

Заземление чувствительной электронной аппаратуры

“Заземление является самой плохо понимаемой темой в автоматизации... Решение проблем заземления в настоящее время находится на грани между пониманием, интуицией и везением ”

Виктор Денисенко докт. техн. наук,

Главный конструктор

Научно-исследовательской лаборатории автоматизации проектирования

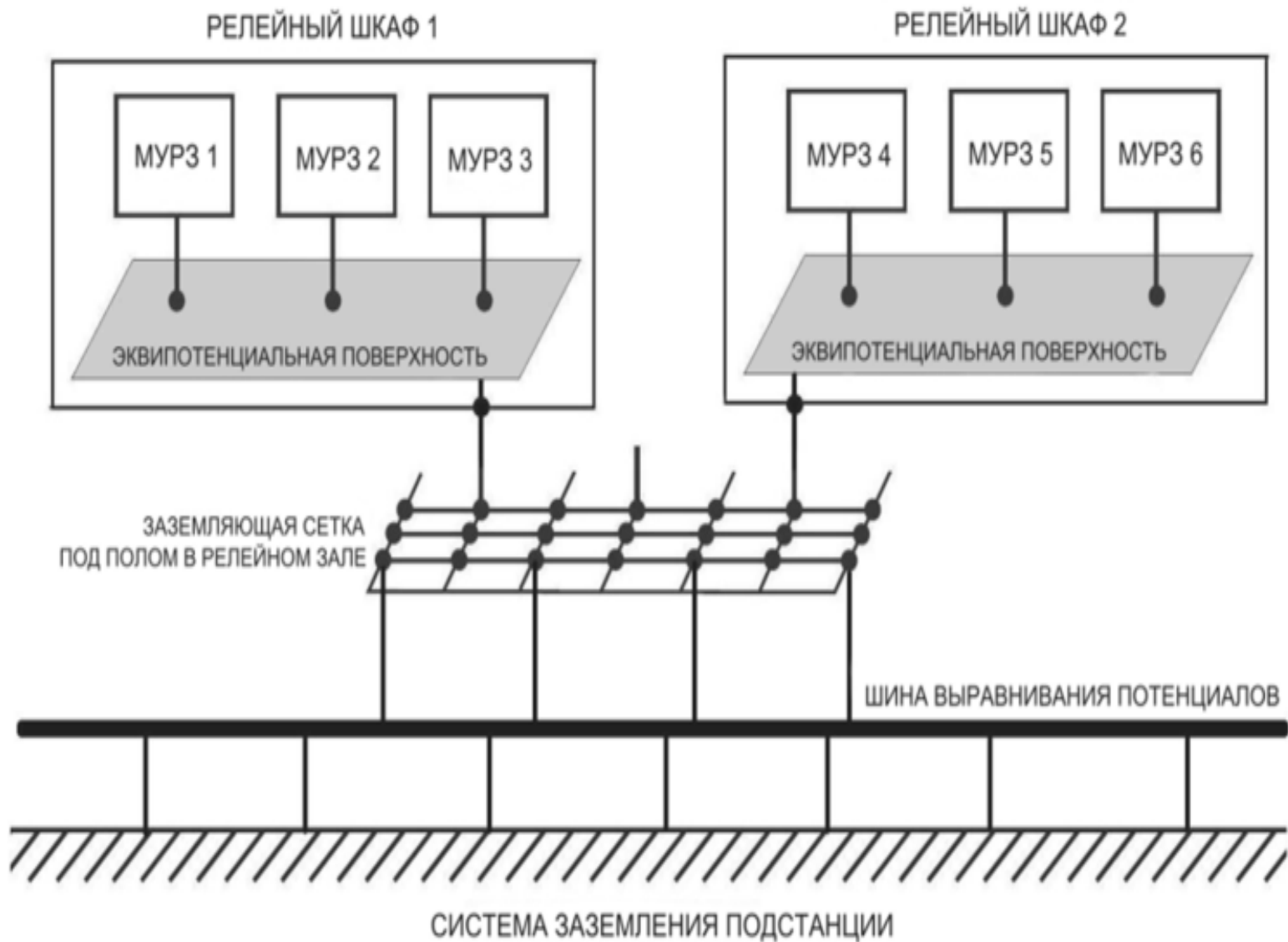


Рис. 4.2. Схема многоточечного заземления МУРЗ с использованием эквипотенциальной поверхности

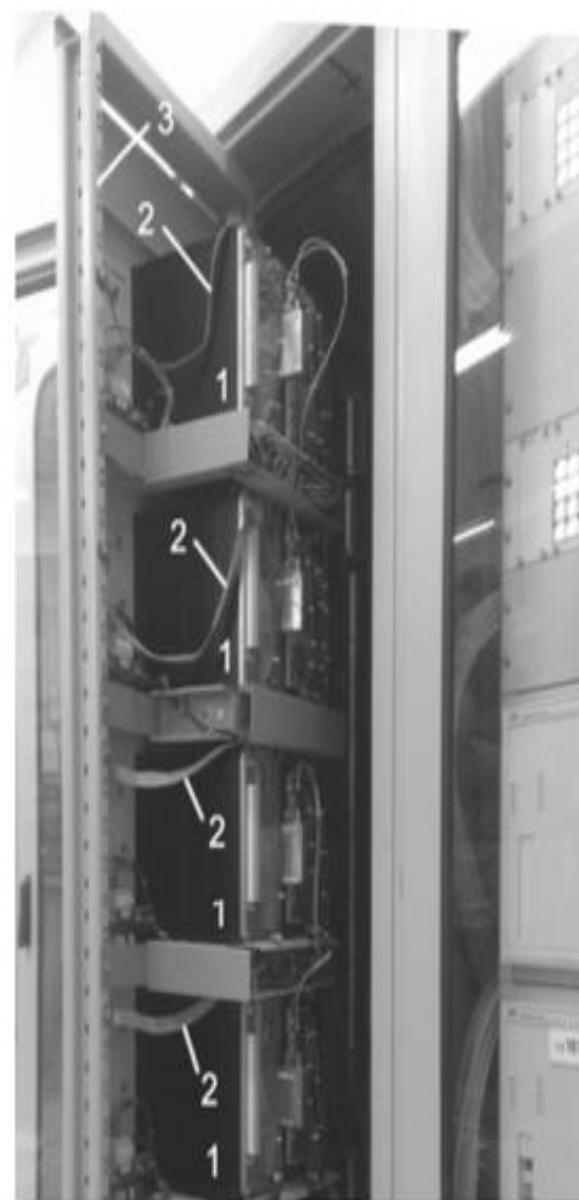


Рис. 4.2. Устройство заземления МУРЗ, установленных в металлических шкафах, с использованием эквипотенциальной поверхности. 1 - МУРЗ в металлических корпусах; 2 - заземляющие медные шинки; 3 - элемент конструкции металлического шкафа, выполняющего роль эквипотенциальной поверхности

Современная, считающаяся правильно спроектированной система заземления МУРЗ выполняется многоточечной с использованием эквипотенциальной поверхности, рис. 4.2. В качестве эквипотенциальной поверхности могут использоваться металлические элементы конструкций релейных шкафов, рис. 4.3.

К сожалению, на объектах электроэнергетики (подстанциях и электростанциях), имеющих значительную территорию, даже такие, методы заземления не являются достаточно эффективными, ввиду неизбежности заземление различных электроустановок, расположенных на большом удалении друг от друга, в различных точках общего контура заземления. При этом, эти точки заземления приобретают значительную разность потенциалов в момент протекания больших импульсных токов через контур заземления. Если эти электроустановки не имеют между собой гальванической связи, например, как реле защиты, соединенные между собой волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС), то эта разность потенциалов особой роли не играет. Но, если реле защиты, расположенные на удалении друг от друга, соединены между собой посредством проводной системы связи (то есть витой парой и обычным каналом связи ЕШете^ на который в последнее время переходят с целью удешевления систем электроснабжения), то к низковольтным узлам этой системы связи окажется приложенным высокое напряжения, которое неизбежно приведет к повреждению этой системы, то есть, во многих случаях, к отказу релейной защиты, рис. 4.4.

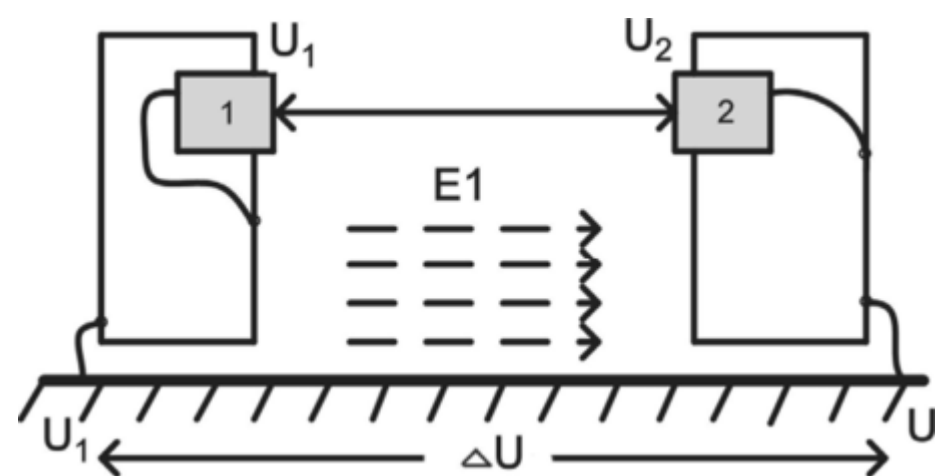


Рис. 4.4. Схема подключения двух МУРЗ (1 и 2), расположенных на значительном расстоянии друг от друга, с неизолированным каналом связи (витая пара и сеть ЕШегпеО

По свидетельству [4.1]: «чем больше площадь территории защищаемого объекта, тем больший потенциал для проблем».

Как известно, существует два вида заземления: так называемое функциональное (или рабочее) и защитное. Как следует уже из названий этих видов заземления, первое из них предназначено лишь для обеспечения нормального функционирования (работы) оборудования (ПУЭ 1.7.30), а второе - исключительно для обеспечения электробезопасности персонала (ПУЭ 1.7.29). В [4.2] утверждается, что функциональное заземление необходимо для обеспечения работоспособности МУРЗ и рассматриваются различные варианты выполнения такого заземления и методы его испытания. Действительно, на некоторых печатных платах МУРЗ имеются зачищенные и покрытые слоем серебра участки печатных проводников, увеличенной ширины, которые при установке платы в корпусе приходят в соприкосновение со специальными пружинами, обеспечивающими контакт этих печатных проводников с заземленным корпусом МУРЗ, рис. 4.5.

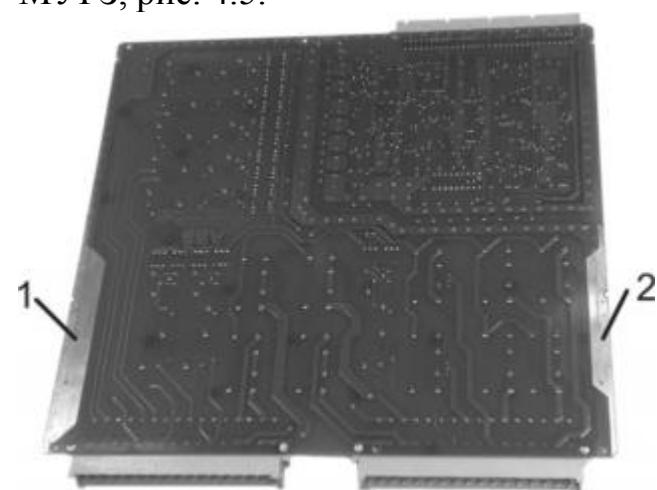


Рис. 4.5. Печатная плата МУРЗ с зачищенными участками печатного монтажа (1 и 2), контактирующими с заземленным корпусом посредством специальной пружины

Но действительно ли функциональное заземление необходимо для нормальной работы МУРЗ, все входные и выходные цепи которого хорошо изолированы от земли и от других электроустановок (при использовании ВОЛС для связи между терминалами)? Ведь работоспособность внутренних электронных цепей МУРЗ никак не связана с наличием или отсутствием заземления. Что же касается эффективности защиты чувствительных электронных цепей МУРЗ от воздействия внешних электромагнитных полей с помощью металлического корпуса, призванного выполнять роль так называемой «клетки Фарадея», то эта эффективность никак не зависит от наличия или отсутствия заземления. То есть заземление корпуса МУРЗ никак не влияет на эффективность экранирующего эффекта корпуса. С другой стороны, если

сигналы помех поступают на электронные цепи МУРЗ, расположенные внутри корпуса, по кабелям, то каким образом заземление его корпуса предотвратит воздействие этих помех (особенно помех дифференциального типа)? Ответ очевиден: никак! Более того, можно утверждать, что заземление корпусов МУРЗ лишь усугубляет ситуацию и снижает помехоустойчивость релейной защиты. Так, например, в соответствии со стандартом IEC 60255-22-4 импульсным напряжением наносекундного диапазона с амплитудой 4 кВ проверяются все входные и выходные цепи реле защиты, за исключением портов цифровой связи. То есть, заранее предполагается, что эти порты и цепи не выдержат таких испытаний. Но при использовании обычной витой пары и присоединения этих цепей к сети Ethernet вместо использования ВОЛС, к этим цепям неизбежно будет приложено высокое напряжение в случае, изображенном на рис. 4.4. А как изменится ситуация, если корпуса МУРЗ будут тщательно изолированы от системы заземления? Если пренебречь паразитными емкостями (а в рассмотренном ниже варианте конструктивного исполнения ими действительно можно будет пренебречь), то исходя из того же рис. 4.4, к портам цифровой связи высокое напряжение приложено не будет.

Еще одна проблема принятой сегодня системы заземления - электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ), в частности, его так называемая «быстрая» составляющая - E1, которая характеризуется коротким, но очень мощным импульсом электрического поля у поверхности Земли, напряженностью до 50 кВ/м с передним фронтом около нескольких наносекунд и задним фронтом около одной микросекунды [4.3]. Это поле имеет сложную структуру и содержит вертикальную и горизонтальную составляющие, которые обуславливают появление значительных импульсов тока в протяженных проводниках, в частности, в системах заземления, выполняющих роль больших антенн, поглощающих электромагнитную энергию на большой площади. В случае разряда молнии или пробоя изоляции высоковольтного электрооборудования, имеющего функционально заземленные части (например, заземленные нулевые точки обмоток высоковольтных трансформаторов, соединенных в звезду) система заземления выполняет роль электрода, имеющего нулевой потенциал. В большинстве нормативных документов, даже таких серьезных, как [4.4], не делается никакой разницы между воздействием на систему заземления разряда молнии и компонента E1 ЭМИ ЯВ. Например, в документе [4.4] дословно записано следующее: *“Так как влияние наведенной электромагнитным импульсом помехи подобно той, что наблюдается при разрядах молнии, система молниеотводов и система заземляющих электродов - главные интерфейсы системы защиты от электромагнитного импульса”*.

Однако, на самом деле имеется существенная разница между высоковольтным разрядом молнии на систему заземления, имеющую нулевой потенциал или пробоем изоляции высоковольтного оборудования на землю и импульсом E1 мощного электрического поля, часть которого направлена параллельно поверхности земли (то есть параллельно сетке системы заземления. При возникновении ЭМИ ЯВ система заземления уже перестает исполнять роль поверхности с нулевым потенциалом и начинает играть роль источника высокого импульсного напряжения, прикладываемого к электрооборудованию, заземленному в различных частях системы заземления и имеющих гальваническую связь между собой, рис. 4.4. Поскольку речь идет об очень мощном и очень коротком (то есть имеющем высокочастотные свойства) импульсе, создающем в воздухе напряженность поля, достигающую 50 кВ/м, то становится понятным, что даже на небольшом участке стандартной системы заземления может появиться очень высокая разность потенциалов, намного превышающая значение, возникающее при протекании токов молнии через систему заземления. Поэтому, требования к электрической прочности изоляции входных и выходных цепей МУРЗ выдерживать испытательные импульсные напряжения наносекундного диапазона с амплитудой 4 кВ, указанные в стандарте IEC 60255-22-4, уже явно не достаточны для обеспечения работоспособности МУРЗ. Кроме того, мы неспроста упомянули выше о корпусе МУРЗ как об элементе, «призванном выполнять роль «клетки Фарадея», а не «выполняющего роль «клетки Фарадея». Потому, что на самом

деле металлические корпуса современных МУРЗ довольно плохо справляются с ролью «клетки Фарадея» из-за наличия в них больших вырезов для экранов, кнопочных панелей, клеммных колодок, рис. 4.6.



Рис. 4.6. Современные терминалы МУРЗ в корпусах с многочисленными окнами, вырезами и отверстиями под экраны, кнопки, индикаторные панели и другие элементы

Параметры составляющей E1 ЭМИ ЯВ таковы, что все эти вырезы в металлическом корпусе обуславливают проникновения мощной электромагнитной волны с эквивалентной частотой доходящей до десятков гигагерц, во внутрь корпуса МУРЗ.

Стандартные металлические шкафы, в которых сегодня размещаются комплекты устройств релейной защиты, также мало пригодны для защиты МУРЗ от высокочастотных электромагнитных полей, поскольку имеют полностью открытую нижнюю (или верхнюю) часть для ввода многочисленных кабелей, а иногда и стеклянные двери через которые удобно наблюдать за экранами и индикаторами МУРЗ, не открывая их, рис. 4.7. Поэтому так или иначе, необходимо искать альтернативные решения для обеспечения такой защиты. Таким образом, становится очевидным, что действительно необходимым является лишь защитное заземлении корпусов МУРЗ, предохраняющее персонал от поражения электрическим током при ПО прикосновении к корпусу МУРЗ, но никак не функциональное заземление.



Рис. 4.7. Терминалы МУРЗ, установленные в стандартных шкафах со стеклянными дверями

Что касается защиты от воздействия компонента Е1 ЭМИ ЯВ, то оказывается, что известные технические решения по системам заземления, применяемые в электроэнергетике, являются не просто бесполезными из-за высокого сопротивления на эквивалентной частоте в десятки гигагерц, но и опасными для чувствительной электронной аппаратуры. Таким образом, требование заземления корпусов микропроцессорных устройств релейной защиты, приходит в противоречие с требованием обеспечения их устойчивости к воздействию ЭМИ ЯВ.

По утверждению [4.2] функциональное заземление невозможно рассматривать в отрыве от защитного заземления, не нарушая стандартов системы безопасности труда. Позволим себе усомниться в справедливости такого утверждения и рассматривать эти два вида заземления как отдельные и независимые друг от друга. При таком подходе появляется возможность организации заземления МУРЗ на новом принципе, который основан на рекомендации IEC 60364-5-

- 111
- 548 [4.5] о повышении помехоустойчивости оборудования информационных технологий путем отделения этого оборудования от источников возмущения.

Поскольку в рассматриваемом случае таким «источником возмущения» является функциональное заземление, то наше предложение заключается в отделении МУРЗ от него, рис. 4.8.

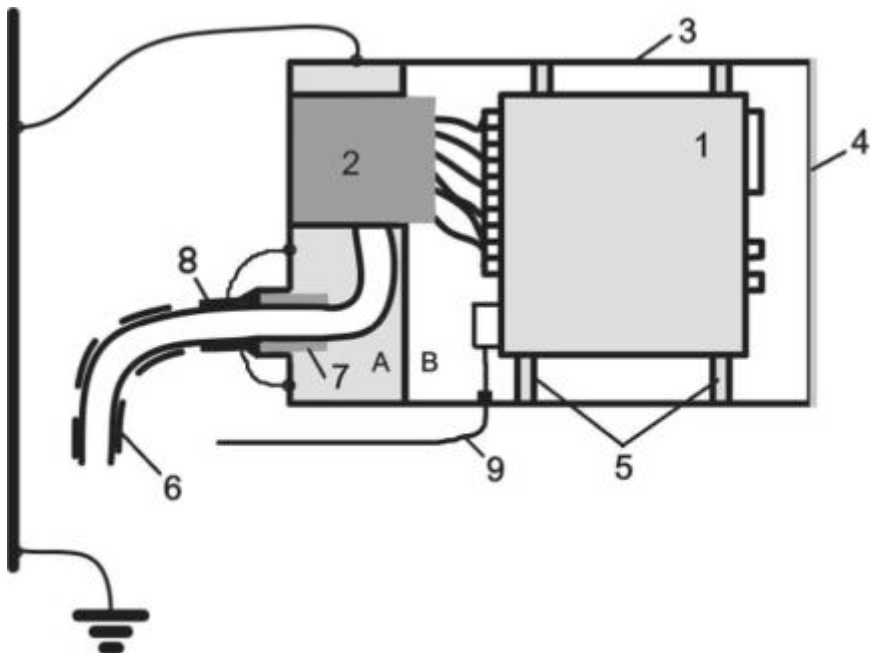


Рис. 4.8. Предлагаемый принцип компоновки МУРЗ, обеспечивающий повышенную устойчивость ко всем видам электромагнитных воздействий, включая ЭМИ ЯВ

А - «грязный» отсек; В - «чистый» отсек; 1 - терминал МУРЗ в тщательно изолированном пластмассовом корпусе; 2 - фильтр ЭМИ ЯВ; 3 - стальной корпус; 4 - дверца стального корпуса; 5 - изоляторы; 6 - контрольный кабель с двойным экраном; 7 - проходной изолятор; 8 - металлическая муфта для сочленения оплетка кабеля со стальным корпусом; 9 - оптоволоконная линия связи

Согласно этому предложению, стальной контейнер 3, рис. 4.8, с минимальным количеством отверстий разделен внутренней переборкой на две зоны: А - «грязную» и В - «чистую». Терминал МУРЗ в пластмассовом корпусе размещен в чистой зоне, свободной от электромагнитных излучений. Контейнер 3 снабжен дверцей 4, обеспечивающей доступ персонала к лицевой панели МУРЗ во время профилактических работ. Контейнер 3 заземлен с соблюдением всех традиционных норм и правил выполнения заземления, что обеспечивает соблюдение требований техники безопасности. При наличии достаточно большого расстояния между МУРЗ и внутренними стенками заземленного металлического контейнера, например, 5-7 см, паразитная емкость электронных цепей МУРЗ на землю будет очень незначительной и ее влиянием можно пренебречь. Что касается самого корпуса МУРЗ, то он должен быть тщательно изолированным (выполненным из пластмассы), с принятием дополнительных мер по предотвращению выноса опасного потенциала на поверхность этого корпуса. Такими мерами могут быть: закрытие экрана дополнительной прозрачной пластмассовой панелью; вывод управляющих кнопок на поверхность корпуса через изоляционные проставки; подвод света со светодиодов на световое табло, расположенное на поверхности корпуса, через жесткие пластмассовые световоды; использование изолированного оптического порта для подключения внешнего компьютера к МУРЗ. В общем, это такие же простые приемы обеспечения безопасности, которые приняты при отсутствии заземления в ручных электроинструментах с так называемой двойной изоляцией и не представляют никакой особой сложности в их практической реализации.

Что касается снятия возможного электростатического заряда, который может накопиться на изолированном корпусе МУРЗ, то эта проблема может быть решена нанесением тонкого высокоомного полупроводящего покрытия на внутреннюю поверхность пластмассового корпуса и соединением ее с заземленным стальным корпусом через специальный высоковольтный (50 - 100 кВ) высокоомный (около 50 МОм) резистор. Электростатический заряд будет стекать на землю через такой резистор. Технология нанесения таких покрытий хорошо отработана и широко применяется в современной электронной аппаратуре. Компактные высокоомные резисторы на напряжение 50 - 100 кВ также не являются дефицитом и выпускаются многими компаниями, например, Caddock Electronics, Arcol, Ohmite, Welwyn Components и др.

По нашему мнению, предлагаемое техническое решение позволит обеспечить высокий уровень помехоустойчивости МУРЗ и в реально существующих сегодня естественных условиях эксплуатации, и в экстремальных условиях при воздействии ЭМИ ЯВ или других технических средств деструктивного дистанционного электромагнитного воздействия [4.2]. При этом затраты на реализацию предложенного технического решения не будут какими-то неподъемными для электроэнергетики. Они могут быть даже существенно меньше, чем затраты на реконструкцию старой системы заземления на многих объектах электроэнергетики, не обеспечивающей нормальное функционирование МУРЗ в существующих условиях эксплуатации.

https://studref.com/475426/tehnika/zazemlenie_chuvstvitelnoy_elektronnoy_apparatury?ysclid=lq3kj9ikxq3670187

Гальваническая развязка

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

Для осуществления гальванической развязки (изоляции) необходимо выполнить подачу энергии и передачу сигнала в изолированную часть цепи. Подача энергии выполняется посредством 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 приёмника аналогового сигнала (например, на рис. 3 синфазное напряжение на термопаре относительно Земли не влияет на дифференциальный сигнал на входе модуля ввода);
- защищает от пробоя вследствие синфазного перенапряжения входные и выходные цепи модулей ввода и вывода (например, на том же рис. 3 синфазное напряжение на термопаре относительно Земли может быть каким угодно большим, если оно не превышает напряжение пробоя изоляции).

Для применения гальванической развязки система автоматизации 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. раздел «Характеристики помех»). На высоких частотах ёмкость подсистемы на землю и ёмкость между обмотками трансформатора являются факторами, ограничивающими достоинства гальванически изолированных систем. Ёмкость на землю можно уменьшить, применяя оптический кабель и уменьшая геометрические размеры гальванически изолированной подсистемы.

Распространённой ошибкой при применении гальванически развязанных цепей является неверная трактовка 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: UL 1577, VDE 0884 и IEC 61010-01, 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 идёт о напряжении, которое может быть приложено к изоляции неограниченно долго (рабочее напряжение изоляции), а в других случаях речь идёт об испытательном напряжении (напряжение изоляции), которое прикладывается к образцу в течение времени от 1 минуты до нескольких микросекунд. Испытательное напряжение может в 10 раз превышать рабочее и предназначено для ускоренных испытаний в процессе производства, поскольку определяемое

этим напряжением воздействие на изоляцию зависит также от длительности тестового импульса.

Табл. 1 показывает связь между рабочим и испытательным (тестовым) напряжением изоляции по стандарту IEC 61010-01. Как видно из таблицы, такие понятия, как рабочее напряжение, постоянное, среднеквадратическое или пиковое значение тестового напряжения могут отличаться очень сильно.

Рабочее напряжение, В	Воздушный зазор, мм	Испытательное напряжение, В		
		Пиковое напряжение импульса, 50 мкс	Среднеквадратическое (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

Таблица 1. Зависимость между рабочим и испытательным напряжением изоляции

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

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 паразитное электромагнитное поле вокруг них и падение напряжения помехи на проводниках. Источниками и причинами помех могут быть молния, статическое электричество, электромагнитное излучение, «шумящее» оборудование, сеть питания 220 В с частотой 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 разрешают производство оборудования, являющегося 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 несертифицированного 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 микроомную элементную базу с минимально достаточным быстродействием, а также практикуют уменьшение длины проводников и экранирование.

Характеристики помех

Основная характеристика помехи – это зависимость спектральной плотности мощности помехи от частоты. Помехи, воздействующие на системы промышленной автоматизации, имеют спектр от нулевой частоты до единиц гигагерц (рис. 7) [15].

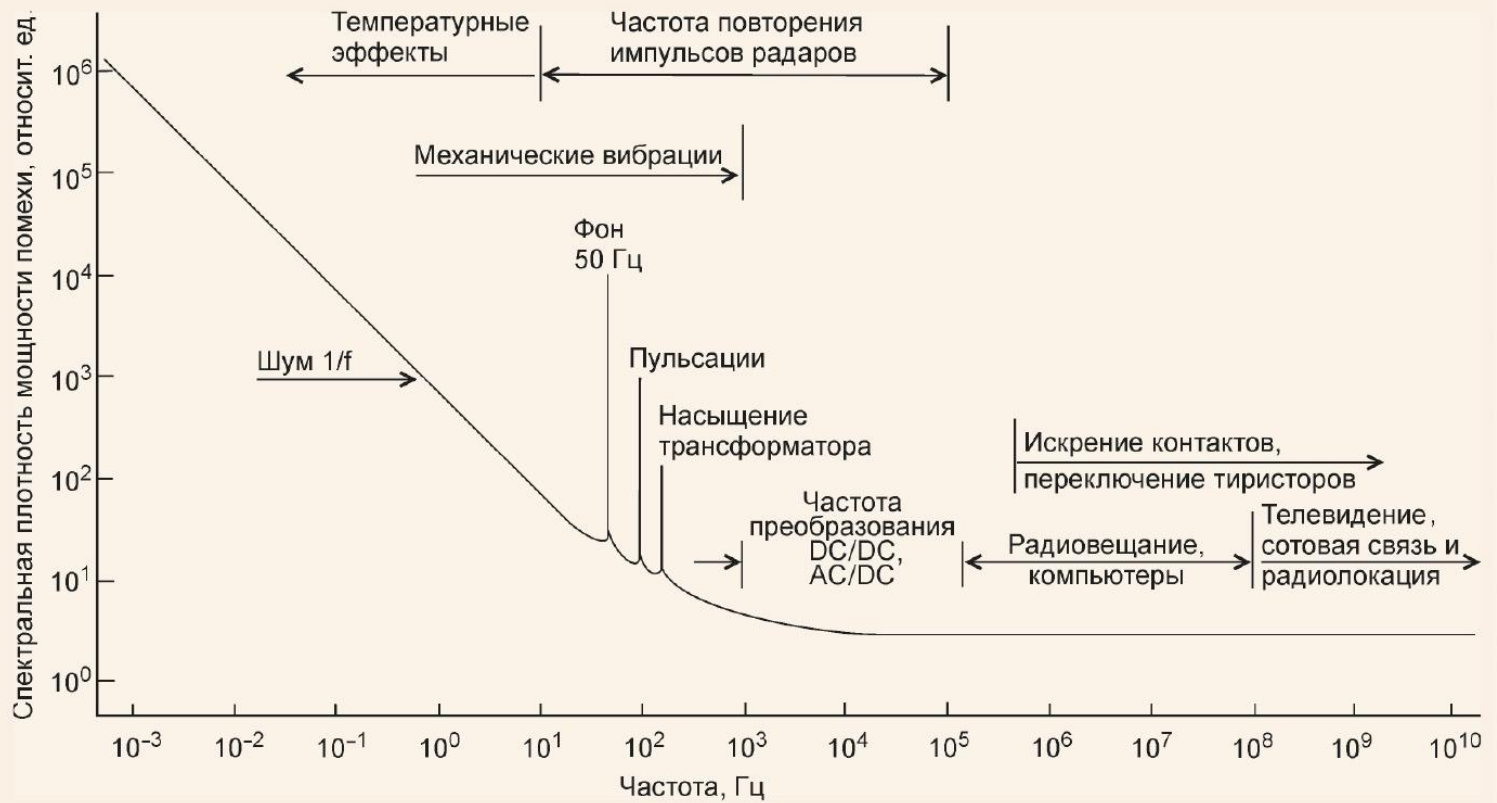


Рис. 7. Относительный уровень спектральной плотности мощности и частоты основных источников электромагнитных помех

Помехи, лежащие в полосе пропускания аналоговых схем, имеют частоты до десятков килогерц. На цифровые цепи воздействуют помехи в полосе до сотен мегагерц. Помехи гигагерцевого диапазона непосредственного влияния на системы автоматизации не оказывают, однако после детектирования в нелинейных элементах они порождают низкочастотные помехи, лежащие в границах воспринимаемого спектра.

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

$$E_{\text{помехи}} = \sqrt{\int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} e^2(f) df},$$

где $e^2(f)$ – спектральная плотность мощности помехи, В²/Гц; $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$ – нижняя и верхняя границы спектра помехи. В частном случае, когда $e^2(f)$ слабо зависит от частоты, приведённое соотношение упрощается:

$$E_{\text{помехи}} \approx \sqrt{e^2 \cdot (f_{\text{в}} - f_{\text{н}})}.$$

Таким образом, для уменьшения влияния помех на системы автоматизации нужно сужать ширину полосы пропускания ($f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$) аналоговых модулей ввода и вывода. Например, если постоянная времени датчика τ составляет 0,3 с, что приблизительно соответствует полосе

пропускания сигнала $f_{0,7} = 0,5 \text{ Гц}$ ($f_{0,7} = 1/2 \pi \cdot \tau$), то ограничение полосы пропускания модуля ввода величиной 0,5 Гц 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, зависящую от частоты (спектра) входного сигнала. В качестве примера на рис. 8 приведена зависимость погрешности измерений модулей RealLab! серии NL от частоты: при частоте входного сигнала 0,5 Гц (как в рассматриваемом примере) погрешность, вносимая фильтром, составляет $-0,05\%$.

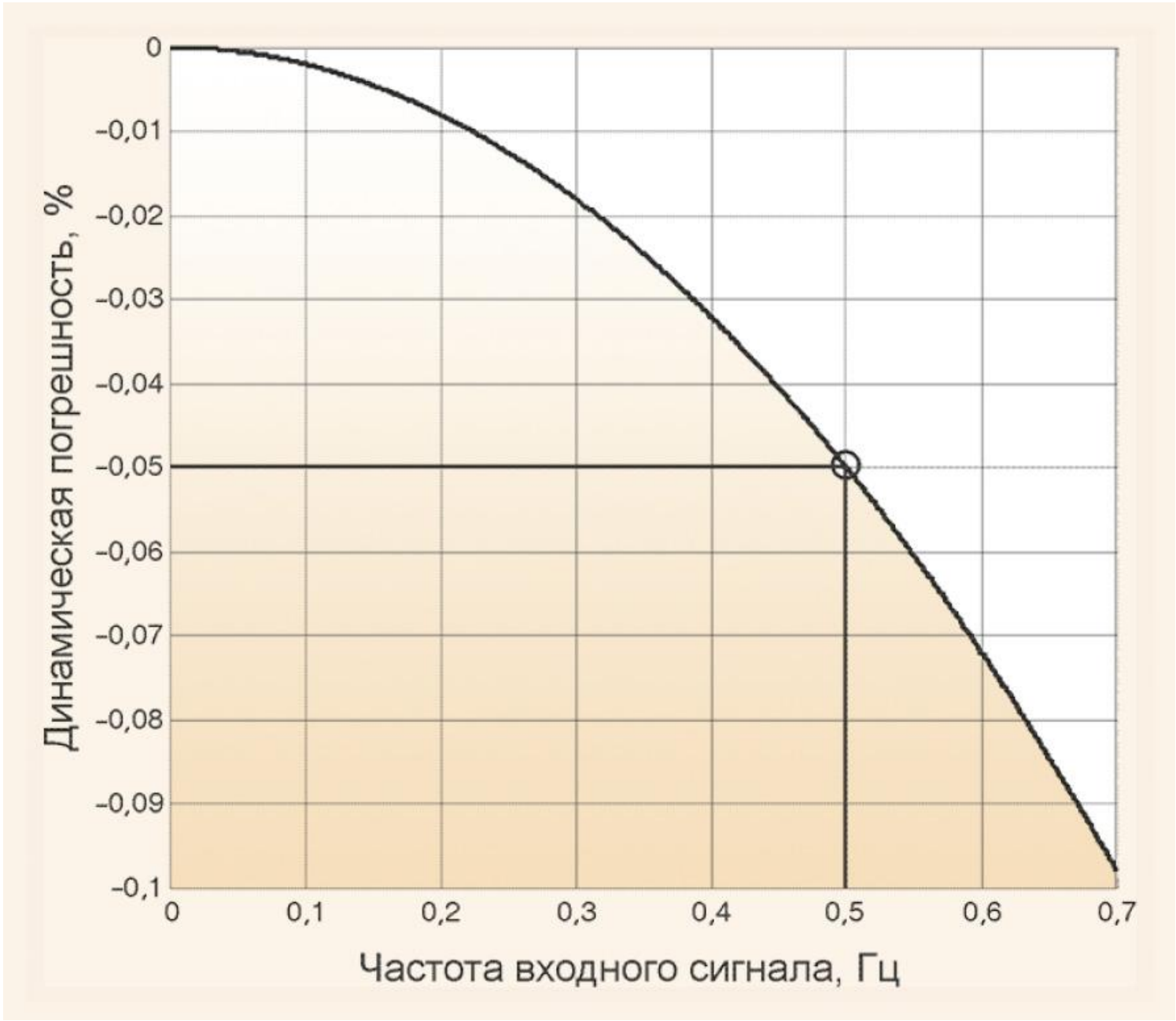


Рис. 8. Зависимость динамической погрешности от частоты входного сигнала на примере модулей RealLab! серии NL

Наиболее мощной в системах автоматизации является помеха с частотой питающей сети 50 Гц. Поэтому для её 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 аналоговых модулях NL: фильтр настроен таким образом, что он ослабляет на 120 дБ (на 6 порядков) помеху с частотой 50 Гц.

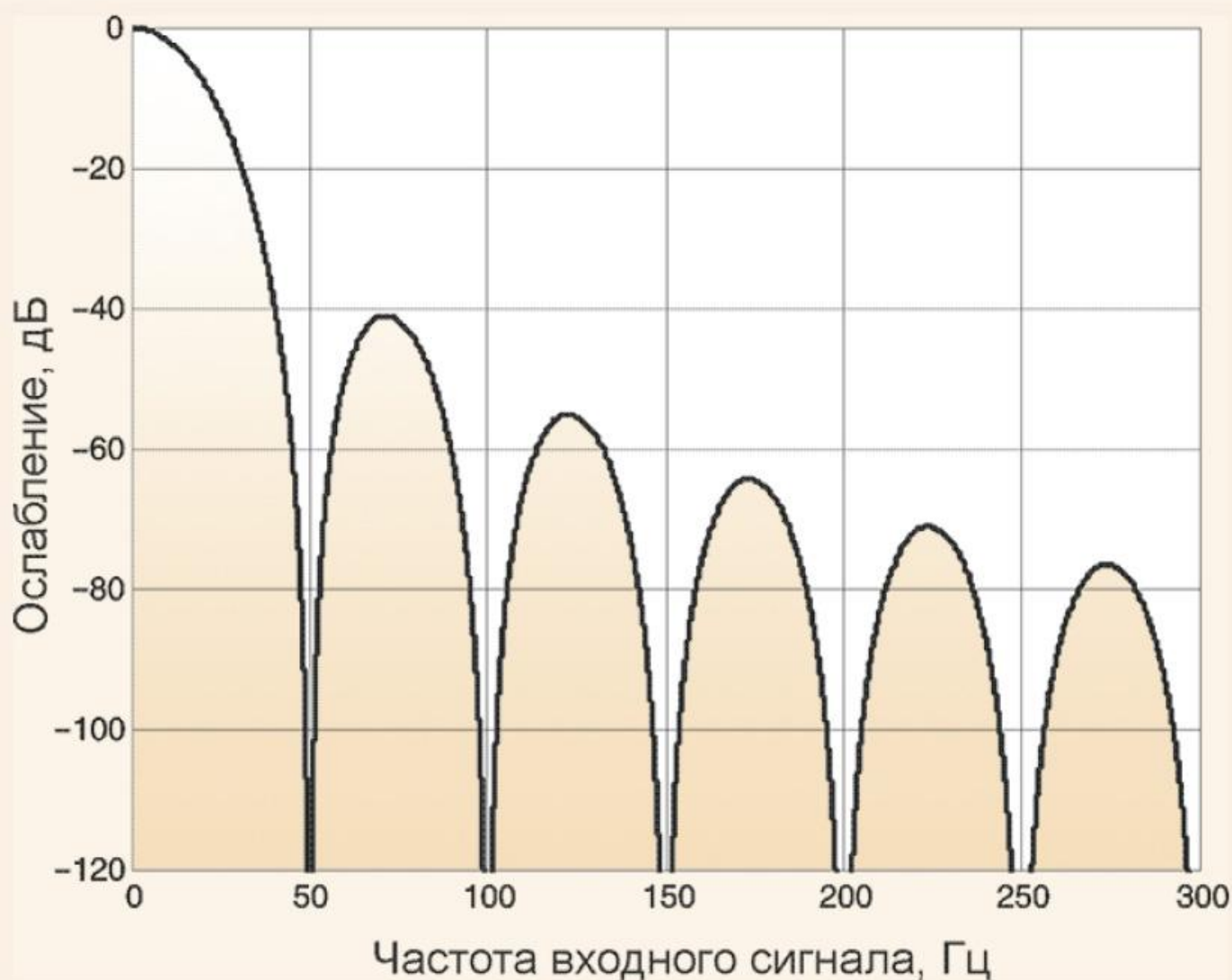


Рис. 9. АЧХ SINC3 фильтра, входящего в состав аналоговых модулей NL

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.

При ещё большей инерционности датчиков или контролируемой системы (например, когда датчик стоит в печи, время выхода на режим которой составляет несколько часов) можно более существенно снизить 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.

Помехи из сети электроснабжения

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

- фон с частотой 50 Гц;
- выбросы напряжения от разряда молнии (рис. 10 а);

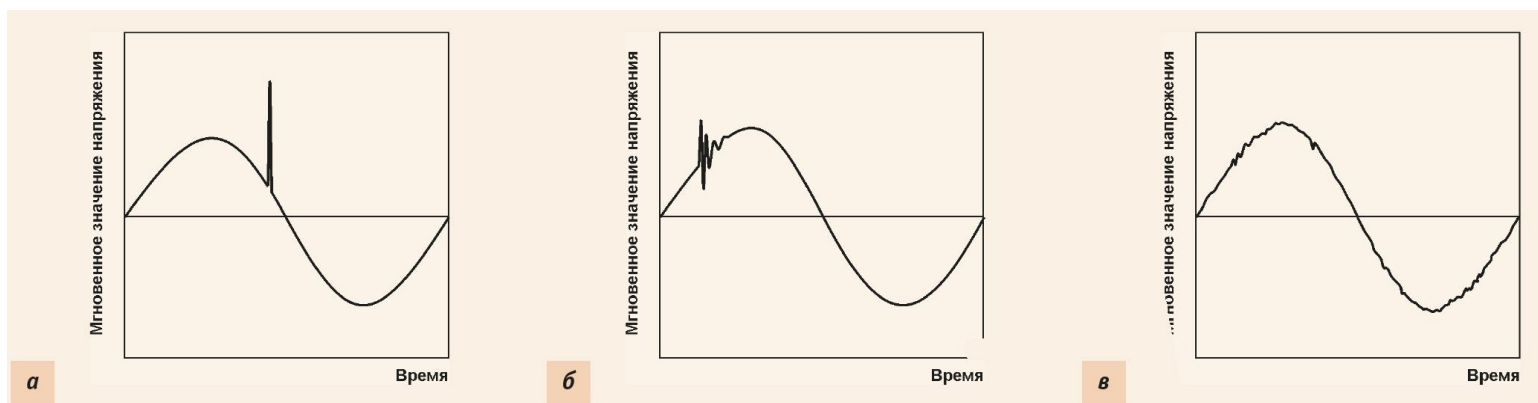


Рис. 10. Виды помех, проникающих из сети питания: а — от разряда молнии; б — при переключении индуктивной нагрузки; в — от радиостанций

- кратковременные затухающие колебания при переключении индуктивной нагрузки (рис. 10 б);
- высокочастотный шум (например, помеха от работающей радиостанции), наложенный на синусоиду 50 Гц (рис. 10 в);
- инфранизкочастотный шум, проявляющийся как нестабильность во времени величины среднеквадратического значения сетевого напряжения (рис. 11);



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

- 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 паразитные ёмкости сетевого трансформатора.

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.

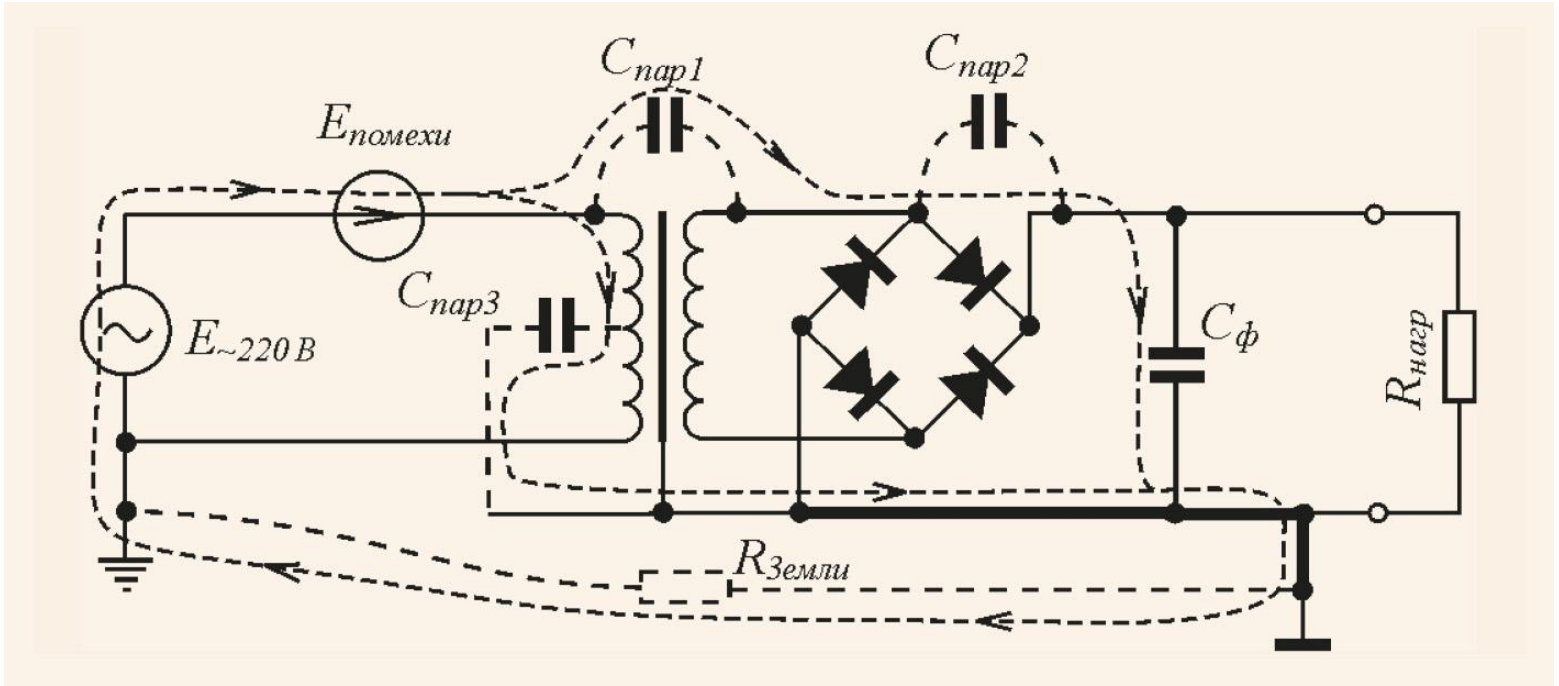


Рис. 12. Путь проникновения помехи из сети 220 В (50 Гц) в систему заземления и общий провод источника питания

Путь проникновения сетевой помехи показан на рис. 12. Силовой или развязывающий трансформатор включён в сеть 220 В (50 Гц). Сеть представлена эквивалентным источником напряжения сети $E_{\sim 220В}$ и эквивалентным источником помех $E_{помехи}$, описанными ранее. Нулевой провод источника сетевого напряжения заземлён на главном щите у ввода в здание. Если выход источника питания тоже заземлён, 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 ёмкость между обмотками силового трансформатора $C_{пар1}$, для уменьшения влияния которой часто используют заземлённый 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 пойдёт 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, подключённых к электрической сети, а также через ёмкость кабеля.

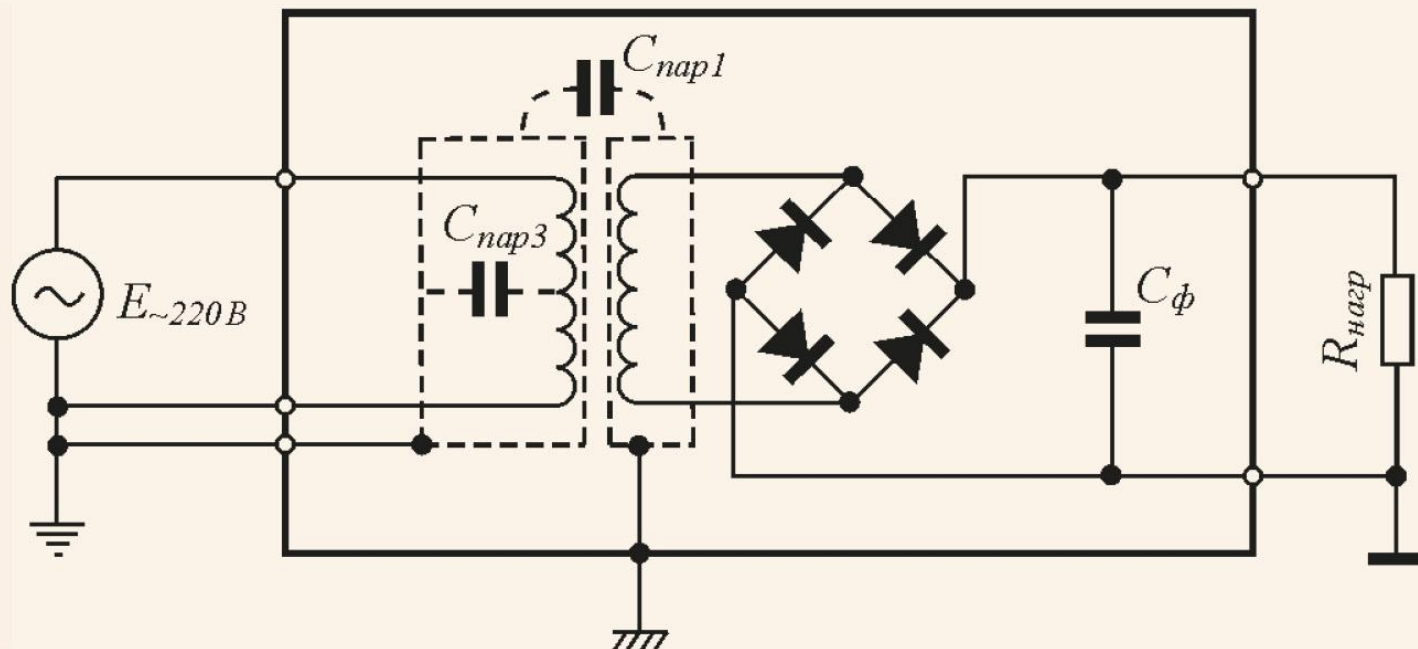


Рис. 13. Источник питания с тремя типами земель (слева направо): защитной, экранной и сигнальной

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

Путь тока помехи через ёмкость между первичной обмоткой трансформатора и его заземлённым сердечником $C_{\text{пар3}}$ показан на рис. 12. Этот ток также протекает через общий провод источника питания и заземлитель. Наличие ёмкости приводит к тому, что незаземлённые электроприборы «бьют током». При отсутствии заземления потенциал металлического корпуса приборов, подключённых к сети 220 В, составляет от нескольких десятков до 220 В в зависимости от сопротивления утечки на землю. Поэтому корпуса приборов, включённых в сеть 220 В, должны быть заземлены.

При использовании DC/DC- и AC/DC-преобразователей к источнику помехи $E_{\text{помехи}}$ добавляется ёмкостная 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 ёмкость $C_{\text{пар1}}$ 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 отдельное экранирование первичной и вторичной обмоток 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 будут описаны далее (см. раздел «Методы заземления»).

Молния и атмосферное электричество

Молнии являются одними из распространённых причин нежелательных перенапряжений, сбоев и отказов в системах автоматизации. 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 и даже до 100 кА (рис. 14), температура в канале достигает 20 000°C, появляется мощное магнитное поле и радиоволны [3].

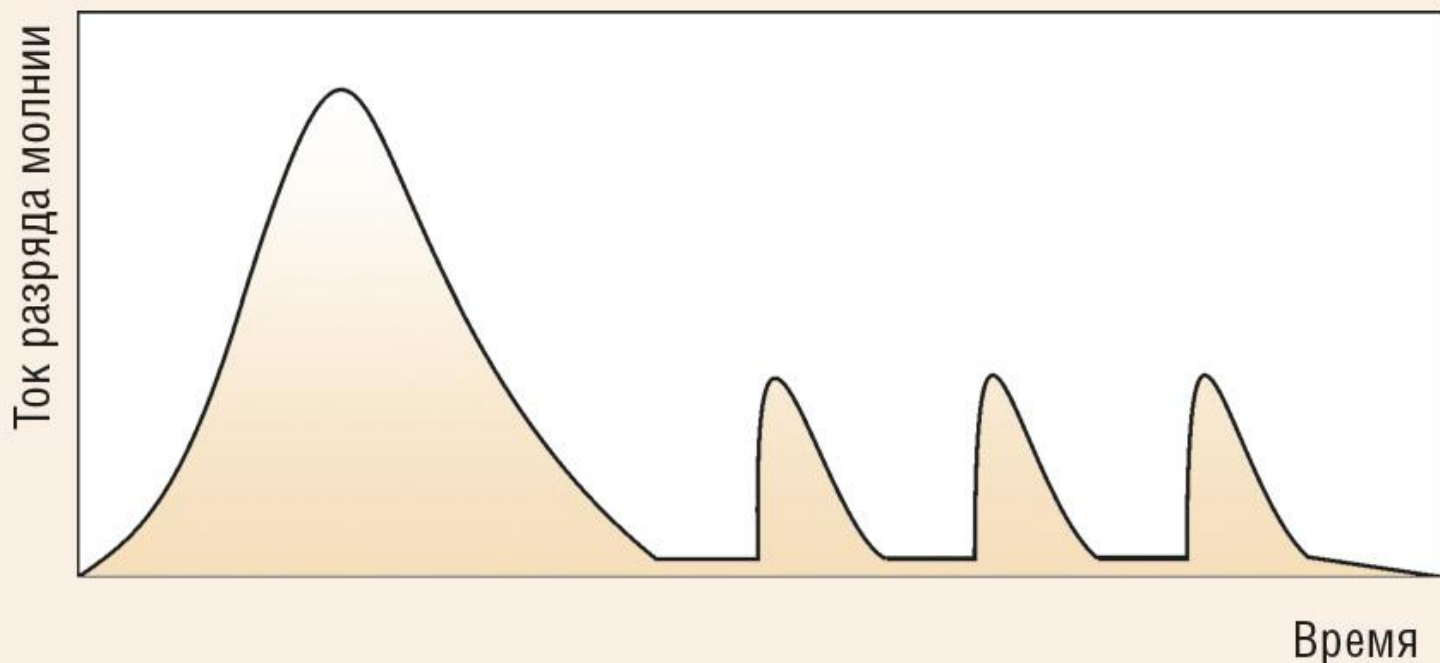


Рис. 14. Типовая форма импульса тока при разряде молнии [3]

Молнии могут образовываться также при пылевых бурях, метелях, извержениях вулканов. Частота поражения молнией зданий высотой 20 м и размерами в плане 100×100 м составляет 1 раз в 5 лет, а для зданий с размерами порядка 10×10 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 (молниеприёмника), 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, создаёт 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 эдс вследствие явления электромагнитной индукции. Этот импульс проходит на трансформаторную подстанцию, где ослабляется искровыми разрядниками. Остаточный импульс проходит в потребительскую линию (рис. 10 а) и через силовой трансформатор — в цепи заземления систем автоматизации (рис. 12).

На системы автоматизации молнии воздействуют 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 и даже до 1 миллиарда вольт. Когда напряжённость 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 напряжённость поля, вызванная атмосферным электричеством, может наводить заряды в «плавающих» цепях с высоким сопротивлением изоляции относительно земли величиной в несколько тысяч вольт и приводить к пробоям оптронов в модулях гальванической развязки. Для защиты от атмосферного электричества гальванически изолированные цепи, не имеющие низкоомного пути на землю, должны быть помещены в заземлённый 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. подраздел «Заземление экранов сигнальных кабелей»).

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

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:

- ремённый привод;
- лента конвейера;
- синтетическая одежда и обувь на теле человека;
- поток непроводящих твёрдых 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.

Ремённый 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, а 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 заземлённый подпружиненный металлический гребешок или щётку, которые касаются движущейся поверхности. Конвейерные ленты электризуются хуже ремённого привода вследствие более 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 ЭЛТ-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 автоматизации от сбоев, вызванных статическим электричеством, используют электростатические экраны, соединённые с экранным заземлением, а также преобразователи интерфейсов с защитой от статического электричества (например, преобразователь интерфейсов NL-232C имеет защиту от статических зарядов с потенциалом до ± 8 кВ по стандарту IEC 1000-4-2).

Кондуктивные наводки

Кондуктивная наводка – это помеха, которая передаётся из соседних электрических цепей не через электромагнитное поле, а путём 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, DC/DC- и AC/DC-преобразователи, шаговые двигатели с импульсным питанием, мощные печи с ШИМ-управлением, а также помехи из сети питания, протекающие по общему участку заземления, и помехи с частотой преобразования источника бесперебойного питания (UPS).

Наиболее типичной причиной появления кондуктивных помех в системах промышленной автоматизации является неправильно выполненное заземление.

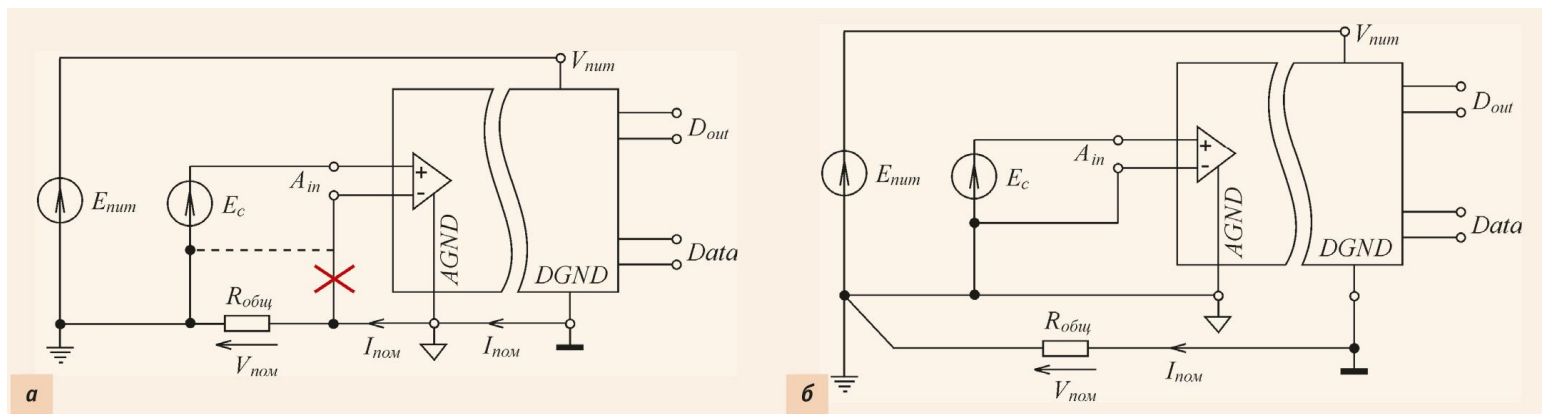


Рис. 15. Прохождение кондуктивной помехи при неправильном соединении земель и цепей сигнала (а) и при правильном соединении (б)

Рассмотрим пример (рис. 15). Ток питания цифровой части модуля ввода $I_{пом}$ проходит по общему участку провода, который имеет сопротивление $R_{общ}$ и создаёт на нём падение напряжения помехи $V_{пом}$. При неправильном соединении аналогового входа модуля ввода с источником сигнала (на рис. 15 а показано зачёркнутой линией) ко входу модуля прикладывается сумма напряжения измеряемого сигнала и напряжения помехи $E_c + V_{пом}$. При более правильном соединении входа «—» модуля с источником сигнала (на рис. 15 а показано штриховой линией) на вход модуля действует синфазная помеха $V_{пом}$, которая при недостаточном коэффициенте подавления синфазного сигнала может вносить погрешность в результат измерения. Для устранения обоих 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.

Электромагнитные наводки

Электромагнитные наводки появляются вследствие явления электромагнитной индукции: в проводящем контуре, находящемся в электромагнитном поле, возникает эдс индукции, если контур разомкнут, или индукционный ток, если контур замкнут. Источниками электромагнитного поля помехи могут быть радиомodem, радиотелефон, радиоретранслятор, радиостанция, сотовый передатчик на крыше здания, двигатель с искрящимися щётками, 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 автоматизации, например, компьютер, реле, тиристоры, мощные выходы дискретных модулей. Сильными источниками электромагнитных помех являются и 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 её окрестности, рамочная – источником магнитного поля. Вдали от таких источников доминирующего поля нет, есть поперечная электромагнитная волна. Реальные системы образуют множество излучающих антенн, состоящих из проводников, кабелей и различных металлических поверхностей.

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

Наиболее распространёнными приёмниками 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» приёмниками электромагнитных помех являются металлические конструкции в зданиях: металлические стеллажи, окна с металлической рамой, трубы водоснабжения и отопления здания, защитное контурное заземление здания и т.п.

Основными методами борьбы с электромагнитными наводками являются уменьшение площади контура, принимающего помеху, и применение дифференциального способа передачи сигнала в сочетании с витыми парами проводов [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 $I_{\text{пом}}$ от источника I_1 , который далее наводит напряжение $V_{\text{пом}}$ во втором витке провода, то есть происходит трансформация сигнала помехи через короткозамкнутый виток, образуемый рамой стеллажа.

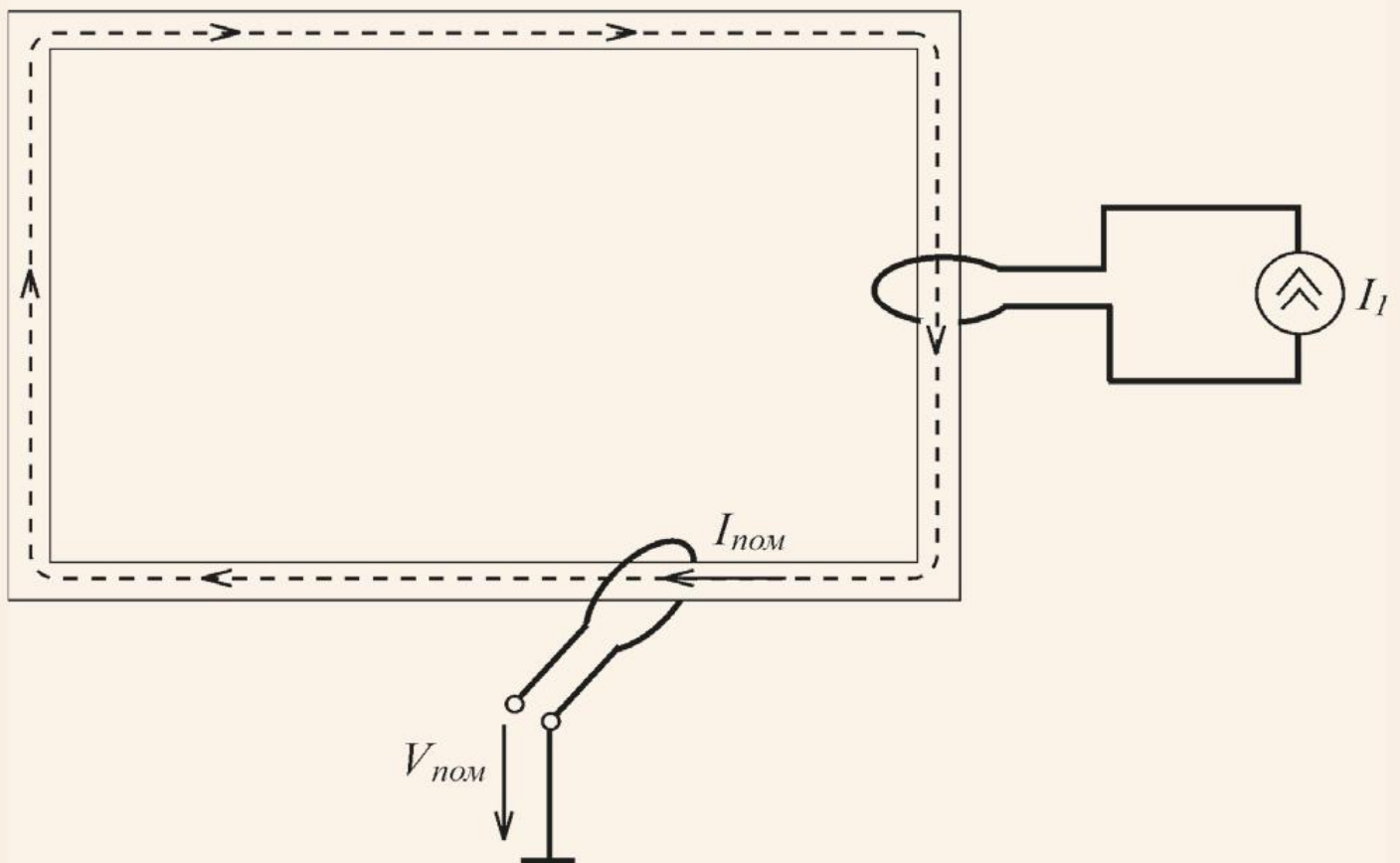


Рис. 16. Наведение электромагнитной помехи через «замаскированную» антенну и взаимную индуктивность

Методы заземления

Техника заземления в системах промышленной автоматизации 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.

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.

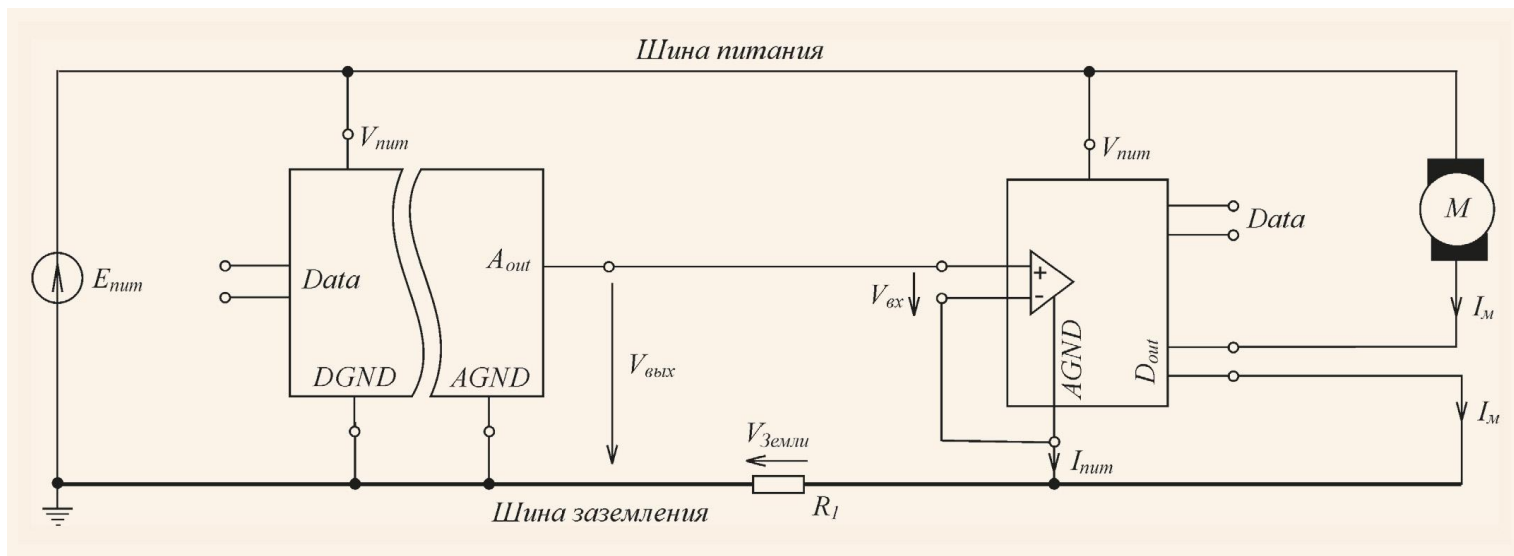


Рис. 17. Пример неправильного заземления

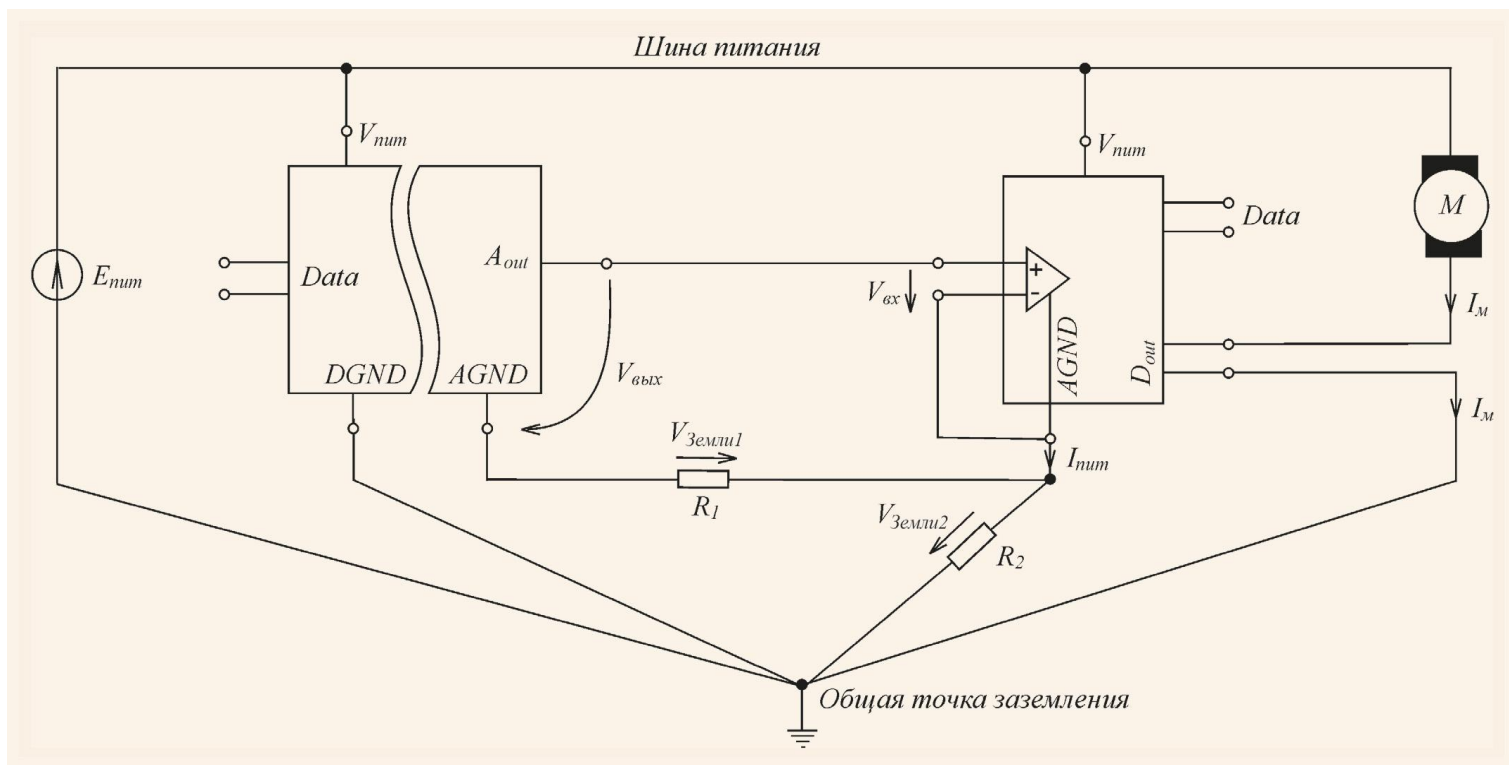


Рис. 18. Пример решения проблемы, показанной на рис. 17

Примером гальванически связанной цепи является соединение источника и приёмника стандартного сигнала 0...5 В (рис. 17, 18). Чтобы пояснить, как корректно 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 $V_{\text{земли}}$;
- использовано однополярное включение приёмника сигнала, а не дифференциальное;
- использован модуль ввода без гальванической развязки цифровой и аналоговой частей, поэтому ток питания цифровой части, содержащий помеху, протекает через вывод AGND и создаёт дополнительное падение напряжения помехи на сопротивлении R_1 .

Перечисленные ошибки приводят к тому, что напряжение на входе приёмника $V_{\text{вх}}$ равно сумме напряжения сигнала $V_{\text{вых}}$ и напряжения помехи $V_{\text{земли}} = R_1 \cdot (I_{\text{пит}} + I_{\text{м}})$. 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 $I_{\text{м}}$ уже не протекает через сопротивление R_1);
- проводник заземления приёмника сигнала присоединить к той же общей точке (при этом ток $I_{\text{пит}}$ уже не протекает через сопротивление R_1 , а падение напряжения на сопротивлении проводника R_2 не складывается с выходным напряжением источника сигнала $V_{\text{вых}}$).

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 приёмник сигнала, а также если в цепи заземления не образуются замкнутые контуры, принимающие электромагнитные помехи.

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, свыше 10 МГц заземлять лучше в нескольких точках, а 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].

Заземление гальванически развязанных цепей

Радикальным решением описанных проблем (рис. 17 и 18) является применение гальванической изоляции с отдельным заземлением цифровой, аналоговой и силовой частей системы (рис. 19).

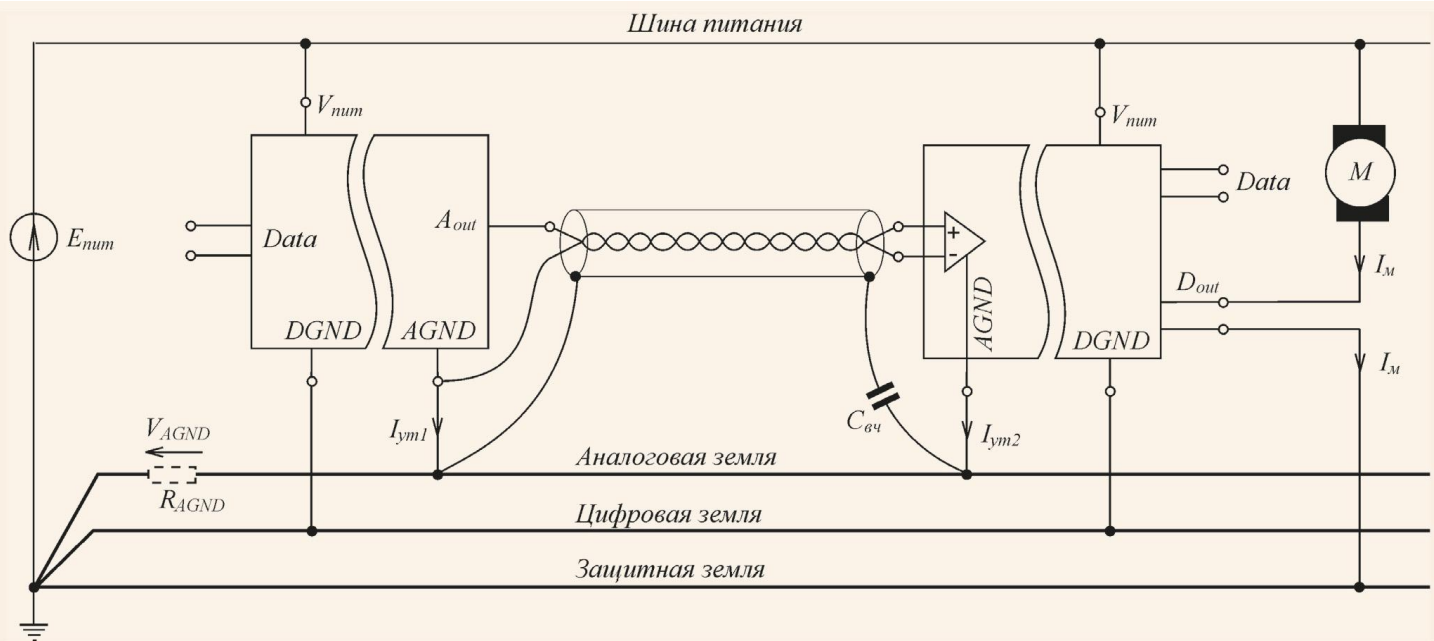


Рис. 19. Пример радикального решения проблемы, показанной на рис. 17 и 18

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.

Аналоговая земля может быть соединена с защитным заземлением через сопротивление R_{AGND} (подробнее см. разделы «„Плавающая“ земля» и «Гальваническая развязка»).

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 автоматизации.

Так как длина сигнального кабеля обычно составляет десятки и сотни метров, он должен быть защищён от переменного магнитного поля (применением витой пары), электростатических зарядов и ёмкостных наводок (экранированием).

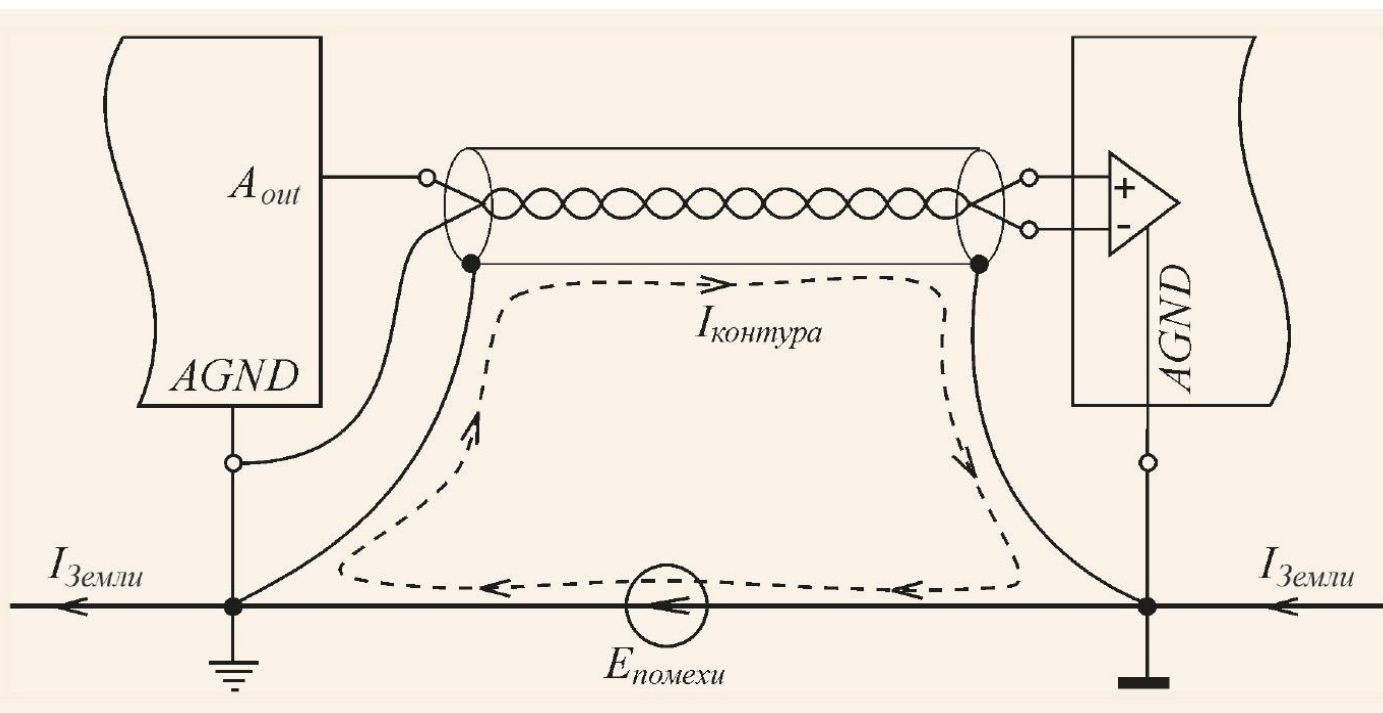


Рис. 20. Пример неправильного (с двух сторон) заземления экрана кабеля на низких частотах

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 $E_{\text{помехи}}$ между концами оплётки кабеля и паразитный ток, который также наводит в центральных жилах помеху вследствие взаимной индукции.

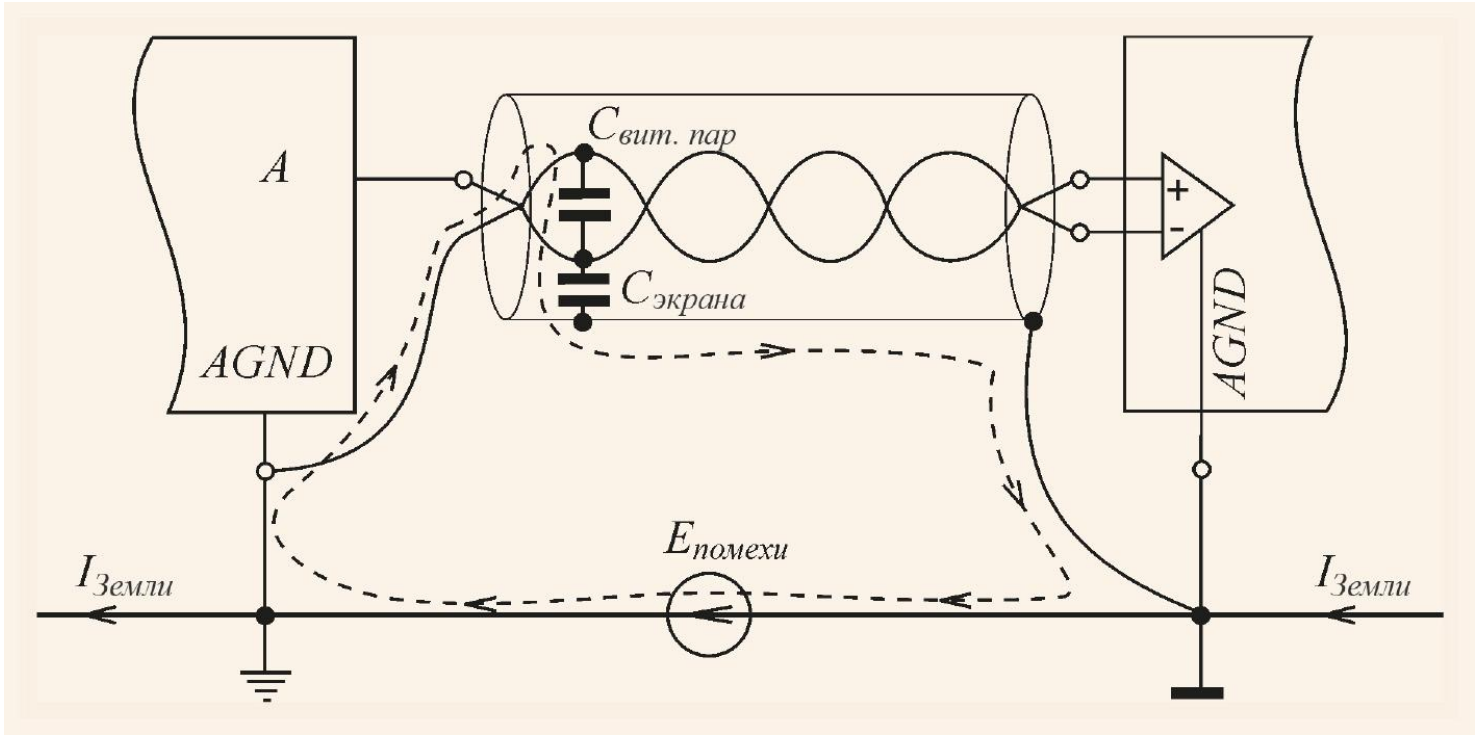


Рис. 20. Пример неправильного (с двух сторон) заземления экрана кабеля на низких частотах

Оплётку кабеля надо заземлять со стороны источника сигнала. Если заземление сделать со стороны приёмника, то ток помехи будет протекать по пути, показанному на рис. 21 штриховой линией, то есть через ёмкость между жилами кабеля, создавая на ней и, следовательно, между дифференциальными входами напряжение помехи. Поэтому заземлять оплётку надо со стороны источника сигнала (рис. 22), в этом случае путь для прохождения тока помехи отсутствует.

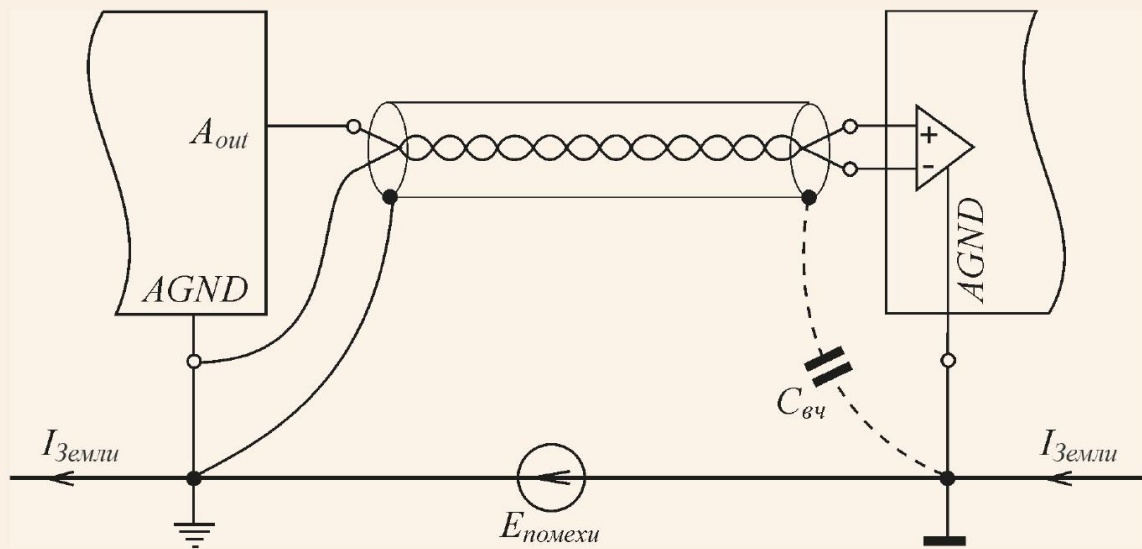


Рис. 22. Правильное заземление экрана (дополнительное заземление справа используется для случая высокочастотного сигнала)

Если источник сигнала не заземлён (например, термопара), то заземлять экран можно с любой стороны, так как в этом случае замкнутый контур для тока помехи не образуется. На частотах более 1 МГц увеличивается индуктивное сопротивление экрана, и токи ёмкостной наводки создают на нём большое падение напряжения, которое может передаваться на внутренние жилы через ёмкость между оплёткой и жилами. Кроме того, при длине кабеля, сравнимой с длиной волны помехи (длина волны помехи на частоте 1 МГц равна 300 м, на частоте 10 МГц – 30 м), возрастает сопротивление оплётки (см. раздел «Модель „земли“»), что резко повышает напряжение помехи на оплётке. Поэтому на высоких частотах оплётку кабеля надо заземлять не только с обеих сторон, но и в нескольких точках между ними (рис. 23).

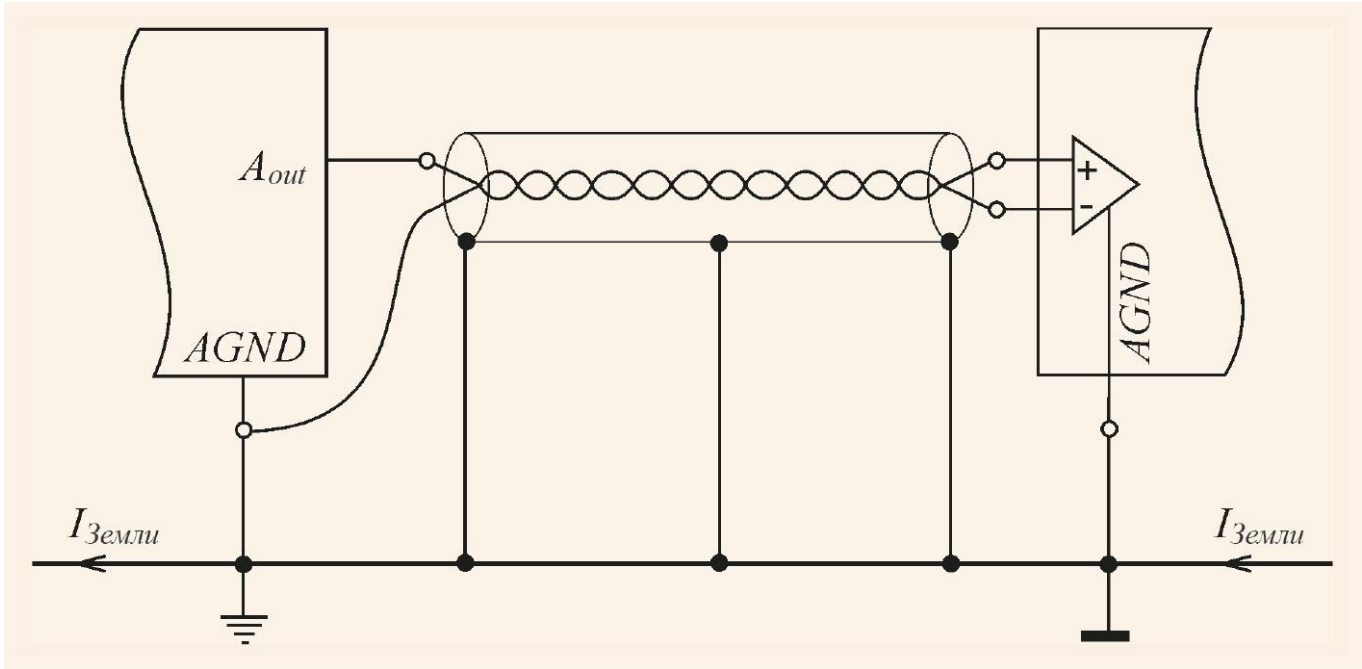


Рис. 23. Заземление экрана длинного кабеля на высоких частотах

Эти точки выбирают на расстоянии 1/10 длины волны помехи одна от другой. При этом по оплётке кабеля будет протекать часть тока $I_{земли}$, передающего помеху в центральную жилу через взаимную индуктивность. Ёмкостный ток также будет протекать по пути, показанному на рис. 21, однако высокочастотная составляющая 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.

В качестве промежуточного варианта можно использовать второе заземление экрана через ёмкость (рис. 22). При этом по высокой частоте экран получается заземлённым 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, то есть когда ещё не нужно выполнять заземление в нескольких промежуточных точках. Величину ёмкости можно рассчитать по формуле $C_{вч} = 1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C)$, где f — верхняя частота границы спектра помехи, X_C — ёмкостное сопротивление заземляющего конденсатора (доли ома). Например, на частоте 1 МГц конденсатор ёмкостью 0,1 мкФ имеет сопротивление 1,6 Ом. Конденсатор должен быть высокочастотным, с малой собственной индуктивностью.

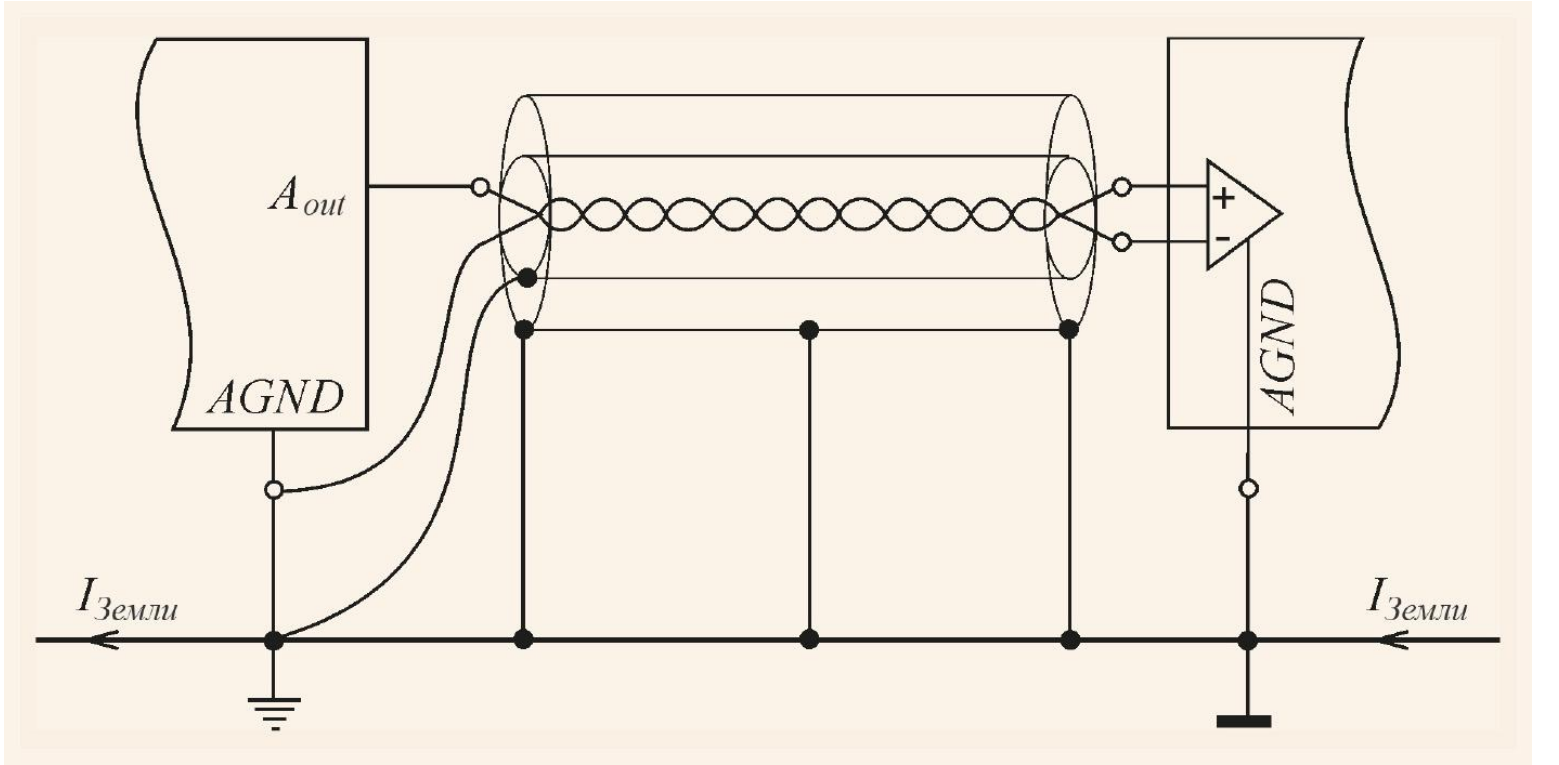


Рис. 24. Двойное экранирование длинного кабеля

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 ёмкостной помехи по пути, показанному на рис. 21, а внешний экран уменьшает высокочастотные наводки.

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

Отметим, что частота помехи — это частота, которую могут воспринимать чувствительные входы устройств систем автоматизации. 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 всё 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 ещё 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 или ADAM-4541/4542+ компании Advantech.

На электрических подстанциях на оплётке (экране) сигнального кабеля системы автоматизации, проложенного под высоковольтными проводами на уровне земли и заземлённого с одной стороны, может наводиться напряжение величиной в сотни вольт [17] во время коммутации тока выключателем. Поэтому с целью электробезопасности оплётку 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 оплётку.

Заземление экранов кабелей для защиты от молнии

Для защиты от магнитного поля молнии сигнальные кабели систем автоматизации, 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 землёй, а при наземном расположении они должны быть заземлены примерно через каждые 3 метра [8]. Кабель должен быть экранирован и экран заземлён. Заземление экрана должно быть произведено очень качественно с минимальным сопротивлением на землю.

Внутри здания магнитное поле ослабляется, если здание железобетонное, и не ослабляется, если оно кирпичное.

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

Заземление при дифференциальных измерениях

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

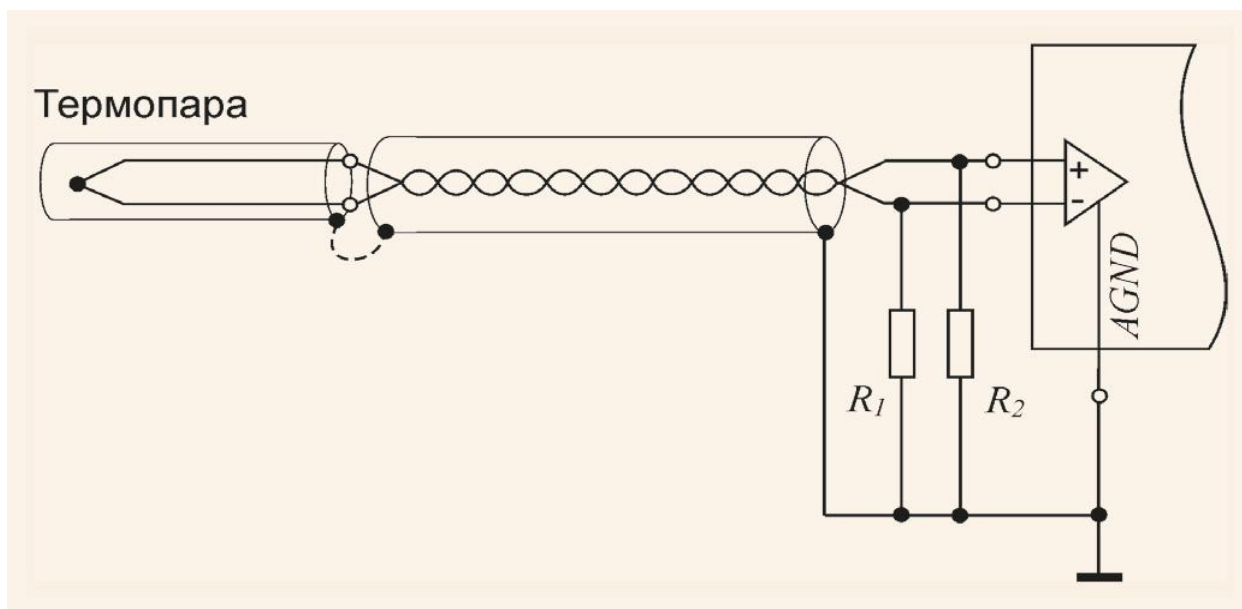


Рис. 25. Заземление аналоговых входов через сопротивления для уменьшения помех на «плавающем» входе

Заземление интеллектуальных датчиков

В последнее время получили широкое 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.

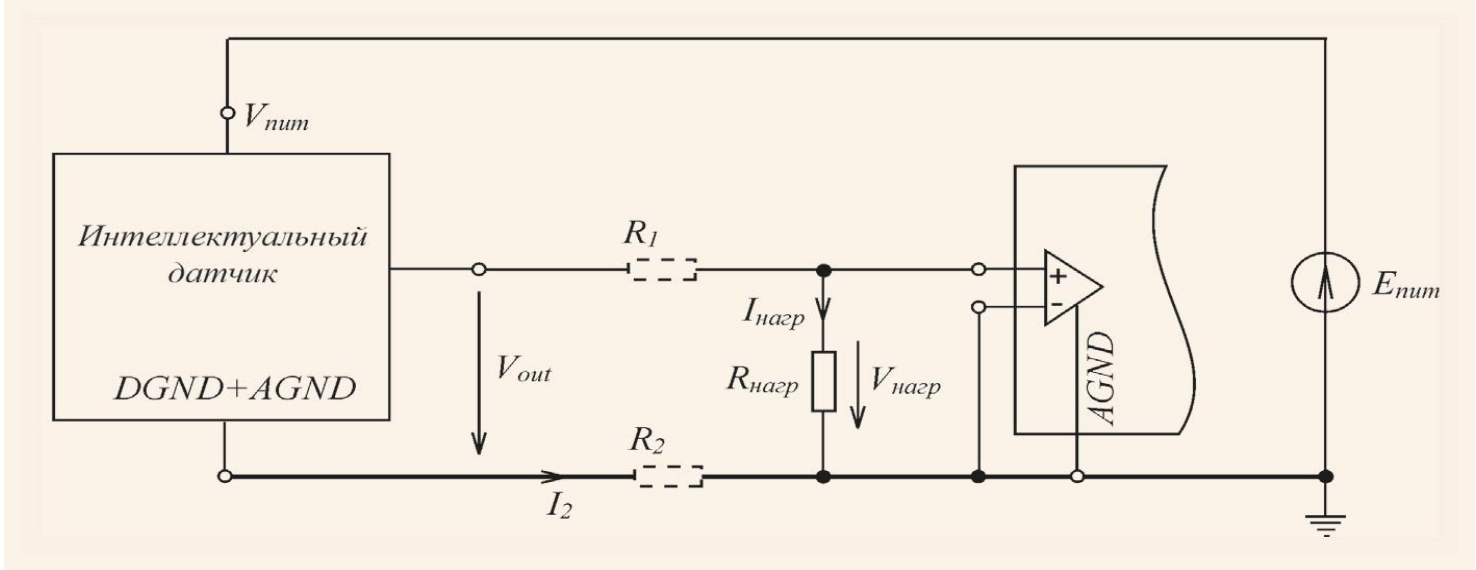


Рис.

26. Неправильное заземление интеллектуальных датчиков

Рассмотрим пример (рис. 26). Напряжение на нагрузке равно: $V_{нагр} = V_{out} - I_{нагр} \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2$, то есть оно зависит от тока I_2 , который включает в себя ток цифровой земли. Ток цифровой земли содержит шум и, в соответствии с приведённой 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.

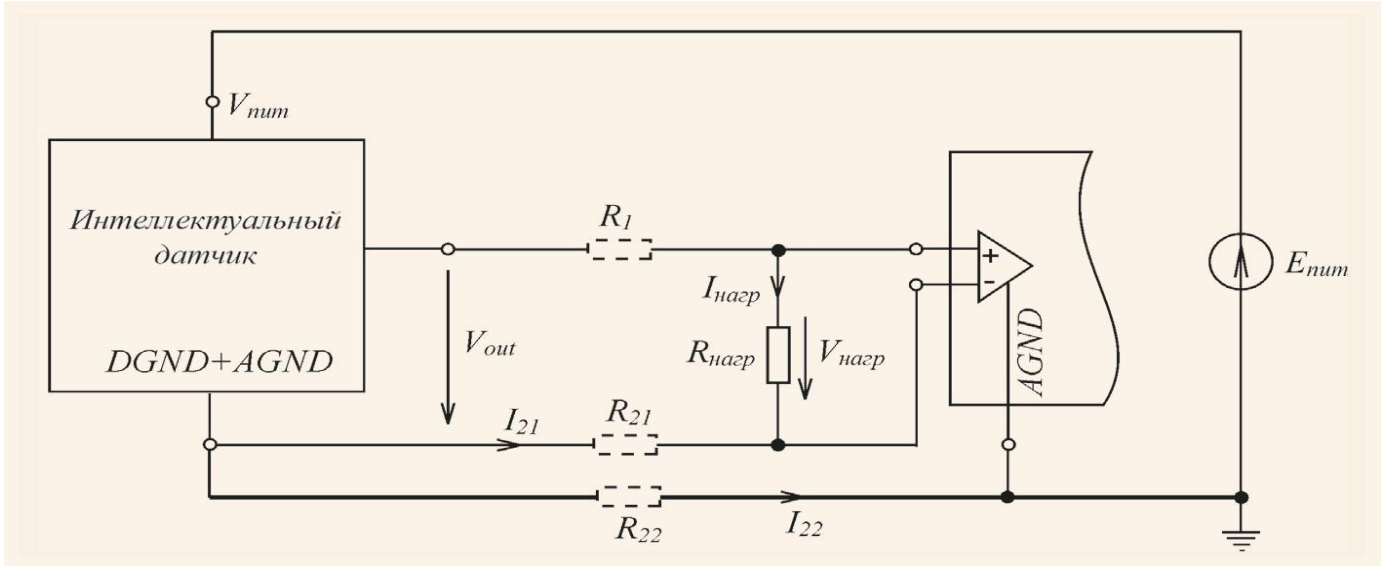


Рис. 27. Правильное заземление интеллектуальных датчиков

Заземление шкафов с аппаратурой систем автоматизации

Монтаж шкафов с аппаратурой должен учитывать всю ранее изложенную информацию. Однако заранее нельзя сказать однозначно, какие требования являются обязательными, какие — нет, поскольку набор обязательных требований зависит от необходимой точности измерений и от окружающей электромагнитной обстановки. Поэтому приведённые далее примеры заземления разделены на «правильные» и «ошибочные» условно. При этом «правильный» пример всегда даёт меньший уровень помех, чем «неправильный».

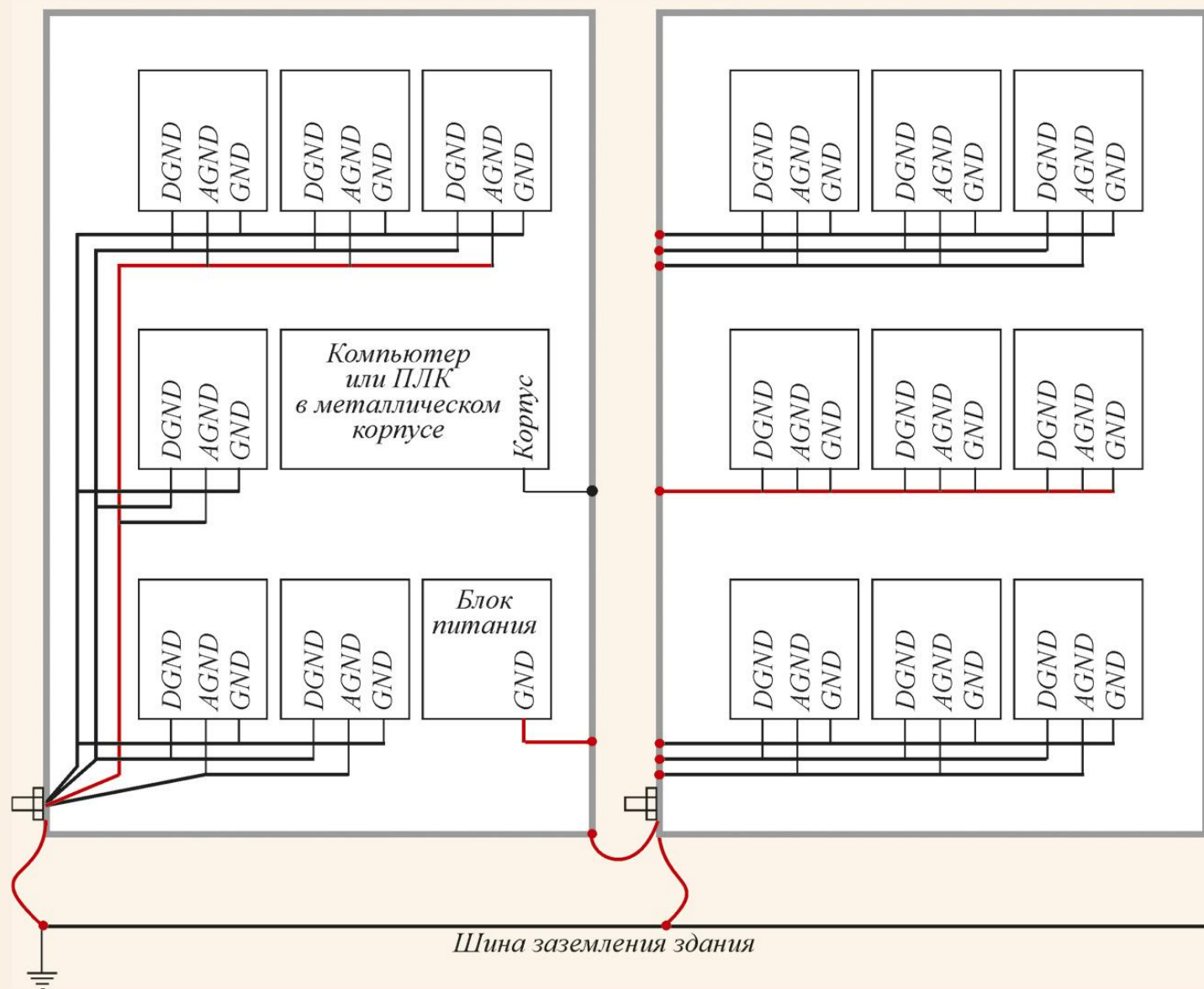


Рис. 28. Пример неправильного заземления шкафов с аппаратурой системы автоматизации (красным цветом выделены неправильные соединения; GND — вывод для подключения заземлённого вывода питания)

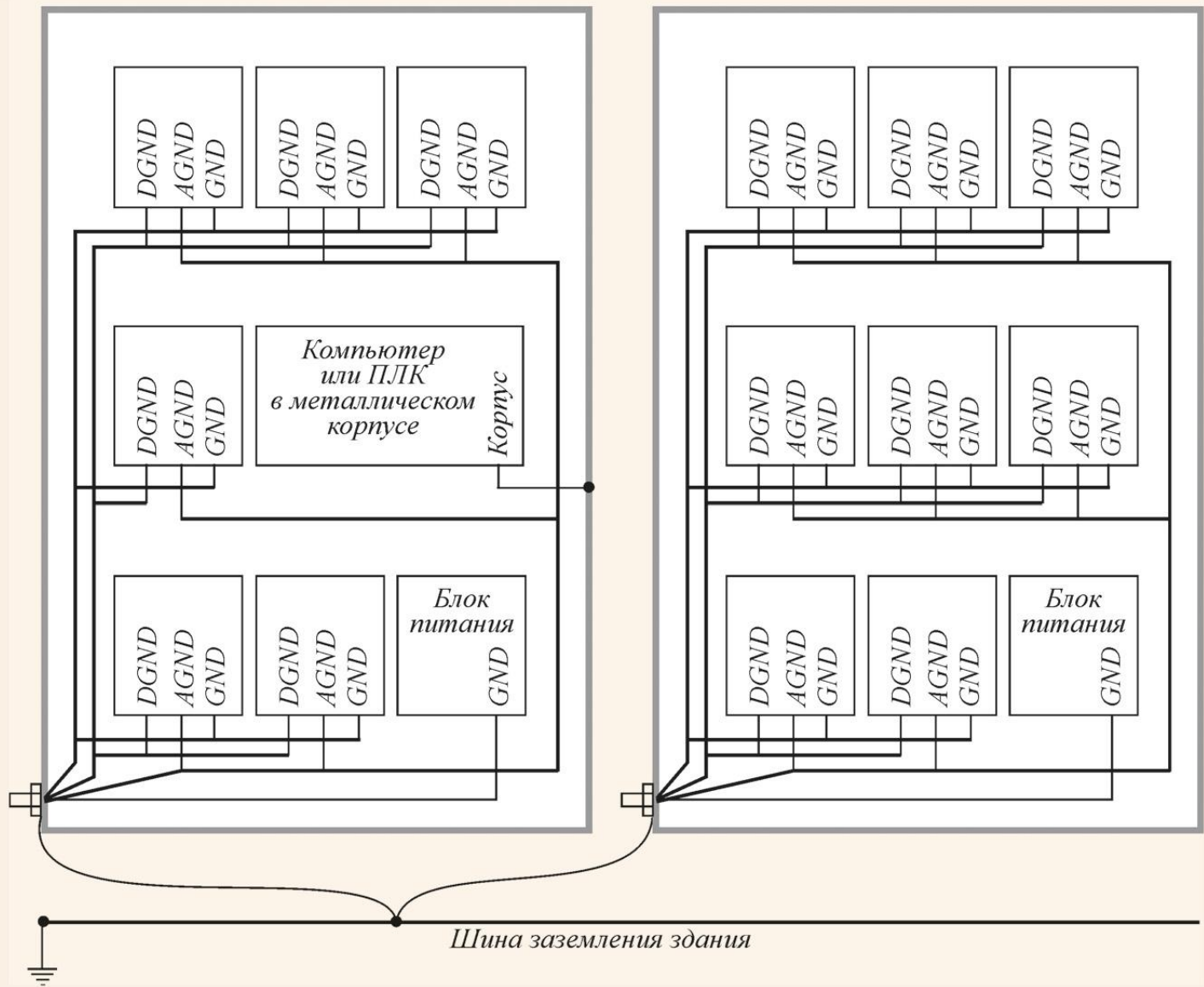


Рис. 29. Пример правильного заземления шкафов системы автоматизации

На рис. 28 приведён 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 (рис. 17 и 18);
- шкафы соединены между собой, что создаёт замкнутый контур в цепи заземления (см. рис. 16, а также разделы «Защитное заземление зданий», «Заземляющие проводники» и «Электромагнитные наводки»);
- проводники аналоговой и цифровой земель в левом шкафу на большом участке идут параллельно, поэтому на аналоговой земле могут появиться индуктивные и ёмкостные наводки от цифровой земли;
- вывод *GND* блока питания соединён с корпусом шкафа в ближайшей точке, а не на клемме заземления, поэтому по корпусу шкафа течёт ток помехи, проникающий через трансформатор блока питания (рис. 12 и 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 (рис. 17, 18, 19).

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

Заземление в распределённых системах управления

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

Кабели, проходящие по открытой местности, должны быть защищены от магнитных импульсов, возникающих во время грозы (см. разделы «Молния и атмосферное электричество», «Заземление экранов кабелей для защиты от молнии»), и от магнитных полей, появляющихся при коммутации мощных нагрузок (см. раздел «Заземление экранов кабелей систем автоматизации на электрических подстанциях»). Особое внимание надо уделить заземлению экрана кабеля (см. раздел «Заземление экранов сигнальных кабелей»). Радикальным решением для территориально распределённой 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 соответствующие модули для построения распределённых систем управления, например серий ADAM-4000 или NL. Суть этого подхода заключается в том, что модуль ввода располагают возле датчика, уменьшая тем самым длину проводов с аналоговыми сигналами, а в ПЛК передаётся сигнал по цифровому каналу. Разновидностью такого подхода является применение датчиков со встроенными в них АЦП и цифровым интерфейсом. Подобные датчики сейчас есть среди изделий многих фирм, например Pepperl+Fuchs, Siemens, Omron и др.; выпускаются такие датчики уже упоминавшейся серии NL, например датчик влажности NL-1DT100.

Заземление чувствительных измерительных цепей

Для измерительных цепей с высокой чувствительностью в плохой электромагнитной обстановке лучшие результаты даёт применение «плавающей» земли (см. раздел «"Плавающая" земля») совместно с батарейным питанием [19] и передачей информации по оптоволокну.

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 составляющей излучаемой помехи. Экран кабеля должен быть заземлён с одной стороны. Цепи подключения датчиков таких систем должны быть помещены в отдельный экран и по возможности пространственно отдалены от исполнительных устройств.

Заземление в промышленных сетях

Промышленная сеть на основе интерфейса RS-485 выполняется экранированной витой парой с обязательным применением модулей гальванической развязки (рис. 30).

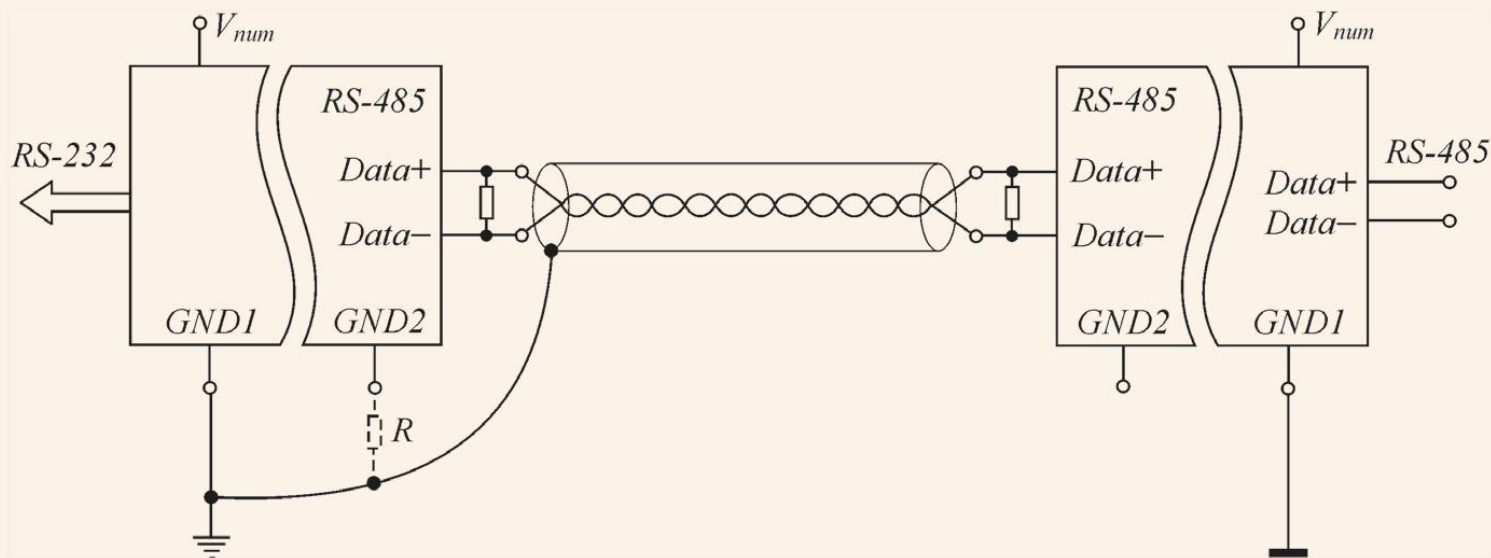


Рис. 30. Заземление в промышленной сети на основе интерфейса RS-485

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 удалённых друг от друга точках может достигать нескольких единиц и даже десятков вольт (см. раздел «Заземление экранов сигнальных кабелей»). 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 счёт электромагнитной индукции может наводиться ток большой величины при ударах молнии или коммутации мощных нагрузок. Ток через взаимную индуктивность наводит на центральной паре проводов эдс, которая может вывести из строя микросхемы драйверов порта.

При использовании неэкранированного кабеля на нём может наводиться большой статический заряд (несколько киловольт) за счёт атмосферного электричества, который способен 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, показанное на рис. 30 штриховой линией, снижает также вероятность пробоя при повреждениях заземления или большом сопротивлении гальванической изоляции в случае применения экранированного кабеля.

Особенно сильно проявляются описанные 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 раздела «Заземление экранов сигнальных кабелей».

Руководствоваться правилами из данного раздела нужно и при прокладке кабеля на открытой местности.

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 защищён от случайного соприкосновения с заземлёнными 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 заземлённой металлической перегородкой. Никакого разделения не требуется, если используются кабели с металлической оболочкой или экраном.

Заземлённые 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 соответствующем разделе. Статическое электричество может быть причиной воспламенения взрывоопасной смеси. Например, при ёмкости 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) [20].

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 автоматизации. Для этого с помощью многоканального компьютерного самописца 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 систем автоматизации, 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 ёмкостью на землю и на руки оператора, с батарейным питанием и передающий сигнал в компьютер через оптический кабель, имеющий потенциальный, токовый и электрометрический входы.

Выводы: правила заземления

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.

Другие советы

1. Используйте в пределах вашей системы автоматизации отдельную землю из медной шины, соединив её с шиной защитного заземления здания только в одной точке.
2. 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.
3. Следите, чтобы при монтаже системы заземления случайно не образовался замкнутый контур.
4. Не используйте по возможности землю как уровень отсчёта напряжения при передаче сигнала.
5. 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.
6. Цепи, изолированные гальванически, нужно заземлять, чтобы избежать накопления статических зарядов.
7. Экспериментируйте и пользуйтесь приборами для оценки качества заземления. Допущенные ошибки не видны сразу.
8. Пытайтесь идентифицировать источник и приёмник помех, затем нарисуйте эквивалентную схему цепи передачи помехи с учётом паразитных ёмкостей и индуктивностей.
9. Пытайтесь выделить самую мощную помеху и в первую очередь защищайтесь от неё.
10. Цепи с существенно различающейся мощностью следует заземлять группами, в каждой группе – блоки с примерно равной мощностью.
11. Заземляющие проводники с большим током должны проходить отдельно от чувствительных проводников с малым измерительным сигналом.
12. Провод заземления должен быть по возможности прямым и коротким.
13. Не делайте полосу пропускания приёмника сигнала шире, чем это надо из соображений точности измерений.
14. 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.
15. Для особо чувствительных измерений используйте «плавающий» батарейный источник питания.
16. Самая «грязная» земля – от сетевого блока питания. Не совмещайте её с аналоговой землёй.
17. Экраны должны быть изолированными, чтобы не появилось случайных замкнутых контуров, а также электрического контакта между экраном и землёй.
18. Прочтите также статьи [2 и 21]. ●

Литература

15. Low level measurements. — 5th edition. Ohio : Keithley ; 2004.

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 Transactions on Industry Applications. 1998. Vol. 34. No. 4. P. 663- 668.
18. Caruso M. Analog grounding considerations : Application Note AN-103. — Honeywell.
19. Floating oscilloscope measurements ... and operator protection : Technical Brief. — Tektronix, 1998.
20. Денисенко В.В. Выбор аппаратных средств автоматизации опасных промышленных объектов // Современные технологии автоматизации. 2005. № 4. С. 86-94.
21. Гарманов А. Принципы обеспечения электросовместимости измерительных приборов // Современные технологии автоматизации. 2003. № 4. С. 64-72 ; 2004. № 1. С. 62-68.

Автор — сотрудник НИЛ АП

Телефон: (8634) 376-157

Факс: (8634) 324-139

E-mail: victor@RLDA.ru