

Заземление в системах промышленной автоматизации

Эта статья опубликована нами в журнале "Современные технологии автоматизации", №2, 2006, с. 94-99 и №3, 2006 г, с. 76-92. Размещение статьи на других сайтах и перепечатка возможны только с разрешения журнала "СТА".

Оглавление

1. ВВЕДЕНИЕ	1
1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	2
1.2. ЦЕЛИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ.....	3
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ.....	4
2.1. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЗДАНИЙ	4
2.2. АВТОНОМНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ.....	5
2.3. ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ ПРОВОДНИКИ	5
2.4. МОДЕЛЬ «ЗЕМЛИ»	6
2.5. ВИДЫ ЗАЗЕМЛЕНИЙ.....	8
2.5.1. Силовое заземление.....	8
2.5.2. Аналоговая и цифровая земля.....	8
2.5.3. «Плавающая» земля.....	8
2.6. МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ.....	9
3. ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ РАЗВЯЗКА.....	11
4. ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ НА ШИНЕ ЗЕМЛИ	12
4.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕХ.....	12
4.2. ПОМЕХИ ИЗ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	14
4.3. МОЛНИЯ И АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО	16
4.4. СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО	17
4.5. КОНДУКТИВНЫЕ НАВОДКИ.....	18
4.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НАВОДКИ.....	19
5. МЕТОДЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ.....	20
5.1. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ЦЕПЕЙ	20
5.2. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННЫХ ЦЕПЕЙ.....	22
5.3. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ СИГНАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ	22
5.4. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЯХ	24
5.5. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭКРАНОВ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ МОЛНИИ	25
5.6. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ПРИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ	25
5.7. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ	25
5.8. ЗАЗЕМЛЕНИЕ МОНТАЖНЫХ ШКАФОВ АВТОМАТИКИ.....	26
5.9. ЗАЗЕМЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ.....	28
5.10. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ	28
5.11. ЗАЗЕМЛЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРИВодОВ АСУ ТП	29
5.12. ЗАЗЕМЛЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ	29
5.13. ЗАЗЕМЛЕНИЕ НА ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ	29
6. ВЕРИФИКАЦИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ.....	30
7. ВЫВОДЫ: ПРАВИЛА ЗАЗЕМЛЕНИЯ	31
7.1. РАДИКАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ	31
7.2. ДРУГИЕ СОВЕТЫ.....	31
8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	32

1. Введение

Неправильное заземление в 40% случаев является причиной дорогостоящих простоев и порчи чувствительного оборудования, используемого в нефтяной, автомобильной и горной промышленности [1]. Следствием неправильного заземления могут быть изредка появляющиеся сбои в работе систем автоматики, повышенная погрешность измерений, выход из строя чувствительных элементов, замедление работы системы вследствие появления потока ошибок в каналах обмена, нестабильность регулируемых параметров, ошибки в собираемых данных. Вопросы заземления тесно связаны с проблемами экранирования и методами борьбы с помехами в электронных системах [2, 3].

Заземление является самой плохо понимаемой темой в автоматизации. Сложность проблемы связана с тем, что источники помех, приемники и пути их прохождения распределены в пространстве, момент и факт их появления часто является случайной и ненаблюдаемой величиной, а местонахождение априори неизвестно. Сложно также провести измерения помех, практически невозможно сделать достаточно точный теоретический анализ, поскольку задача обычно является трехмерной и описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Поэтому обоснование того или иного метода заземления, которое, строго говоря, должно опираться на математические расчеты, на практике приходится делать на основании опыта и интуиции. Решение проблем заземления в настоящее время находится на грани между пониманием, интуицией и везением.

Изучение влияния помех, связанных с неправильным заземлением, сводится к составлению правдоподобных упрощенных моделей системы, включающей источники, приемники и пути прохождения помехи с последующим анализом их влияния на характеристики системы и синтезом методов борьбы с ними.

Мы не будем рассматривать вопросы заземления энергетических электроустановок. Это отдельная тема, которая достаточно подробно рассмотрена в литературе по электроэнергетике [4, 5]. В настоящей статье речь идет только о заземлении, используемом в системах промышленной автоматизации для обеспечения их стабильного функционирования, а также о заземлении с целью защиты персонала от поражения электрическим током, поскольку эти два вопроса невозможно рассматривать изолированно один от другого, не нарушая стандартов системы безопасности труда.

1.1. Определения

Под *заземлением* понимают как соединение с грунтом Земли, так и соединение с некоторым «общим проводом» электрической системы, относительно которого измеряют электрический потенциал. Например, в космическом корабле или самолете «землей» считают металлический корпус. В приемнике с батарейным питанием – систему внутренних проводников, которые являются общим проводом для всей электронной схемы. В дальнейшем мы будем использовать именно такое понятие «земли», не беря в дальнейшем это слово в кавычки, поскольку оно давно стало физическим термином. Потенциал земли в электрической системе не всегда равен нулю относительно грунта Земли. Например, в летящем самолете за счет генерации электростатического заряда потенциал земли (корпуса) самолета может составлять сотни и тысячи вольт относительно поверхности Земли.

Уменьшенным вариантом земли космического корабля является «*плавающая земля*» - не соединенная с грунтом Земли система проводников, относительно которой отсчитывается потенциал в электрической подсистеме. Например, в модуле аналогового ввода с гальванической развязкой внутренняя аналоговая земля модуля может не соединяться с грунтом Земли или соединяться с ним через большое сопротивление (например, 20 МОм).

Под *защитным* заземлением понимают электрическое соединение проводящих частей оборудования с грунтом Земли через заземляющее устройство с целью защиты персонала от поражения электрическим током.

Заземляющим устройством называют совокупность заземлителя (т.е. проводника, соприкасающегося с землей) и заземляющих проводников [5].

Общим проводом (проводником) называют проводник в системе автоматики, относительно кото-

рого отсчитываются потенциалы в системе. Обычно он является общим для источника питания и подключенных к нему электронных устройств. Примером может быть провод, общий для всех 8 входов 8-канального модуля аналогового ввода с одиночными (не дифференциальными) входами. Общий провод во многих случаях является синонимом земли, но он может быть вообще не соединен с грунтом Земли.

Сигнальным заземлением называют соединение с землей общего провода цепей передачи *сигнала*.

Сигнальная земля делится на *цифровую* землю и *аналоговую*. Сигнальную аналоговую землю иногда делят на *землю аналоговых входов* и *землю аналоговых выходов*.

Силовой землей будем называть общий провод в системе, соединенный с защитной землей, по которому протекает большой ток (большой по сравнению с током для передачи сигнала).

В основе такого деления земель лежит различный уровень чувствительности к помехам аналоговых и цифровых цепей, а также сигнальных и мощных (силовых) цепей, и, как правило, гальваническая развязка между указанными землями в системах промышленной автоматики.

Глухозаземленной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, присоединенная к заземлителю непосредственно или через малое сопротивление (например, через трансформатор тока).

Нулевым проводом называется провод сети, соединенный с глухозаземленной нейтралью.

Изолированной нейтралью называется нейтраль трансформатора или генератора, *не присоединенная* к заземляющему устройству.

Занулением называют соединение оборудования с глухозаземленной нейтралью трансформатора или генератора в сетях трехфазного тока или с глухозаземленным выводом источника однофазного тока [5].

Ниже мы будем также использовать термин "*кондуктивный*" – от слова conductor (проводник) – связанный с проводимостью материала, например, кондуктивная помеха наводится через проводник, соединяющий две цепи.

1.2. Цели заземления

Защитное заземление служит исключительно для защиты людей от поражения электрическим током.

Необходимость выполнения защитного заземления часто приводит к увеличению уровня помех в системах автоматики, однако это требование является необходимым, поэтому исполнение сигнальной и силовой земли должно базироваться на предположении, что защитное заземление имеется и оно выполнено в соответствии с ПУЭ. Защитное заземление можно не применять только для оборудования с напряжением питания до 42 В переменного или 110 В постоянного тока, за исключением взрывоопасных зон. Подробнее см. п. 5.13 и ПУЭ, гл.1.7.

Правила заземления для уменьшения помехи от сети 50 Гц в системах автоматики зависят от того, используется ли сеть с глухозаземленной или с изолированной нейтралью. Заземление нейтрали трансформатора на подстанции выполняется с целью ограничения напряжения, которое может появиться на проводах сети 220/380 В относительно Земли при прямом ударе молнии или в результате случайного соприкосновения с линиями более высокого напряжения, или в результате пробоя изоляции токоведущих частей распределительной сети.

Электрические сети с изолированной нейтралью используются для избежания перерывов питания потребителя при единственном повреждении изоляции, поскольку при пробое изоляции на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью срабатывает защита и питание сети прекращается. Кроме того, в цепях с изолированной нейтралью при пробое изоляции на землю отсутствует искра, которая неизбежна в сетях с глухозаземленной нейтралью. Это свойство очень важно при питании оборудования во взрывоопасной зоне. В США в нефтегазовой и химической промышленности используется также заземление нейтрали через сопротивление, ограничивающее ток на землю в случае короткого замыкания [6].

Сигнальная земля служит для упрощения электрической схемы и удешевления систем и устройств

автоматики. При использовании сигнальной земли в качестве общего провода для разных цепей появляется возможность применения одного общего источника питания для всей электрической цепи вместо нескольких «плавающих» источников питания. Электрические цепи без общего провода (без земли) всегда можно преобразовать в цепи с общим проводом и наоборот по правилам, изложенным в работе [7].

В зависимости от целей применения сигнальные земли можно разделить на *базовые* и *экранные*. Базовая земля используется для отсчета и передачи сигнала в электронной цепи, а экранная земля используется для заземления экранов.

Базовая сигнальная земля используется также для «привязки» потенциала изолированной части электрической цепи к земле системы автоматики. Например, если входные каскады модуля ввода сигналов термодатчиков имеют гальваническую развязку от земли системы, то потенциал входов может быть каким угодно вследствие заряда паразитной емкости между землей и входными каскадами. Во время грозы этот потенциал может составить тысячи вольт (см. п. 4.3), что приведет к пробоем гальванической изоляции модуля. Для предотвращения этого явления аналоговая земля входных каскадов (обозначается как AGND в модулях *RealLab!* и ADAM) должна быть соединена с землей системы, как это будет описано ниже.

Экранная земля используется для заземления экранов кабелей, экранирующих перегородок, корпусов приборов и снятия статических зарядов с трущихся частей транспортерных лент, ремней электроприводов и т.п.

2. Общие вопросы заземления

Большинство проблем заземления возникают вследствие необходимости защиты человека от поражения электрическим током. В этом смысле было бы лучше, если бы Земля и человек состояли из диэлектрика. С Землей соединена нейтраль трансформатора электрической подстанции, она является частью генератора электростатического заряда во время грозы, обкладкой паразитных емкостей и проводником, в котором за счет явления электромагнитной индукции наводятся токи. Земля как проводник участвует практически в любой электрической системе и ее наличие нельзя игнорировать.

2.1. Защитное заземление зданий

В качестве защитных заземляющих проводников используют естественные и искусственные заземлители [5]. К естественным заземлителям относятся, например, стальные и железобетонные каркасы производственных зданий; металлические конструкции производственного назначения; стальные трубы электропроводок; алюминиевые оболочки кабелей; металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений, за исключением трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ, канализации и центрального отопления. Если их проводимость удовлетворяет требованиям к заземлению, то дополнительные проводники для заземления не используются. Возможность использования железобетонного фундамента здания объясняется тем, что удельное сопротивление влажного бетона примерно равно удельному сопротивлению земли (150...300 Ом*м) [4].

Искусственные (специально изготовленные) заземлители используют, когда сопротивление заземления превышает установленные ПУЭ нормы. Конструктивно они представляют собой трубы, уголки, пруты, помещенные в землю вертикально на глубину 3 м или горизонтально на глубину не менее 50...70 см. Для улучшения равномерности распределения потенциала земли (для уменьшения "напряжения шага") используют несколько заземлителей, соединяя их стальной полосой. На электрических подстанциях используют сетку заземлителей. При соединении заземлителей между собой не рекомендуется образовывать замкнутый контур большой площади [8], поскольку он является "антенной", в которой может циркулировать большой ток во время разрядов молнии. Лучшие результаты получаются при соединении заземлителей в форме сетки, когда площадь каждого контура сетки много меньше общей площади, охватываемой заземлителями. Различные конструк-

ции заземляющих устройств приведены в книге [4].

Несмотря на рекомендации многих авторов избегать контуров при выполнении разводки шин заземления по зданию [1], на практике, например, при использовании естественных заземлителей, избежать этого часто не удастся. Железобетонные конструкции промышленных зданий содержат металлические арматурные прутья, которые соединяются между собой сваркой. Таким образом, система заземления здания представляет собой металлическую клетку, нижняя часть которой электрически соединена с грунтом. Монтажная организация обеспечивает надежный контакт между собой всех металлических конструкций здания и оформляет акты на скрытые работы. Заземляющий контакт для подключения оборудования при этом представляет собой болт заземления, приваренный к металлической закладной конструкции элемента колонны или фундамента здания [4].

При монтаже систем заземления нужно избегать зазоров в контурах, на которых может наводиться э.д.с. магнитным полем молнии, чтобы избежать появления искры и возможного возгорания горючих веществ в здании.

В зданиях для размещения оборудования систем связи систему проводников заземления выполняют в виде сетки [9]. Сетка выполняет одновременно функции заземления и электромагнитного экрана здания. На электростанциях в помещении с промышленной автоматикой стены и потолок экранируют стальными плитами [10], окна и отверстия для кондиционирования закрывают медной сеткой, пол выполняют из электропроводного пластика.

Необходимо обратить внимание на качество контактов в цепи заземления. В статье [11] приводится пример, когда плохо затянутый болт в цепи заземления приводил к сбоям системы автоматики, причину которого искали несколько лет. При конструировании заземления нельзя использовать контакты разнородных металлов, чтобы не образовывались гальванические пары, являющиеся местами быстрой коррозии. Медь со сталью можно соединять только через буферные металлы: нержавеющей сталь или бронзу. Не рекомендуется использовать оцинкованный крепеж.

При монтаже системы автоматики в уже построенном здании система заземляющих проводников как правило, уже смонтирована и шина защитного заземления разведена по зданию.

2.2. Автономное заземление

К системе защитного заземления промышленного объекта могут быть подключены силовые установки, которые поставляют большой ток помехи в провод заземления. Поэтому для точных измерений может потребоваться отдельная земля, выполненная по технологии искусственного заземления в грунт. Такое заземление соединено с общим заземлением здания только в одной точке для целей выравнивания потенциала между разными землями, что важно при ударе молнии [1, 12].

Второй вариант автономной, "чистой" земли можно получить с помощью изолированного провода, который нигде не соединяется с металлическими конструкциями здания, но соединяется с основной клеммой заземления у ввода нейтрали питающего фидера в здание. Шину такого заземления делают из медной шины с поперечным сечением не менее 13 кв. мм.

2.3. Заземляющие проводники

Проводники, соединяющие оборудование с заземлителем, должны быть по возможности короткими, чтобы снизить их активное и индуктивное сопротивление. Для эффективного заземления на частотах более 1 МГц проводник должен быть короче $1/20$ [13], а лучше $1/50$ [14] длины волны самой высокочастотной гармоники в спектре помехи (см. также п.2.4). При частоте помехи 10 МГц (длина волны 30 м) и длине проводника 7,5 м ($1/4$ от длины волны) модуль его комплексного сопротивления на частоте помехи будет равен бесконечности, т.е. такой проводник можно использовать в качестве изолятора, но не для заземления.

При наличии фильтров в системе автоматики за максимальную частоту влияющей помехи можно принимать верхнюю граничную частоту фильтра.

Чтобы снизить падение напряжения на заземлителе, надо уменьшать его длину. Индуктивное со-

противление провода заземления на частоте помехи f равно $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot l$, где L в типовых случаях равно примерно 0,8 мкГн/м (погонная индуктивность провода), l - длина провода.

Если провода заземления располагаются близко один от другого, то между ними возникает передача помехи через взаимную индуктивность, что особенно существенно на высоких частотах.

Провода заземления не должны образовывать замкнутых контуров, которые являются приемниками (антеннами) электромагнитных наводок.

Заземляющий проводник не должен касаться других металлических предметов, поскольку такое случайные нестабильные контакты могут быть источником дополнительных помех.

2.4. Модель «земли»

На основании вышеизложенного можно предложить электрическую модель системы заземления, показанную на рис. 1. При составлении модели предполагалось, что система заземления состоит из заземляющих электродов, соединенных между собой сплошной шиной заземления, к которой приварена пластина (клемма) заземления. К клемме заземления подсоединяются, к примеру, две шины (два проводника) заземления, к которым в разных местах подключается заземляемое оборудование.

Если шины заземления или заземляющие проводники проходят близко один от другого, то между ними существует магнитная связь с коэффициентом взаимной индукции M (рис. 1). Каждый участок проводника (шины) системы заземления имеет индуктивность L_{ij} , сопротивление R_{ij} и в нем наводится э.д.с. E_{ij} путем электромагнитной индукции. На разных участках шины заземления к ней подсоединено оборудование автоматики, которое поставляет в шину заземления ток помехи $I_{n21} \dots I_{n23}$, вызванный описанными в п. 4 причинами, и ток питания, возвращающийся к источнику питания по шине земли. На рис. 1 изображено также сопротивление между заземляющими электродами $R_{земли}$ и ток помехи, протекающий по земле, например, при ударах молнии или при к.з. на землю мощного оборудования $I_{nземли}$.

Если шина сигнального заземления используется одновременно для питания систем автоматики (этого нужно избегать), то необходимо учитывать ее сопротивление. Сопротивление медного провода длиной 1 м и диаметром 1 мм равно 0,022 Ом. В промышленной автоматике при расположении датчиков на большой площади, например, в элеваторе, длина заземляющего проводника может достигать 100 м и более. Для проводника длиной 100 м сопротивление составит 2,2 Ом. При количестве модулей системы автоматики, питаемых от одного источника, равном 20 и токе потребления одного модуля 0,1 А падение напряжения на сопротивлении заземляющего проводника составит 4,4 В.

При частоте помехи более 1 МГц возрастает роль индуктивного сопротивления цепи заземления, а также емкостной и индуктивной связи между участками цепей заземления. Провода заземления начинают излучать электромагнитные волны и сами становятся источниками помех.

На высоких частотах проводник заземления или экран кабеля, проложенный параллельно полу или стене здания, образует совместно с заземленными металлическими конструкциями здания длинную линию с волновым сопротивлением порядка 500...1000 Ом, короткозамкнутую на конце. Поэтому сопротивление проводника для высокочастотных помех определяется не только его индуктивностью, но и явлениями, связанными с интерференцией между падающей волной помехи и отраженной от заземленного конца провода. Модуль комплексного сопротивления между точкой подключения проводника к заземляемому оборудованию и ближайшей точкой железобетонной конструкции здания можно приближенно описать формулой для двухпроводной воздушной ли-

нии передачи: $Z_{ex} \approx R_e \cdot tg\left(2\pi \frac{L}{\lambda}\right)$, где R_e - волновое сопротивление, L - длина проводника заземления; λ - длина волны помехи; $\lambda \approx c/f$, c - скорость света в вакууме (300 тыс. км/с); f - частота помехи. График, построенный по приведенной формуле для типового проводника заземления (экрана) диаметром 3 мм при расстоянии до ближайшего прута железобетонной арматуры здания 50

см (при этом волновое сопротивление составляет 630 Ом), приведен на рис. 2. Отметим, что когда длина проводника приближается к 1/4 длины волны помехи, его сопротивление стремится к бесконечности.

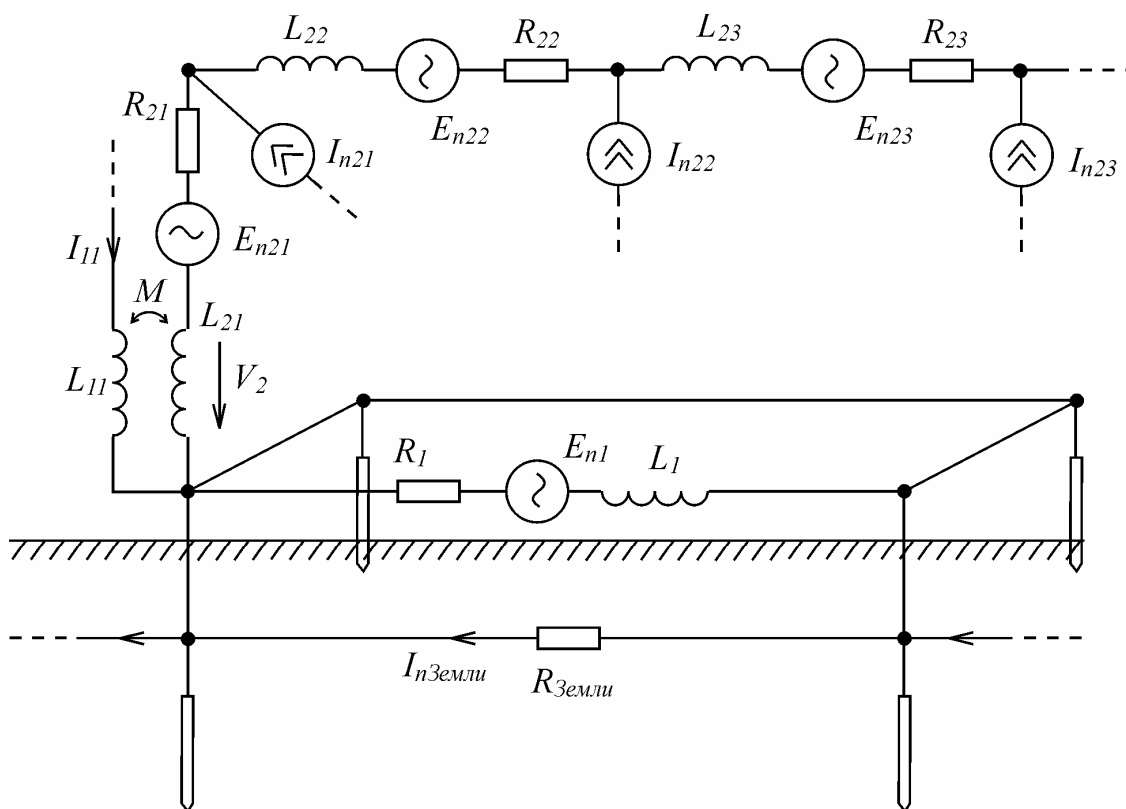


Рис. 1. Электрическая модель системы заземления

Таким образом, шина земли является в общем случае "грязной землей", источником помех, имеет активное и индуктивное сопротивление. Она является эквипотенциальной только с точки зрения защиты от поражения электрическим током, но не с точки зрения передачи сигнала. Поэтому если в контур, включающий источник и приемник сигнала, входит участок "грязной земли", то напряжение помехи будет складываться с напряжением источника сигнала и прикладываться ко входу приемника (см. п. 4.5).

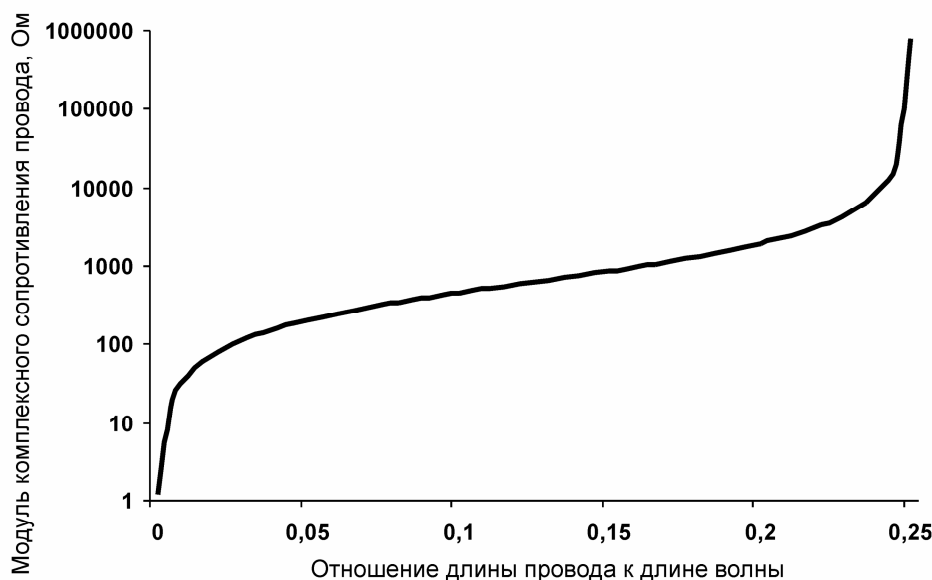


Рис. 2. Зависимость модуля комплексного сопротивления заземляющего проводника от длины провода

2.5. Виды заземлений

Одним из путей ослабления вредного влияния цепей заземления на системы автоматики является раздельное выполнение систем заземлений для устройств, имеющих разную чувствительность к помехам или являющихся источниками помех разной мощности. Раздельное исполнение заземляющих проводников позволяет выполнить их соединение с защитной землей в одной точке. При этом разные системы земель представляют собой лучи звезды, центром которой является контакт к шине защитного заземления здания. Благодаря такой топологии помехи "грязной" земли не протекают по проводникам "чистой" земли. Таким образом, несмотря на то, что системы заземления разделены и имеют разные названия, в конечном счете все они соединены с Землей через систему защитного заземления. Исключение составляет только "плавающая" земля (см. п. 2.5.3).

2.5.1. Силовое заземление

В системах автоматики могут использоваться электромагнитные реле, микромощные серводвигатели, электромагнитные клапаны и другие устройства, ток потребления которых существенно превышает ток потребления модулей ввода-вывода и контроллеров. Цепи питания таких устройств выполняют отдельной парой свитых проводов (для уменьшения излучаемых помех), один из которых соединяется с шиной защитного заземления. Общий провод такой системы (обычно провод, подключенный к отрицательному выводу источника питания) является силовой землей.

2.5.2. Аналоговая и цифровая земля

Системы промышленной автоматики являются аналого-цифровыми. Поэтому одним из источников погрешностей аналоговой части является помеха, создаваемая цифровой частью системы. Для исключения прохождения помех через цепи заземления цифровую и аналоговую землю выполняют в виде несвязанных проводников, соединенных вместе только в одной общей точке. Для этого модули ввода-вывода и промышленные контроллеры имеют отдельные выводы аналоговой земли (AGND) и цифровой (DGND).

2.5.3. «Плавающая» земля

"Плавающая" земля образуется в случае, когда общий провод небольшой части системы электрически не соединяется с шиной защитного заземления (т.е. с Землей). Типовыми примерами таких систем являются батарейные измерительные приборы, автоматика автомобиля, самолета или космического корабля. "Плавающая" земля может быть получена и с помощью DC-DC или AC-DC преобразователей, если вывод вторичного источника питания в них не заземлен. Такое решение позволяет полностью исключить кондуктивные наводки через общий провод заземления. Кроме того, допустимое синфазное напряжение может достигать 300 Вольт и более; практически 100%-ным становится подавление прохождения синфазной помехи на выход системы, снижается влия-

ние емкостных помех. Однако на высоких частотах токи через емкость на землю существенно снижают последние два достоинства.

Если "плавающая" земля получена с помощью устройств гальванической развязки на оптронах и DC-DC преобразователях, то надо принять особые меры для предотвращения накопления заряда в емкости между Землей и "плавающей" землей, которое может привести к пробое оптрона (см. п. 3, 4.4.).

Пример образования "плавающей" земли показан на рис. 3. Вывод AGND модуля ввода

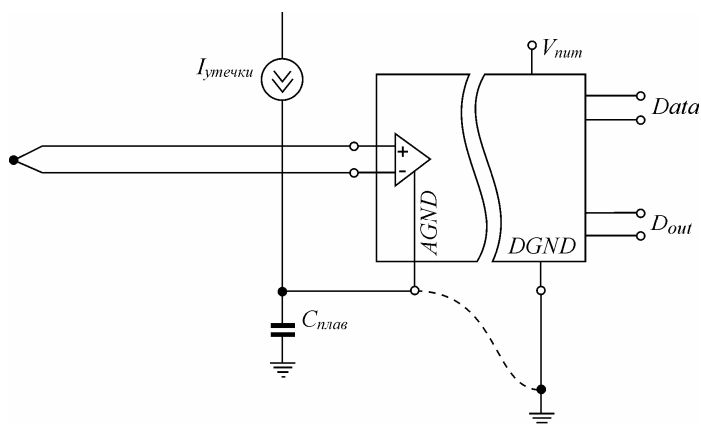


Рис. 3. Пример "плавающей" земли

сигналов термопар не соединен с землей. Аналоговая часть модуля имеет эквивалентную емкость на землю $C_{\text{плав}}$, которая включает в себя емкость входных цепей на землю, емкость проводников печатной платы на землю, проходную емкость DC-DC преобразователя и оптронов гальванической развязки. Величина этой емкости может составлять около 100 пФ и более. Поскольку воздух и другие диэлектрики, с которыми контактирует емкость $C_{\text{плав}}$, имеют не бесконечное электрическое сопротивление, то емкость может медленно, в течение минут или часов, зарядиться током утечки $I_{\text{утечки}}$ (рис. 3) до потенциала электризованных тел, высоковольтных источников питания или потенциала, связанного с атмосферным электричеством (см. п. 4.3, 4.4). Потенциал на "плавающей" земле может превысить напряжение пробоя изоляции оптронов и вывести систему из строя.

В качестве защитных мер при использовании "плавающей" земли можно рекомендовать соединение "плавающей" части с землей через сопротивление величиной от десятков килоом до единиц мегаом. Вторым способом является применение батарейного питания и передачи информации через оптический кабель.

"Плавающая" земля чаще используется в технике измерений малых сигналов и реже - в промышленной автоматике.

2.6. Модели компонентов систем автоматки

Для дальнейшего анализа и синтеза систем заземления необходимо представлять структуру модулей систем промышленной автоматки. Такое представление дают модели типовых модулей аналогового и дискретного ввода и вывода, представленные на рис. 4 - рис. 6. Модули аналогового ввода и дискретного вывода бывают без гальванической изоляции (рис. 4 а - например, модуль CL-8AI фирмы НИЛ АП), с изоляцией аналоговых входов и без изоляции дискретных выходов (рис. 4, б - например, модуль ADAM-4016 фирмы Advantech) и с изоляцией одновременно как аналоговых входов, так и дискретных выходов (рис. 4, в - например, модуль NL-8TI фирмы НИЛ АП).

На рисунках использованы следующие обозначения: AGND - аналоговая земля; DGND - цифровая земля; GND - земля источника питания порта связи; Data - информационный порт модуля (вход/выход данных); A_{in} - аналоговый вход; D_{out} - дискретный выход; D_{in} - дискретный вход; A_{out} - аналоговый выход; $V_{\text{пит}}$ - клемма подключения источника питания. Разрыв модулей (блоков) на рис. 4 - рис. 6 означает гальваническую изоляцию разорванных частей между собой.

Аналогично, модули с дискретными или счетными входами и дискретными выходами могут быть без гальванической изоляции (рис. 5, а - например, ADAM-4050 фирмы Advantech), с изоляцией входов (рис. 5, б - например, ADAM-4052 фирмы Advantech) и с изоляцией как входов, так и выходов (рис. 5, в - например, NL-16DI фирмы НИЛ АП). Модули аналогового вывода делают обычно с гальванической изоляцией выходов (рис. 6). Таким образом, один модуль ввода-вывода может содержать до трех различных выводов земли.

В моделях на рис. 4 - рис. 6 с целью упрощения не показаны входные сопротивления, которые иногда нужно учитывать.

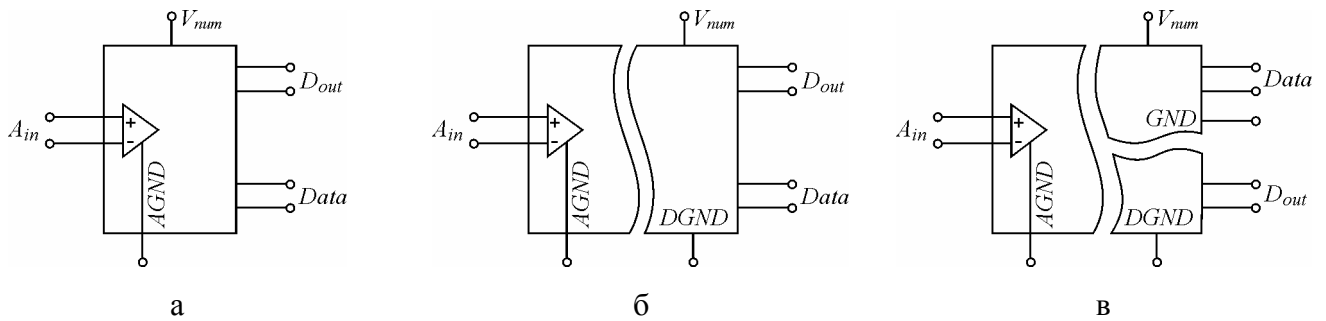


Рис. 4. Обобщенные модели аналоговых модулей ввода и дискретного вывода для анализа систем заземления: а) - без гальванической изоляции; б) - с гальванической изоляцией аналоговых входов; в) - с изоляцией как входов, так и выходов.

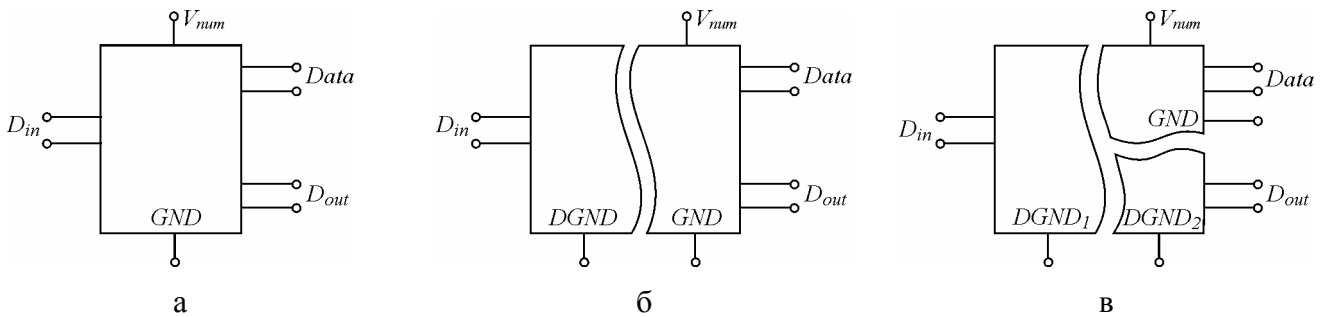


Рис. 5. Обобщенные модели дискретных модулей для анализа систем заземления: а) - без гальванической изоляции; б) - с изоляцией входов; в) - с изоляцией и входов, и выходов.

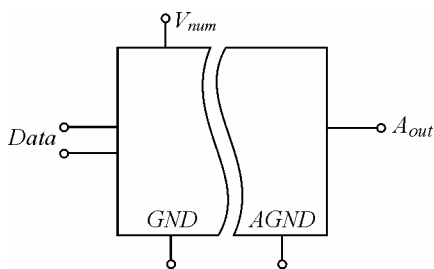


Рис. 6. Обобщенная модель модулей аналогового вывода для анализа систем заземления

3. Гальваническая развязка

Гальваническая развязка цепей является радикальным решением большинства проблем, связанных с заземлением, и ее применение фактически стало стандартом в системах промышленной автоматике.

Для осуществления гальванической развязки (изоляции) необходимо выполнить подачу энергии и передачу сигнала в изолированную часть цепи. Подача энергии выполняется с помощью развязывающего трансформатора (в DC-DC или AC-DC преобразователях) или с помощью автономных источников питания: гальванических батарей и аккумуляторов. Передача сигнала осуществляется

через оптроны и трансформаторы, элементы с магнитной связью, конденсаторы или оптоволокно. Основная идея гальванической развязки заключается в том, что в электрической цепи полностью устраняется путь, по которому возможна передача кондуктивной помехи.

Гальваническая изоляция позволяет решить следующие проблемы:

- исключает появление паразитных токов по земле, уравнивающих потенциалы, и тем самым снижает индуктивные наводки, вызванные этими токами;
- уменьшает практически до нуля напряжение синфазной помехи на входе дифференциального приемника аналогового сигнала (например, на рис. 3 синфазное напряжение на термопаре относительно Земли не влияет на дифференциальный сигнал на входе модуля ввода);
- защищает от пробоя входные и выходные цепи модулей ввода и вывода вследствие синфазного перенапряжения (например, на рис. 3 синфазное напряжение на термопаре относительно Земли может быть как угодно большим, если оно не превышает напряжение пробоя изоляции).

Для применения гальванической развязки система автоматики делится на автономные изолированные подсистемы, между которыми отсутствуют проводники (гальванические связи). Каждая подсистема имеет свою локальную землю. Подсистемы заземляют только для обеспечения электробезопасности и локальной защиты от помех.

Основным недостатком цепей с гальванической развязкой является повышенный уровень помех от DC-DC преобразователя, который, однако, для низкочастотных схем можно сделать достаточно малым с помощью цифровой и аналоговой фильтрации (см. п. 4.1). На высоких частотах емкость подсистемы на землю и емкость между обмотками трансформатора является фактором, ограничивающим достоинства гальванически изолированных систем. Емкость на землю можно уменьшить, применяя оптический кабель и уменьшая геометрические размеры гальванически изолированной подсистемы.

Распространенной ошибкой при применении гальванически развязанных цепей является ошибочное трактование понятия "напряжение изоляции". В частности, если напряжение изоляции модуля ввода составляет 3 кВ, это не означает, что его входы могут находиться под таким высоким напряжением в рабочих условиях. Рассмотрим методы описания характеристик изоляции. В зарубежной литературе для этого используют три стандарта: UL1577, VDE0884 и IEC61010-01, но в описаниях устройств гальванической развязки не всегда даются на них ссылки. Поэтому понятие "напряжение изоляции" трактуется в отечественных описаниях зарубежных приборов неоднозначно. Главное различие состоит в том, что в одних случаях речь идет о напряжении, которое может быть приложено к изоляции неограниченно долго (*рабочее напряжение изоляции*), в других случаях речь идет об *испытательном* напряжении (*напряжение изоляции*), которое прикладывается к образцу в течение от 1 мин. до нескольких микросекунд. Испытательное напряжение может в 10 раз превышать рабочее и предназначено для ускоренных испытаний в процессе производства, поскольку напряжение, при котором наступает пробой, зависит от длительности тестового импульса.

Таблица 1 показывает связь между рабочим и испытательным (тестовым) напряжением по стандарту IEC61010-01. Как видно из таблицы, такие понятия, как рабочее напряжение, постоянное, среднеквадратическое или пиковое значение тестового напряжения могут отличаться очень сильно.

Электрическая прочность изоляции отечественных средств автоматизации испытывается по ГОСТ 51350 или ГОСТ Р МЭК 60950-2002, т.е. синусоидальным напряжением с частотой 50 Гц в течение 60 сек при напряжении, указываемом в руководстве по эксплуатации как "напряжение изоляции". Например, при испытательном напряжении изоляции 2300 В рабочее напряжение изоляции составляет всего 300 В (таблица 1).

Таблица 1. Зависимость между рабочим и тестовым напряжением

Рабочее напряжение, В	Воздушный зазор, мм	Испытательное напряжение, В		
		Пиковое напряжение импульса, 50 мкс	Среднеквадратичное (действующее) значение, 50/60 Гц, 1 мин.	Постоянное напряжение или пиковое значение напряжения 50/60 Гц, макс., 1 мин.
150	1,6	2550	1400	1950
300	3,3	4250	2300	3250
600	6,5	6800	3700	5250
1000	11,5	10200	5550	7850

4. Источники помех на шине земли

Все помехи, воздействующие на кабели, датчики, исполнительные механизмы, контроллеры и металлические шкафы автоматики, в большинстве случаев протекают и по заземляющим проводникам, создавая вокруг них паразитное электромагнитное поле и падение напряжения помехи на проводниках. Источниками и причинами помех могут быть: молния; статическое электричество; электромагнитное излучение; "шумящее" оборудование; сеть питания 220 В 50 Гц, переключаемые сетевые нагрузки; трибоэлектричество; гальванические пары, термоэлектрический эффект, электролитические процессы, движение проводника в магнитном поле и др.

Государственные центры стандартизации и сертификации во всех странах мира не допускают к производству оборудование, являющееся источником помех недопустимо высокого уровня. Однако уровень помех невозможно сделать равным нулю. Кроме того, на практике встречается достаточно много источников помех, связанных с неисправностями или применением не сертифицированного оборудования.

В России допустимый уровень помех и устойчивость оборудования к их воздействию нормируются ГОСТ Р 51318.14.1, ГОСТ Р 51318.14.2, ГОСТ Р 51317.3.2, ГОСТ Р 51317.3.3, ГОСТ Р 51317.4.2, ГОСТ 51317.4.4, ГОСТ Р 51317.4.11, ГОСТ Р 51522, ГОСТ Р 50648.

При конструировании электронной аппаратуры для снижения уровня помех используют мощную элементную базу с минимально достаточным быстродействием, уменьшение длины проводников и экранирование.

4.1. Характеристики помех

Основная характеристика помехи - это зависимость спектральной плотности мощности помехи от частоты. Помехи, воздействующие на системы промышленной автоматики, имеют спектр от постоянного тока до единиц гигагерц (см. рис. 7) [15]. Помехи, лежащие в полосе пропускания аналоговых систем автоматики, имеют частоты до десятков килогерц. На цифровые цепи воздействуют помехи в полосе до сотен мегагерц. Помехи гигагерцевого диапазона непосредственного влияния на системы автоматики не оказывают, однако после детектирования в нелинейных элементах они порождают низкочастотные помехи, лежащие в границах воспринимаемого спектра.



Рис. 7. Относительный уровень спектральной плотности мощности и частоты основных источников электромагнитных помех

В сигнальных цепях и цепях заземления систем автоматики содержится весь спектр возможных помех. Однако влияние оказывают только помехи, частоты которых лежат в полосе пропускания систем автоматики. Среднеквадратическое значение напряжения (или тока) помехи $E_{помехи}$ определяется шириной ее спектра:

$$E_{помехи} = \sqrt{\int_{f_n}^{f_g} e^2(f) df}$$

где $e^2(f)$ - спектральная плотность мощности шума, $B^2/Гц$; f_n и f_g - нижняя и верхняя граница спектра помехи. В частном случае, когда $e^2(f)$ слабо зависит от частоты, приведенное соотношение упрощается:

$$E_{помехи} \approx \sqrt{e^2 \cdot (f_g - f_n)}.$$

Таким образом, для уменьшения влияния помех на системы автоматики нужно сужать ширину полосы пропускания ($f_g - f_n$) аналоговых модулей ввода и вывода. Например, если известно, что постоянная времени терморпары составляет 2 сек, что приблизительно соответствует полосе пропускания сигнала температуры 0,5 Гц, то соответствующее ограничение полосы пропускания модуля ввода позволит уменьшить уровень помехи и тем самым повысить точность измерений, снизить требования к заземлению, экранированию и монтажу системы. Однако фильтр вносит динамическую погрешность в результаты измерения, которая зависит от частоты (спектра) входного сигнала. В качестве примера на рис. 8 приведена зависимость погрешности измерений модулей RealLab! серии NL (НИЛ АП) от частоты. При частоте входного сигнала 0,5 Гц, как в рассматриваемом примере, погрешность, вносимая фильтром, составляет -0,05%.

Наиболее мощной в системах автоматики является помеха с частотой питающей сети 50 Гц. Поэтому для ее подавления используют узкополосные фильтры, настроенные точно (с помощью кварца) на частоту 50 Гц. На рис. 9 в качестве примера приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цифрового фильтра, использованного в модулях RealLab! серии NL. Фильтр настроен таким образом, что он ослабляет на 120 дБ (на 6 порядков) помеху с частотой 50 Гц. Следует отметить, что динамическая погрешность свойственна всем известным методам ослабления

помехи нормального вида, хотя она часто не указывается в характеристиках аналоговых модулей, что может вводить пользователя в заблуждение.

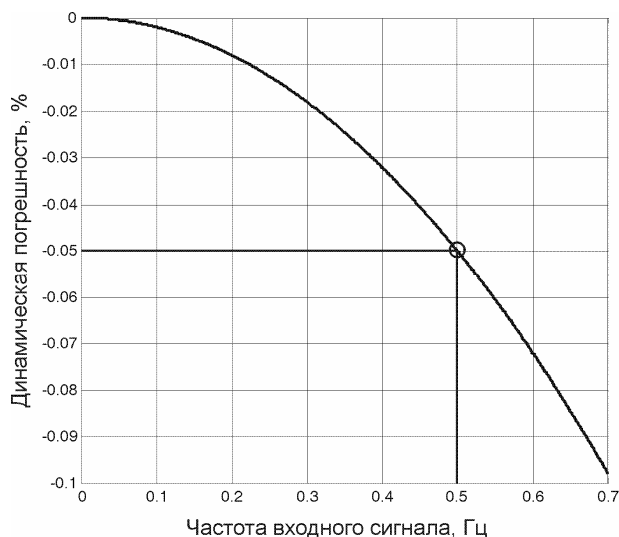


Рис. 8. Зависимость динамической погрешности модулей RealLab! серии NL (НИЛ АП) от частоты входного сигнала

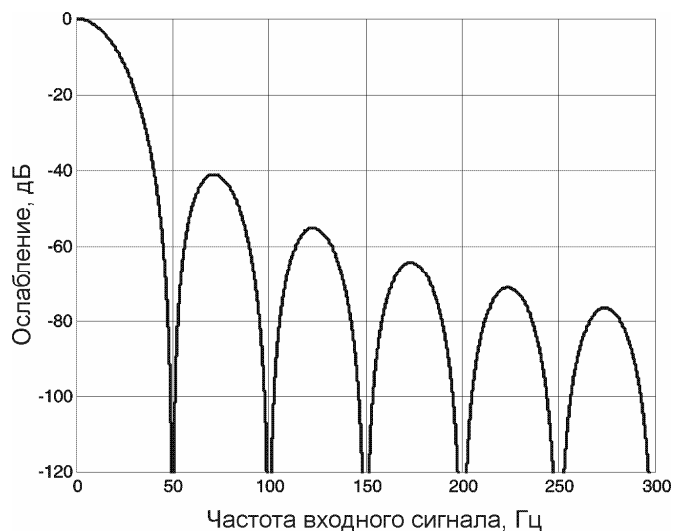


Рис. 9. АЧХ $SINC^3$ фильтра, входящего в состав аналоговых модулей RealLab! серии NL

При еще большей инерционности датчиков или контролируемой системы (например, когда датчик стоит в печи, время выхода на режим которой составляет несколько часов) можно еще сильнее ослабить требования к уровню помех, введя процедуру многократных измерений и дополнительную цифровую фильтрацию в управляющем контроллере или компьютере. В общем случае, чем больше время измерения, тем точнее можно выделить сигнал на фоне шума.

Следует отметить, что наличие фильтра не всегда спасает от влияния помех. Например, если высокочастотная помеха, перед тем как попасть на вход модуля ввода, детектируется или выпрямляется на нелинейных элементах, то из сигнала помехи выделяется постоянная или низкочастотная составляющая, которая уже не может быть ослаблена фильтром модуля ввода. В качестве нелинейных элементов могут выступать, например, контакты разнородных металлов, защитные диоды, стабилитроны, варисторы.

4.2. Помехи из сети электроснабжения

Питающая сеть 220/380 В с частотой 50 Гц и подключенные к ней блоки питания являются источниками следующих помех:

- фон с частотой 50 Гц;
- выбросы напряжения от разряда молнии (рис. 10, а);
- кратковременные затухающие колебания при переключении индуктивной нагрузки (рис. 10, б);
- высокочастотный шум, наложенный на синусоиду 50 Гц (рис. 10, в);
- инфранизкочастотный шум, проявляющийся как нестабильность во времени величины среднеквадратического значения сетевого напряжения (рис. 11);
- долговременные искажения формы синусоиды и гармоники при насыщении сердечника трансформатора и по другим причинам.

Наибольшее влияние на системы промышленной автоматики оказывают первые три вида помех. Для уменьшения кратковременных выбросов напряжения используют специальные защитные диоды и варисторы. Инфранизкочастотный шум и искажения синусоиды отфильтровываются стабилизатором и сглаживающим фильтром сетевого источника питания и не проходят сквозь пара-

зитные емкости сетевого трансформатора.

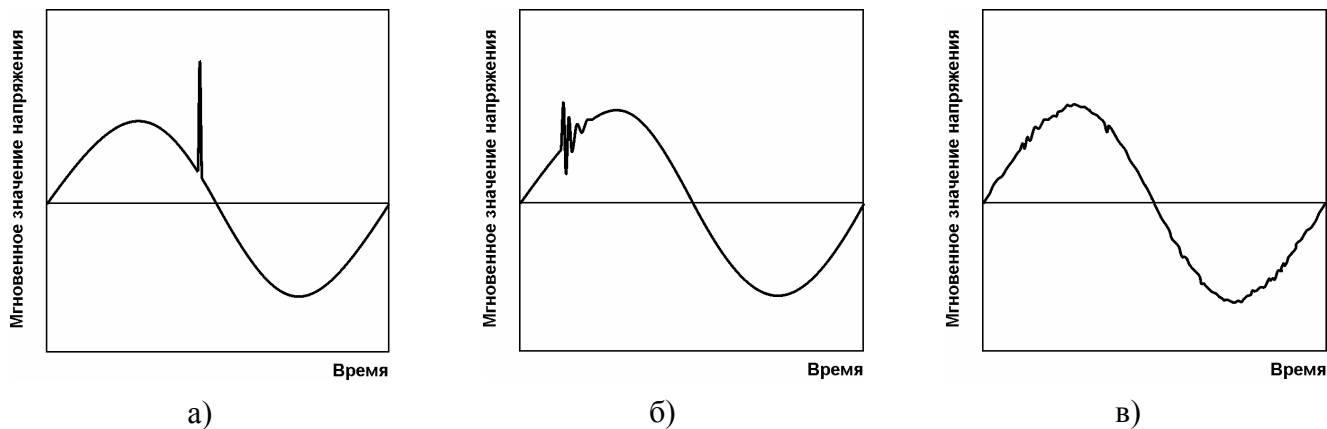


Рис. 10. Виды помех, проникающих из сети питания: а) - от разряда молнии; б) - при переключении индуктивной нагрузки; в) - помехи от радиостанций

Причинами и источниками сетевых помех могут быть разряды молнии при попадании в линию электропередачи, включение или выключение электроприборов; тиристорные регуляторы мощности; реле; электромагнитные клапаны; электродвигатели; электросварочное оборудование и др.

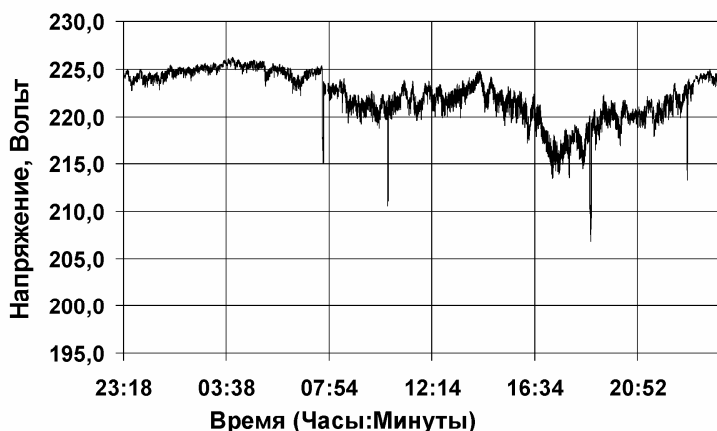


Рис. 11. Изменения средневывпрямленного значения сетевого напряжения в течение суток (измерено в НИЛ АП 12.11.2005 г.)

Путь проникновения сетевой помехи показан на рис. 12. Силовой или развязывающий трансформатор включен в сеть 220 В, 50 Гц. Сеть представлена эквивалентным источником напряжения сети $E_{\sim 220В}$ и эквивалентным источником помех $E_{помехи}$, описанных выше. Нулевой провод источника сетевого напряжения заземлен на главном щите у ввода в здание. Если выход источника питания тоже заземлен, что часто необходимо для целей электробезопасности, то возникает путь протекания тока помехи, показанный на рис. 12, включающий сопротивление земли между двумя заземлителями $R_{земли}$. Основным звеном в этой цепи является паразитная емкость между обмотками силового трансформатора $C_{пар1}$, для уменьшения влияния которой часто используют заземленный электростатический экран (рис. 13). Ток помехи протекает по общему проводу источника питания и заземлителю (рис. 12), создавая на их сопротивлении падение напряжения помехи, о котором речь пойдет в следующих разделах (на рис. 12 эти участки цепи выделены жирной линией). Ток помехи фактически может замыкаться не на подстанции, а через внутреннее сопротивление других электроприборов, подключенных к электрической сети, а также через емкость кабеля.

Наиболее значительной помехой, проникающей в шину заземления из сети 220 В 50 Гц, являются емкостные токи, протекающие через емкость между обмоткой двигателя и его корпусом; токи между сетевой обмоткой трансформатора и сердечником, токи через конденсаторы сетевых фильтров.

Путь тока помехи через емкость между первичной обмоткой трансформатора и его заземленным сердечником $C_{нар3}$ показан на рис. 12. Этот ток также протекает через общий провод источника питания и заземлитель. Наличие емкости приводит к тому, что незаземленные электроприборы "бьют током". При отсутствии заземления потенциал металлического корпуса приборов, подключенных к сети 220В, составляет от нескольких десятков до 220В в зависимости от сопротивления утечки на землю. Поэтому корпуса приборов, включенных в сеть 220 В, должны быть заземлены.

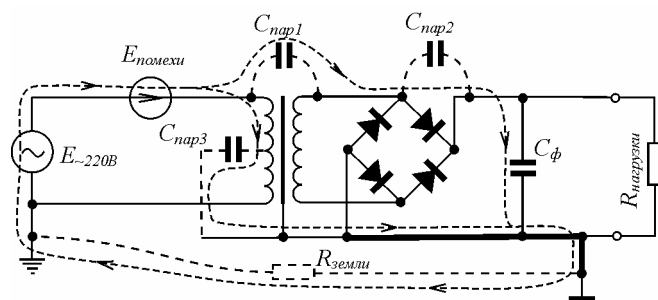


Рис. 12. Путь проникновения помехи из сети 220 В, 50 Гц в систему заземления и общий провод источника питания

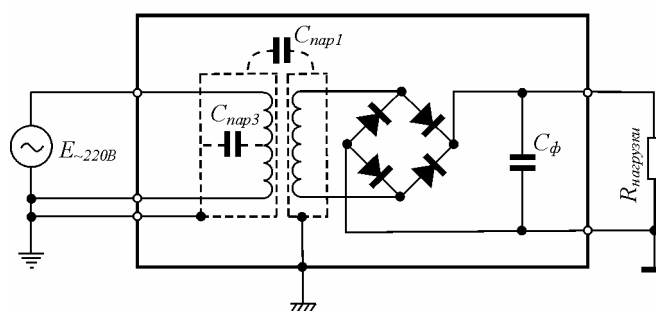


Рис. 13. Источник питания с тремя типами заземель. Слева направо: защитная земля, экранная земля и сигнальная

При использовании DC-DC и AC-DC преобразователей к источнику помехи $E_{помехи}$ добавляется емкостная и индуктивная наводка от собственного генератора преобразователя. Поэтому в общем случае уровень помех на общем проводе у DC-DC и AC-DC преобразователей выше, чем в источниках с обычным силовым трансформатором, хотя проходная емкость $C_{нар1}$ в преобразователях может быть уменьшена до единиц пикофард по сравнению с сотнями пикофард для обычного силового трансформатора.

Для уменьшения проникновения помехи в источниках питания используют раздельное экранирование первичной и вторичной обмотки трансформатора, а также разделение сигнальной и корпусной земли (рис. 13). На рисунке сплошной жирной линией нарисован металлический корпус прибора; кружочки обозначают клеммные соединители. Методы соединения различных земель между собой описаны ниже, в п. 5.

4.3. Молния и атмосферное электричество

Молнии являются одним из распространенных причин нежелательных перенапряжений, сбоев и отказов в системах автоматики. Заряд, накапливаемый в облаках, имеет потенциал величиной около нескольких миллионов вольт относительно поверхности Земли и является отрицательным. Длительность разряда молнии составляет в среднем 0,2 с, редко до 1...1,5 с, длительность переднего фронта импульса - от 3 до 20 мкс, ток составляет несколько тысяч ампер, до 100 кА (рис. 14), температура в канале достигает 20 000 °С, появляется мощное магнитное поле и радиоволны [3]. Молнии могут образовываться также при пылевых бурях, метелях, извержениях вулканов. Частота поражения молнией зданий высотой 20 м и размерами в плане 100x100 м составляет 1 раз в 5 лет, а для зданий с размерами порядка 10x10 м - 1 попадание за 50 лет [РД 34.21.122-87]. Количество прямых ударов молнии в Останкинскую телебашню высотой 540 м составляет 30 ударов в год.

Для защиты от прямого удара молнии используют молниеотводы, которые состоят из штыря (молниеприемника), находящегося над зданием, заземлителя и соединяющего их проводника. Система молниеотвода образует низкоимпедансный путь для прохождения тока молнии на землю, минуя структуры здания. Молниеотвод должен находиться как можно дальше от здания, чтобы

ослабить эффект взаимной индукции, и в то же время достаточно близко, чтобы защитить здание от прямого попадания молнии. Для зданий с большой площадью крыши молниеотводы устанавливают на крыше и соединяют между собой и с заземлителем стальными полосами. Заземлитель молниеотвода выполняют отдельно от защитного заземления здания, но электрически соединяют с ним с целью выравнивания потенциалов и устранения возможных искрений [РД 34.21.122-87].

Ток молнии, проходя по земле, создает в ней падение напряжения, которое может вывести из строя драйверы интерфейсов, если они не имеют гальванической развязки и расположены в разных зданиях (с разными заземлителями).

В линиях электропередачи разряд молнии принимается на экранирующий провод, который отводит молнию в землю через заземлитель. Экранирующий провод протягивают над фазовыми проводами, однако на фазовых проводах наводится импульс э.д.с. вследствие явления электромагнитной индукции. Этот импульс проходит на трансформаторную подстанцию, где ослабляется искровыми разрядниками. Остаточный импульс проходит в потребительскую линию (см. рис. 10, а) и через силовой трансформатор - в цепи заземления систем автоматики (рис. 12).

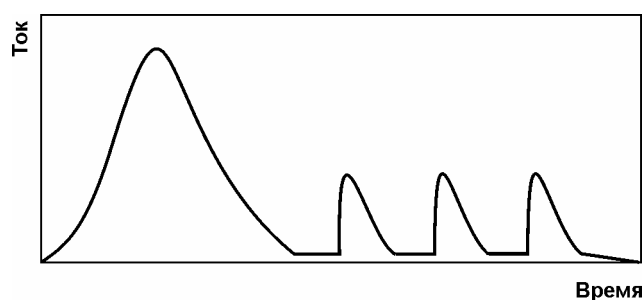


Рис. 14. Типовая форма импульса тока при разряде молнии [3]

На системы автоматики молнии воздействуют не путем прямого попадания, а через электромагнитный импульс, который может вывести из строя устройства гальванической развязки и пережечь провода малого поперечного сечения током, который генерируется вследствие явления электромагнитной индукции [8].

Вторым природным явлением, связанным с грозой, является атмосферное электричество. Электрический потенциал грозового облака во время дождя может составлять десятки миллионов, до 1 млрд. Вольт. Когда напряженность

электрического поля между облаком и поверхностью земли достигает 500...1000 В/м, начинается электрический разряд с острых предметов (мачты, трубы, деревья и т.п.).

Высокая напряженность поля, вызванная атмосферным электричеством, может наводить заряды в "плавающих" цепях с высоким сопротивлением изоляции на землю величиной в несколько тысяч Вольт и приводить к пробоем оптронов в модулях гальванической развязки. Для защиты от атмосферного электричества гальванически изолированные цепи, не имеющие низкоомного пути на землю, должны быть помещены в заземленный электростатический экран. В частности, атмосферное электричество является одной из причин, по которым промышленные сети прокладывают экранированной витой парой. Экран кабеля нужно заземлять только в одной точке (см. п.5.3).

Следует отметить, что молниеотводы, служащие для защиты от прямого удара молнии, не могут существенно уменьшить напряженность электрического поля атмосферных зарядов и никак не защищают аппаратуру от мощного электромагнитного импульса во время грозы.

4.4. Статическое электричество

Статическое электричество возникает на диэлектрических материалах. Величина заряда зависит от скорости движения трущихся тел, их материала и величины поверхности соприкосновения. Примерами трущихся тел могут быть:

- ременный привод;
- лента конвейера;
- синтетическая одежда и обувь на теле человека;
- поток непроводящих твердых частиц (пыли), газа или воздуха через сопло;
- движение непроводящей жидкости, заполняющей цистерну;
- автомобильные шины, катящиеся по непроводящей дороге;
- резиновые ролики под стульями, когда стулья перемещаются по непроводящему полу.

Ременный привод, состоящий из диэлектрического ремня и двух шкивов, является наиболее общим примером генератора статического электричества. Потенциал статического заряда на ремне может достигать 60...100 кВ и пробиваемый воздушный промежуток - 9 см. Поэтому на взрывоопасных производствах (элеваторы, мельницы) ремни используют с проводящими присадками или металлизацией. Для снятия зарядов с ремней и других электризующихся предметов используют заземленный подпружиненный металлический гребешок или щетку, которые касаются движущейся поверхности. Конвейерные ленты электризуются хуже ременного привода вследствие низкой скорости движения ленты.

Вторым способом борьбы со статическим электричеством является установка в помещении увлажнителя воздуха для получения влажности выше 50%.

Для уменьшения зарядов на теле человека используют заземление запястья работников, электропроводные полы, электропроводную одежду, увлажнение воздуха.

Результатом возникновения статических электрических зарядов может быть пробой входных каскадов измерительных систем; появление линий на CRT мониторах, переход триггеров в другое состояние, поток ошибок в цифровых системах, пробой изоляции гальванически изолированных цепей с большим сопротивлением на землю; воспламенение взрывоопасной смеси.

Для защиты систем автоматики от сбоев используют электростатические экраны, соединенные с экранным заземлением, преобразователи интерфейсов с защитой от статического электричества (например, преобразователь интерфейсов NL-232C фирмы НИЛ АП имеет защиту от статических зарядов с потенциалом до ± 8 кВ по стандарту IEC1000-4-2).

4.5. Кондуктивные наводки

Кондуктивная наводка - это помеха, которая передается из соседних электрических цепей не через электромагнитное поле, а путем переноса электрического тока по общим для обеих цепей проводникам, в основном через общие участки цепей заземления или питания. Обычно источником кондуктивных помех являются генераторы, цепи с большим током, цифровая часть аналого-цифровой схемы, реле, помехи из сети питания, протекающие по общему участку заземления, помехи с частотой преобразования источника бесперебойного питания (UPS), DC-DC и AC-DC преобразователи, шаговые двигатели с импульсным питанием, мощные печи с ШИМ-управлением.

Наиболее типичной причиной появления кондуктивных помех в промышленной автоматике является неправильно выполненное заземление. Рассмотрим пример (рис. 15-а). Ток питания цифровой части модуля ввода $I_{ном}$ проходит по общему участку провода, который имеет сопротивление $R_{общ}$ и создает на нем падение напряжения помехи $V_{ном}$. При дополнительно неправильном соединении аналогового входа модуля ввода с источником сигнала (на рис. 15-а показано зачеркнутой линией) ко входу модуля прикладывается сумма напряжения измеряемого сигнала и напряжения помехи $E_c + V_{ном}$. При более правильном соединении входа "-" модуля с источником сигнала (показано штриховой линией) на вход модуля действует синфазная помеха $V_{ном}$, которая при недостаточном коэффициенте подавления синфазного сигнала может вносить погрешность в результат измерения.

Для устранения обеих источников погрешности соединение аналоговой и цифровой земли необходимо выполнять в одной общей точке (рис. 15, б). При этом падение напряжения помехи на заземляющем проводнике никак не сказывается на аналоговой части модуля.

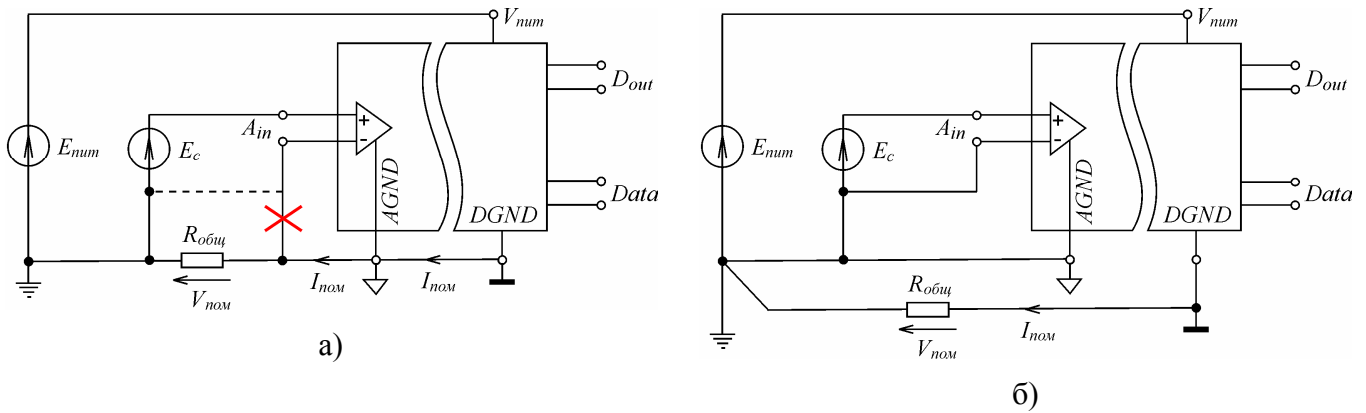


Рис. 15. Прохождение кондуктивной помехи из цифровой части в аналоговую: а) - неправильное соединение земель и цепей сигнала; б) - правильное соединение

4.6. Электромагнитные наводки

Электромагнитные наводки появляются вследствие явления электромагнитной индукции: в проводящем контуре, находящемся в электромагнитном поле, возникает э.д.с. индукции, если контур разомкнут, или индукционный ток, если контур замкнут. Источником электромагнитного поля помехи может быть радиомодем, радиотелефон, радиоретранслятор, радиостанция, сотовый передатчик на крыше здания, двигатель с искрящимися щетками, электросварочный аппарат, трамвай, люминесцентные лампы, тиристорный регулятор, компьютер, телевизионные и радиостанции, сотовые телефоны, цифровая часть измерительной системы, реле регулятора, космическое коротковолновое излучение, удар молнии и др.

Источником электромагнитной помехи может быть также и цифровая (дискретная) подсистема системы автоматики, например, компьютер, реле, тиристоры, мощные выходы дискретных модулей. Сильным источником электромагнитных помех являются оптоволоконные передатчики, поскольку они потребляют большой ток и работают на высоких частотах. Излучаются помехи с помощью случайных проводников, образующих дипольную или рамочную антенну. Дипольная антенна является источником преимущественно электрического поля в ее окрестности, рамочная - источником магнитного поля. Вдали от таких источников доминирующего поля нет, есть поперечная электромагнитная волна. Реальные системы образуют множество излучающих антенн, образуемых взаимодействующими проводниками и различными металлическими поверхностями.

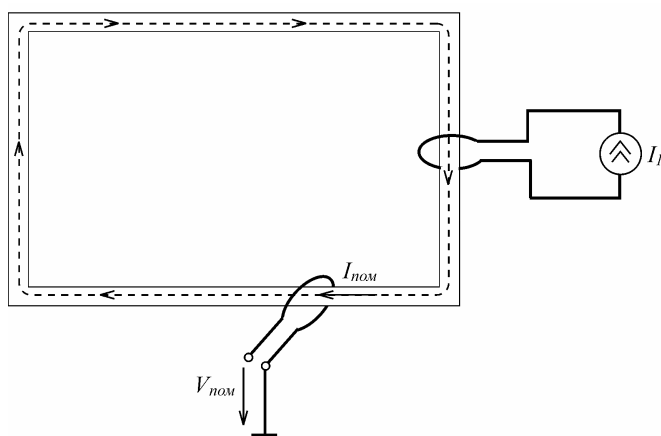


Рис. 16. Наведение электромагнитной помехи через "замаскированную" антенну и взаимную индуктивность

Наводятся электромагнитные помехи на всех проводящих предметах, которые в рассматриваемом случае играют роль антенн. Мощность наведенной помехи зависит от площади контура, охваченного проводником или от длины провода. Помеха, наведенная в "антенне", кондуктивным путем может передаваться в сигнальные цепи или цепи заземления, вызывая поток ошибок в цифровых схемах или погрешность передачи сигнала в аналоговых.

Наиболее распространенным приемником электромагнитных помех являются длинные провода: цепи заземления, промышленные сети (полевые шины), кабели, соединяющие датчики и модули аналогового ввода, кабели информационных коммуникаций. Подробнее о защите кабелей систем автоматики от электромагнитных помех см. [2]. "Замаскированными"

приемниками электромагнитных помех являются металлические конструкции в зданиях: металлические стеллажи, окна с металлической рамой, трубы водоснабжения и отопления здания, защитное контурное заземление здания.

Основным методом борьбы с электромагнитными наводками является уменьшение площади контура, принимающего помеху, и применение дифференциального способа передачи сигнала в сочетании с витыми парами проводов (см. [2]). Однако даже в контуре с маленькой площадью может наводиться большая помеха, если при монтаже допустить ошибку, показанную на рис. 16: в металлической раме стеллажа (стола) наводится ток помехи $I_{пом}$ от источника I_1 , который далее наводит напряжение $V_{пом}$ во втором витке провода, т.е. происходит трансформация сигнала помехи через короткозамкнутый виток, образуемый рамой стеллажа.

5. Методы заземления

Техника заземления в системах промышленной автоматики сильно различается для гальванически связанных и гальванически развязанных цепей. Большинство методов, описанных в литературе, относится к гальванически связанным цепям, доля которых в последнее время существенно уменьшилась в связи с резким падением цен на DC-DC преобразователи.

5.1. Заземление гальванически связанных цепей

Мы рекомендуем избегать применения гальванически связанных цепей, а если другого варианта нет, то желательно, чтобы размер этих цепей был по возможности малым и чтобы они располагались в пределах одного шкафа.

Примером гальванически связанной цепи является соединение источника и приемника стандартного сигнала 0...5 В (рис. 17, рис. 18). Чтобы пояснить, как правильно выполнить заземление, рассмотрим вариант неправильного (рис. 17) и правильного (рис. 18) монтажа. На рис. 17 допущены следующие ошибки:

- ток мощной нагрузки (двигателя постоянного тока) протекает по той же шине заземления, что и сигнал, создавая падение напряжения $V_{земли}$;
- использовано однополярное включение приемника сигнала, а не дифференциальное;
- использован модуль ввода без гальванической развязки цифровой и аналоговой части, поэтому ток питания цифровой части, содержащий помеху, протекает через вывод AGND и создает дополнительное падение напряжения помехи на сопротивлении R_1 .

Перечисленные ошибки приводят к тому, что напряжение на входе приемника $V_{вх}$ равно сумме напряжения сигнала $V_{сиг}$ и напряжения помехи $V_{земли} = R_1 \cdot (I_{пит} + I_M)$. Для устранения этого недостатка в качестве проводника заземления можно использовать медную шину большого сечения, однако лучше выполнить заземление так, как показано на рис. 18, а именно:

- все цепи заземления соединить в одной точке. При этом ток помехи I_M уже не протекает через сопротивление R_1 ;
- проводник заземления приемника сигнала присоединить к той же общей точке. При этом ток $I_{пит}$ уже не протекает через сопротивление R_1 , а падение напряжения на сопротивлении проводника R_2 не складывается с выходным напряжением источника сигнала $V_{сиг}$.

Общим правилом ослабления связи через общий провод заземления является деление земель на аналоговую, цифровую, силовую и защитную с последующим их соединением только в одной точке. При разделении заземлений гальванически связанных цепей используется общий принцип: цепи заземления с большим уровнем шума должны выполняться отдельно от цепей с малым уровнем шума, а соединяться они должны только в одной общей точке. Точек заземления может быть несколько, если топология такой цепи не приводит к появлению участков "грязной" земли в контуре,

включающем источник и приемник сигнала, а также если в цепи заземления не образуются замкнутые контуры, принимающие электромагнитные помехи.

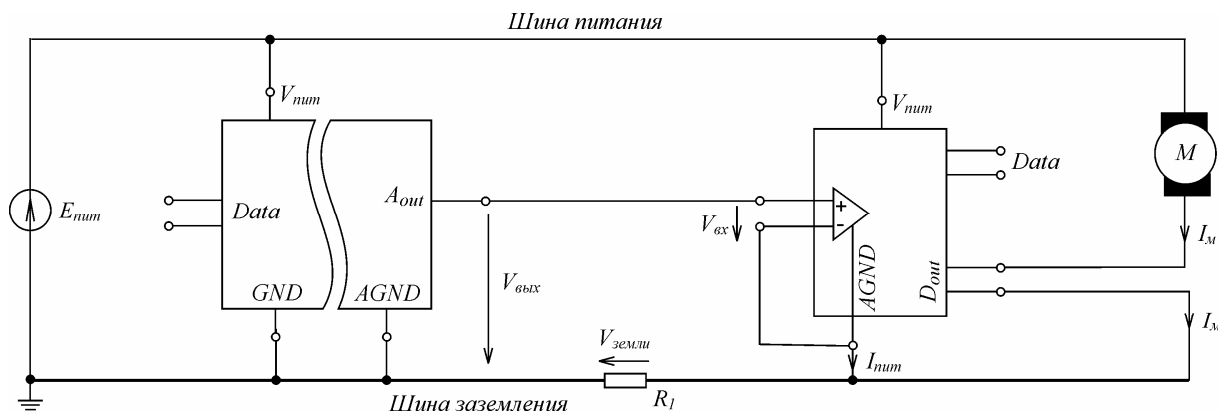


Рис. 17. Пример неправильного заземления

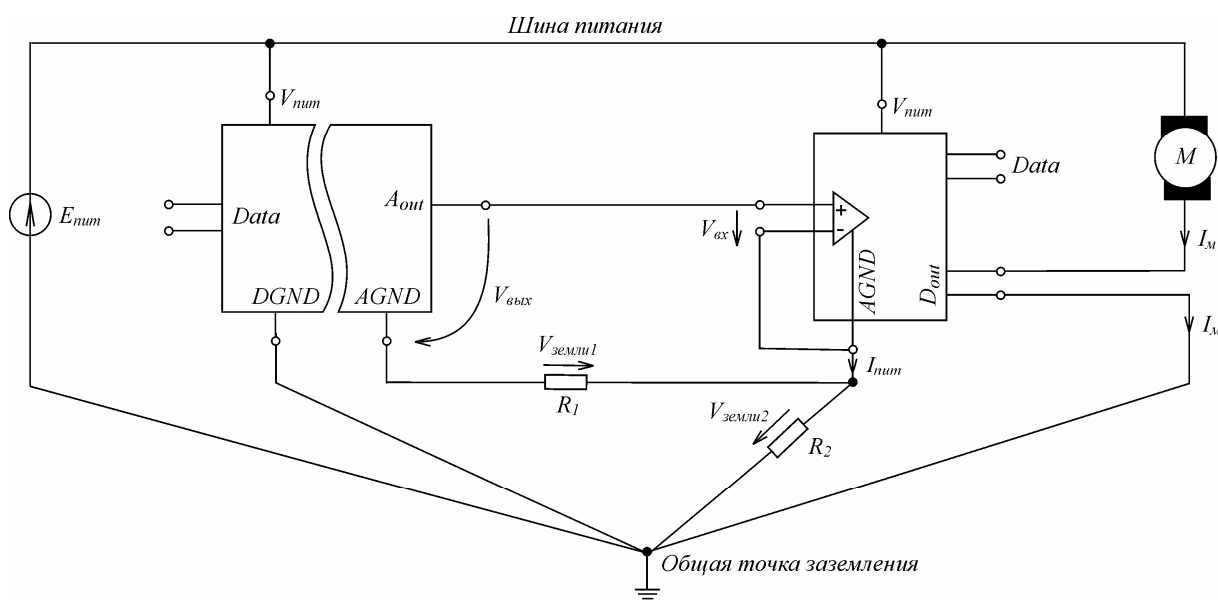


Рис. 18. Пример решения проблемы, указанной на рис. 17

Недостатком метода разделения проводников заземления является низкая эффективность на высоких частотах, когда большую роль играет взаимная индуктивность между рядом идущими проводниками заземления, которая только заменяет гальванические связи на индуктивные, не решая проблемы в целом.

Большая длина проводников приводит также к увеличению сопротивления заземления, что важно на высоких частотах. Поэтому заземление в одной точке используется на частотах до 1 МГц, выше 10 МГц заземлять лучше в нескольких точках, в промежуточном диапазоне от 1 до 10 МГц следует использовать одноточечную схему, если наиболее длинный проводник в цепи заземления меньше 1/20 от длины волны помехи. В противном случае используется многоточечная схема [16]. Заземление в одной точке часто используется в военных и космических устройствах [16].

5.2. Заземление гальванически развязанных цепей

Радикальным решением описанных выше проблем (см рис. 17 и рис. 18) является применение гальванической изоляции с отдельным заземлением цифровой, аналоговой и силовой части системы (рис. 19). Силовая часть обычно заземляется через шину защитного заземления. Применение гальванической изоляции позволяет разделить аналоговую и цифровую землю, а это, в свою очередь, исключает протекание по аналоговой земле токов помехи от силовой и цифровой земли (рис.

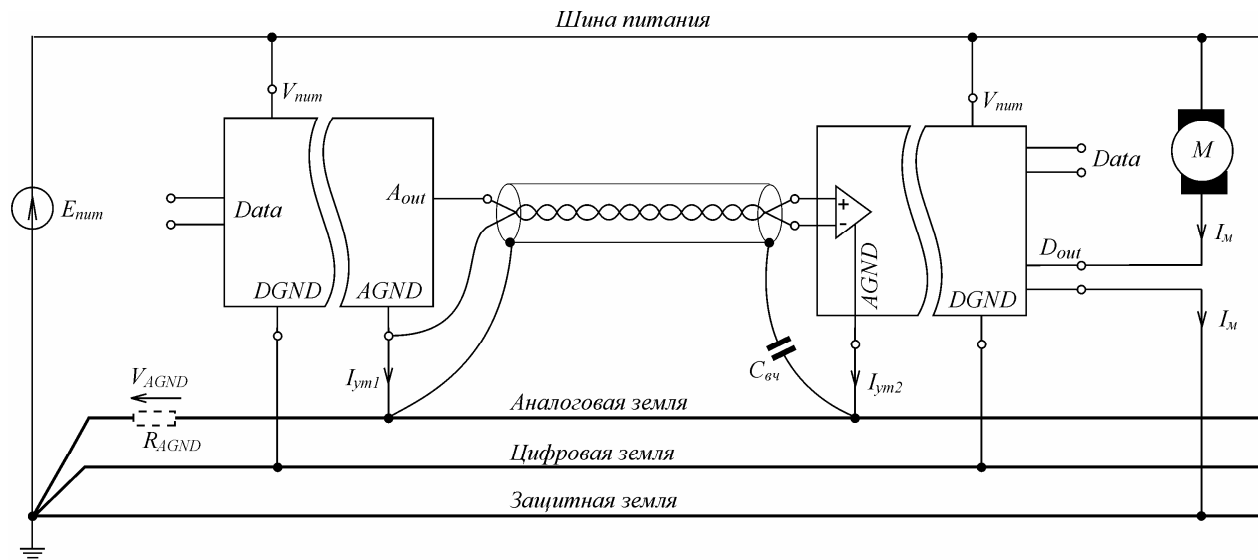


Рис. 19. Пример радикального решения проблемы, показанной на рис. 17 и рис. 18 19).

Аналоговая земля может быть соединена с защитным заземлением через сопротивление R_{AGND} (подробнее см. п. 2.5.3, 3).

5.3. Заземление экранов сигнальных кабелей

Вопросы передачи сигналов по кабелю подробно описаны в работе [2]. Здесь мы рассмотрим только заземление при передаче сигнала по витой экранированной паре, поскольку этот случай наиболее типичен для систем промышленной автоматики.

Поскольку длина сигнального кабеля обычно составляет десятки и сотни метров, он должен быть защищен от переменного магнитного поля (применением витой пары), электростатических зарядов и емкостных наводок (экранированием).

Если частота помехи не превышает 1 МГц, то кабель надо заземлять с одной стороны. Если его заземлить с двух сторон (рис. 20), то образуется замкнутый контур, который будет работать как антенна, принимая электромагнитную помеху (на рис. 20 путь тока помехи показан штриховой линией). Ток помехи, проходя по экрану кабеля, будет наводить на центральных жилах кабеля помеху через взаимную индуктивность.

Если точки заземления концов кабеля разнесены на значительное расстояние, между ними может существовать разность потенциалов, вызванная блуждающими токами в земле или помехами в шине заземления. Блуждающие токи наводятся электрифицированным транспортом, (трамваями, поездами метрополитена и железных дорог), сварочными агрегатами, устройствами электрохимической защиты, естественными электрическими полями, вызванными фильтрацией вод в горных породах, диффузией водных растворов и др.). Особенно большие токи возникают при ударе молнии. Блуждающие токи вызывают разность потенциалов $E_{помехи}$ между концами оплетки кабеля и паразитный ток, который также наводит в центральных жилах кабеля помеху вследствие взаимной индукции.

Оплетку кабеля надо заземлять со стороны источника сигнала. Если заземление сделать со стороны приемника (рис. 21), то ток помехи будет протекать по пути, показанному на рис. 21 штриховой линией, т.е. через емкость между жилами кабеля, создавая на ней и, следовательно, между

дифференциальными входами, напряжение помехи. Поэтому заземлять оплетку надо со стороны источника сигнала (рис. 22). В этом случае путь для прохождения тока помехи отсутствует.

Если источник сигнала не заземлен (например, термопара), то заземлять экран можно с любой стороны, т.к. в этом случае замкнутый контур для тока помехи не образуется.

На частотах более 1 МГц увеличивается индуктивное сопротивление экрана и токи емкостной наводки создают на нем большое падение напряжения, которое может передаваться на внутренние жилы через емкость между оплеткой и жилами. Кроме того, при длине кабеля, сравнимом с длиной волны помехи (длина волны помехи при частоте 1 МГц равна 300 м, на частоте 10 МГц - 30 м) возрастает сопротивление оплетки (см. п. 2.4), что резко повышает напряжение помехи на оплетке. Поэтому на высоких частотах оплетку кабеля надо заземлять не только с обеих сторон, но и в нескольких точках между ними (рис. 23). Эти точки выбирают на расстоянии 1/10 длины волны помехи одна от другой. При этом по оплетке кабеля будет протекать часть тока $I_{земли}$, передающего помеху в центральную жилу через взаимную индуктивность. Емкостной ток также будет протекать по пути, показанному на рис. 21, однако высокочастотная компонента помехи будет ослаблена. Выбор количества точек заземления кабеля зависит от разницы напряжений помехи на концах экрана, частоты помехи, требований к защите от ударов молнии или от величины токов, протекающих через экран в случае его заземления.

Для качественного экранирования в широком спектре частот используют двойной экран (рис. 24) [8]. Внутренний экран заземляют с одной стороны, со стороны источника сигнала, чтобы исключить прохождение емкостной помехи по механизму, показанному на рис. 21, а внешний экран уменьшает высокочастотный наводки.

В качестве промежуточного варианта можно использовать второе заземление экрана через емкость (рис. 22). При этом по высокой частоте экран получается заземленным с двух сторон, по низкой частоте - с одной. Это имеет смысл в том случае, когда частота помехи превышает 1 МГц, а длина кабеля в 10...20 раз меньше длины волны помехи, т.е. когда еще не нужно выполнять заземление в нескольких промежуточных точках. Величину емкости можно рассчитать по формуле $C_{вч} = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c)$, где f - верхняя частота границы спектра помехи, X_c - емкостное сопротивление заземляющего конденсатора (доли Ома). Например, на частоте 1 МГц конденсатор емкостью 0,1 мкФ имеет сопротивление 1,6 Ом. Конденсатор должен быть высокочастотным, с малой собственной индуктивностью.

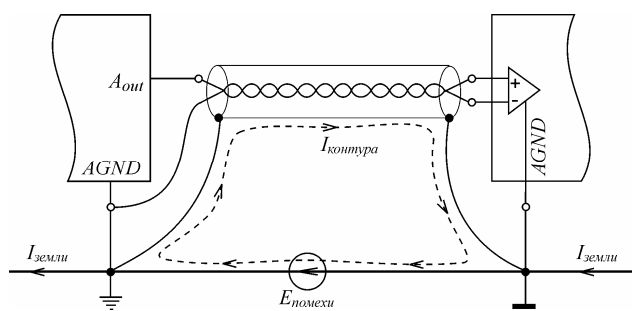


Рис. 20. Пример неправильного заземления экрана кабеля на низких частотах (с двух сторон)

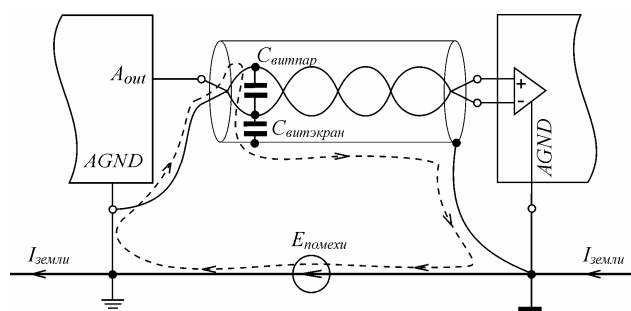


Рис. 21. Пример неправильного заземления экрана кабеля - со стороны приемника сигнала

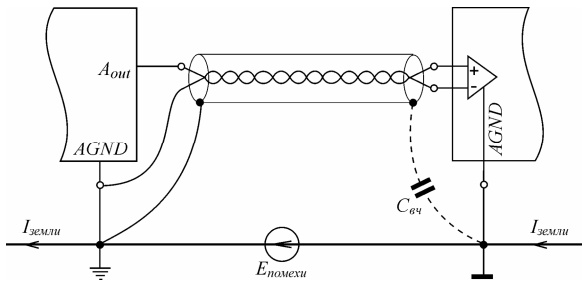


Рис. 22. Правильное заземление. Дополнительное заземление справа используется для высокочастотного сигнала

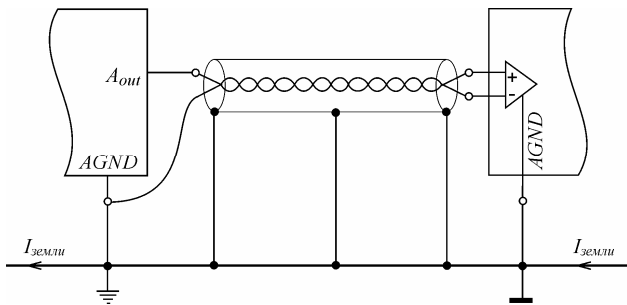


Рис. 23. Заземление экрана длинного кабеля на высоких частотах

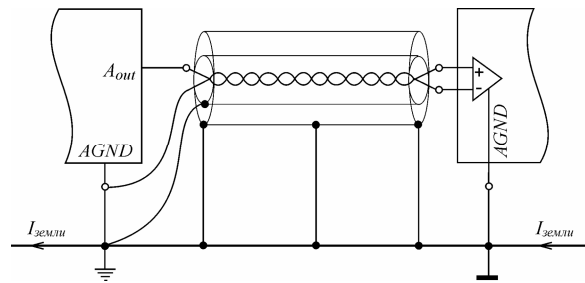


Рис. 24. Двойное экранирование длинного кабеля

Во всех случаях экран должен быть изолирован, чтобы предотвратить случайные его контакты с металлическими предметами и землей.

Отметим, что частота помехи - это частота, которую могут воспринимать чувствительные входы средств автоматики. В частности, если на входе аналогового модуля имеется фильтр, то максимальная частота помехи, которую надо учитывать при экранировании и заземлении, определяется верхней граничной частотой полосы пропускания фильтра.

Поскольку даже при правильном заземлении, но длинном кабеле помеха все равно проходит через экран, то для передачи сигнала на большое расстояние или при повышенных требованиях к точности измерений нужно передавать сигнал в цифровой форме или, еще лучше, через оптический кабель. Для этого можно использовать, например, модули аналогового ввода RealLab! серии NL или ADAM-4000 и оптоволоконные преобразователи интерфейса RS-485, например типа SN-OFC-ST-62.5/125 фирмы НИЛ АП.

5.4. Заземление экранов кабелей систем автоматики на электрических подстанциях

На электрических подстанциях на оплетке (экране) сигнального кабеля автоматики, проложенного под высоковольтными проводами на уровне земли и заземленного с одной стороны, может наводиться напряжение величиной в сотни Вольт [17] во время коммутации тока выключателем. Поэтому с целью электробезопасности оплетку кабеля заземляют с двух сторон.

Для защиты от электромагнитных полей с частотой 50 Гц экран кабеля также заземляют с обеих сторон. Это оправдано в случаях, когда известно, что электромагнитная наводка с частотой 50 Гц больше, чем наводка, вызванная протеканием выравнивающего тока через оплетку.

5.5. Заземление экранов кабелей для защиты от молнии

Для защиты от магнитного поля молнии сигнальные кабели систем автоматики, проходящие по открытой местности, должны быть проложены в металлических трубах из ферромагнитного материала, например, стали. Трубы играют роль магнитного экрана [3]. Нержавеющую сталь использовать нельзя, поскольку этот материал не является ферромагнитным. Трубы прокладывают под землей, а при наземном расположении они должны быть заземлены примерно через каждые 3 метра [8]. Кабель должен быть экранирован и экран заземлен. Заземление экрана должно быть произведено очень качественно с минимальным сопротивлением на землю.

Внутри здания магнитное поле ослабляется в железобетонных зданиях и не ослабляется в кирпичных.

Радикальным решением проблем защиты от молнии является применение оптоволоконного кабеля, который стоит уже достаточно дешево и легко подключается к интерфейсу RS-485.

5.6. Заземление при дифференциальных измерениях

Если источник сигнала не имеет сопротивления на землю, то при дифференциальном измерении образуется "плавающий вход" (рис. 25). На плавающем входе может наводиться статический заряд от атмосферного электричества (см. также п. 4.3 и 2.5.3) или входного тока утечки операционного усилителя. Для отведения заряда и тока на землю потенциальные входы модулей аналогового ввода обычно содержат внутри себя резисторы сопротивлением от 1 МОм до 20 МОм, соединяющие аналоговые входы с землей. Однако при большом уровне помех или большом сопротивлении источника сигнала сопротивление 20 МОм может оказаться недостаточным и тогда необходимо дополнительно использовать внешние резисторы сопротивлением от десятков кОм до 1 МОм или конденсаторы с таким же сопротивлением на частоте помехи (рис. 25).

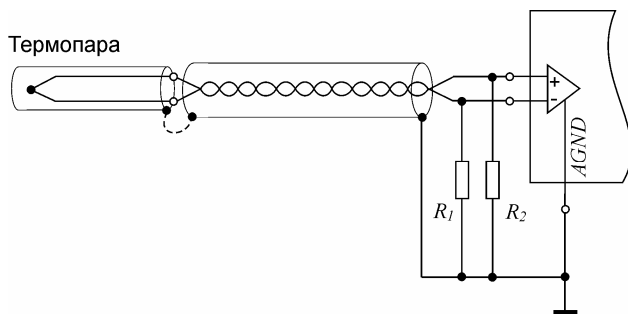


Рис. 25. Заземление аналоговых входов через сопротивления для уменьшения помех на "плавающем" входе

5.7. Заземление интеллектуальных датчиков

В последнее время получили быстрое распространение и развитие так называемые интеллектуальные датчики, содержащие микроконтроллер для линеаризации характеристики преобразования датчика. Интеллектуальные датчики выдают сигнал в цифровой или аналоговой форме [18]. Вследствие того, что цифровая часть датчика совмещена с аналоговой, при неправильном заземлении выходной сигнал имеет повышенный уровень шума. Некоторые датчики, например, фирмы Honeywell, имеют ЦАП с токовым выходом и поэтому требуют подключения внешнего сопротивления нагрузки порядка 20 кОм [18], поэтому полезный сигнал в них получается в форме напряжения, падающего на нагрузочном резисторе при протекании выходного тока датчика.

Рассмотрим пример. На рис. 26 напряжение на нагрузке равно

$$V_{нагр} = V_{out} - I_{нагр} \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2,$$

т. е. $V_{нагр}$ зависит от тока I_2 , который включает в себя ток цифровой земли. Ток цифровой земли содержит шум и, в соответствии с вышеприведенной формулой, влияет на напряжение на нагрузке. Чтобы устранить этот эффект, цепи заземления надо выполнить так, как показано на рис. 27. Здесь ток цифровой земли не протекает через сопротивление R_{21} и поэтому не вносит шум в напряжение сигнала на нагрузке.

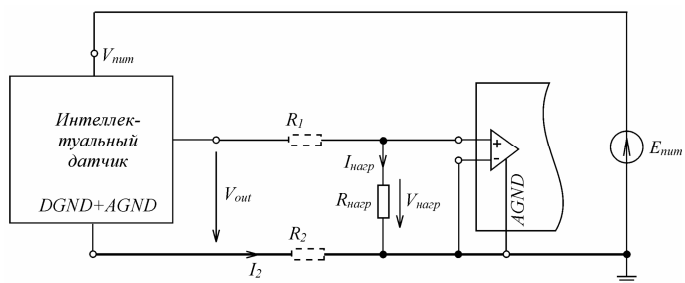


Рис. 26. Неправильное заземление интеллектуальных датчиков

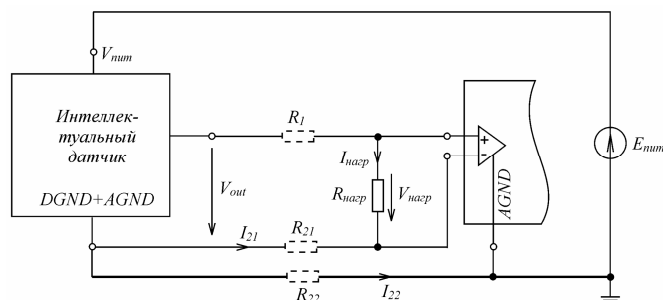


Рис. 27. Правильное заземление интеллектуальных датчиков

5.8. Заземление монтажных шкафов автоматики

Монтаж шкафов автоматики должен учитывать всю вышеизложенную информацию. Однако заранее нельзя сказать однозначно, какие требования являются обязательными, какие - нет, поскольку набор обязательных требований зависит от требуемой точности измерений и от окружающей электромагнитной обстановки. Поэтому нижеприведенные примеры заземления разделены на "правильные" и "ошибочные" условно. При этом "правильный" пример всегда дает меньший уровень помех, чем "неправильный".

На рис. 28 приведен пример, в котором каждое отличие от рис. 29 увеличивает вероятность сбоев цифровой части и ухудшает погрешность аналоговой. На рис. 28 сделаны следующие "неправильные" соединения:

- заземление шкафов выполнено в разных точках, поэтому потенциалы их земель отличаются, см. рис. 17, рис. 18;
- шкафы соединены между собой, что создает замкнутый контур в цепи заземления, см. рис. 16, п. 2.1, 2.3, 4.6;
- проводники аналоговой и цифровой земли в левом шкафу на большом участке идут параллельно, поэтому на аналоговой земле могут появиться индуктивные и емкостные наводки от цифровой земли;
- блок питания (точнее, его вывод "GND") соединен с корпусом шкафа в ближайшей точке, а не на клемме заземления, поэтому по корпусу шкафа течет ток помехи, проникающий через трансформатор блока питания (см. рис. 12, рис. 13);
- используется один блок питания на два шкафа, что увеличивает длину и индуктивность проводника заземления;
- в правом шкафу выводы земли подсоединены не к клемме заземления, а непосредственно к корпусу шкафа. При этом корпус шкафа становится источником индуктивной наводки на все провода, проходящие вдоль его стен;
- в правом шкафу, в среднем ряду, аналоговая и цифровая земли соединены прямо на выходе блоков, что неправильно, см. рис. 17 - рис. 19.

Перечисленные недостатки устранены на рис. 29. Дополнительным улучшением разводки в этом примере было бы применение отдельного проводника заземления для наиболее чувствительных

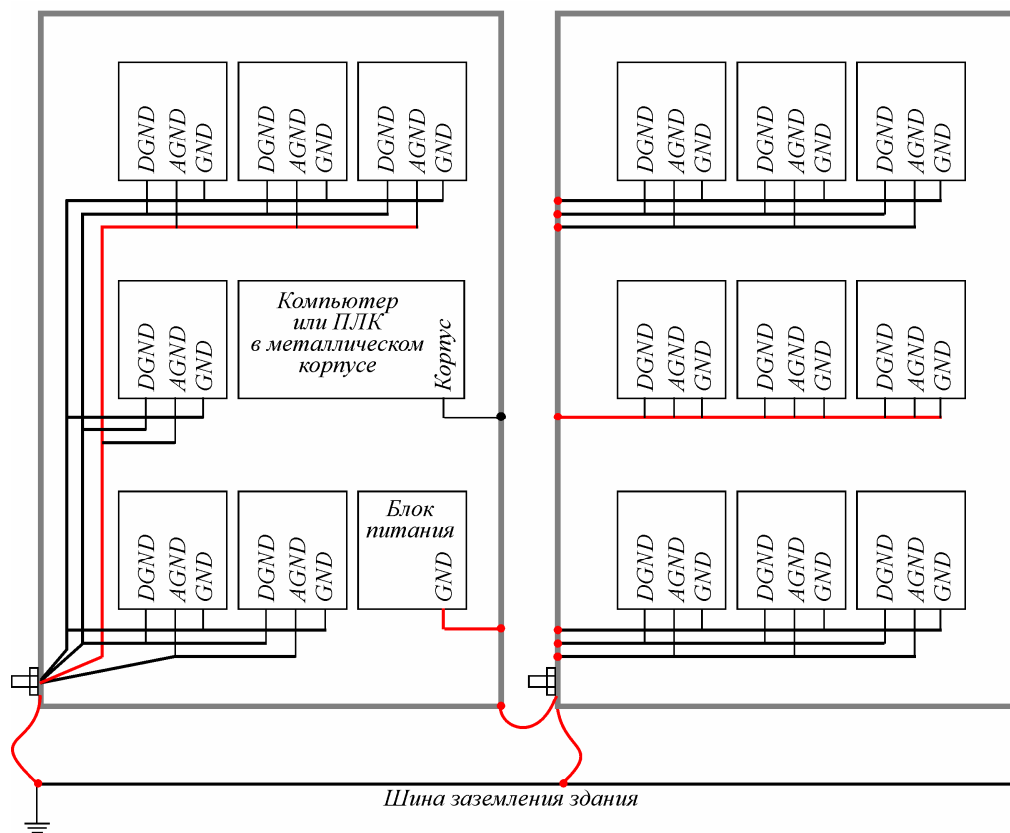


Рис. 28. Пример неправильного заземления шкафов с автоматикой. Красным цветом выделены неправильные соединения. GND - вывод для подключения заземленного вывода питания.

аналоговых модулей ввода.

В пределах шкафа (стойки) желательно группировать аналоговые модули отдельно, цифровые - отдельно, чтобы при прокладке проводов в кабельном канале уменьшить длину участков параллельного прохождения цепей цифровой и аналоговой земли.

5.9. Заземление в распределенных системах управления

В системах управления, распределенных по некоторой территории с характерными размерами в десятки и сотни метров, нельзя использовать модули ввода без гальванической развязки. Только гальваническая развязка позволяет соединять цепи, заземленные в точках с разными потенциалами.

Кабели, проходящие по открытой местности, должны быть защищены от магнитных импульсов во время грозы (см. п.4.3, 5.5) и магнитных полей при коммутации мощных нагрузок (см. п. 5.4). Особое внимание надо уделить заземлению экрана кабеля (см. п. 5.3). Радикальным решением для территориально распределенной системы управления является передача информации по оптическому волокну или радиоканалу.

Неплохие результаты можно получить, отказавшись от передачи информации по аналоговым стандартам в пользу цифровых. Для этого можно использовать модули распределенной системы управления ADAM-4000 фирмы Advantech или RealLab! серии NL фирмы НИЛ АП. Суть этого подхода заключается в том, что модуль ввода располагают возле датчика, уменьшая тем самым длину проводов с аналоговыми сигналами, а в ПЛК передается сигнал по цифровому интерфейсу. Разновидностью этого подхода является применение датчиков со встроенными в них АЦП и цифровым интерфейсом (например, датчиков влажности NL-1DT100 фирмы НИЛ АП).

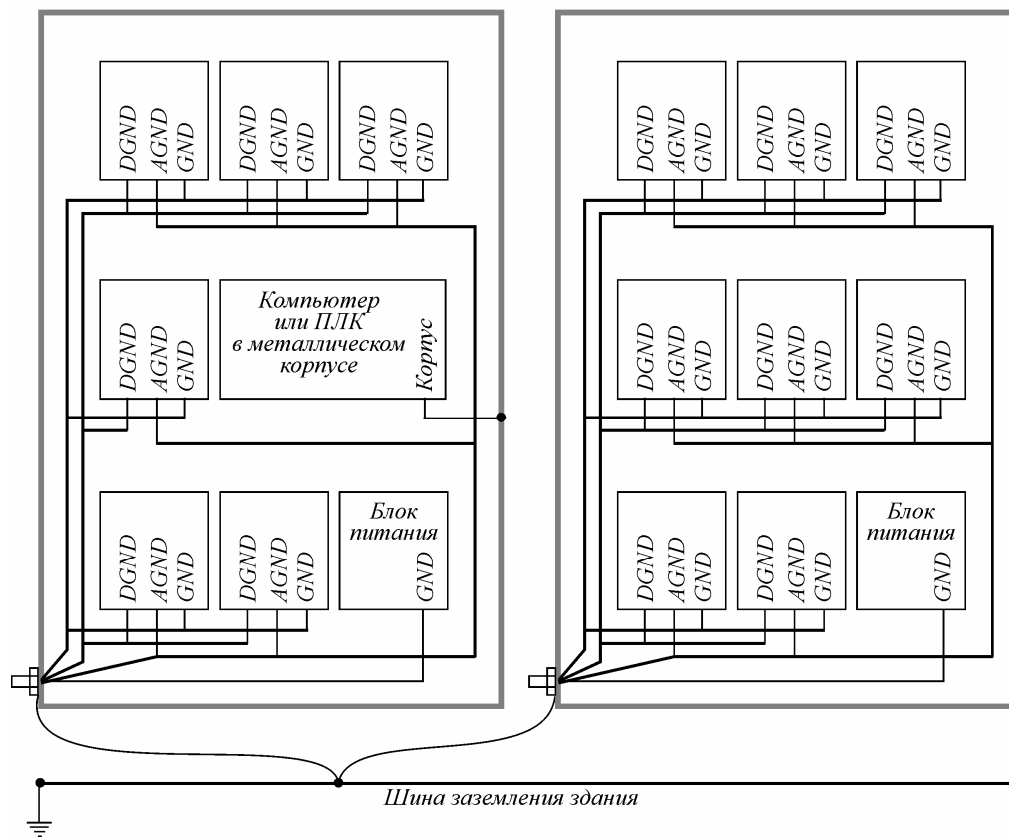


Рис. 29. Пример правильного заземления шкафов с автоматики

5.10. Заземление чувствительных измерительных цепей

Для измерительных цепей с высокой чувствительностью в плохой электромагнитной обстановке лучшие результаты дает применение "плавающей" земли (см. п. 2.5.3) совместно с батарейным питанием [19] и передачей информации по оптоволокну.

5.11. Заземление исполнительного оборудования и приводов АСУ ТП

Цепи питания двигателей с импульсным управлением, двигателей сервоприводов, исполнительных устройств с ШИМ-управлением должны быть выполнены витой парой для уменьшения магнитного поля, а также экранированы для снижения электрической компоненты излучаемой помехи. Экран кабеля должен быть заземлен с одной стороны. Цепи подключения датчиков таких систем должны быть помещены в отдельный экран и по возможности пространственно отдалены от исполнительных устройств.

5.12. Заземление в промышленных сетях

Промышленная сеть на основе интерфейса RS-485 выполняется экранированной витой парой с обязательным применением модулей гальванической развязки (рис. 30). Для небольших расстояний (порядка 10 м) при отсутствии поблизости источников помех экран можно не использовать. При больших расстояниях (стандарт допускает длину кабеля до 1,2 км) разница потенциалов земли в удаленных друг от друга точках может достигать несколько единиц и даже десятков вольт (см. п. 5.3). Поэтому, чтобы предотвратить протекание по экрану тока, выравнивающего эти потенциалы, экран кабеля нужно заземлять *только в одной точке* (безразлично, в какой). Это также предотвратит появление замкнутого контура большой площади в цепи заземления, в котором за счет электромагнитной индукции может наводиться ток большой величины при ударах молнии или

коммутации мощных нагрузок. Этот ток через взаимную индуктивность наводит на центральной паре проводов э. д. с., которая может вывести из строя микросхемы драйверов порта.

При использовании неэкранированного кабеля на нем может наводиться большой статический заряд (несколько киловольт) за счет атмосферного электричества, который может вывести из строя элементы гальванической развязки. Для предотвращения этого эффекта изолированную часть устройства гальванической развязки следует заземлить через сопротивление, например, 0,1...1 МОм. Сопротивление (на рис. 30 показано штриховой линией) снижает также вероятность пробоя при повреждениях заземления или большом сопротивлении гальванической изоляции в случае применения экранированного кабеля.

Особенно сильно проявляются описанные выше эффекты в сетях Ethernet с коаксиальным кабелем, когда при заземлении в нескольких точках (или отсутствии заземления) во время грозы выходят из строя сразу несколько сетевых Ethernet-плат.

В сетях Ethernet с малой пропускной способностью (10 Мбит/с) заземление экрана следует выполнять только в одной точке. В Fast Ethernet (100 Мбит/с) и Gigabit Ethernet (1 Гбит/с) заземление экрана следует выполнять в нескольких точках, пользуясь рекомендациями п. 5.3.

При прокладке кабеля на открытой местности нужно использовать все правила, описанные в п. 5.3.

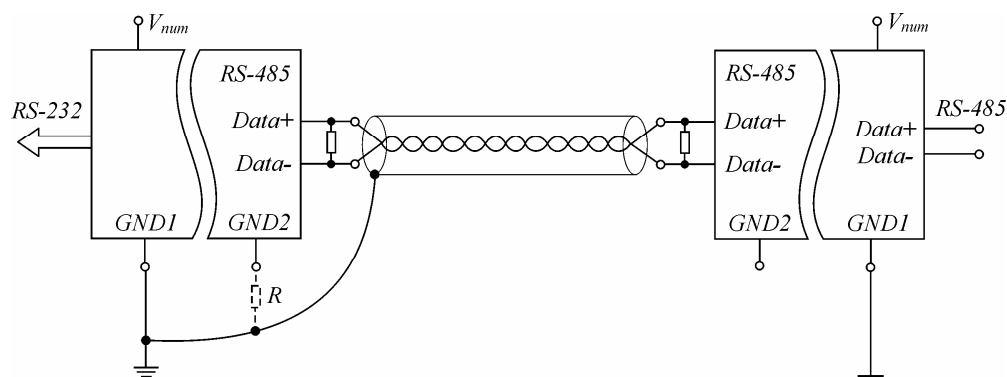


Рис. 30. Заземление в промышленной сети на основе интерфейса RS-485

5.13. Заземление на взрывоопасных промышленных объектах

На взрывоопасных промышленных объектах при монтаже заземления многожильным проводом не допускается применение пайки для спаивания жил между собой, поскольку вследствие хладотекучести припоя возможно ослабление мест контактного давления в винтовых зажимах.

Экран кабеля интерфейса RS-485 заземляется в одной точке, вне взрывоопасной зоны. В пределах взрывоопасной зоны он должен быть защищен от случайного соприкосновения с заземленными проводниками. Искробезопасные цепи не должны заземляться, если этого не требуют условия работы электрооборудования (ГОСТ Р 51330.10, п.6.3.5.2).

Искробезопасные цепи должны быть смонтированы таким образом, чтобы наводки от внешних электромагнитных полей (например, от расположенного на крыше здания радиопередатчика, от воздушных линий электропередачи или близлежащих кабелей для передачи большой мощности) не создавали опасного напряжения или тока в искробезопасных цепях. Это может быть достигнуто экранированием или удалением искробезопасных цепей от источника электромагнитной наводки.

При прокладке в общем пучке или канале кабели с искроопасными и искробезопасными цепями должны быть разделены промежуточным слоем изоляционного материала или заземленной металлической перегородкой. Никакого разделения не требуется, если используются кабели с металлической оболочкой или экраном.

Заземленные металлические конструкции не должны иметь разрывов и плохих контактов между собой, которые могут искрить во время грозы или при коммутации мощного оборудования.

На взрывоопасных промышленных объектах используются преимущественно электрические распределительные сети с изолированной нейтралью, чтобы исключить возможность появления искры при коротком замыкании фазы на землю и срабатывания предохранителей защиты при повреждении изоляции.

Для защиты от статического электричества используют заземление, описанное в п. 4.4. Статическое электричество может быть причиной воспламенения взрывоопасной смеси. Например, при емкости человеческого тела 100...400 пФ и потенциале заряда 1 кВ энергия искрового разряда с тела человека будет равна 50...200 мкДж, что может быть достаточно для воспламенения взрывоопасной смеси группы ПС (60 мкДж), см. [20].

6. Верификация заземления

Для обнаружения проблем заземления используют осциллографы с "плавающим" (батарейным) питанием и самописцы.

Самописцы [11], помогают найти плохие ("шуршащие") контакты в цепи заземления и питания аппаратуры, редко появляющиеся сбои в системах автоматики. Для этого с помощью многоканального компьютерного самописца (например, серии RealLab!) контролируют интересующий параметр, напряжение в цепи низковольтного питания, в питающей сети 220 В и разность напряжений между несколькими точками системы заземления. Непрерывная запись параметров процесса и напряжений позволяет установить причинно-следственную связь между сбоями технологических параметров и выбросами напряжения в цепи питания и заземления.

Осциллографы с "плавающим" питанием [19] позволяют контролировать величину и частоту помехи на клеммах заземления в монтажных шкафах автоматики, оценить уровень и найти источник магнитного поля помехи с помощью антенны из нескольких витков провода, подключенной к осциллографу. Аналогично можно найти источник электрического поля с помощью пластины (обкладки конденсатора).

Идеальным прибором для исследования помех мог бы быть миниатюрный цифровой осциллограф с малой емкостью на землю и на руки оператора, с батарейным питанием и передающий сигнал в компьютер через оптический кабель, имеющий потенциальный, токовый и электрометрический входы.

7. Выводы: правила заземления

7.1. Радикальные методы решения проблем заземления

1. Используйте модули ввода-вывода только с гальванической развязкой.
2. Не применяйте длинных проводов от аналоговых датчиков. Располагайте модули ввода в непосредственной близости к датчику, а сигнал передавайте в цифровой форме.
3. Используйте датчики с цифровым интерфейсом.
4. На открытой местности и при больших дистанциях используйте оптический кабель вместо медного.
5. Используйте только дифференциальные (не одиночные) входы модулей аналогового ввода.

7.2. Другие советы

6. Используйте в пределах вашей системы автоматики отдельную землю из медной шины, соединив ее с шиной защитного заземления здания только в одной точке.
7. Аналоговую, цифровую и силовую землю системы соединяйте только в одной точке. Если этого сделать невозможно, используйте медную шину с большой площадью поперечного сечения для уменьшения сопротивления между разными точками подключения земель.

8. Следите, чтобы при монтаже системы заземления случайно не образовался замкнутый контур.
9. Не используйте по возможности землю как уровень отсчета напряжения при передаче сигнала.
10. Если провод заземления не может быть коротким или если по конструктивным соображениям необходимо заземлить две части гальванически связанной системы в разных точках, то эти системы нужно разделить с помощью гальванической развязки.
11. Цепи, изолированные гальванически, нужно заземлять, чтобы избежать накопления статических зарядов.
12. Экспериментируйте и пользуйтесь приборами для оценки качества заземления. Допущенные ошибки не видны сразу.
13. Пытайтесь идентифицировать источник и приемник помех, затем нарисуйте эквивалентную схему цепи передачи помехи с учетом паразитных емкостей и индуктивностей.
 - 1.1 Пытайтесь выделить самую мощную помеху и в первую очередь защищайтесь от нее.
 - 1.2 Цепи с существенно различающейся мощностью следует заземлять группами, в каждой группе блоки с примерно равной мощностью.
 - 1.3 Заземляющие проводники с большим током должны проходить отдельно от чувствительных проводников с малым измерительным сигналом.
 - 1.4 Провод заземления должен быть по возможности прямым и коротким.
 - 1.5 Не делайте полосу пропускания приемника сигнала шире, чем это надо из соображений точности измерений.
 - 1.6 Используйте экранированные кабели, экран заземляйте в одной точке, со стороны источника сигнала на частотах ниже 1 МГц и в нескольких точках - на более высоких частотах.
 - 1.7 Для особо чувствительных измерений используйте "плавающий" батарейный источник питания.
 - 1.8 Самая "грязная" земля – от сетевого блока питания. Не совмещайте ее с аналоговой землей.
 - 1.9 Экраны должны быть изолированными, чтобы не появилось случайных замкнутых контуров, а также электрического контакта между экраном и землей.
 - 1.10 Прочтите также статьи [2 и 21].

8. Список литературы

1. Rebeck, A.W. Proper grounding for the automation industry. - Pulp and Paper Industry Technical Conference, Portland, OR 2001, 18-22 June 2001, p. 110-113.
2. Денисенко В.В., Халявко А.Н. Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматики. - СТА, №1, 2001, с. 68-75.
3. Vijayaraghavan G., Brown M., Barnes M. Practical grounding, bonding, shielding, and surge protection. – Elsevier, Newnes, 2004. p.237.
4. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. М., 1998, 374 с.
5. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), 6-е издание. М.: Энергосервис, 2002, 608 с.
6. Nelson J. P. High-Resistance Grounding of Low-Voltage Systems: A Standard for the Petroleum and Chemical Industry. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, № 4, 1999 pp. 941-948.
7. Денисенко В.В. Топологическое преобразование, устраняющее незаземленные источники ЭДС в электрической цепи. - Радиотехника, 1986, №8, с.31-33.
8. Zipse D.W., Earthing-Grounding methods: a primer. - Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2002, May 5-8, 2002 p. 158 - 177.
9. Соколов С. Заземление и экранирование зданий для размещения оборудования систем свя-

зи. – Электроника: НТБ, №4, 2005, с.58-59.

10. Liang C., Wei Z. EMI in hydropower plant and EMC design for its computer monitoring and control system. - China Electromagnetic Compatibility, 2002, 3rd International Symposium, 21-24 May 2002 p. 378 - 381.
11. Burluson, J. Wiring and grounding to prevent power quality problems with industrial equipment. Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference, 8-9 May, 1991, p. 5/1 - 5/6.
12. Durham, M.O.; Arnold, R.G. Data quality and grounding considerations for a medical facility. 2002. MWSCAS-2002. The 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Vol. 2, 4-7 Aug. 2002 p. II-184 - II-187.
13. Reducing Noise in Switching for Test Systems Application Note 1441-2, Agilent Technologies, p. 14.
14. Kosc D., Hamer P. S. Grounding practices - A system-wide systematic approach. - IEEE Trans. on Industry Applications., Vol. 39, No. 5, 2003, p. 1475 - 1485.
15. Low level measurements. Keithley, 5-th edition.
16. Барнс Д. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. М.: Мир, 1990, 239 с.
17. Ke H., Lee W.-J., Chen M.-S., Liu J.-P., Yang J. S. Grounding techniques and induced surge voltage on the control signal cables. - IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 4, 1998, p. 663- 668.
18. Caruso M., Analog grounding considerations. - Honeywell, AN-103.
19. Floating oscilloscope measurements ... and operator protection - Tektronix Technical Brief, 1998.
20. Денисенко В.В. Выбор аппаратных средств автоматизации опасных промышленных объектов. - СТА, №4, 2005, с. 86-94.
21. Гарманов А. Принципы обеспечения электросовместимости измерительных приборов. - СТА, №4, 2003, с. 64-72 и №1, 2004 г., с. 62-68.
22. Стандарт ANSI/TIA/EIA-607-1994 (Август 1, 1994). Требования к телекоммуникационной системе выравнивания потенциалов и заземления коммерческих зданий.

Автор - сотрудник НИЛ АП
Тел.: (8634) 376-157, факс: 324-139
E-mail: info@RLDA.ru