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

Помехи

Автор: Вербин В.С.

1. Классификация электромагнитных помех

В качестве электромагнитной помехи (ЭМП) может фигурировать практически любое электромагнитное явление в широком диапазоне частот. Прежде чем переходить к рассмотрению влияния ЭМП на электронную аппаратуру, попытаемся ввести некоторую классификацию ЭМП.

В зависимости от *источника* ЭМП можно разделить на *естественные* и *искусственные*. Наиболее распространенной естественной ЭМП является электромагнитный импульс при ударе молнии. Искусственные помехи можно разделить на создаваемые функциональными источниками и создаваемые *нефункциональными источниками*. Функциональным источник помехи будем называть в случае, если для него самого создаваемая ЭМП является полезным сигналом. К таким источникам относятся, прежде всего, передающие устройства радиосвязи, а также аппаратура, использующая цепи питания для передачи информации. Нефункциональными будем называть источники, которые создают ЭМП в качестве побочного эффекта в процессе работы. К ним можно отнести любые проводные коммуникации, создающие электромагнитные поля, коммутационные устройства, импульсные блоки питания аппаратуры и т.п. Электростатический разряд с тела человека также может рассматриваться как создаваемый нефункциональным источником ЭМП. Принципиальное различие между функциональными и нефункциональными источниками состоит в том, что для вторых уровень ЭМП часто можно снизить путем пересмотра конструкции источника, в то время как для функциональных ЭМП такой путь обычно исключается.

В зависимости от *среды распространения* ЭМП могут разделяться на *индуктивные* и *кондуктивные*. Индуктивными называют ЭМП, распространяющиеся в виде электромагнитных полей в непроводящих средах. Кондуктивные ЭМП представляют собой токи, текущие по проводящим конструкциям и земле.

Деление помех на индуктивные и кондуктивные является, строго говоря, условным. В реальности протекает единый электромагнитный процесс, затрагивающий проводящую и непроводящую среду. В ходе распространения многие помехи могут превращаться из индуктивных в кондуктивные и наоборот. Так, переменное электромагнитное поле способно создавать наводки в кабелях, которые далее распространяются как классические кондуктивные помехи. С другой стороны, токи в кабелях и цепях заземления сами создают электромагнитные поля, т.е. индуктивные помехи.

Условность деления помех на индуктивные и кондуктивные наглядно проявляется, например, в ходе анализа пути проникновения высокочастотных

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

помех внутрь электронной аппаратуры. Часто выясняется, что реальный путь проникновения помехи представляет собой комбинацию металлических проводников и «дорожек» на платах аппаратуры («кондуктивные» участки) и паразитных емкостных и индуктивных связей («индуктивные» участки). В результате помеха достигает высокочувствительных цифровых контуров аппаратуры, минуя защитные элементы типа фильтров и варисторов, установленные в расчете на чисто кондуктивный характер помехи.

Деление помех на индуктивные и кондуктивные можно считать относительно строгим лишь в низкочастотной (до десятков кГц) области, когда емкостные и индуктивные связи обычно малы. Однако и здесь есть исключения – например, строгий анализ растекания тока через сложный заземлитель в землю требует учета как гальванической, так и электромагнитной составляющей единого процесса.

Кондуктивные помехи в цепях, имеющих более одного проводника, принято также делить на помехи «*провод - земля*» (синонимы − несимметричные, общего вида, Common Mode) и «*провод-провод*» (симметричные, дифференциального вида, Differential Mode). В первом случае («провод-земля») напряжение помехи приложено, как следует из названия, между каждым из проводников цепи и землей. Во втором – между различными проводниками одной цепи (см. рис. 1). Обычно самыми опасными для аппаратуры являются помехи «провод-провод», поскольку они оказываются приложенными так же, как и полезный сигнал (рис. 1 б)). Реальные помехи обычно представляют собой комбинацию помех «провод-провод» и «провод-земля». Нужно учитывать, что несимметрия внешних цепей передачи сигналов и входных цепей аппаратуры может вызывать преобразование помехи «провод-земля» в помеху «провод-провод». Это легко понять, рассматривая упрощенную схему на рис. 2: несимметрия внешних цепей ($Z_{l1} \neq Z_{l2}$) и входных цепей аппаратуры-приемника ($Z_{i1} \neq Z_{i2}$) приводит к появлению помехи «провод-провод» величиной $U_d = (Z_{i1}/Z_{l1} - Z_{i2}/Z_{l2})U_c$. В данном примере упрощение заключалось в том, что внутреннее сопротивление приемника в режиме «провод-провод» принято равным бесконечности (т.е., в качестве измерителя полезного сигнала включен идеальный вольтметр).

ЗАДАЧА. Найти выражение для напряжения помехи «провод-провод» в реальной схеме, заменив вольтметр в схеме рис. 2 некоторым входным сопротивлением аппаратуры Z.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

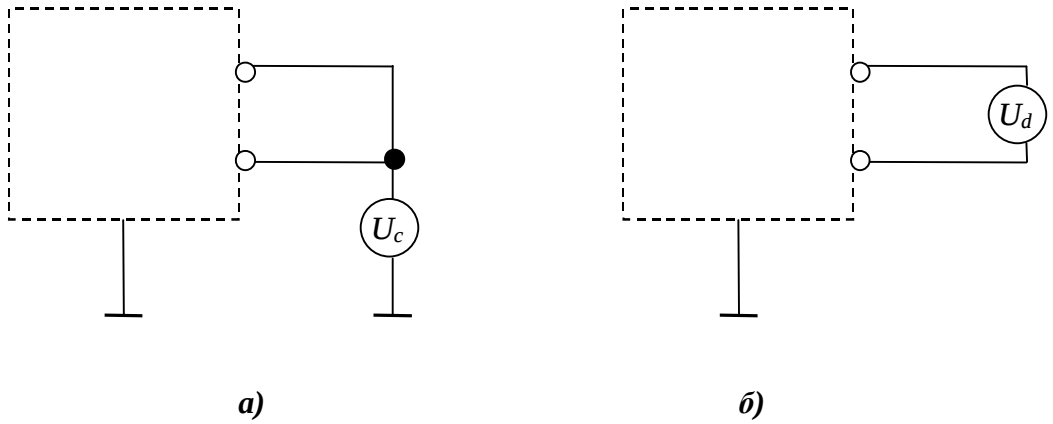


Рисунок 1. Схема приложения помехи «провод-земля» (а) и «провод-провод» (б).

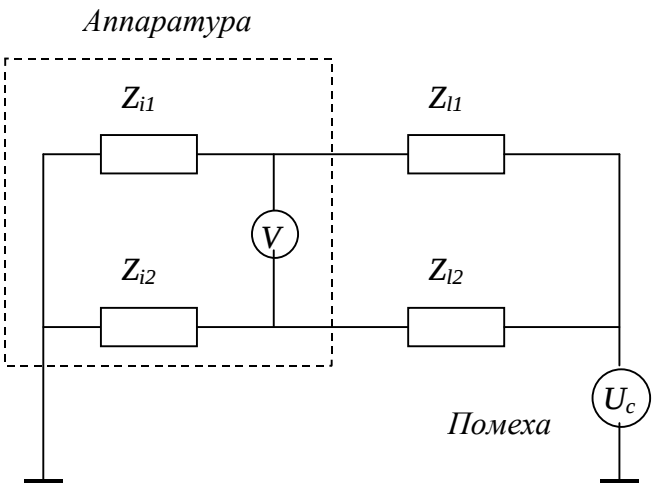


Рисунок 2. Преобразование помехи «провод-земля» в помеху «провод-провод».

Применение внешних цепей с высокой степенью симметрии (т.е. с $Z_{l1} \approx Z_{l2}$, например, типа «витая пара»), позволяет обеспечить низкий уровень преобразования помех «провод-земля» в помехи «провод-провод», но лишь при условии высокой симметрии входных цепей аппаратуры ($Z_{i1} \approx Z_{i2}$).

Следующие два способа классификации помех основываются на их *спектральных характеристиках*. Во-первых, ЭМП делятся на *узкополосные* и *широкополосные*. К первым обычно относятся помехи от систем связи на несущей частоте, систем питания переменным током и т.п. Их отличительной особенностью является то, что характер изменения помехи во времени является синусоидальным или близок к нему. При этом спектр помехи близок к линейчатому (максимальный уровень – на основной частоте, пики меньшего уровня – на частотах гармоник).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Широкополосные помехи имеют существенно несинусоидальный характер и обычно проявляются в виде либо отдельных импульсов, либо их последовательности. Для периодических широкополосных сигналов спектр состоит из большого набора пиков на частотах, кратных частоте основного сигнала. Для апериодических помех спектр является непрерывным и описывается спектральной плотностью. Типичными широкополосными помехами являются:

- шум, создаваемый в сети питания аппаратуры при работе импульсного блока питания;
- молниевые импульсы;
- импульсы, создаваемые при коммутационных операциях;
- ЭСР.

Другой спектральной характеристикой является *область частот*, в которой лежит основная часть спектра помехи. Условно принято делить все помехи на *низкочастотные* и *высокочастотные*. К первым обычно относят помехи в диапазоне 0 – 9 кГц. В большинстве случаев они создаются силовыми электроустановками и линиями. Высокочастотные узкополосные помехи (с частотой выше 9 кГц) обычно создаются различными системами связи. Высокочастотными являются все распространенные типы импульсных помех. Иногда также вводят понятия *радиочастотной помехи* (диапазон – от 150 кГц до 1−2 ГГц) и *СВЧ-помехи* (порядка нескольких ГГц).

Приведенная классификация не претендует ни на строгость, ни на полноту. Тем не менее, она позволяет ввести понятия, которые понадобятся нам в дальнейшем. Эта же классификация широко используется инженерами, работающими в области ЭМС.

2. Влияние ЭМП на аппаратуру связи

Влияние ЭМП на аппаратуру бывает разнообразным – от непредсказуемых временных ухудшений характеристик канала передачи информации, сбоев цифровой техники и искажения изображения на экранах мониторов до физического повреждения и даже возгорания аппаратуры и ее кабелей. Иногда при анализе той или иной неисправности оказывается очень сложно обнаружить, что реальным ее источником являются проблемы ЭМС.

Прежде, чем переходить к описанию физических механизмов влияния ЭМП на аппаратуру, рассмотрим формальную классификацию воздействия ЭМП по признаку степени серьезности последствий. В действующих стандартах для этого используются так называемые *критерии качества функционирования* аппаратуры под действием ЭМП (см., например, [5]). Они используются для формализации описания поведения аппаратуры под действием той или иной помехи. Рассмотрим эти критерии.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Критерий А – воздействие ЭМП никак не отражается на функциональных характеристиках аппаратуры, работа которой до, во время и после воздействия помехи происходит в полном соответствии с техническими условиями или стандартами. Обычно выполнение критерия А требуется для аппаратуры, используемой для выполнения функций высокой важности в реальном масштабе времени. В первую очередь это аппаратуры защиты и противоаварийной автоматики.

Критерий В – допускается временное ухудшение функциональных характеристик аппаратуры в момент воздействия помехи. После прекращения воздействия ЭМП функционирование полностью восстанавливается *без вмешательства обслуживающего персонала*. Этот критерий обычно используется для аппаратуры, выполняющей задачи высокой важности, однако не в реальном масштабе времени. Достаточно «скользким» моментом при определении соответствия аппаратуры критерию В является допустимое время восстановления функциональных характеристик после воздействия помехи. Это актуально, например, когда речь идет о цифровой аппаратуре, воздействие ЭМП на которую приводит к перезагрузке.

Критерий С - аналогичен В, но, в отличие от него, допускает вмешательство персонала для восстановления работоспособности аппаратуры (например, перезагрузки «зависшей» цифровой системы, повторного набора номера и т.п.). Обычно используется для аппаратуры, не предназначенной для выполнения ответственных задач.

Критерий D – физическое повреждение аппаратуры под действием помехи. По понятным причинам, этот критерий не может использоваться для формулировки требований к устойчивости аппаратуры.

Несмотря на высокий уровень формализации, применение этих критериев часто требует дополнительной информации. Такая конкретизация обычно выполняется в стандартах на виды продукции, технических условиях и программах испытаний.

Перейдем теперь к рассмотрению физических механизмов влияния ЭМП на аппаратуру.

Условно, можно выделить следующие основные сценарии воздействия ЭМП на аппаратуру:

1) **Искажение сигналов во внешних информационных цепях**. Можно выделить две основных причины возникновения кондуктивных помех в информационных цепях (рис. 3):
   - действие индуктивных ЭМП, наводящих кондуктивные помехи в информационных цепях;
   - наличие гальванической связи между подверженной влиянию цепью и источником внешних помех (кондуктивный механизм). В качестве такой гальванической связи очень часто выступает общее для

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

различных устройств сопротивление заземления: потенциал, созданный падением напряжения на сопротивлении заземления, оказывается приложенным к корпусу аппаратуры и, через сопротивления между входными цепями этой аппаратуры и корпусом, прикладывается к информационным цепям.

Помехи, появившись в проводных коммуникациях, достигают входов аппаратуры. Далее механизм воздействия помех зависит от их частот.

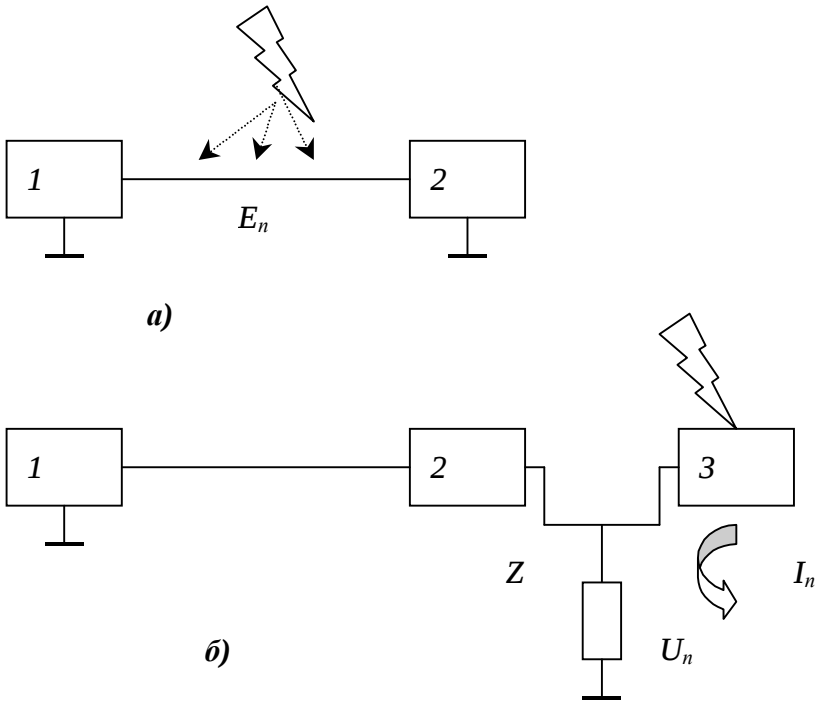


Рисунок 3. Возникновение помех в линии связи: а) - ЭДС помехи E_n создается под действием внешнего электромагнитного поля (индуктивный механизм), б) - напряжение U_n создается при протекании тока помехи I_n через общее для устройств 2,3 сопротивление заземления Z (кондуктивный механизм).

Особенно опасны составляющие спектра помехи, лежащие в той же полосе частот, что и рабочие сигналы. Обычно такие составляющие беспрепятственно минуют входные фильтры и далее обрабатываются так же, как если бы они были полезными сигналами. В результате повышается число ошибок в канале передачи информации. В отдельных случаях может происходить даже физическое повреждение элементов сигнального тракта.

Сравнительно низкочастотные (до 10 − 20 МГц) составляющие помехи, лежащие вне рабочей полосы частот канала связи, обычно воздействуют на ближайшие к входам схемные элементы. В грамотно спроектированной

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

аппаратуре ими обычно оказываются фильтры и специальные устройства ограничения перенапряжений (разрядники, варисторы и т.п.). В этом случае основной угрозой является возможность физического повреждения этих элементов. Обычно это бывает, если амплитуда помехи значительно превышает ту, на которую защитные элементы были рассчитаны.

Высокочастотные составляющие спектра помехи вне рабочей полосы частот, отличаются тем, что благодаря наличию паразитных индуктивных и емкостных связей оказываются способными «обходить» защитные элементы и проникать глубоко внутрь аппаратуры. Особенно опасно их воздействие на элементы внутренних цифровых схем аппаратуры. Поскольку обмен данными по внутренним системным шинам часто производится без использования протоколов с обнаружением и коррекцией ошибок, искажение только одного бита информации уже способно полностью блокировать работу системы.

2) **Искажение сигналов в антенных цепях**. Относится к радиоаппаратуре. Механизм возникновения помех аналогичен индуктивному механизму возникновения помех в проводных коммуникациях аппаратуры связи (рис. 3 а): электромагнитное поле помехи индуцирует в антенных цепях ЭДС помехи. Обычно амплитуды помех, наводимых таким образом, малы для того, чтобы повредить входные фильтры аппаратуры. Поэтому основную угрозу для приема представляют помехи, значительная часть спектра которых лежит в рабочей полосе частот радиоаппаратуры.

3) **Попадание помех на входы питания аппаратуры**. Существует множество механизмов возникновения помех в цепях питания аппаратуры. Это связано с тем, что обычно сеть питания имеет большую протяженность и объединяет самых разных потребителей. Описанные выше для информационных цепей механизмы попадания помех (индуцирование ЭДС внешним полем и проникновение помехи через общее сопротивление) действуют и в этом случае. Кроме того, работа каждого потребителя, включенного в общую сеть питания, вносит искажения в формы кривых тока и напряжения в этой сети. При этом частоты помех могут меняться в очень широких пределах – от десятков и сотен герц (гармоники, а также провалы и выбросы напряжения питания при коммутациях больших нагрузок) до радиочастотных (например, при работе некоторых блоков питания аппаратуры). Постоянное отклонение напряжения и (или) частоты питания от номинальных значений вследствие перегрузки сети, аварийной работы энергосистемы или автономного источника питания также могут рассматриваться как помехи.

Среди низкочастотных помех наибольшую опасность представляют перенапряжения при авариях электропитания (особенно − аварийные потенциалы на элементах заземляющего устройства, которые вследствие возникающей разности потенциалов между заземлением аппаратуры и нейтрали питающего ее трансформатора оказываются приложенными к входам питания). К временной потере работоспособности аппаратуры также

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

приводят полные отключения питания на длительное время. Отказы хорошо спроектированной аппаратуры по причине появления других низкочастотных (до нескольких сотен герц) помех в цепях питания случаются относительно редко. Такая устойчивость объясняется тем, что современные блоки питания аппаратуры обычно представляют собой систему автоматического регулирования (САР), способную поддерживать заданное значение напряжения на выходе даже в случае значительного отклонения формы кривой напряжения на входе от номинальной.

При сдвиге спектра частот помехи в высокочастотную область ее опасность (при той же энергии) обычно возрастает. Для частот до нескольких десятков мегагерц это объясняется двумя факторами.

Во-первых, импульсные помехи даже сравнительно небольшой энергии могут иметь значительную амплитуду по напряжению. Действительно, энергия импульса, выделяющаяся на активном сопротивлении, определяется как

$$E = \int_0^T \frac{u^2}{r} dt ,$$

где $u=u(t)$ – напряжение, r – сопротивление, T – длительность импульса. Таким образом, при меньшей длительности импульс той же энергии может иметь большую амплитуду. Большие значения пикового напряжения импульса могут приводить к пробою элементов блока питания, не рассчитанных на слишком высокое напряжение. Возникающая при пробое дуга может сохраняться и после окончания импульса, поддерживаемая за счет обычного напряжения питания. В этом случае импульс играет роль лидера.

Второй фактор, обуславливающий повышение опасности помех в цепях питания с ростом их частоты – динамические характеристики самого блока питания. Выше уже отмечалось, что современные блоки питания имеют структуру САР, причем с нелинейными элементами. Обычно такая система проектируется в расчете на относительно низкочастотные возмущения на входе. Попадание на вход высокочастотных помех может вызвать нежелательную реакцию системы (резонансные эффекты, автоколебания и т.п.). В результате стабильность напряжения на выходе блока питания может нарушиться, что вызовет отказ аппаратуры.

С дальнейшим ростом частоты помехи (от десятков мегагерц до гигагерц) большое значение начинают играть паразитные емкостные и индуктивные связи. В результате (как и в случае информационных цепей) составляющие помехи могут, в обход установленных защитных элементов, проникнуть вглубь аппаратуры и нарушить работу ее цифровых узлов.

4) **Протекание токов помех по металлическим корпусам аппаратуры и экранам кабелей**. Источников таких помех может быть множество.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Заземленные металлические корпуса и шасси аппаратуры, а также экраны кабелей, образуют часть пути стекания в землю токов помех. Внешние электромагнитные поля также наводят токи помех в экранирующих корпусах аппаратуры и экранах кабелей. При электростатическом разряде с тела человека также происходит протекание тока по металлическим конструкциям аппаратуры.

Отрицательный эффект протекания таких токов может быть обусловлен индуктивным или кондуктивным механизмом. При индуктивном механизме протекание тока создает магнитное поле, которое, в свою очередь, способно индуцировать ЭДС помехи в близкорасположенных контурах аппаратуры. Во втором случае существенно то, что при протекании токов помех различные точки заземленных металлических частей приобретают различные потенциалы. Поскольку при проектировании аппаратуры все такие точки обычно рассматриваются как эквипотенциальные («масса»), это может привести к искажению сигналов. Пример того, как протекание тока помехи по экрану коаксиального кабеля способно исказить передаваемый сигнал, приведен на рис. 4. Здесь $Z_{ж}$ и $Z_{э}$ – полные сопротивления жилы и экрана кабеля соответственно, U_c - неискаженное напряжение сигнала на входе в кабель, $I_п$ - ток помехи. Легко понять, что реальный сигнал, измеренный на входе аппаратуры, будет уже равен $U_c + I_п Z_{э}$.

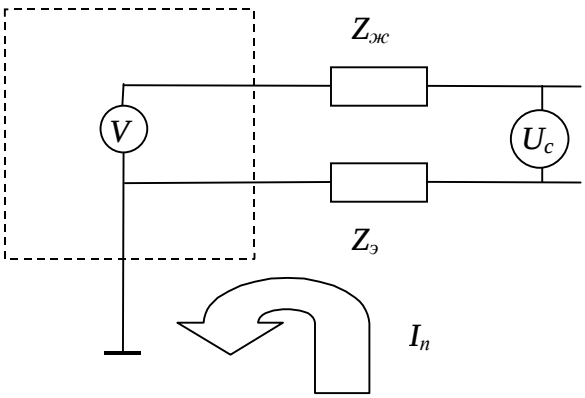


Рисунок 4. Искажение сигнала в несимметричной цепи под действием тока в экране кабеля.

Полные сопротивления металлических частей шасси аппаратуры и экранов кабелей носят индуктивный характер и возрастают (по модулю) с ростом частоты. То же самое справедливо и в отношении коэффициентов паразитных связей между ними и цепями аппаратуры. Поэтому опасность со стороны протекающих по металлическим частям шасси аппаратуры и экранам кабелей токов возрастает с ростом частоты.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

5) **Непосредственное воздействие внешних полей на внутренние цепи аппаратуры**. Такая ситуация обычно имеет место при отсутствии у аппаратуры экранирующего корпуса, либо когда экранирующие свойства такого корпуса недостаточны. При этом по закону электромагнитной индукции во внутренних контурах аппаратуры наводится ЭДС помехи. Если эта ЭДС помехи достаточно велика (например, выше порога, отделяющего уровень «ноль» от уровня «единица» в цифровых системах), возможно нарушение функционирования аппаратуры. Поскольку коэффициенты индуктивной связи пропорциональны частоте, особенно высокую опасность представляют высокочастотные поля. Принято считать, что относительно низкочастотные поля (не более 80 МГц) воздействуют, в основном, не на саму аппаратуру, а на ее проводные коммуникации (сценарии 1, 3 из данного списка). Лишь на более высоких частотах влияние поля непосредственно на внутренние контуры аппаратуры может оказаться существенным.

   Отдельно стоит сказать о действии магнитных полей на устройства, содержащие электронно-лучевые трубки (ЭЛТ). Конструкция таких устройств предусматривает очень точное нацеливание пучка электронов на соответствующую точку люминофора. Как известно, воздействие электрического или магнитного поля приводит к искажению траектории электронов. В результате искажается и изображение на экране, так как электронный пучок попадает в другие точки люминофора. В первую очередь, это сопровождается искажением цвета. Благодаря остаточной намагниченности отдельных элементов устройства, искажения изображения сохраняются некоторое время и после снятия внешнего магнитного поля.

3. Основные источники ЭМП

В этом разделе мы рассмотрим основные источники ЭМП, способные представлять угрозу для электронной аппаратуры. Некоторые из них характерны лишь для объектов с высокой энерговооруженностью (энергетика, транспорт, тяжелая промышленность и т.п.). Другие могут обнаружиться практически в любом месте, включая офисы, машинные залы ЭВМ и жилые помещения.

3.1 Аварийные потенциалы на элементах заземляющего устройства

Прежде всего, нам понадобится рассмотреть само понятие заземления и функции, которые оно выполняет.

Заземление – преднамеренное электрическое соединение элементов схем, корпусов аппаратуры, экранов кабелей и других проводящих элементов с точкой, потенциал которой принимается в качестве опорного (нулевого). Обычно в качестве такой точки принимается физическая земля, хотя это и не

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

обязательно. Так, на подвижных объектах (автомашинах, самолетах, судах и т.п.) в качестве опорного выбирается потенциал корпуса («масса»).

Заземление обеспечивает выполнение двух основных задач. Во-первых, оно служит для обеспечения электробезопасности. Действительно, хорошая электрическая связь на низкой частоте между всеми имеющимися на объекте проводящими конструкциями, к которым может прикасаться человек, обеспечивает выравнивание их потенциала. В результате разность потенциалов между любыми доступными прикосновению точками сильно снижается.

В случае короткого замыкания фазы на землю по цепям заземления могут протекать очень большие токи. Поскольку элементы системы заземления обладают некоторым сопротивлением (активным и реактивным) то, по закону Ома, на них могут создаваться значительные потенциалы, представляющие опасность для человека. Но и в этом случае заземление все же выполняет свою защитную функцию: протекание большого тока «нулевой последовательности» заставляет сработать систему защиты (в простейшем случае – обычный предохранитель). Существуют жесткие ограничения на время срабатывания защитных устройств (обычно – доли секунды).

Второй задачей заземления является задание единого опорного потенциала для всех элементов электрического или электронного оборудования.

В качестве примера можно рассмотреть два электронных устройства, расположенных в различных помещениях одного здания (рис. 5). Пусть между ними проходят цепи обмена информацией (как, например, в локальной вычислительной сети). Если теперь корпус одного из устройств приобретает высокий потенциал (в результате, например, электростатического разряда), то этот потенциал оказывается приложенным к интерфейсным элементам связи между устройствами. Это может вызвать появление помех или даже физическое повреждение интерфейсных элементов. При заземлении обоих устройств происходит очень быстрое выравнивание потенциала, в результате чего снижается вероятность физического повреждения интерфейсных элементов (хотя появление кратковременных помех при электростатическом разряде исключить по-прежнему нельзя).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

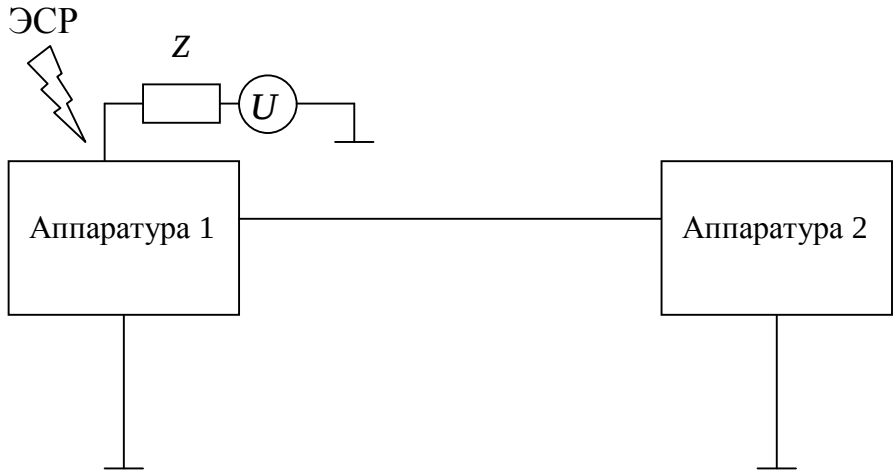


Рисунок 5. Выравнивание потенциалов при электростатическом разряде. U, Z - соответственно напряжение и эквивалентное внутреннее сопротивление источника ЭСР.

Иногда заземление используют для организации цепи возврата тока к источнику. Некоторые силовые и информационные цепи строятся по так называемой *несимметричной* схеме, когда от источника к приемнику идет лишь один провод, а обратным проводом является земля. При этом достигается некоторая экономия, однако такой подход часто снижает помехоустойчивость системы и приводит к возникновению паразитных перекрестных связей через общее для различных цепей сопротивление заземления (см. выше).

Базовым элементом системы заземления стационарного объекта является *заземлитель* (рис. 6). Заземлителем называется проводник (электрод), непосредственно соединенный с физической землей, или совокупность таких проводников, связанных металлическими связями. Широко распространены заземлители типа сетки, представляющие собой заглубленную в землю горизонтальную конструкцию из пересекающихся металлических электродов. Сложные заземлители иногда называют *контурами заземления*.

Заземлитель может быть как *искусственным* (специально созданным с целью заземления), так и *естественным*, т.е. не предназначенным специально для организации заземления. В качестве естественных заземлителей могут выступать трубопроводы, железобетонные и металлические элементы фундаментов зданий, металлическая броня кабелей и т.п.

К заземлителю присоединяется *заземляющий проводник*, который связывает с ним все конструкции, электрические и электронные устройства и т.п., подлежащие заземлению. Таких проводников может быть много, они образуют сеть, по сложности сравнимую с сетью питания.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

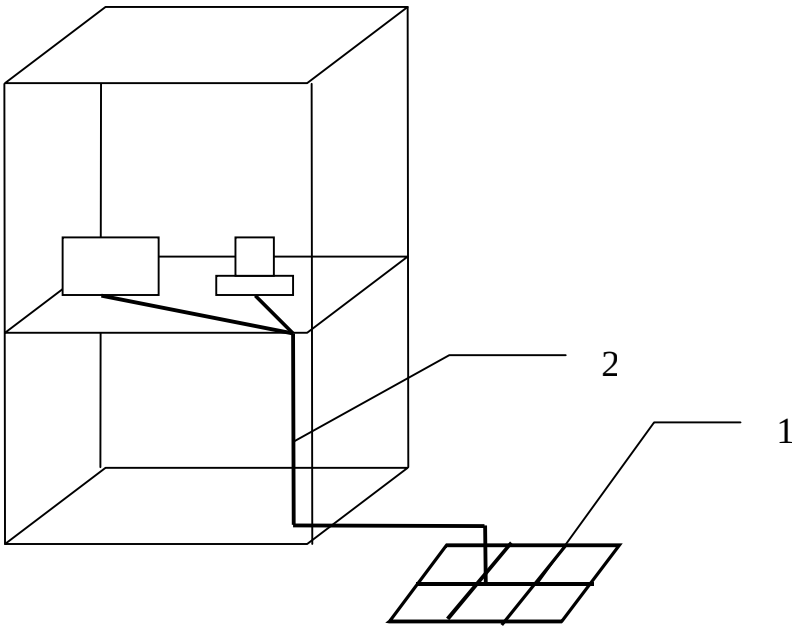


Рисунок 6. Основные элементы заземляющего устройства: 1 - заземлитель, 2 - заземляющий проводник

Иногда вместо заземления используют *зануление*. Обычно это делается, когда объект не обладает собственным заземлителем. Тогда в качестве заземлителя используют заземлитель ближайшей трансформаторной подстанции, на который (согласно ПУЭ) заземляется «ноль» (в трехфазной сети – нейтраль) питания. Такая организация заземления является неудовлетворительной. Действительно, в этом случае постоянно происходит протекание тока питания через цепи заземления, что приводит к появлению помех. Кроме того, большая длина заземляющего проводника приводит к росту его полного сопротивления.

Совокупность заземлителя и заземляющего проводника называется *заземляющим устройством*. Включая в рассмотрение также все элементы аппаратуры, металлоконструкции и т.п., непосредственно связанные с заземляющим устройством, можно говорить о *системе заземления*.

При протекании тока через заземляющий проводник в заземлитель и далее через землю к другому полюсу источника, физический ввод в заземлитель приобретает некоторый потенциал относительно удаленной земли (т.н. зоны нулевого потенциала). Отношение этого потенциала к величине тока называется *сопротивлением растеканию* заземлителя (рис. 7). Расстояние до удаленных точек ввода тока и измерения потенциала (точки 1, 2 на рисунке) должно быть много больше линейных размеров заземлителя. Соответствующий метод измерения сопротивления растеканию носит название «*метод амперметра - вольтметра*».

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

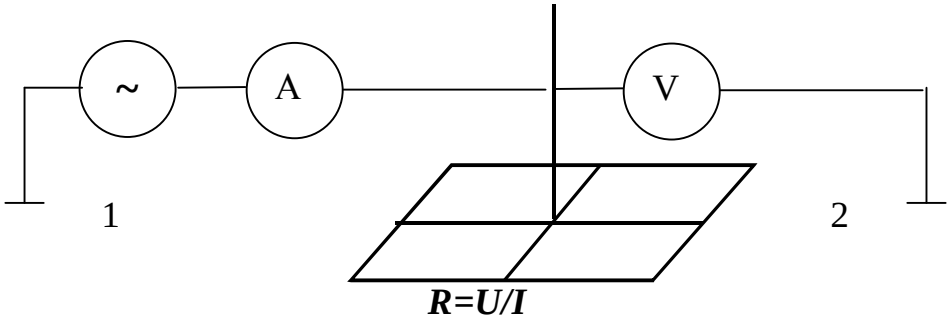


Рисунок 7. Определение сопротивления растеканию заземлителя.

Сопротивление растеканию зависит от частоты и обычно определяется для 50 Гц.

Другие важные параметры – *сопротивление заземляющего устройства в целом* (т.е., с учетом сопротивления заземляющего проводника), *сопротивление основания* электроаппарата или ввода в заземлитель, *напряжение шага и напряжение прикосновения*. Две последние характеристики зависят не только от параметров системы заземления, но и от ожидаемых значений токов короткого замыкания. Во многих случаях также нормируется предельное значение аварийного потенциала на заземляющем устройстве.

Как уже говорилось, при протекании через заземляющее устройство значительных токов на нем возникает некоторый потенциал относительно удаленной земли (зоны нулевого потенциала). Рисунок 8 показывает, каким образом этот потенциал может воздействовать на телекоммуникационную аппаратуру. В приведенном примере произошло короткое замыкание на заземляющем устройстве ЗУ1. Его причиной может быть авария любого силового электрооборудования, присоединенного к этому устройству. В результате ЗУ1 (и вся присоединенная к нему аппаратура) приобретает относительно зоны нулевого потенциала (в которой расположено второе заземляющее устройство ЗУ 2) некоторый потенциал $U_{кз}$, который в реальности может достигать многих кВ. Пусть теперь на обоих объектах установлена аппаратура связи, соединенная проводными связями. Тогда этот аварийный потенциал окажется приложенным к кабелю связи, что может привести к повреждению интерфейсных элементов, пробою оболочки кабеля и т.п. Примерный вид напряжения, приложенного в этом случае к кабелю связи и входам аппаратуры по схеме «провод-земля» показан на рис. 9.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

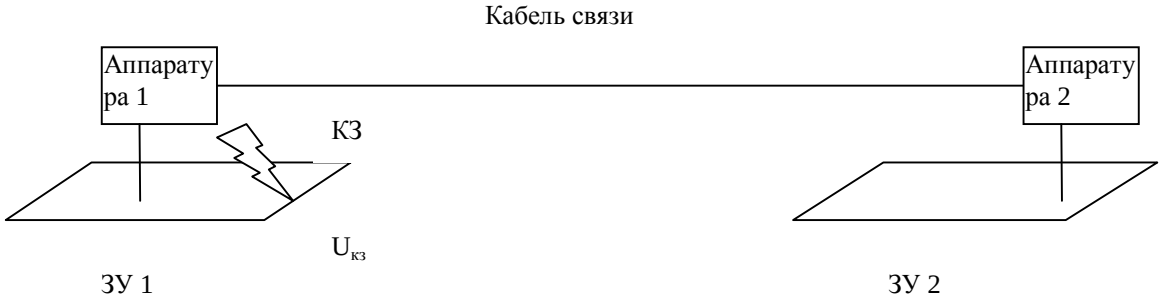


Рисунок 8. Влияние разности потенциалов между различными заземляющими устройствами на аппаратуру связи.

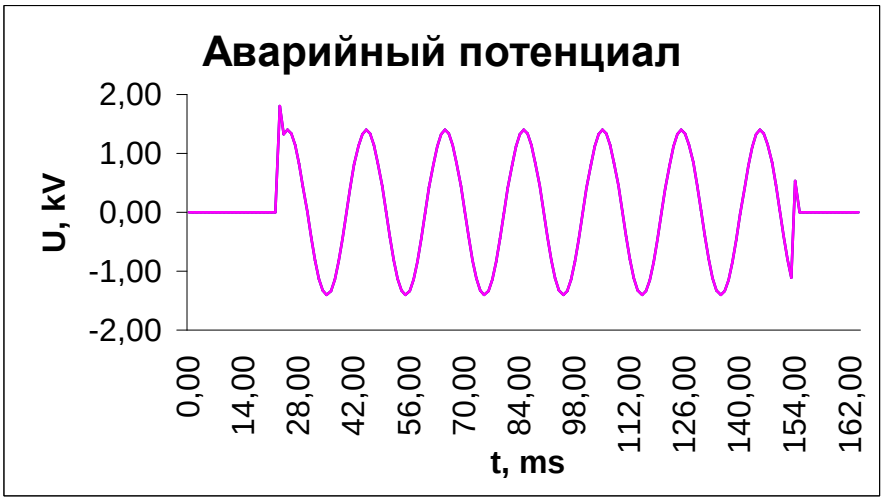


Рисунок 9. Пример напряжения помехи «провод-земля» на входе аппаратуры при воздействии аварийного потенциала.

Аналогичные проблемы могут возникать и в пределах одного заземляющего устройства. Это связано с тем, что заземляющее устройство не является эквипотенциальным. В качестве примера рассмотрим следующую ситуацию.

Пусть произошло короткое замыкание фазы на землю в силовой части энергообъекта (например, на распределительном устройстве – РУ – подстанции). Пусть, далее, ток короткого замыкания возвращается к заземленной нейтрали трансформатора, питающего данное короткое замыкание и расположенного на том же РУ. При этом на элементах заземляющего устройства будут неминуемо создаваться падения напряжения вследствие протекания токов короткого замыкания. Величина этих падений напряжения зависит от величины тока короткого замыкания, а также от свойств грунта и заземлителя и, особенно, от качества электрической связи между отдельными элементами заземляющего устройства.

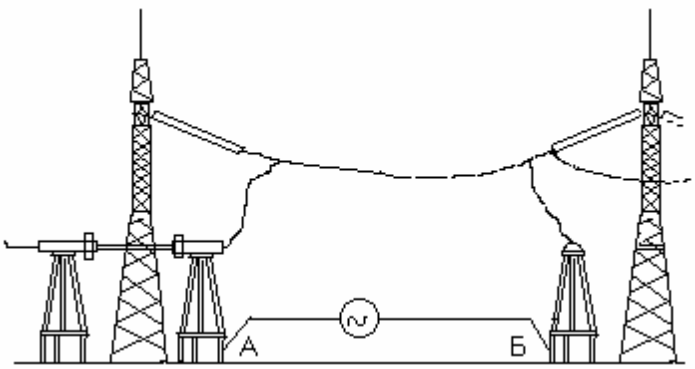
PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Для упрощения оценки качества электрической связи между отдельными элементами единого заземляющего устройства вводится понятие *сопротивления связи* между электроаппаратами (конструкциями) на распределительном устройстве энергообъекта (РУ). Это понятие можно обобщить на любую систему заземления, в которой имеется несколько вводов заземляющих проводников в заземлитель. Чтобы понять, как определяется сопротивление связи, рассмотрим рисунок 10.

Между двумя электроустановками (вводами в заземлитель) А и В включен генератор тока промышленной частоты. Протекающий в земле и заземлителе ток создает между точками А и В некоторую разность потенциалов. Отношение этой разности потенциалов к току генератора и называется *сопротивлением связи* между точками А и В.

На рисунке 11 приведены графики распределения мгновенного значения потенциала вдоль протяженного заземлителя, показанного на рис. 10. Если бы земля являлась изолятором, то весь ток возвращался бы к генератору по заземлителю, и распределение потенциала вдоль заземлителя было бы равномерным (кривая 1 на рис. 11), т. к. его погонное сопротивление остается неизменным по длине. В действительности земля (грунт) имеет конечную проводимость, не равную нулю, поэтому ток по мере удаления от места его ввода перераспределяется между заземлителем и землей. При этом вблизи точек ввода и вывода занятый током объем грунта будет небольшим, но он будет быстро увеличиваться по мере удаления от концов заземлителя к его середине. Если считать продольный заземлитель вместе с объемом грунта, занятого током, некоторым эквивалентным проводником тока земляного возврата, то этот проводник будет иметь переменное сечение. Наибольшее сечение будет в середине, а наименьшее – в точках ввода и вывода тока, т.е. в точках А и Б. Соответственно, погонное сопротивление такого проводника будет наибольшим вблизи его концов, и распределение мгновенного значения потенциала вдоль него будет неравномерным (кривая 2 на рис. 11). В точках А и В потенциал будет максимальным (по абсолютной величине). По мере удаления от этих точек потенциал будет быстро снижаться до малых значений.



PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Рисунок 10. К определению сопротивления основания электроустановки

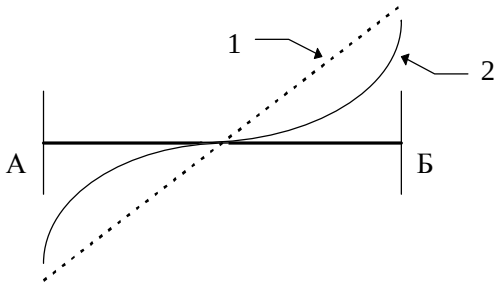


Рисунок 11. Характер изменения мгновенного значения потенциала вдоль заземленного проводника.

Такой характер изменения потенциала определяет опасность напряжения прикосновения. По этой же причине сопротивление электрической связи между двумя точками А и Б можно в большинстве случаев представить суммой двух сопротивлений — сопротивления основания электроустановки А и сопротивления основания электроустановки Б. Под *сопротивлением основания* электроустановки А относительно Б при этом понимается отношение потенциала, измеренного в точке А, к току генератора.

ЗАМЕЧАНИЕ. Если в качестве точки Б использовать заземлитель, вынесенный далеко за пределы заземляющего устройства, полученное значение сопротивления основания в точке А будет в точности равно сопротивлению растеканию данного ЗУ, измеренному в точке А.

Вообще говоря, сопротивление основания электроустановки А зависит от выбора второй точки Б. Поэтому понятия «сопротивление связи» или «сопротивление растеканию, измеренное в точке А» являются более строгими. Однако на практике при выполнении измерений удобнее всего измерять именно сопротивление основания. Это позволяет ограничиться измерением сопротивления растеканию лишь в одной «опорной» точке (на подстанции такой точкой обычно является заземление нейтрали одного из трансформаторов). Для всех остальных точек (вводов в заземлитель) измеряются только сопротивления оснований относительно этой опорной точки. В целом получается достаточно полная картина, характеризующая заземляющее устройство в целом.

Чтобы оценить важность рассмотренных понятий с точки зрения ЭМС, рассмотрим простой пример.

ПРИМЕР. Пусть сопротивления оснований всех аппаратов, расположенных на РУ подстанции относительно нейтрали трансформатора составляют 0,1 Ом (что соответствует реальному значению сопротивлений связи для элементов ЗУ, находящегося в удовлетворительном состоянии). Примем ток КЗ равным 10 кА, что вполне соответствует реальности. Тогда при коротком замыкании на какой-либо из электроустановок разность потенциалов между точками грунта, расположенными рядом с ней, и другими точками, удаленными от места КЗ и питающего его трансформатора, будет равна примерно 1 кВ. При возрастании сопротивления связи до 1 Ом (что нередко наблюдается в реальных условиях), указанная разность потенциалов увеличится до 10 кВ.

Высокая разность аварийных потенциалов в пределах единого ЗУ может, в итоге, оказаться приложенной к некоторым кабелям, и через них – к входам

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

аппаратуры. Кроме того, она представляет значительную опасность для оперативного и ремонтного персонала.

При оценке опасности аварийных потенциалов необходимо учитывать такое явление, как *вынос потенциала*. Его суть заключается в распространении высокого потенциала по экранам кабелей, трубопроводам и т.п. далеко от места короткого замыкания.

ПРИМЕР. Пусть заземление экранов кабелей, связывающих два объекта А и Б, осуществляется со стороны объекта А. Тогда при появлении аварийного потенциала на объекте А возможен вынос потенциала на объект Б по экранам кабелей.

Аварийные потенциалы воздействуют на аппаратуру как низкочастотные кондуктивные помехи по информационным цепям и цепям питания (сценарии 1 и 3 в разделе 2). Обычная схема − «провод−провод». Поскольку частота 50 Гц очень низка по сравнению с рабочими частотами практически любой современной информационной аппаратуры, основную угрозу представляет физическое разрушение элементов аппаратуры, а также самих кабелей (критерий качества функционирования D согласно классификации раздела 2). Иногда, однако, встроенные схемы мониторинга питания распознают аварийные потенциалы как отказ и производят отключение или перезагрузку аппаратуры. В этом случае критерий качества функционирования – B или C.

К сожалению, пока нет единой стандартизованной процедуры испытаний, моделирующей воздействие аварийных потенциалов на работающую аппаратуру. Применяемые обычно стандартные измерения сопротивления изоляции нельзя считать полностью удовлетворительными, поскольку, во-первых, они проводятся лишь для отключенной аппаратуры и, во вторых, только по схеме «провод-земля».

3.2 Низкочастотные возмущения напряжения питания

Основными источниками возмущений напряжения питания являются:

1. **Резкие колебания нагрузки.** Рассмотрим условную схему сети электропитания (рис. 12).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

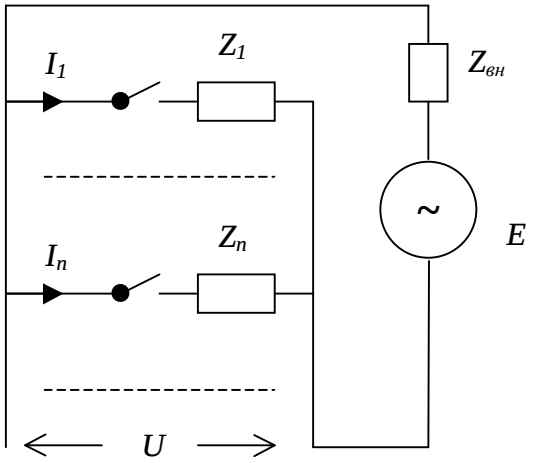


Рисунок 12. Влияние резкого изменения нагрузки на остальных потребителей.

Здесь потребители $Z_1 \ldots Z_n$ питаются от источника с ЭДС E и внутренним сопротивлением $Z_{вн}$. Очевидно, что включение, например, первого источника приведет к уменьшению напряжения питания U на величину $\Delta U = I_1 Z_{вн}$ за счет увеличения падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника. При наличии в сети большого количества часто коммутируемых мощных потребителей (например, нагревательных устройств с терморегуляторами), будут происходить постоянные колебания напряжения сети питания (т.н. *фликер - flicker*).

2. **Нештатные режимы работы энергосистем.** Вследствие тех или иных неполадок в работе энергосистемы параметры напряжения питания (в первую очередь, действующее значение) могут значительно отличаться от номинальных. Короткие замыкания и другие аварии могут приводить к полному исчезновению напряжения питания длительностью от десятков миллисекунд до нескольких часов. В некоторых случаях могут возникать кратковременные перенапряжения, когда в течение нескольких периодов напряжение питания в 1,5 − 2 раза превышает номинальное.

3. **Нелинейные элементы в сетях электропитания.** Наличие в сети питания нелинейных элементов способно значительно искажать формы кривых тока и напряжения. К таким элементам относятся сердечники трансформаторов, работающие в режиме, близком к насыщению, импульсные блоки питания аппаратуры, силовые полупроводниковые преобразователи и т.п. Нужно учитывать, что искажение формы кривой тока отражается на форме кривой напряжения за счет внутреннего сопротивления источника. Обычно для анализа вносимых искажений используют аппарат гармонического анализа. При этом основным параметром является *коэффициент гармонических искажений*, определяемый как отношение среднего квадратичного значения гармоник, начиная со второй (обычно – до 9−50), к действующему значению первой гармоники. Обычно наибольший вклад в коэффициент

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

гармонических искажений вносят нечетные гармоники низких порядков (третья, пятая и седьмая). Это объясняется тем, что большинство встречающихся нелинейных элементов имеет симметричную относительно начала координат вольт-амперную характеристику.

Воздействие указанных факторов на аппаратуру проявляется как воздействие низкочастотных кондуктивных помех по цепям питания (сценарий 3 из раздела 2). Физическое повреждение аппаратуры (критерий D) обычно появляется лишь в случае значительных перенапряжений. Большинство современных устройств имеет блоки питания, обеспечивающие нормальное функционирование в широком диапазоне входных напряжений. Поэтому для них существенную угрозу представляют лишь длительные прерывания питания. Наиболее надежным защитным средством в этом случае является применение источника или системы бесперебойного электропитания (ИБП, UPS−Uninterruptable Power Supply).

Традиционно на энергопредприятиях существовало две системы питания: питание переменным током 380/220 В (сеть собственных нужд объекта) и питание оперативным током (постоянное напряжение 220 В от аккумуляторной батареи). Последняя как раз и используется для питания критических элементов, требующих бесперебойного электроснабжения. Благодаря большой протяженности цепей оперативного тока и большому количеству подключаемых к ним потребителей, уровень помех в этих цепях достаточно высок. Особенно большие помехи в цепях оперативного тока создаются при срабатывании подключенных к ним электромеханических устройств (например, приводов высоковольтных выключателей). Поэтому в последнее время появилась тенденция снабжать особенно важную аппаратуру собственным ИБП, работающим от сети собственных нужд.

Имеются российские и международные стандарты, позволяющие провести полномасштабные испытания аппаратуры на устойчивость к воздействию перечисленных выше помех: провалов, прерываний и выбросов напряжения питания, а также гармоник.

3.3 Помехи от грозовых разрядов

При ударе молнии вблизи от аппаратуры или ее проводных коммуникаций возникают сильные импульсные помехи в информационных и антенных цепях, а также цепях питания (сценарии 1–3 раздела 2). При этом могут реализовываться как индуктивный, так и кондуктивный механизм связи. В первом случае первостепенную роль играет то, что на расстоянии до нескольких километров от места разряда могут создаваться значительные электрические и магнитные поля. Эти поля создают наводки в линиях электропередачи и обмена информацией которые, в итоге, оказываются приложенными к входам электронной аппаратуры как помехи.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Кондуктивный механизм связи действует лишь при возникновении разряда между облаком и землей. В этом случае за счет протекания тока происходит подъем потенциала части грунта, а также различных металлоконструкций, включая элементы заземляющего устройства. После этого воздействие помехи на цепи аппаратуры происходит так же, как и в случае аварийных потенциалов на элементах заземляющего устройства (раздел 3.1).

В отдельных случаях опасность может представлять воздействие импульсных электрических и магнитных полей непосредственно на аппаратуру (сценарий 5 раздела 2). Опасность также может представлять протекание токов помех по металлическим частям аппаратуры и экранам (сценарий 4 раздела 2).

МЭК и другие организации произвели изучение молниевого разряда и приняли следующие параметры импульса, имитирующего грозовую помеху:

- ширина переднего фронта импульса – 1.2 мкс,
- общая ширина импульса – 50 мкс,
- амплитуда – до 6 кВ,
- внутреннее сопротивление источника очень мало (обычно 2 Ом).

Таким образом, энергия импульса очень велика (сотни Дж!).

Благодаря высокой энергии и значительному напряжению импульса, его воздействие на аппаратуру часто оказывается разрушительным (критерий D). Поскольку частоты не очень велики, помехи редко проникают вглубь аппаратуры. Обычно выводятся из строя интерфейсные элементы и блоки питания. Изредка, в случае пробоя защитных элементов или возникновения перекрытия на внутренние цепи, импульс проникает в основные узлы аппаратуры, что приводит к практически полному разрушению последней.

В настоящее время имеются российские и международные стандарты, позволяющие провести испытания аппаратуры на устойчивость к воздействию молниевых помех в цепях питания и обмена информацией, а также к импульсному магнитному полю. При чтении стандартов необходимо учитывать, что устоявшимися наименованиями молниевых помех являются: в русскоязычной литературе – микросекундные импульсные помехи (МИП), в англоязычной – Surge.

3.4 Помехи от коммутационных операций высоковольтного оборудования

Высокочастотные помехи и электромагнитные поля, возникающие при коммутационных операциях высоковольтного оборудования, имеют частотный спектр от единиц до десятков мегагерц. Примерный вид такой помехи показан на рис. 13.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

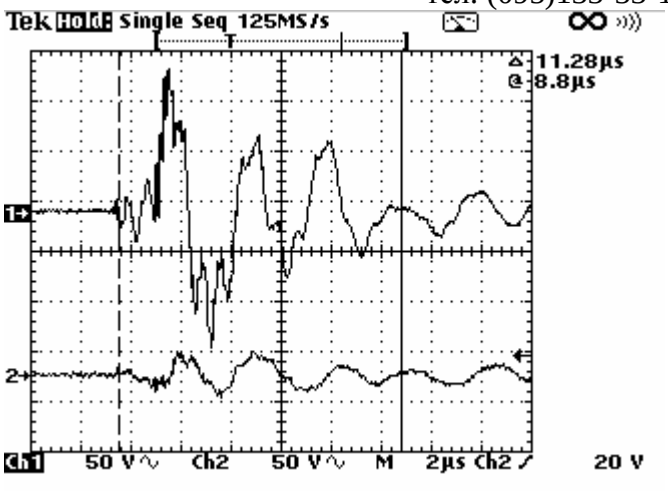


Рисунок 13. Коммутационная помеха в информационных цепях

Причинами возникновения импульсных помех на электрических станциях и подстанциях чаще всего являются коммутации основного оборудования выключателями и разъединителями. При работе коммутационного аппарата возникает электрический разряд в промежутке между контактами. При этом в коммутируемом участке системы шин развивается высокочастотный переходный процесс, сопровождаемый повторными пробоями воздушного промежутка. Появляющееся при этом импульсное электромагнитное поле наводит ЭДС в кабелях, проложенных рядом с местом коммутации, а также антенных цепях радиоаппаратуры. Коммутации выключателями менее опасны, чем разъединителями, поскольку выключатель имеет дугогасящую систему, которая не позволяет электрической дуге между контактами гореть слишком долго. При коммутациях разъединителями многократный пробой промежутка и горение дуги может продолжаться более 10 секунд. Многократность пробоя обеспечивается изменением полярности питающего напряжения. В этом случае возникает целая серия затухающих колебательных помех (типа показанных на рис. 13), следующих друг за другом через 5 – 15 мс.

Спектр частот помех существенно зависит от протяженности коммутируемых участков шин. Частота бывает тем выше, чем меньше протяженность (и, следовательно, эквивалентная емкость и индуктивность) коммутируемого участка. В то же время, при коммутации значительных участков шин время горения дуги и, соответственно, длительность пачки импульсов будет выше. Так, например, в случае коммутации короткого участка ошиновки длиной несколько метров спектр частот достигает нескольких десятков мегагерц. В случае же коммутации длинного участка (например, обходной системы шин) основная часть спектра помехи будет лежать в диапазоне сотен килогерц – единиц мегагерц.

Особняком стоят коммутационные помехи на элегазовых подстанциях. Поскольку применение элегаза в качестве изолятора уменьшает линейные

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

размеры основных силовых элементов в несколько раз, соответственно возрастают и частоты помех. Они могут достигать сотен МГц и более.

Коммутационные помехи представляют значительную опасность для любой электронной аппаратуры, размещаемой на энергопредприятиях и предприятиях с высоким энергопотреблением, имеющих собственные подстанции. Основной сценарий воздействия на аппаратуру – создание кондуктивных помех в цепях передачи информации, питания, а также антенных цепях (сценарии 1–3 раздела 2). Иногда опасность также может представлять протекание токов помех по металлическим частям аппаратуры и экранам (сценарий 4 раздела 2).

Вследствие значительного разброса частотных характеристик могут проявляться различные механизмы воздействия таких помех на аппаратуру – от физического повреждения интерфейсных элементов до искажения сигналов во внутренних цепях аппаратуры. Возможны нарушения функционирования аппаратуры любой степени тяжести – критерии B, C, D.

При наличии высокочастотных коммутационных помех (обычно при коммутации коротких участков ошиновки длиной до 5 м или на элегазовых энергообъектах) опасность представляет также непосредственное воздействие полей на аппаратуру (сценарий 5 раздела 2).

Нужно учитывать, что энергия коммутационных помех обычно меньше чем молниевых. Поэтому в реальности в большинстве случаев аппаратура, успешно выдерживающая воздействие молниевых импульсов (микросекундных импульсных помех) выдерживает и воздействие коммутационных помех с частотами не выше нескольких десятков МГц. Тем не менее, существуют стандарты, предусматривающие испытания аппаратуры на устойчивость к воздействию коммутационных помех.

3.5 Помехи при коммутациях малой реактивной нагрузки

Коммутационные помехи возникают не только при коммутационных операциях на высоковольтных электроустановках. В принципе все, что необходимо для появления коммутационных помех – это быстрое включение или выключение реактивной нагрузки.

Например, при включении емкостной нагрузки типа люминесцентной лампы, к цепи быстро подключается колебательный контур. Если подключение происходит вблизи пика напряжения сети питания, то возникает затухающий колебательный процесс с максимальным значением напряжения примерно равным удвоенной величине напряжения питания; частота обычно лежит в диапазоне 5 – 10 кГц.

Отключение индуктивной нагрузки также производит переходные помехи. Напомним, что напряжение на индуктивности определяется формулой:

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

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

Здесь V –напряжение на зажимах контура (В), L – индуктивность нагрузки (Гн), dI/dt – скорость изменения тока (А/с).

Когда скорость изменения тока велика, создается очень высокое напряжение. Теоретически, если ток уменьшается от конечного значения до нуля мгновенно, абсолютная величина напряжения оказывается бесконечно большой. В реальности же происходит дуговой пробой, ток которого уменьшает величину напряжения. Также играет роль паразитная емкость, позволяющая протекать току утечки.

Многократный пробой контакта приводит к появлению вместо одного пика множества переходных процессов с резкими скачками напряжения. Рассмотрим цепь на рисунке 14. Если пробоя не происходит (весь ток является током утечки через паразитную емкость), то пиковое значение напряжения Vc определяется формулой:

$$V_c = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Здесь Vc – напряжение, создаваемое на размыкающемся контакте, I_o – ток, протекавший в контуре (А), L – индуктивность нагрузки (Гн), C – паразитная емкость контура (Ф).

Если происходит пробой контакта, что определяется приложенным к контакту напряжением и величиной воздушного промежутка, то появляется резкий всплеск (burst) тока (см. рис. 15).

Отметим, что этот эффект (появление высокого напряжения при коммутации индуктивной нагрузки, вызывающего пробой воздушного промежутка) используется в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания. Поэтому работа таких двигателей также сопровождается генерацией помех.

Часто заметные импульсные помехи возникают при работе электромеханических устройств типа реле. Это особенно опасно там, где современную цифровую аппаратуру устанавливают рядом с устаревшими электромеханическими системами защиты и автоматики.

Еще одним важным источником коммутационных помех является работа щеточных электродвигателей. Поскольку с помощью щеток происходит многократное включение-выключение обмоток такого двигателя, имеет место типичный случай коммутации индуктивной нагрузки.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

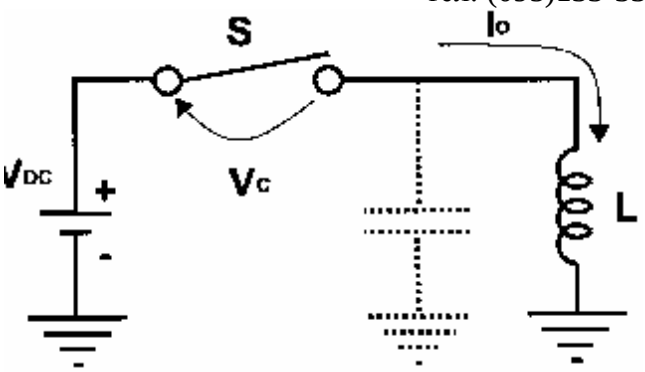


Рисунок 14. Генерация переходных помех на индуктивной нагрузке.

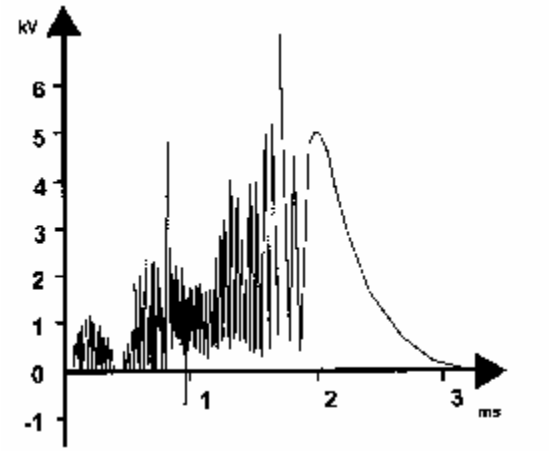


Рисунок 15. Многократный пробой контакта при отключении.

Обычно коммутационные помехи в цепях низкого напряжения представляют собой пачки импульсов, причем длительность фронта импульсов – несколько наносекунд. Хотя амплитуда импульсов (по напряжению) может достигать нескольких киловольт, их энергия, как правило, невелика. Чтобы отличать такие помехи от более низкочастотных, но и более мощных помех при коммутациях высоковольтного электрооборудования, их принято называть *наносекундными импульсными помехами* (НИП, Bursts). Обычно НИП возникают в цепях питания, однако, благодаря своему высокочастотному спектру, они могут порождать электромагнитные поля, создающие, в свою очередь, наводки в других цепях.

Основной сценарий воздействия на аппаратуру – через цепи питания (сценарий 3 раздела 2), хотя все остальные сценарии также возможны. Благодаря сравнительно низкой энергии, НИП редко вызывают физические повреждения аппаратуры. Однако благодаря паразитным емкостным и индуктивным связям, такие помехи могут легко проникать во внутренние цепи аппаратуры. Типичным последствием влияния НИП являются сбои в работе цифровой техники вследствие искажения сигналов во внутренних шинах обмена данными. Обычно это проявляется как «зависание» устройства с последующей автоматической или ручной перезагрузкой (критерии B или C).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Иногда все же встречаются случаи физического повреждения отдельных высокочувствительных элементов (обычно – цифровых и аналоговых микросхем) под действием НИП.

Существующие в настоящее время методы испытаний позволяют эффективно моделировать воздействие НИП на цепи питания и передачи информации. Что касается воздействия на аппаратуру электромагнитных полей, создаваемых НИП, то их влияние частично моделируется при проведении испытаний аппаратуры на устойчивость к воздействию радиочастотных электромагнитных полей.

3.6 Радиочастотные электромагнитные поля

В зависимости от диапазона частот, электромагнитные поля принято делить на *низкочастотные* и *радиочастотные*. Граница между ними по-разному определяется различными стандартами, но обычно в качестве граничной рассматривается частота 150 кГц. Рассмотрим сначала радиочастотные поля.

Выше уже рассматривались вопросы, связанные с воздействием на аппаратуру полей, создаваемых при коммутационных операциях и молниевых разрядах. В этом разделе речь пойдет, в первую очередь, о влиянии радиочастотного излучения функциональных источников. К таким источникам относятся, в первую очередь, радио- и телевизионные передатчики различного назначения и радары. Кроме того, к ним можно отнести микроволновые печи бытового и промышленного назначения, различные экспериментальные и испытательные установки и т.п. В некоторых случаях помехи, аналогичные помехам со стороны функциональных источников, могут создаваться и линиями проводной связи, работающими на высокой частоте.

Иногда существенный вклад в общий уровень помех в радиочастотном диапазоне вносят атмосферные и космические радиошумы, шумы от короны, а также радиочастотные шумы, создаваемые при работе блоков питания аппаратуры

Использование радиочастотного спектра зарегистрированными передатчиками становится все более интенсивным (радиовещание, морские и авиационные радиосредства, радары и мобильные передатчики). Частота используемых передатчиков меняется от 10 кГц в длинноволновом диапазоне до гигагерц у радаров, мобильных телефонов и т.п. Напряженность создаваемого электрического и магнитного полей зависит от мощности передатчика и расстояния до него. Так, слабый близкорасположенный источник (например, сотовый телефон) может создавать большее поле, чем удаленный мощный передатчик (например, аэродромный радар).

Приведенная ниже таблица содержит типовые значения напряженности электрического поля для основных источников (информация взята из IEC 1000-2-3: 1992-09).

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Таблица 3-1. Типовое распределение радиочастотного спектра

Источник	Диапазон частот, МГц	Мощность передатчика	Типовое удаление от источника	Расчетное значение напряженности поля, В/м
НЧ станции радиовещания и морской связи	0.014-0.5	2500 кВт	2 - 20 км	5.5 - 0.55
Широковещательные АМ-станции	0.2 -1.6	50 - 800 кВт	0.5 - 2 км	12.5 - 0.78
Радиолюбители (ВЧ)	1.8-30	1 кВт	10-100 м	22.1 - 2.21
ВЧ-связь, включая SW – вещание	1.6-30	0,1 кВт	1 - 20 км	0.7 - 0.04
Устройства личной и служебной радиосвязи	27-58	12 Вт	10-100 м	2.4 - 0.24
Радиолюбители, VHF/UHF	50-52 144-146 432 - 438 1290 -1300	1 –8 кВт 1 –8 кВт 1 –8 кВт 1 –8 кВт	10-500м	63 - 0.44
Стационарная и мобильная связь,	29-40 68-87 146-174 422 - 432 438 - 470 860 - 990	50-130 Вт 50-130 Вт 50-130 Вт 50-130 Вт 50-130 Вт 50-130 Вт	2 - 200 м	40 - 0.25
Мобильные телефоны (включая радиотелефоны)	1880-1990	5 Вт 1 Вт	1 – 100 м 0.5 – 10 м	15.6 – 1.56 14 – 0.7
Телевидение (VHF)	48-68 174 - 230	100-320 кВт	0.5 – 2 км	8 –1.11 **
Вещание на FM	88 -108	100 кВт	0.25 -1 км	8.9 - 2.2 **
Телевидение (UHF)	470 - 853	500 кВт	0.5 - 3 км	10-1.6**
Радары	1000 - 30000	1 кВт – 10 ГВт	2 - 20 км	350 - 1.6 (пики)

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

*- Рассчитано по формуле

$$\frac{7\sqrt{ERP}}{r}$$

в предположении, что антенна ведет себя как полуволновой диполь в свободном пространстве; рассматривается дальнее поле.

**- Указанная напряженность – только внутри луча, создаваемого антенной

На предприятиях чаще всего встречаются передатчики локальной и мобильной радиосвязи (например, для связи с бригадами наладчиков). В последнее время наметилась тенденция к росту использования радиосредств для обеспечения работы служб единого времени, связи и других элементов систем автоматизированного управления предприятием. Иногда свой вклад в создание радиочастотных помех вносит работа каналов высокочастотной связи по высоковольтным линиям (ВЛ), тяговой сети и трубопроводам . Обычно сигналы ВЧ-связи лежат в диапазоне от десятков килогерц до 1 МГц.

Нужно помнить, что использование любой части радиочастотного спектра регулируется соответствующими государственными органами. Поэтому обычно размещению на энергообъекте любой радиопередающей аппаратуры предшествует процедура получения соответствующего разрешения. Выполнение этой процедуры помогает решить проблему взаимовлияния между различными радиоустройствами, но, к сожалению, не решает ее полностью. Действительно, даже полное разделение рабочих диапазонов частот различных устройств связи не гарантирует отсутствие их влияния друг на друга, например, на промежуточной частоте.

Отдельно нужно сказать о таком явлении, как коронный разряд. Он происходит на ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения и визуально проявляется в ночное время как слабое свечение вокруг проводов. В реальности происходит множество мелких разрядов у поверхности провода с длительностью менее микросекунды каждый. Спектр радиочастотных помех очень широк − от сотен кГц до десятков МГц. Существуют нормы (например, ГОСТ 22012-76), обеспечивающие снижение уровня радиопомех от короны при строительстве ВЛ.

Важными для понимания основ теории радиочастотных полей являются понятия ближнего и дальнего поля. Свойства электромагнитного поля существенно различаются для каждой из этих зон. Обычно считается, что источник излучения создает ближнее поле, если расстояние до него не превышает $\lambda/2\pi$ (т.е., примерно одну шестую длины волны). Дальним считается поле на расстоянии более $(2-3)\lambda$ от источника. Особенностью ближнего поля является то, что в нем *волновой импеданс* – отношение напряженностей электрического и магнитного полей – определяется природой источника

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

излучения. В дальнем поле волновой импеданс равен волновому импедансу среды (для воздуха и вакуума – 377 Ом). Поэтому для определения параметров дальнего поля достаточно только одной величины. Так, например, для определения магнитного поля (в А/м) на основе данных приведенной таблицы, необходимо разделить значения напряженности электрического поля (в В/м) на 377. В промежуточной области между дальним и ближним полем происходит постепенный переход от одного типа поля к другому.

Если источником излучения является штыревая антенна или прямой провод, ближнее поле будет в основном электрическим (волновой импеданс Е/Н велик по сравнению с 377 Ом). В этом случае электрическая компонента поля убывает с расстоянием пропорционально $1/r^3$, в то время как магнитная – пропорционально $1/r^2$.

Для рамочной антенны (типа петли с током), ближнее поле является в основном магнитным. В этом случае уже магнитная компонента поля убывает с расстоянием пропорционально $1/r^3$, в то время как электрическая – пропорционально $1/r^2$.

В дальнем поле тип излучателя уже не играет роли; как магнитная, так и электрическая компонента убывает с расстоянием пропорционально 1/r.

Как уже отмечалось выше, сценарий воздействия радиочастотного поля на аппаратуру зависит от частоты. На сравнительно низких частотах (ориентировочно – до 20 − 30 МГц) превалирует влияние посредством наводки кондуктивных помех во внешних цепях. Заметную роль могут также играть радиочастотные токи, возбуждаемые в контурах, образованных элементами заземляющего устройства и экранами кабелей. На более высоких частотах опасность представляет также непосредственное воздействие полей на внутренние цепи аппаратуры.

В отличие от импульсных помех, обычно имеющих широкополосный характер, радиочастотные помехи, как правило, узкополосные. Исключениями являются, пожалуй, лишь атмосферные и космические радиошумы, шумы от короны, а также шумы, создаваемые при работе блоков питания аппаратуры. Поэтому влияние радиочастотных помех на аппаратуру обычно происходит при совпадении частоты помехи и одного из «окон уязвимости» аппаратуры. Наличие последних обычно связаны с рабочими частотами аппаратуры или резонансными частотами тех или иных ее элементов.

Воздействие радиочастотных помех в первую очередь представляет опасность для другой радиоаппаратуры (особенно высокочувствительных приемников). Однако, благодаря усилиям соответствующих международных и государственных органов, случаи совпадения рабочих частот у различных радиосредств редки. Гораздо чаще приходится иметь дело с ситуациями, когда внешнее излучение имеет спектр частот, пересекающийся с одним из «окон уязвимости», например – промежуточной частотой аппаратуры. Такая ситуация

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

часто имеет место, например, когда одна и та же антенная мачта используется различными радиопередающими устройствами.

Сравнительно уязвимой к воздействию радиочастотных помех является любая аппаратура проводной связи на высокой частоте. Это касается, в частности, скоростных цифровых линий связи и магистралей локальных вычислительных сетей. Традиционная аппаратура высокочастотной связи по ВЛ обычно использует слишком низкие частоты и высокие мощности, чтобы оказаться подверженной влиянию источников радиочастотных полей. Однако с ростом частот передачи проблема ЭМС становится одной из основных для систем связи.

Сбои цифровой аппаратуры под действием радиочастотных полей часто связаны с неудовлетворительными экранирующими свойствами ее корпуса или неправильной схемой заземления аппаратуры и экранов.

Случаи физического повреждения аппаратуры под действием радиочастотных помех сравнительно редки. Обычно такого рода повреждения наблюдаются у высокочувствительных приемников, по той или иной причине оказавшихся рядом с мощным источником радиочастотного излучения.

3.7 Низкочастотные электрические и магнитные поля силовых электроустановок

Работа любых силовых электроустановок сопровождается образованием электрических и магнитных полей, частоты которых определяются промышленной частотой 50 Гц и ее гармониками. Нужно учитывать что, поскольку длина волны на этих частотах велика, аппаратура и ее кабели всегда оказываются в ближней зоне, где электрическое и магнитное поля непосредственно не связаны друг с другом.

Обычно опасность представляют наводки промышленной частоты в информационных кабелях. Хотя коэффициент взаимной индукции обычно мал вследствие малости частоты, высокая напряженность электрического и магнитного полей на энергообъектах обеспечивает значительный уровень наводок.

Влияние низкочастотных наводок в кабелях на подключенную к ним аппаратуру аналогично влиянию аварийных потенциалов на элементах заземляющего устройства (см. раздел 3.1). Нередко происходит совместное влияние этих двух факторов, что значительно увеличивает уровень помех на входе аппаратуры.

Непосредственное воздействие низкочастотных электрических и магнитных полей на аппаратуру сравнительно редко приводит к ее отказу или сбою вследствие малости коэффициентов индуктивной связи и, следовательно, малости величин ЭДС, наводимых во внутренних цепях аппаратуры.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Исключением являются, пожалуй, лишь средства отображения информации на основе электронно-лучевой трубки, в первую очередь − мониторы компьютеров. Воздействие значительных магнитных полей часто полностью искажает изображение на мониторе, причем искажения сохраняются еще некоторое время после исчезновения породившего их воздействия (за счет остаточной намагниченности элементов конструкции). В некоторых случаях (например, когда монитор используется для оперативного управления предприятием) такие искажения недопустимы. Нужно также учитывать, что значительные уровни электромагнитных полей вредны для здоровья.

Уровни электрических и магнитных полей промышленной частоты существенно зависят от режима работы силового электрооборудования. Особенно высокий уровень магнитных полей наблюдается при коротких замыканиях по схеме «фаза−земля». Это объясняется как большой величиной протекающих токов, так и значительной степенью несимметрии схемы. Действительно, при протекании даже значительных токов по симметричной схеме (при нормальной работе электрооборудования или при коротком замыкании «фаза-фаза» или «фаза-ноль») поля, создаваемые токами в соседних проводах, векторно складываются. Поскольку эти токи текут в противоположных направлениях, векторная сумма полей от них оказывается, соответственно, мала. При этом она будет тем меньше, чем меньше расстояние между проводами.

В случае, когда возврат тока происходит по земле, ситуация принципиально иная. Влияние тока земляного возврата на поле над поверхностью земли мало, и потому поле от провода остается, фактически, нескомпенсированным.

Поля от токов короткого замыкания обычно бывают кратковременными. Длительность действия такого поля определяется (как и для аварийного потенциала) временем срабатывания устройства защиты. Обычно это − доли секунды.

Существующие стандарты предусматривают возможность испытания аппаратуры на устойчивость к магнитным полям промышленной частоты. При этом предусматривается как испытание на устойчивость к постоянно действующему, так и кратковременному полю. Стандартизованных методов испытания на устойчивость к действию электрических полей промышленной частоты нет. Это связано, вероятно, с тем, что электрическое поле промышленной частоты легко экранируется любым заземленным металлическим корпусом аппаратуры.

В противоположность ему, магнитное поле промышленной частоты экранируется очень плохо. Это объясняется тем, что коэффициент экранирования магнитного поля падает с уменьшением частоты. Для обеспечения эффективного экранирования магнитного поля промышленной частоты требуется использовать толстые металлические экраны, часто − многослойные. Поэтому в реальности наилучшим способом защиты аппаратуры и персонала от такого поля часто служит просто вывод аппаратуры и рабочих

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

мест ее пользователей из области с чрезмерно высоким уровнем напряженности магнитного поля.

3.8 Электростатический разряд

Электростатический разряд (ЭСР) – довольно распространенное явление, и большинство людей имеет представление о его разрушительном воздействии на полупроводниковые схемы. По сути, ЭСР – просто перераспределение заряда между телами, имеющими различный электростатический потенциал. Накопление заряда происходит при обычной электризации трением; конкретные величины зарядов зависят от размеров, формы и электрических свойств взаимодействующих тел. Условия окружающей среды (особенно влажность) также заметно влияют на величину и время рассеивания заряда.

Рисунок 16 (IEC 1000-2-3) иллюстрирует влияние используемых материалов, а также относительной влажности воздуха на величину заряда, который может быть накоплен.

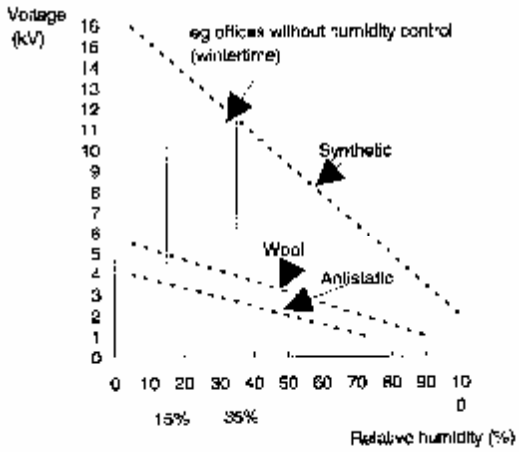


Рисунок 16. Зависимость напряжения ЭСР от относительной влажности (по оси x) для разных материалов (сверху вниз: синтетика, шерсть, антистатическое покрытие).

Форма кривой тока разряда зависит от электрических характеристик объекта, несущего заряд. Хотя каждый объект носит индивидуальный характер, Международной электротехнической комиссией (IEC) приняты стандартизованные параметры источника ЭСР: емкость – 150 пФ и внутреннее сопротивление 330 Ом.

Основным механизмом воздействия является протекание тока по металлическим частям аппаратуры (сценарий 4 раздел 2). Поскольку спектр импульса содержит очень высокие частоты (длительность фронта − около 1 нс, следовательно, частоты − порядка гигагерц), влияние через паразитные связи на

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

внутренние узлы аппаратуры очень велико. Чаще всего наблюдаются сбои в работе высокоскоростных цифровых узлов, а также цифровых интерфейсных элементов. При подаче на разъемы, клавиатуры, элементы индикации и т.п. возможно физическое повреждение интерфейсных элементов.

Особенно опасно воздействие ЭСР на незащищенные узлы аппаратуры. Поэтому при любых ремонтных и наладочных работах нужно соблюдать требования электростатической безопасности. При профессиональной сборке аппаратуры используют антистатические браслеты (обеспечивающие стекание заряда на землю), антистатические покрытия и т.п. В условиях эксплуатации эти требования удается выполнить не всегда. Однако минимальные меры предосторожности соблюдать все же стоит: например, перед прикосновением к узлам аппаратуры следует дотронуться до заземленных металлоконструкций, что позволит снять избыточный заряд.

3.9 Другие источники помех

Разумеется, свой вклад в электромагнитную обстановку вносят не только рассмотренные выше источники помех. В реальности, к ним добавляются помехи от электротранспорта, лифтов и т.п. Особое внимание к рассмотренным выше видам помех − аварийным потенциалам, коммутационным помехам, низкочастотным возмущениям напряжения питания, МИП, НИП, ЭСР, радиочастотным и низкочастотным электромагнитным полям − уделяется в силу двух следующих факторов.

Во-первых, эти виды помех являются наиболее распространенными. Обычно именно они вносят решающий вклад в ЭМО на том или ином объекте. Аварийные потенциалы, коммутационные помехи и помехи от молниевых разрядов обычно вносят определяющий вклад в ЭМО на энергопредприятиях и промышленных предприятиях с высокой энерговооруженностью. Разумеется, бывают и исключения: например, на подстанции, расположенной вблизи мощного радиопередающего центра, значительный вклад в электромагнитную обстановку будут вносить радиочастотные поля, хотя обычно на энергопредприятиях их влияние не столь заметно как, например, коммутационных помех.

Второй причиной особого внимания к перечисленным помехам является то, что они, в совокупности, охватывают практически весь спектр частот и путей возможных электромагнитных влияний на аппаратуру. Остальные помехи в большинстве случаев, похожи на один из этих видов помех или же на их комбинацию.

Например, помехи от электрического транспорта на переменном токе обычно представляют собой электрические и магнитные поля промышленной частоты с наложенными на них пачками импульсов, напоминающих коммутационные помехи или НИП. Эти поля создают наводки с аналогичными частотными характеристиками в цепях питания, заземления и обмена информацией.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com

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

Источником полей промышленной частоты здесь служит переменный ток, потребляемый транспортом. Импульсные помехи возникают в моменты искрения контактов, резкого включения или выключения двигателя и т.п. Несколько особняком стоят помехи от электротранспорта на постоянном токе (например, метро). Здесь обычно наблюдается комбинация квазипостоянных электрических и магнитных полей с импульсными помехами, аналогичными помехам от транспорта на переменном токе. Однако, по имеющимся данным, квазипостоянное магнитное поле не представляет значительной опасности для аппаратуры или персонала. Исключением являются, пожалуй, лишь случаи воздействия квазипостоянных магнитных полей на мониторы компьютеров, когда даже сравнительно небольшое изменение поля вызывает значительные искажения изображения.

При рассмотрении помех от электротранспорта следует учитывать тот факт, что помехи создает не только сам транспорт, но и питающие его воздушные и подземные линии электропередачи и соответствующие трансформаторные подстанции.

Приведенные примеры показывают, что часто помехи от различных источников бывают схожими. Это сходство объясняется либо общностью механизмов генерации, либо просто сходством частотных спектров. Таким образом, можно выделить некий «базовый» набор помех таким образом, что аппаратура, обладающая достаточной устойчивостью к помехам из этого «базового» набора, будет обладать хорошей помехоустойчивостью и в реальной ЭМО. Именно на этом построена идея проведения испытаний аппаратуры на ЭМС.

PDF создан испытательной версией pdfFactory Pro www.pdffactory.com