любой точкой шасси и заземлением не должно быть более 2,5 мОм. Стандарт MIL-STD-461G не развеял это заблуждение, несмотря на достаточно ясное упоминание о необходимости измерять сопротивление заземления и предоставлять результаты измерений в отчете без указания конкретного значения. MIL-STD-464C предусматривает некоторые особые условия измерения сопротивления, но требование обеспечить 2,5 мОм относится к отдельному сопрягаемому соединению. Для обеспечения ЭМС необходимо, чтобы величина используемого в испытаниях сопротивления заземления соответствовала величине сопротивления заземляющей цепи оборудования. ◀

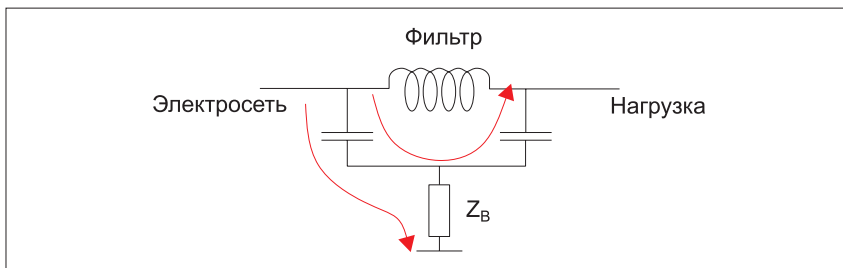


Рис. 3. Заземляющий тракт для фильтра

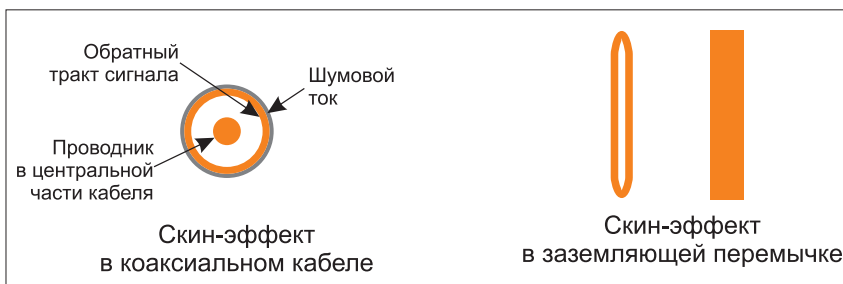


Рис. 4. Из-за поверхностного эффекта обратный ток сигнала протекает по внутренней поверхности коаксиального кабеля, а шумовой ток – по внешней