

Термины и определения

Источник сигнала

Объект, от которого приходит сигнал на вход подключаемого прибора. Физически под источником сигнала понимается выход датчика или выход прибора, рассматриваемый совместно с соединительным кабелем, если такой кабель используется.

Сигнальная цепь

Это замкнутая электрическая цепь информационного сигнала между источником и приёмником. По сигнальной цепи протекает ток сигнальной цепи.

Общий провод

Провод условно нулевого опорного потенциала, соединяющий источник и приёмник сигнала, позволяющий выровнять потенциалы аналоговых земель (AGND) выходных узлов источника с входными узлами приёмника сигнала. Термин «условно нулевой потенциал» употреблён в том смысле, что общий провод в ряде случаев может быть не заземлен и иметь потенциал относительно земли.

Заземление

Заземление корпусов (панелей) приборов, что означает подсоединение соответствующих цепей (штатных клемм) заземления приборов к шине заземления, имеющей непосредственный контакт с землёй.

Такое заземление называют защитным.

В больших системах, состоящих из разнородных приборов возможно взаимовлияние устройств по цепи заземления, приводящего к сбоям и помехам.

Сигнальное заземление

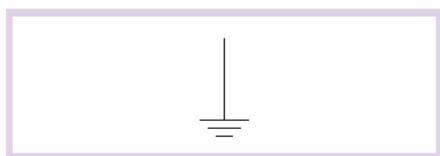


Рис. 1. Символ сигнального заземления

Под заземлением всегда подразумевается именно сигнальное заземление, обозначаемое символом, показанным на рис. 1.

Это «чистая» ветка основной цепи заземления системы, по которой не текут в землю токи заземления сильно потребляющих устройств (силовое оборудование, станки, мощные импульсные устройства и пр.), а протекают токи заземления относительно чувствительных сигнальных устройств.

В сложных системах последовательное, без разбора, соединение всех точек заземления разнородных приборов приводит к проблеме их совместимости, и необходимо выделить отдельную «чистую» ветку сигнального заземления.

В особо сложных системах возможны несколько веток сигнального заземления со своеобразной иерархией в зависимости от «чистоты» веток заземления. Если символ заземления на рисунках присоединяется пунктирной линией, то подразумевается, что заземление в показанной точке не обязательно.

Ток заземления

Ток, текущий по цепи заземления данного прибора. Иногда этот ток называют уравновешивающим током заземления, поскольку он приводит к выравниванию разности потенциалов заземляемых точек (рис. 2).

Как правило, ток I_g имеет сложный переменный характер, что обусловлено утечками тока от внутренних источников помехового сигнала (например, импульсный источник питания, силовые коммутационные цепи).

Как правило, внутренние утечки устройств носят активноёмкостный характер, а спектр земельного тока I_g крайне широкополосный — энергия гармоник достаточно высока даже на сотнях мегагерц. Это прежде всего относится к устройствам, имеющим импульсный источник питания, и в меньшей степени — к устройствам с линейным источником питания.

Цепи цифровой и аналоговой земель

Для обозначения земель на схемах или в таблицах обычно применяют следующие мнемонические сокращения:

GND (DGND, GNDD) — для обозначения цифровой земли;

AGND (GNDA) — для обозначения аналоговой земли.

Наличие у устройства контактов разъёма с обозначением GND (DGND, GNDD) и AGND (GNDA) говорит о том, что

провод цепи GND, подключенный к соответствующему контакту разъёма, исходит непосредственно из точки подключения внутреннего общего провода цифровых и импульсных узлов устройства,

провод цепи AGND исходит из общего провода аналоговых узлов.

При этом сами по себе обозначения GND, AGND не говорят о том, куда их нужно подключать. Для выяснения этого вопроса нужно знать тип входа устройства, к которому относится данная цепь GND или AGND, либо тип выхода устройства.

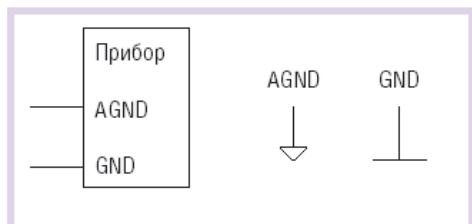


Рис. 3. Символы аналоговой и цифровой земель

На рис. 3 показаны типичные обозначения цепей аналоговой и цифровой земли.

Большинство проблем помехозащищённости возникает именно в аналоговых цепях подключения к приборам, в то же время цифровые интерфейсные сигналы (TTL, CMOS) являются специализированным случаем аналоговых однофазных входов-выходов напряжения, поэтому в примеры даны для случая аналогового интерфейса с применением понятия аналоговой земли AGND. При этом те же самые принципы можно применить и для цифрового интерфейса. Еще один пример: известный цифровой интерфейс токовая петля подпадает под случай соединения однофазных однополярных токовых входов-выходов. Любой цифровой интерфейс — это частный случай аналогового, ведь цифровая техника исторически произошла из аналоговой. Особым случаем является прибор, на разъёмы которого одновременно выведены цепи аналоговой и цифровой земли. Такой подарок имеют, как правило, многофункциональные приборы с цифровым интерфейсом управления и аналоговым измерительным интерфейсом.

Экран

Экран в изначальном понимании — это защитная токопроводящая оболочка системы, по которой не текут корпусные токи прибора и токи общих проводов сигнальных цепей.

Типы источников сигналов

Под источником сигнала будем понимать то устройство, которое пользователь намерен подключить к электрическому входу прибора, например, соединить кабелем выход какого-либо датчика со входом пользовательского объекта.

По характеру внутреннего сопротивления

Внутреннее сопротивление источника сигнала почти всегда не носит активного характера из-за влияния ёмкостей и индуктивностей соединительных проводов, а также частотной зависимости выходного сопротивления прибора. Поэтому речь идет о классификации по активному внутреннему сопротивлению на низкой частоте, где указанными факторами можно пренебречь.

К *источнику напряжения* (рис. 4) можно отнести:

- низкоомный (до 100_500 Ом) выход любого прибора, подключенного посредством короткого кабеля. Чем длиннее кабель, тем более реактивным становится эквивалентный выходной импеданс источника напряжения, тем большее влияние на сигнальную цепь оказывают импульсные сквозные токи и ёмкостные наводки; согласованную, как минимум, на приёмной стороне (а лучше на обоих концах) длинную линию, например, радиочастотный кабель типа РК. Согласование производится концевыми низкоомными резисторами 50 или 75 Ом.

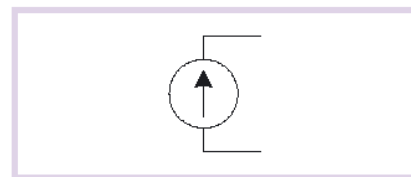


Рис. 4. Символ источника напряжения

К **основным параметрам источника напряжения относятся:**

- внутреннее сопротивление,
- полярность,
- максимальный выходной ток.

К классическому *источнику тока* (рис. 5) можно отнести высокоомный выход генератора тока. К **основным параметрам источника тока относятся:**

- полярность,
- запас по напряжению,
- внутреннее сопротивление.

Последняя характеристика относится именно к генератору тока, выходное напряжение которого может находиться лишь в заданных пределах для обеспечения рабочего режима самого генератора тока.

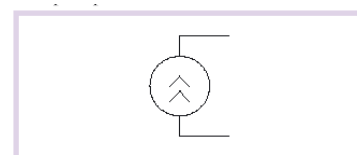


Рис. 5. Символ источника тока

К типичному *источнику заряда* (рис. 6) относится пьезодатчик, имеющий ёмкостный характер внутреннего импеданса. В подавляющем большинстве приложений постоянная составляющая заряда не представляет интереса (например, в виброметрии), поэтому будем рассматривать

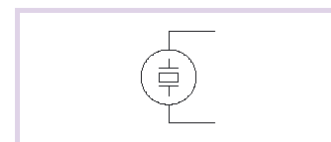


Рис. 6. Символ источника заряда

этот источник как источник переменного заряда.

По наличию заземления

Источник, гальванически связанный с землей, является *заземлённым*.

Для однофазного источника (рис. 7) заземлена точка сигнальной цепи.

Для дифференциального (рис. 8) — общая точка электрически симметричная относительно фазовых проводов и связанная общим проводом источника. Как правило, заземлённым бывает источник заряда; источники напряжения и тока бывают заземлёнными или изолированными.

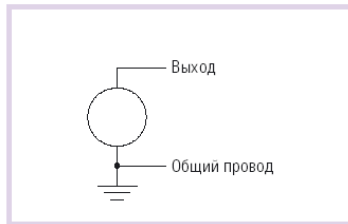


Рис. 7. Однофазный заземлённый источник сигнала

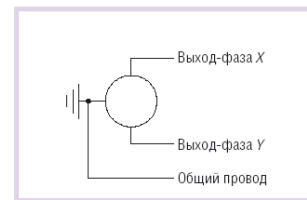


Рис. 8. Дифференциальный заземлённый источник сигнала

Достаточно интересным является типичный случай выхода массивного прибора — например, генератора — общий провод которого соединён с большим незаземлённым корпусом прибора. Можно отнести такой «крамольный» источник сигнала к заземлённому (в смысле сигнального заземления, а не защитного), поскольку имеются признаки местного заземления. В отличие от заземлённого источника, *изолированный* (незаземлённый, отвязанный от земли) источник не связан с землёй. Примеры: термopара, изолированная обмотка трансформатора. Примечательно, что однофазный изолированный источник, например термopара, не является дифференциальным, но при этом является симметричным, поскольку обладает свойством симметрии выходов по отношению к внешней среде, например, к паразитной ёмкостной связи относительно внешней гальваноразвязанной цепи, в частности, к земле.

По числу фаз

Дифференциальный (двухфазный) источник (рис. 9) всегда содержит в себе два противофазных источника сигнала, работающих относительно общего провода источника. Всего у этого источника три выходных провода.

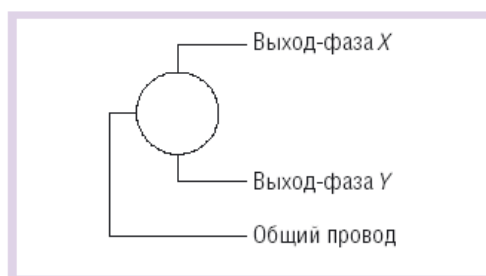


Рис. 9. Дифференциальный источник сигнала

К однофазным (рис. 10) относятся источники сигнала, имеющие два полюса и два выходных провода.

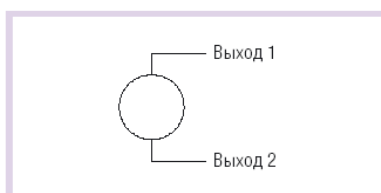


Рис. 10. Однофазный источник сигнала

По наличию экранирующей поверхности

Электростатический экран. *Экранированный источник сигнала* (рис. 12) — это источник, имеющий сплошной внешний токопроводящий контур, который называется экранирующей цепью. Экран — это токопроводящая оболочка системы.

Экран в изначальном понимании — это защитная токопроводящая оболочка системы, по которой не текут корпусные токи и токи общих проводов сигнальных цепей. В реальных устройствах эти принципы нарушаются. Например,

- в обычном одножильном коаксиальном кабеле оплётка выполняет роль экрана и нулевого провода;

- корпуса разъёмов коаксиальных кабелей часто соединяются непосредственно с корпусом прибора и с оплёткой кабеля. Получается, что в этом примере корпус, экран и общий провод сигнальной цепи — это плохо различимые понятия.

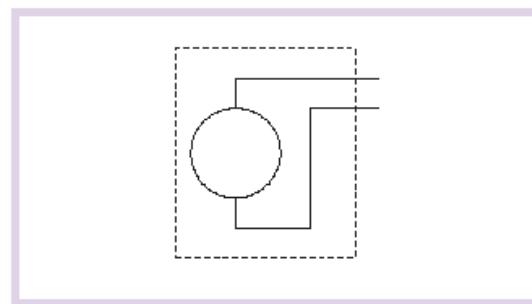


Рис. 12. Экранированный источник сигнала

выбирая тот или иной способ подключения экрана, нужно всегда отдавать себе отчёт в том, какой ток течет через экран и будет ли он вредить сигнальной цепи, потому что **идеальный экран тот, по которому ток вообще не течет!**

Под экранированным источником, подразумеваем, что физически экранирован и сам источник, и кабель, идущий от него. Как правил, экранируется только кабель (например, в случае применения датчиков, которые принципиально не могут быть экранированы) — такой источник тоже можно назвать экранированным.

Неэкранированным можно назвать источник сигнала, не имеющий окружающего токопроводящего контура. Если имеющийся токопроводящий контур не является экраном, то источник также не экранирован.

По полярности источника сигнала

Физическая величина на выходе источника может принимать однополярное или двухполярное значение. В зависимости от этого источник называется однополярным или двухполярным. Следует учитывать, что встречаются источники сигналов и с несимметричным выходом.

Типы входов устройств

По полярности входного сигнала

По диапазону входного сигнала входы разделяются на однополярные и двухполярные. Следует также учитывать, что встречаются приборы с несимметричным относительно нуля входным диапазоном сигнала (например, $-25\dots+75$ мВ).

По количеству фаз и степени симметрии входа

ЭТО степень симметричности входной сигнальной цепи по отношению к общей помехе, приложенной к сигнальной цепи относительно внешней среды (земли).

Дифференциальный вход (рис. 13) — это вход, позволяющий принять пару входных сигналов X и Y симметрично относительно общего провода (AGND) и выделить полезный разностный сигнал ($Y - X$) на фоне общего аддитивного помехового сигнала d

Таблица 1. Типичные примеры источников сигнала

Источник сигнала	По характеру внутреннего сопротивления	По наличию заземления	По числу фаз	По наличию экранирующей поверхности	По полярности сигнала
2 провода от термопары	Источник напряжения	Изолированный	Однофазный	Неэкранированный	Двухполярный (общий случай)
3 провода от от изолированной обмотки трансформатора со средней точкой	Источник напряжения	Изолированный	Дифференциальный	Неэкранированный	Двухполярный
Коаксиальный выход низкочастотного измерительного прибора (генератора)	Источник напряжения (в большинстве случаев)	Заземлённый	Однофазный	Экранированный	Одно- или двухполярный
Экранированная витая пара с заземлённым экраном от удаленного выхода прибора (общий случай)	Определяется в зависимости от выходного сопротивления удаленного прибора	Заземлённый	Дифференциальный	Экранированный	Одно- или двухполярный
Экранированный провод от источника заряда	Источник заряда	Как правило, заземлённый	Однофазный	Экранированный	Двухполярный

Обычно X — это неинвертирующий, а Y — инвертирующий вход.

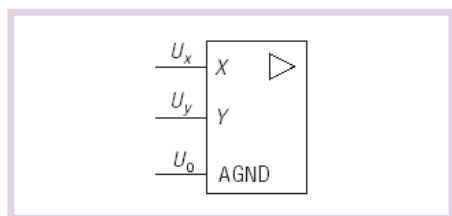


Рис. 13. Вход дифференциальный

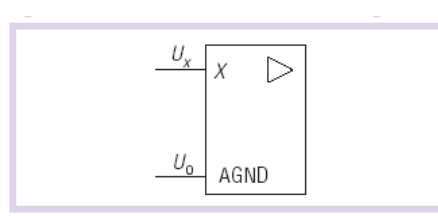


Рис. 14. Вход однофазный

Дифференциальный вход можно назвать разностным входом.

Аддитивный помеховый сигнал называется синфазным,

Полезный разностный сигнал ($Y - X$) — противофазным.

Коэффициент подавления синфазного сигнала определяет качество дифференциального входа.

Дифференциальный вход, в отличие от однофазного, позволяет подключить источник сигнала таким образом, чтобы ток сигнальной цепи не протекал через общий провод.

Дифференциальный вход — это всегда трёхточечное подключение. Очень часто дифференциальный вход является входом напряжения, реже встречаются дифференциальные (разностные) токовые входы и дифференциальные входы заряда. *Однофазный вход* (рис. 14) — это вход, использующий двухточечное подключение. Однофазный вход — это наиболее часто встречающийся вход. Это может быть вход напряжения, токовый или вход заряда.

По способу гальваноразвязки

Лучший вход — это независимый вход.

Главный смысл гальваноразвязки сигнальной цепи напряжения вообще заключается в исключении тем или иным способом паразитного сквозного тока по общему проводу от источника к приёмнику сигнала.

Этот ток, вызывающий помеховое падение напряжения на сопротивлении общего провода, в том числе индуктивного характера, вызывается разностью потенциалов между аналоговыми землями источника и приёмника сигнала. Существуют несколько принципов гальваноразвязки:

Трансформаторная гальваноразвязка сигнальной цепи относится к индивидуальному способу гальваноразвязки входа напряжения. Трансформаторная развязка может быть как однофазной, так и дифференциальной. Наиболее существенный недостаток трансформаторной развязки — это наличие проходной ёмкости между обмотками, которая не даёт возможности обеспечить полную независимость развязываемых цепей по высокой частоте — об этом надо всегда помнить.

Оптоэлектронная гальваноразвязка сигнальной цепи с применением оптопар даёт достаточно качественную гальваноразвязку сигнальной цепи. Как правило, применяется для развязки цифровых сигнальных цепей.

Импульсная поканальная гальваноразвязка — это развязка входной сигнальной цепи, которая делается не на уровне входных проводов устройства, а на уровне развязки всех остальных цепей с которыми связано устройство — это развязка цепей питания, управления и пр.

Суть этого способа состоит в разрыве цепи прохождения паразитного сквозного тока по нулевому проводу за счёт гальваноразвязки источника питания входного устройства.

Недостаток этого способа проявляется, главным образом, в наличии высокочастотных помех, проникающих через межобмоточные ёмкости трансформаторной развязки источника питания входного устройства.

Импульсная групповая гальваноразвязка аналогична предыдущей, но применена на уровне развязки группы каналов, при этом внутри группы гальваноразвязки нет.

По входному сопротивлению

Вход напряжения имеет большое входное сопротивление. Он предназначен для приёма информации в виде потенциального сигнала.

Токовый вход имеет малое входное сопротивление. Он предназначен для приёма информации в виде токового сигнала.

Ток I , протекающий через его входное сопротивление R_i пр, вызывает падение напряжения, максимальная величина которого $U_{max} = I_{max}R_i$ пр определяет запас по напряжению токового входа.

Вход заряда имеет малое входное сопротивление. Он выделяет информационную составляющую из заряда Q , пропускаемого через его входное сопротивление R_i пр. Сущность входа заряда поясним с использованием эквивалентной схемы источника заряда Q в виде последовательно соединённых ёмкости и источника переменного напряжения U , при этом эквивалентный заряд $Q = CU$. Как и у токового входа, входное сопротивление R_i пр входа заряда должно быть достаточно низким, в этом сходство входов тока и заряда. Отличие же носит принципиальный характер: вход заряда схемотехнически обеспечивает частотную – *символ гальваноразвязки* Y

Таблица 2. Карта совместимости типов входов с типами источников сигнала

Тип входа		Тип источника сигнала	По характеру внутреннего сопротивления			По наличию заземления		По числу фаз		По наличию экранирующей поверхности		По полярности источника сигнала	
			U	I	Q	Нет	Есть	1	2	Есть	Нет	Однополярный	Двухполярный
По входному сопротивлению	U — вход по напряжению		+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
	I — токовый вход		-	+	+/-	+	+	+	+	+	+	+	+
	Q — вход заряда		-	+/-	+	+	+	+	+	+	-	-	+
По полярности входного сигнала	Однополярный		+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
	Двухполярный		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
По количеству фаз и степени симметрии входа	Однофазный		+	+	+	+	+	+	+/-**	+	+	+	+
	Псевдодифференциальный		+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+
	Дифференциальный		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

* Случай встречается редко

** Можно считать совместимым, но только в случае, если однофазный вход имеет индивидуальную гальваноразвязку и это вход–выход напряжения, а не тока или заряда независимость в широкой полосе частот выделенной физической величины заряда, а при использовании токового входа в качестве входа заряда такая частотная независимость обеспечиваться не может, поскольку ток в сигнальной цепи при подсоединении описанной эквивалентной схемы источника заряда рассчитывается по формуле $I_{i\text{ пр}} = U / (Z_c + R_{i\text{ пр}})$ и, следовательно, частотно_зависим от реактивного сопротивления ёмкости источника заряда Z_c .

ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ ДАТЧИКОВ И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Паразитные воздействия на процесс передачи сигнала можно разделить на следующие группы:

- воздействия через кондуктивные связи;
- влияние неэквипотенциальности «земли»;
- наводки через взаимную индуктивность;
- наводки через ёмкостные связи;
- высокочастотные электромагнитные наводки.

Типы источников и приемников сигнала

Источники сигнала (датчики температуры, давления, веса, влажности и др.) могут быть заземлёнными или не заземлёнными (рис. 1). Незаземлёнными (плавающими) источниками сигнала являются

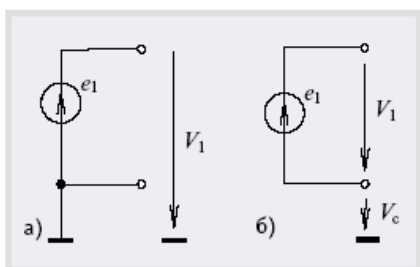


Рис. 1. Заземленный (а) и плавающий (б) источники сигнала

- батарейки,
- источники сигнала с батарейным питанием,
- термопары,
- изолированные операционные усилители,
- пьезоэлектрические датчики.

Сигналом в этих случаях является разность потенциалов между выводами источника (V_1). Потенциал выводов источника относительно

«земли» (V_c) является паразитным (синфазная помеха) и не должен влиять на результат измерений.

У заземлённого источника сигнала напряжение второго вывода измеряется относительно «земли». Заземлённый источник можно получить из плавающего, если один из его выводов заземлить, но это зависит от принципа построения датчика или схемы преобразования измеряемой физической величины в

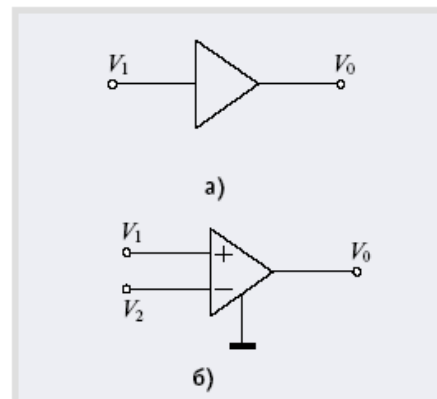


Рис. 2. Приемник сигнала с одиночным (а) и с дифференциальным (б) входом

напряжение, что часто невозможно. Плавающие источники, как правило, конструктивно и схемотехнически сложнее, чем заземлённые.

Источники сигнала могут быть не только источниками напряжения, но и источниками тока. Источники тока также могут быть заземлёнными или плавающими. Приёмник сигнала (например, система сбора данных) может измерять сигнал относительно «земли» или относительно второго входа. В первом случае приёмник сигналов называется приёмником с одиночным (недифференциальным) входом (рис. 2 а), во втором случае — дифференциальным приёмником сигнала (рис. 2 б).

Дифференциальный приёмник сигнала измеряет разность потенциалов между двумя проводниками. Потенциалы отсчитываются относительно общего провода приёмника (относительно «земли» приемника). Таким образом, дифференциальный приёмник сигналов имеет три входа: два сигнальных и один общий («земля»).

Важно отметить, что, с точки зрения помех, «земля» источника и приёмника сигнала имеет разные потенциалы, то есть это фактически разные «земли», и в дальнейшем на схемах они будут иметь разные условные обозначения.

Дифференциальные приёмники могут быть двух типов на основе:

- изолированного (плавающего) источника питания (тестеры, система сбора данных с компьютером типа «ноутбук» или малогабаритный осциллограф с батарейным питанием),
- схемы вычитателя, позволяющего определить разность потенциалов между двумя узлами электрической цепи (дифференциальный сигнал). Примерами дифференциальных приёмников на основе вычитателя являются схемы, построенные на базе инструментального дифференциального усилителя с большим коэффициентом подавления синфазного сигнала.

Неидеальность дифференциальных приемников заключается в том, что наряду с дифференциальным сигналом на выход приёмника попадает и ослабленный синфазный сигнал. Коэффициент передачи синфазного сигнала меньше, чем дифференциального, в некоторое число раз, которое называется коэффициентом ослабления синфазного сигнала K_{CMRR} . Коэффициент ослабления синфазного сигнала зависит от частоты. Наибольший интерес для систем промышленной автоматизации представляет коэффициент подавления синфазного сигнала с частотой 50 Гц, который является как электромагнитная наводка от электрической сети 220/380 В.

Напряжение на выходе дифференциального приёмника сигнала (рис. 2 б) можно записать в виде:

$$V_0 = K_0 (V_1 - V_2) + K_{CMRR} V_c \quad (1)$$

Здесь $V_c = (V_1 + V_2)/2$ — синфазное напряжение, K_0 — дифференциальный коэффициент усиления.

Следует отметить, что дифференциальный приёмник не может быть получен с помощью двух одиночных приёмников сигнала путём простого вычитания сигналов на их выходах (рис. 3).

Предположим, что мы используем два усилителя с одиночным входом, например, два канала из многоканальной платы ввода с одиночными входами, и хотим вы-

делить дифференциальный сигнал путем вычитания двух напряжений V_1 и V_2 . Описанная ситуация схематично изображена на рис. 3. Для этой схемы можно записать:

$$V_0 = K_1 V_1 - K_2 V_2 \quad (2)$$

В идеальном случае, когда

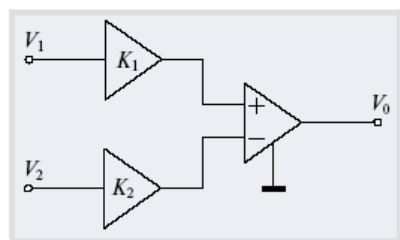


Рис. 3. Иллюстрация того, как нельзя строить усилители с дифференциальным входом

$K_1=K_2=K_0$, действительно получим дифференциальный приёмник сигнала:

$$V_0 = K_0 (V_1 - V_2)$$

Однако на самом деле коэффициенты усиления приёмников отличаются от идеального значения K_0 на величину относительной погрешности γ :

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= (K_1 - K_0)/K_0, \\ \gamma_2 &= (K_0 - K_2)/K_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Эта погрешность включает в себя инструментальную погрешность приёмников, напряжение смещения нуля, шумы электронных приборов и т. д. Примем по методу «наихудшего случая» (здесь — случай максимальной погрешности на выходе), что эти погрешности равны между собой, но противоположны по знаку и обе равны γ по абсолютной величине. Тогда, переписывая выражения (3) в виде

$$K_1 = (1 + \gamma) K_0, \quad K_2 = (1 - \gamma) K_0$$

и подставляя эти значения в (2), получим:

$$V_0 = K_0 (V_1 - V_2) + 2\gamma K_0 V_c \quad (4)$$

Здесь $V_c = (V_1 + V_2)/2$ — величина синфазного сигнала (по определению).

Следовательно, относительная погрешность приведённой к выходу усилителя измеряемой величины $K_0(V_1 - V_2)$, обусловленная влиянием синфазного сигнала, будет равна

$$\gamma_c = 2\gamma V_c / (V_1 - V_2) \quad (5)$$

Таким образом, в схеме на рис. 3 сумма погрешностей усилителей с одиночным входом (2γ) умножается на отношение величины синфазного сигнала к дифференциальному. При измерении сигналов термопар и других датчиков это отношение может достигать не скольких порядков. Поэтому погрешность измерения дифференциального сигнала таким методом будет также на несколько порядков больше. Рассмотрим пример. Предположим, что требуется получить дифференциальный сигнал с разрешающей способностью 12 бит, то есть с отношением сигнала к погрешности, равным 4096 (полагаем допустимую погрешность равной 1 младшему значащему разряду — МЗР).

Во всех случаях, когда измеряется разность двух напряжений, нужно усиливать потенциал V_1 , измеренный относительно V_2 , а не относительно «земли». Эта идея положена в основу построения большинства прецизионных усилителей с дифференциальным входом.

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАЗЕМЛЁННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Напряжение заземленного источника сигнала e_1 (рис. 4) измеряется с помощью заземлённого приёмника.*

Поскольку «земли» источника и приёмника сигнала пространственно разнесены, они имеют разный потенциал и обозначены на схеме по-разному. Разность потенциалов между ними равна V_g . По теореме об эквивалентном генераторе эта разность потенциалов может быть представлена на схеме источником напряжения $V_g = R_g I_g$, где R_g и I_g — соответственно сопротивление «земли» и ток через это сопротивление (рис. 5), причем напряжение, приложенное ко входу приёмника V_{in} , оказывается равным сумме напряжений источника сигнала и разности потенциалов между двумя «землями».

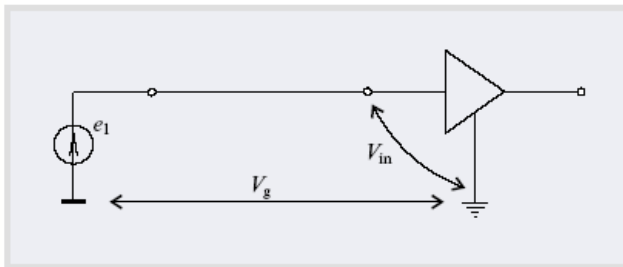


Рис. 4. «Земля» имеет разные потенциалы в разных точках

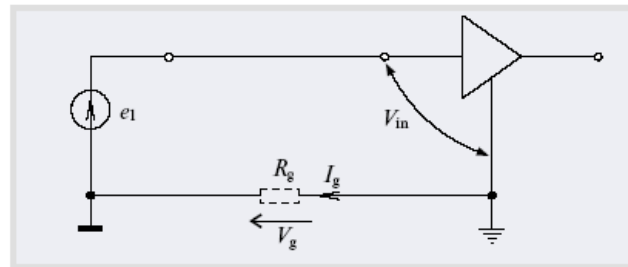


Рис. 6. Проводник, соединяющий «земли» источника и приёмника сигнала, имеет конечное сопротивление

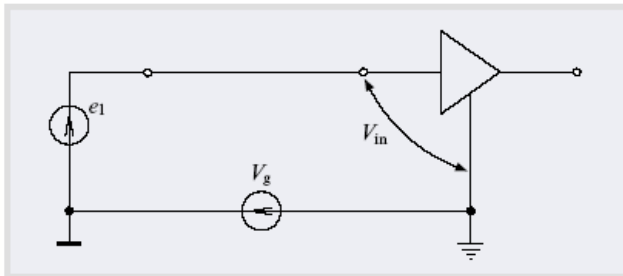


Рис. 5. Различие потенциалов «земли» источника сигнала и приёмника эквивалентно включению источника напряжения помехи последовательно с источником сигнала

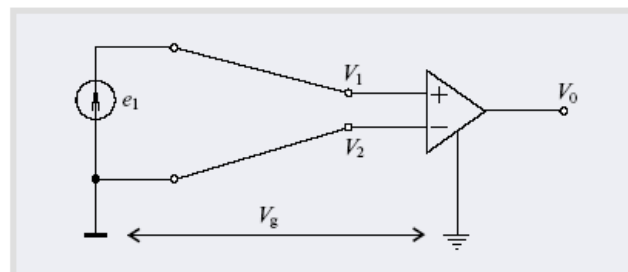


Рис. 7. Измерение сигнала заземленного источника с помощью дифференциального приёмника

Таким образом, результат измерения, выполненного по описанной схеме, будет содержать погрешность величиной V_g . Эта погрешность может находиться в допустимых пределах, если источник сигнала и приёмник расположены недалеко друг от друга или если напряжение сигнала имеет большую величину (например, предварительно усилено).

Уменьшение помехи:

- провод «земля» источника и приёмника сигнала соединить медным проводником с низким сопротивлением (рис. 6). Однако это не устраняет паразитное напряжение V_g полностью, поскольку ток, возникающий вследствие разности потенциалов «земель», теперь будет течь по соединяющему их проводнику. Как правило, основным компонентом тока является помеха с частотой 50 Гц, но большое значение имеет и э.д.с., наведенная высокочастотными электромагнитными полями. В этом случае

значительную роль играет индуктивность проводника, и устранить её без применения дифференциального приемника практически невозможно.

Схема, обеспечивающая наибольшую точность измерения сигнала заземлённого источника (рис. 7), содержит дифференциальный приёмник, который ослабляет синфазное напряжение помехи V_g в КСМRR раз. Следует отметить, что в схеме (рис. 7) нельзя соединять один из входов с «землёй» приемника, поскольку при этом фактически получается схема с одиночным входом (рис. 6) со всеми ее недостатками.

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НЕЗАЗЕМЛЁННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Напряжение незаземлённых (плавающих) источников сигнала измеряется приемником, как с одиночным, так и с дифференциальным входом. При использовании дифференциального входа нужно следить за тем, чтобы величина синфазного сигнала не вышла за границы диапазона работоспособности приёмника. Сопротивление между любым из дифференциальных входов и «землёй» очень велико, поэтому даже маленький ток помехи может создать на нём падение напряжения более 10 В, что переведёт приёмник сигнала в режим насыщения. Ток помехи в этом случае может состоять из входных токов смещения самого дифференциального приёмника и тока паразитной ёмкостной связи с источником помехи.

Для уменьшения этого эффекта входы дифференциального приемника соединяют с «землёй» через резисторы (рис. 8).

1. Если внутреннее сопротивление источника сигнала велико, то резисторы выбирают с одинаковым сопротивлением. При низком сопротивлении источника (например, термопары) разница сопротивлений не играет роли, и можно использовать одно из них вместо двух.

2. Если источник сигнала соединён с приёмником через развязывающие конденсаторы, то величины резисторов должны быть строго одинаковы. В измерениях с высокой точностью эти резисторы улучшают симметрию дифференциальной пары проводов и улучшают эффект компенсации синфазной помехи.

Сопротивление резисторов выбирается как можно меньшим, чтобы снизить величину синфазного сигнала, однако оно должно быть много больше внутреннего сопротивления источника сигнала, чтобы не вносить погрешность в результат измерения. При использовании термопар типовая величина сопротивлений лежит в диапазоне 10...100 кОм.

Дифференциальные приёмники сигнала всегда обеспечивают более высокую помехозащищённость по сравнению с приемниками с одиночным входом, однако они требуют больше соединительных проводов и технически сложнее. Поэтому

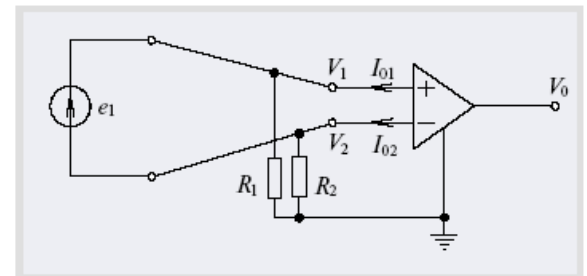


Рис. 8. Устранение насыщения дифференциального приемника с помощью резисторов

выбор между дифференциальным или одиночным входом может быть сделан только при рассмотрении конкретных условий применения и требований к системе.

Приёмники с одиночным входом могут быть использованы, если источник и приемник сигналов разнесены на небольшое расстояние (до единиц метров), если сигнал источника предварительно усилен или имеет большую величину (около 1 В) и если выводы «земля» источника и приемника соединены коротким низкоомным проводником в одной точке. Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, следует использовать приёмники с дифференциальным входом.

ПОГРЕШНОСТИ, ВЫЗВАННЫЕ КОНДУКТИВНЫМИ СВЯЗЯМИ

Источником погрешности при передаче сигнала может быть

- падение напряжения V_g на участке провода, общем для сигнала и некоторой нагрузки (рис. 9). *Такая паразитная связь называется кондуктивной (резистивной).*

Нагрузкой в данном случае может быть цифровая схема, заземляющий провод компьютера или случайный проводник, замкнувший провод «земля» с корпусом энергетического оборудования, через который протекает ток I_{NN} от эквивалентного источника e_{NN} .

- схема, состоящая из нескольких операционных усилителей, может создать на проводе длиной в 20 см падение напряжения более 1 мВ, что сравнимо с величиной МЗР 12-разрядного приёмника сигнала.

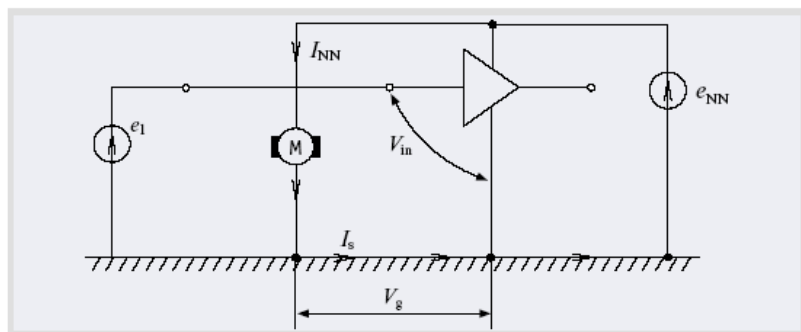
- особенно большие проблемы может создать цифровая схема, работающая в момент передачи аналогового сигнала. В результате входное напряжение V_{in} будет складываться из напряжения источника сигнала e_1 и напряжения помехи V_g .

Решением описанной проблемы является подсоединение «земли» источника сигнала к приемнику отдельным изолированным проводом, который не используется ни для каких иных целей (рис. 10).

В общем случае, чтобы заранее предотвратить возникновение данной проблемы, следует различать понятия «сигнальная земля», «аналоговая земля», «цифровая земля». Все эти «земли» должны быть выполнены разными проводами, и их можно соединять только в одной общей точке. Сигнальные цепи нельзя использовать для питания даже маломощной аппаратуры.

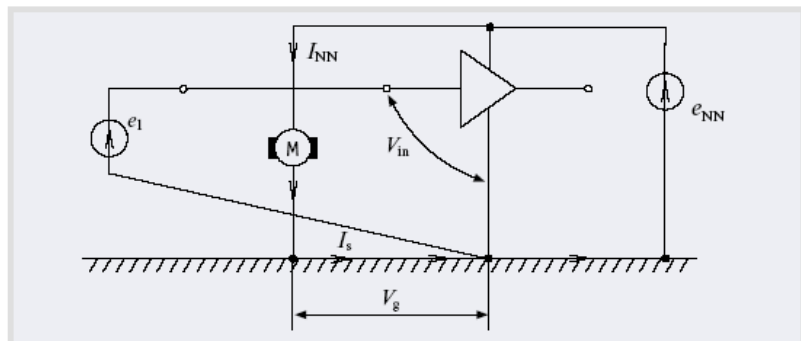
ИНДУКТИВНЫЕ И ЁМКОСТНЫЕ СВЯЗИ

Если рядом с сигнальным проводом проходит некоторый провод, по которому протекает ток амплитудой I_N (рис. 11). Тогда вследствие эффекта электромагнитной индукции на сигнальном проводе будет наводиться напряжение помехи V_M .



Условные обозначения: M — нагрузка, e_{NN} — эквивалентный источник, I_{NN} — ток, протекающий от эквивалентного источника через нагрузку.

Рис. 9. Паразитный ток I_s , протекающий по общему участку провода «земля», создает падение напряжения V_g



Условные обозначения: M — нагрузка, e_{NN} — эквивалентный источник, I_{NN} — ток, протекающий от эквивалентного источника через нагрузку.

Рис. 10. Решение проблемы: «земли» источника сигнала и приемника следует соединять отдельным проводом

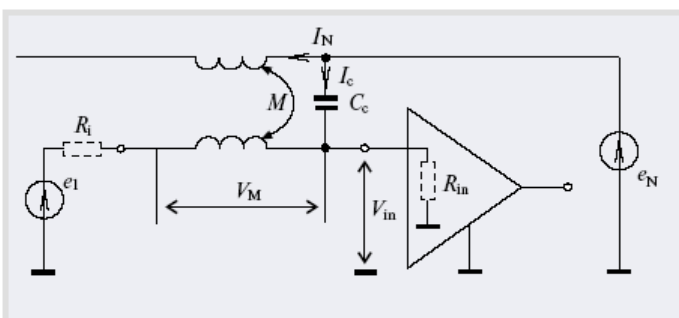


Рис. 11. Пути прохождения ёмкостной и индуктивной помехи от источника e_N

Здесь M - взаимная индуктивность между проводами; L - индуктивность сигнального провода; $\omega L = 2\pi fL$, f - частота тока помехи; R_i - выходное сопротивление источника сигнала; R_{in} - входное сопротивление приёмника. Величина взаимной индуктивности пропорциональна площади витка, который пересекается магнитным полем, созданным током I_N . «Витком» в данном случае является контур, по которому протекает ток, вызванный э.д.с. помехи. На рис. 11 этот контур образован сигнальным проводом, входным сопротивлением приёмника, проводом «земли» и выходным сопротивлением источника сигнала. Для уменьшения взаимной индуктивности площадь данного контура должна быть минимальной, то есть сигнальный провод должен быть проложен максимально близко к «земле». Эф-

Таблица 1. Типовые датчики и порядок величин их сопротивлений

Источник сигнала	Полное сопротивление
Термопара	< 20 Ом
Терморезистор	> 1 кОм
Резистивный датчик сопротивления	< 1 кОм
Полупроводниковый датчик давления	> 1 кОм
Тензодатчик	< 1 кОм
Стеклянный рН-электрод	> 10 ⁹ Ом
Потенциометрический датчик перемещения	от 500 Ом до 100 кОм
Операционный усилитель	10 ⁻⁴ Ом

фективную площадь «витка» можно уменьшить, если расположить его в плоскости, перпендикулярной плоскости контура с током, наводящим помехи.

В случае синусоидальной формы тока амплитуда напряжения помехи, наводимого на сигнальном проводе, будет равна

$$V_M = \frac{\omega \cdot M \cdot (R_i + R_m)}{\sqrt{(R_i + R_m)^2 + \omega^2 \cdot L^2}} \cdot I_N \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что

- индуктивная наводка увеличивается с ростом частоты и отсутствует на постоянном токе.

- напряжение помехи на рис. 11 включено последовательно с источником сигнала, то есть вносит аддитивную погрешность в результат измерения.

- при бесконечно большом сопротивлении R_{in} напряжение на входе приёмника имеет вид:

$$V_{in} = e_1 + \omega \cdot M \cdot I_N$$

и не зависит от сопротивления источника сигнала.

- ёмкостная наводка через паразитную ёмкость между проводниками C_c , наоборот, полностью определяется величиной внутреннего сопротивления источника сигнала R_i , поскольку оно входит в делитель напряжения помехи, состоящий из сопротивления R_i , включенного параллельно R_{in} , и ёмкости C_c :

$$V_{in} = e_1 + \frac{\omega \cdot (R_i \parallel R_{in}) \cdot C_c}{\sqrt{1 + (\omega \cdot (R_i \parallel R_{in}) \cdot C_c)^2}} \cdot e_N \quad (7)$$

Как следует из (7), при $R_i = 0$ ёмкостная помеха полностью отсутствует. *В действительности сигнальный проводник имеет некоторое индуктивное и резистивное сопротивление, падение напряжения помехи на котором не позволяет полностью устранить ёмкостную наводку с помощью источника с низким внутренним сопротивлением. Особенно важно учитывать индуктивность сигнального провода в случае высокочастотных помех.*

Порядок величин сопротивлений типовых источников сигнала приведен в табл. 1.

Датчики, имеющие большое внутреннее сопротивление или малое напряжение сигнала, нужно использовать совместно с усилителем, расположенным в непосредственной близости к датчику, а к приемнику следует передавать уже усиленный сигнал.

Для устранения индуктивной наводки носителем сигнала должен быть ток, а не напряжение, то есть источником сигнала должен быть идеальный источник тока (рис. 12). Ток источника тока не зависит от характера нагрузки (по определению), в том числе от величины наведённой э.д.с. Таким образом, для снижения ёмкостной наводки сигнал нужно передавать с помощью идеального

источника напряжения, а для снижения индуктивной наводки — с помощью идеального источника тока.

Выбор носителя информации (ток или напряжение) в каждом конкретном случае зависит от того, какая помеха преобладает: индуктивная или ёмкостная.

Как правило, ёмкостные наводки преобладают над индуктивными, если источник помехи имеет большое напряжение.

Индуктивные же помехи создаются током, поэтому они велики в случае, когда источником помехи является мощное оборудование, потребляющее большой ток.

Экранирование магнитной наводки технически гораздо сложнее, чем ёмкостной.

Стремление совместить преимущества передачи сигнала в форме тока и в форме напряжения приводит к передаче информации сигналом большой мощности.

Отношение мощности сигнала к мощности помехи определяет величину погрешности, вносимую помехами в результат измерения. Из формулы (6)

При сопротивлениях нагрузки и источника, стремящихся к нулю, напряжение помехи также стремится к нулю (а передаваемая мощность — к бесконечности).

ПАРАЗИТНЫЕ СВЯЗИ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА

Кардинальным средством устранения индуктивных и ёмкостных связей является применение источников сигнала с дифференциальным токовым выходом и приемников с низкоомным (токовым) дифференциальным входом (рис. 13). Индуктивная наводка мала, поскольку информация передается в форме тока, а ёмкостная наводка мала, поскольку при хорошей симметрии линии передачи она является синфазной и подавляется входным дифференциальным приёмником.

Дополнительной защитой линии является её экранирование. Токи источников тока на рис. 13 строго равны между собой и противоположно направлены.

Для получения высокого качества передачи сигнальные провода должны быть экранированы и выполнены в виде витой пары, чтобы обеспечить лучшую согласованность их продольных импедансов и импеданса на «землю». Разница в длине проводов и в частотных характеристиках их импедансов может быть причиной появления синфазной помехи на высоких частотах.

Для повышения степени согласованности линий в витой паре лучше использовать провода, специально изготовленные и аттестованные для инструментальных промышленных применений. Использование двух витых, соединённых параллельно, пар вместо одной позволяет снизить продольный импеданс проводов и повысить точность передачи сигнала.

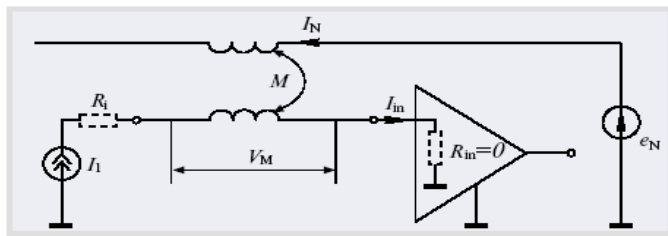


Рис. 12. Канал передачи сигнала с помощью тока менее чувствителен к индуктивным наводкам

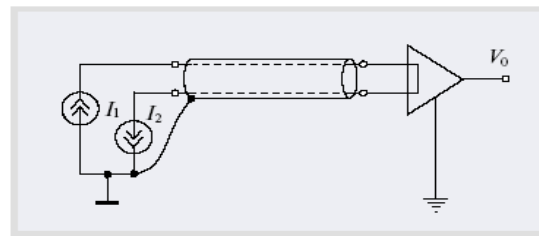


Рис. 13. Дифференциальный источник и приемник тока — наилучшее решение проблемы качественной передачи сигнала

Недостатком токовых каналов передачи информации является то, что в соответствии с выражением (7) при бесконечно большом сопротивлении источника и приёмника сигнала относительно «земли» напряжение ёмкостной наводки является максимальным. Применение резисторов для отвода тока помехи на землю (рис. 8) улучшает ситуацию, однако эти резисторы не могут быть выбраны очень малыми, поскольку при этом увеличивается влияние их рассогласования на погрешность передачи тока.

ЭКРАНИРОВАНИЕ СИГНАЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

Методы экранирования сигнального провода выбираются в зависимости от путей прохождения помехи.

1. Для устранения паразитной ёмкостной связи используют электростатический экран в виде проводящей трубки (чулка), охватывающей экранируемые провода, а для защиты от магнитного поля используют экран из материала с высокой магнитной проницаемостью.

2. Нельзя соединять электростатический экран с «землёй» источника и приемника одновременно (рис. 14), поскольку при этом через экран течет ток, обусловленный неравенством потенциалов этих «земель» и достигающий в цеховых условиях нескольких ампер, а разность потенциалов «земель» может достигать нескольких вольт.

3. Ток, протекающий по экрану, является источником индуктивных наводок на соседних проводах и проводах, находящихся внутри экрана. Наводка на провода внутри экрана может иметь значительную величину при неточном их центрировании вследствие технологического разброса. Поэтому экран нужно заземлять только с одной стороны, причем со стороны источника сигнала.

4. В общем случае при передаче широкополосного сигнала от удаленного источника с высоким сопротивлением рекомендуется использовать схему гибридного заземления (рис. 15). В данной схеме ёмкость $C_{НФ}$ позволяет ослабить высокочастотную составляющую помехи. Таким образом, низкочастотный ток, создающий индуктивную наводку, остаётся малым, а высокочастотные наводки заземляются через ёмкость.

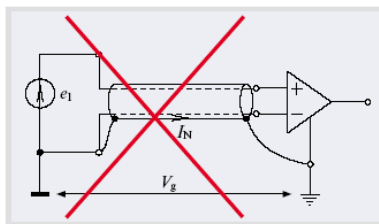


Рис. 14. Пример неправильного заземления экрана

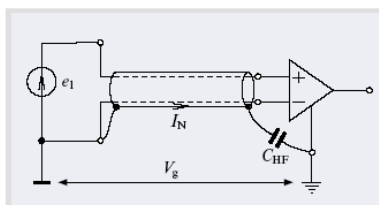


Рис. 15. Пример правильного заземления экрана при передаче сигнала от удаленного источника с высоким сопротивлением

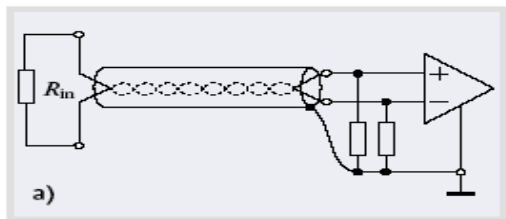
1. Экран, защищающий от паразитных индуктивных связей, сделать гораздо сложнее, чем электростатический экран. Для этого нужно использовать материал с высокой магнитной проницаемостью и, как правило, гораздо большей толщины, чем толщина электро-

статических экранов. Для частот ниже 100 кГц можно использовать экран из стали или пермаллоя.

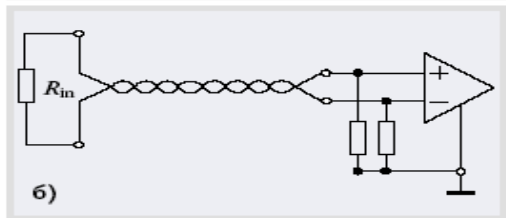
2. На более высоких частотах используются алюминий и медь.

Для экранирования магнитной составляющей помехи

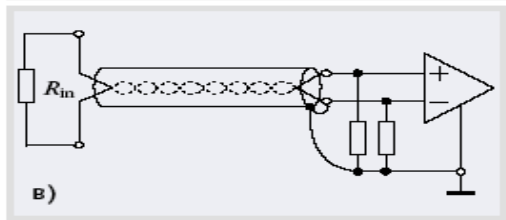
1. Уделить внимание уменьшению индуктивности сигнального провода и выбору схемы приёмника и передатчика.



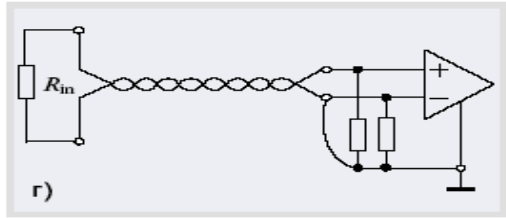
а)



б)



в)



г)

- а) амплитуда помехи — 15 мкВ
 б) амплитуда помехи — 61 мкВ
 в) амплитуда помехи — 78 мкВ
 г) амплитуда помехи — 3584 мкВ

Рис. 16. Зависимость среднеквадратической амплитуды напряжения помехи от способа включения усилителя и экрана

2. Если источник сигнала не заземлён (например, в случае температурных датчиков), то экран применяют в сочетании с дифференциальным усилителем и резисторами на входе. При этом экран заземляют, как показано на рис. 16 а.

3. Отказ от экранирования увеличивает амплитуду помехи в 4 раза (рис. 16 б).

4. Переход к одиночному включению вместо дифференциального (рис. 16 в) увеличивает её в 5 раз.

5. Если ещё и отказаться от экрана, то амплитуда помехи увеличивается в 230 раз (рис. 16 г).

На рисунках приведены среднеквадратические значения амплитуды напряжения помех в полосе частот 0,01...5 Гц, полученные на выходе приёмника сигнала и приведенные к его входу.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ДРУГИЕ ТИПЫ ПОМЕХ

Высокочастотные электромагнитные помехи наводятся от таких источников, как радио и телевизионные передатчики, мобильные и радиотелефоны, тиристорные преобразователи, коллекторные электродвигатели, электросварочное оборудование, дисплеи компьютеров и сами компьютеры.

1. Помехи с частотой выше 100 кГц обычно находятся за границей частотного диапазона измерительных систем, однако высокочастотные помехи могут быть нежелательным образом выпрямлены или перенесены в область более низких частот по причине нелинейности характеристик диодов и транзисторов, расположенных на измерительной плате и внутри микросхем.

2. В системах с очень высокой чувствительностью могут наблюдаться паразитные напряжения, вызванные термоэлектрическим эффектом в контактах разнородных металлов, трибоэлектричеством, возникающим при трении диэлектриков друг о друга, пьезоэлектрическим эффектом и эффектом электростатического или электромагнитного микрофона. Эти источники помех опасны тем, что встречаются редко, поэтому о них зачастую забывают.

Решение проблемы помех следует начинать с поиска их источника. Для этого, в первую очередь, следует измерять уровень помех отдельно в приёмнике сигнала, в источнике и в соединительном кабеле.

1. Для проверки приёмника следует максимально коротким проводом соединить его вход (или входы для дифференциального приёмника) с выводом «земля» системы.

2. Нельзя оставлять часть входов многоканальной системы незаземленной. На выходе будут видны также собственные шумы приёмника сигнала. Нужно убедиться, что уровень шумов соответствует спецификации на изделие.

Если имеются расхождения, то вероятной причиной могут быть источники помех, воздействующие непосредственно на плату измерительной части системы, или неправильное подключение цепей питания и заземления. Для их обнаружения можно попробовать изменить местоположение измерительной части.

Для измерения уровня помех, наведенных в кабеле

1. Нужно подключить кабель к системе сбора данных.

2. Закоротить кабель со стороны источника сигнала, то есть имитировать нулевое внутреннее сопротивление источника.

3. Если уровень помехи будет сильно отличаться от её уровня в случае, когда источник сигнала подключен, то причина может быть в недостаточно низком сопротивлении источника.

4. Для уменьшения помехи следует использовать согласующий усилитель или выбрать более помехоустойчивый способ передачи сигнала.

5. Для оценки уровня помех источника его нужно соединить максимально коротким проводом с входом приёмника. Если источник помех заранее неизвестен, его поиску может помочь спектральный анализ помехи.

6. Для увеличения точности передачи каждый сигнал должен передаваться витой парой в индивидуальном экране.

7. Для витых пар должна быть симметричность свойств проводов кабеля (импедансов проводов в паре и равномерности их частотных характеристик в полосе рабочих частот). Равномерность характеристик позволяет выполнять компенсацию асимметрии линий и тем самым уменьшать влияние паразитных наводок.

8. Для уменьшения паразитных наводок, создаваемых на кабеле магнитной составляющей электромагнитного излучения, необходимо обеспечить минимально возможный шаг скрутки проводников в витой паре и минимальную площадь петель, образующихся при подключении витой пары к источнику и приемнику сигнала.

9. При невысоких требованиях к точности могут быть использованы витые или невитые сигнальные провода в общем экране. Однако в этом случае появляются индуктивные и ёмкостные взаимовлияния проводников в кабеле, а также кондуктивные связи через общий провод заземления экрана.

10. Если параметры сигнала известны заранее, для уменьшения помех можно использовать аналоговые фильтры на входе системы. Для ослабления помехи с частотой 50 или 60 Гц обычно используют фильтры третьего порядка, имеющие наклон АЧХ в полосе заграждения -60 дБ на декаду.

11. Если измерения производятся на частотах, близких к граничной частоте фильтра, следует учитывать погрешность коэффициента передачи фильтра в полосе пропускания.

12. Дальнейшее ослабление помех возможно путем цифровой фильтрации. Однако она не может полностью заменить аналоговую в связи с тем, что ее возможности ограни-

чены быстродействием системы сбора данных, требуемым временем измерения и разрядностью аналого-цифрового преобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К проблеме помехозащищённости измерительных каналов следует относиться с максимальным вниманием, поскольку неправильный выбор схемы подключения, разводки кабелей, системы заземления и экранирования могут свести на нет достоинства дорогой и, казалось бы, крайне надёжной электронной части системы.