

Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации

<http://www.rlda.ru> ,
e-mail: info@rlda.ru,
тел. (86344) 2-14-57

Примечание. Изложенный ниже материал опубликован нами в журнале "Современные технологии автоматизации", см. статью Денисенко В.В., Халявко А.Н. "Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации", СТА, №1, 2001 г., стр. 68-75. Перепечатано с разрешения СТА в журнале "Управление, контроль, диагностика", №4, 2002г., с.45-51.

Введение

Подключение датчиков к измерительной системе является очень непростым делом и часто выявляет неожиданные проблемы, причина которых кроется в том, что источники погрешностей, вызванных паразитными связями, являются скрытыми от проектировщика - они не нарисованы на электрической схеме. Об их местонахождении можно только догадываться, их появление трудно предсказать, а устранить можно только в процессе эксперимента. Тем не менее, ряд типовых условий возникновения помех и методов их устранения достаточно хорошо изучен. О них и пойдет речь в настоящей статье.

Понимание причин возникновения помех при проектировании систем автоматизации позволяет избежать ряда ошибок в выборе оборудования, его размещении, экранировании и кабельной разводке, а также ускорить процесс внедрения системы.

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

- воздействия через кондуктивные связи;
- влияние неэквипотенциальности "земли";
- наводки через взаимную индуктивность;
- наводки через емкостные связи;
- высокочастотные электромагнитные наводки.

Типы источников и приемников сигнала

Источники сигнала (датчики температуры, давления, веса, влажности и др.) могут быть заземленными (рис.1,а) или незаземленными (рис.2). Примерами незаземленных (плавающих) источников сигнала являются батарейки, источники сигнала с батарейным питанием, термопары, трансформаторы, изолированные операционные усилители, пьезоэлектрические датчики. Сигналом в этих случаях является разность потенциалов между выводами источника (V_I). Потенциал выводов источника относительно «земли» V_C является паразитным (синфазной помехой) и не должен влиять на результат измерений.

У заземленного источника сигнала один из выводов заземлен (рис.1, а) и напряжение второго вывода измеряется относительно «земли». Заземленный источник можно получить из плавающего, если один из его выводов заземлить. Однако получить плавающий источник достаточно сложно, поскольку сам принцип построения датчика или схемы преобразования измеряемой физической величины в напряжение часто не позволяют этого сделать. Поэтому плавающие источники, как правило, конструктивно и схемотехнически сложнее, чем заземленные.

Источники сигнала могут быть не только источниками напряжения, но и источниками тока. Источники тока также могут быть заземленными или плавающими.

Приемник сигнала (например, система сбора данных) может принимать (измерять) сигнал относительно «земли» или относительно второго входного зажима. В первом случае приемник сигналов называется приемником с одиночным (недифференциальным) входом (рис.2,а), во втором случае - дифференциальным приемником сигнала (рис.2,б).

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

Важно отметить, что с точки зрения помех «земля» источника и приемника сигнала имеет разные потенциалы, т.е., это фактически разные «земли» и в дальнейшем на схемах они будут обозначаться разными условными обозначениями.

Дифференциальные приемники могут быть двух типов: построенные на основе изолированного (плавающего) источника питания или на основе схемы вычитателя, позволяющего вычислить разность потенциалов между двумя узлами электрической цепи (дифференциальный сигнал). Примерами приемников первого типа являются тестеры, система сбора данных с компьютером типа "ноутбук" или малогабаритный осциллограф с батарейным питанием. Примерами дифференциальных приемников 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 приемника 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 появляется как электромагнитная наводка от электрической сети 220/380 Вольт.

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

$$V_o = K_o (V_1 - V_2) + K_{CMRR} V_c, \quad (1)$$

где $V_c = (V_1 + V_2)/2$ - синфазное напряжение, K_o - дифференциальный коэффициент усиления.

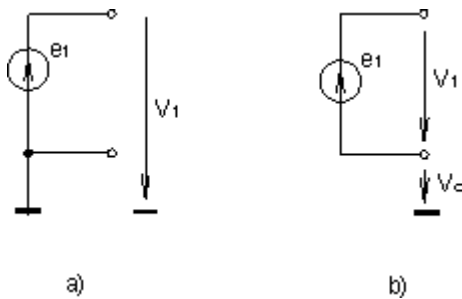


Рис.1. Заземленный (а) и плавающий (б) источники сигнала

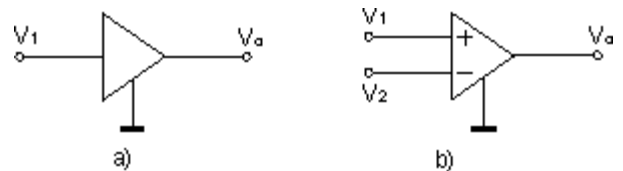


Рис.2. Приемник сигнала с одиночным (а) и с дифференциальным (б) входом

Следует отметить, что дифференциальный приемник (рис.2,б) не может быть получен с помощью двух одиночных приемников сигнала путем 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 выделить дифференциальный сигнал путем вычитания двух напряжений V_1 и V_2 , предварительно введенных в компьютер. Описанная ситуация схематично изображена на рис.3. Для этой схемы можно записать:

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

В идеальном случае, когда $K_1 = K_2 = K_o$, действительно получим дифференциальный приемник сигнала, $V_o = K_o (V_1 - V_2)$. Однако на самом деле коэффициенты усиления приемников отличаются от идеального значения K_o на величину относительной погрешности

$$\gamma_1 = (K_1 - K_o)/K_o, \quad \gamma_2 = (K_o - K_2)/K_o. \quad (3)$$

Эта погрешность включает в себя погрешность коэффициента усиления, напряжение смещения нуля, погрешность аналого-цифрового преобразования, шумы электронных приборов, электромагнитные и кондуктивные помехи, погрешность методов сглаживания данных в компьютере, то есть весь спектр погрешностей от источника сигнала до вычитателя (1).

Используя метод анализа погрешностей для наихудшего случая, предположим, что погрешности равны между собой, но противоположны по знаку и 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:

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

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

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

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

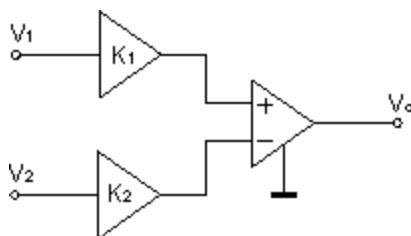


Рис.3. Иллюстрация того, как нельзя строить усилители с дифференциальным входом

Таким образом, в схеме на рис.3 сумма погрешностей усилителей с одиночным входом (2γ) умножается на отношение величины синфазного сигнала к дифференциальному $V_c / (V_1 - V_2)$. При измерении сигналов термпар и других датчиков это отношение может достигать нескольких порядков. Поэтому погрешность измерения дифференциального сигнала таким методом будет также на несколько порядков хуже.

Рассмотрим пример. Предположим, что нам требуется получить дифференциальный сигнал с разрешающей способностью 12 бит, то есть с отношением сигнала к погрешности, равным 4096. Предположим также, что погрешность полностью определяется синфазной помехой, т.е. погрешность равна $\gamma_c = 1/4096$. Если при этом синфазная помеха в 10 раз больше дифференциального сигнала, то есть $V_c / (V_1 - V_2) = 10$, то из формулы (5) следует, что погрешность усилителей γ должна быть равна $\gamma = (\gamma_c / 2) / 10 = 1/81920$, что может быть получено только с помощью 17-разрядного АЦП.

Иными словами, при синфазном сигнале, превышающем в 10 раз дифференциальный сигнал, для получения разрешающей способности 12 бит каждый из сигналов должен быть усилен усилителем с разрешающей способностью 17 бит. Поэтому во всех случаях, когда измеряется разность двух напряжений, нужно усиливать потенциал V_1 , измеренный относительно V_2 , а не относительно "земли".

Итак, источники сигнала бывают источниками тока и напряжения, с одиночным выходом и плавающие. Приемники сигнала могут быть с одиночным входом и дифференциальные.

Измерение напряжения заземленных источников

Рассмотрим, что происходит, когда напряжение заземленного источника сигнала e_1 (рис.4) измеряется с помощью заземленного приемника. Поскольку "земли" источника и приемника сигнала пространственно разнесены, они имеют разный потенциал и обозначены на рис.4 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 $R_g I_g$ - сопротивление "земли" и ток через него (рис.5), причем напряжение, приложенное ко входу приемника, оказывается равным сумме напряжений источника сигнала и разности потенциалов между двумя "землями". Таким образом, результат измерения, выполненного описанным способом, будет содержать погрешность величиной V_g . Эта погрешность может находиться в допустимых пределах, если источник сигнала и приемник расположены недалеко друг от друга, или если напряжение сигнала имеет большую величину (например, предварительно усилено).

Ситуация может быть существенно улучшена, если "земляной" провод источника и приемника 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, основной компонентой тока является помеха с частотой 50 Гц, но значительную роль играет и э.д.с., наведенная высокочастотными электромагнитными полями. В последнем случае индуктивность проводника играет значительную роль и устранить ее без применения дифференциального приемника практически невозможно.

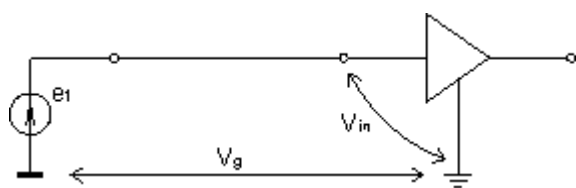


Рис.4. "Земля" имеет разные потенциалы в разных ее точках

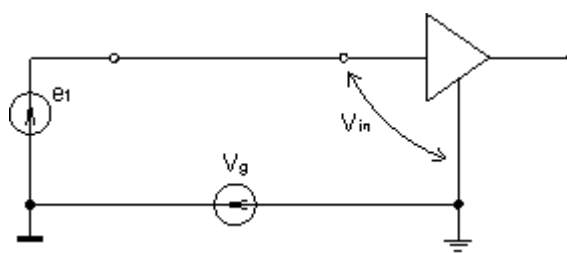


Рис.5. Различие потенциалов "земли" источника сигнала и приемника эквивалентно включению источника напряжения помехи последовательно с источником сигнала

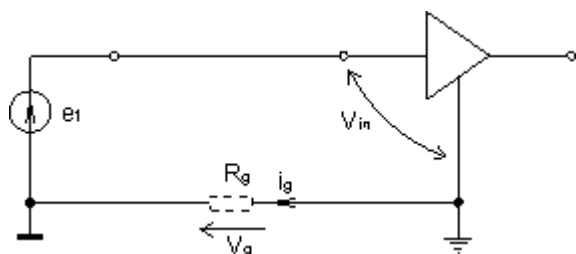


Рис.6. Проводник, соединяющий "земли" источника и приемника сигнала, имеет конечное сопротивление

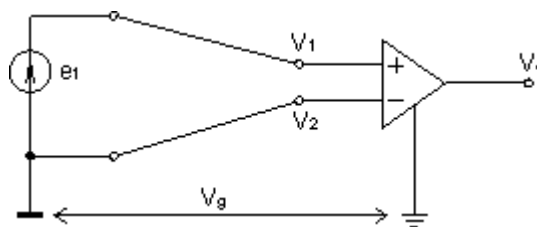


Рис.7. Измерение сигнала заземленного источника с помощью дифференциального приемника

Наиболее точная схема для измерения сигнала заземленного источника показана на рис.7. Она содержит дифференциальный приемник, который ослабляет синфазное напряжение помехи V_g в K_{CMRR} раз.

Следует отметить, что в схеме на рис.7 нельзя соединять один из входов с "землей" приемника, поскольку при этом фактически получается схема с одиночным входом (рис.6) со всеми ее недостатками.

Измерение напряжения "плавающих" (незаземленных) источников

Напряжение плавающих источников сигнала может быть достаточно точно измерено приемником как с одиночным, так и с дифференциальным входом. Однако при использовании дифференциального входа нужно следить за тем, чтобы величина синфазного сигнала не вышла за границы диапазона работоспособности

приемника. Сопротивление между любым из дифференциальных входов и "землей" очень велико, поэтому даже маленький ток помехи может создать на нем падение напряжения более 10 Вольт, что переведет приемник сигнала в режим насыщения. Ток помехи в этом случае может состоять из входных токов смещения самого дифференциального приемника и тока паразитной емкостной связи с источником помехи.

Для уменьшения этого эффекта входы дифференциального приемника можно соединить с "землей" через резисторы (рис.8). Если внутреннее сопротивление источника сигнала велико, то резисторы выбирают с одинаковым сопротивлением. При низком сопротивлении источника (как, например, у термопар), разница сопротивлений не играет роли и можно использовать одно из них вместо двух. Если источник сигнала соединен с приемником через развязывающие конденсаторы, то величины резисторов должны быть строго одинаковы. В измерениях с высокой разрешающей способностью эти резисторы улучшают симметрию дифференциальной пары проводов и улучшают эффект компенсации синфазной помехи.

Сопротивление резисторов на рис.8 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 10КОм...100КОм.

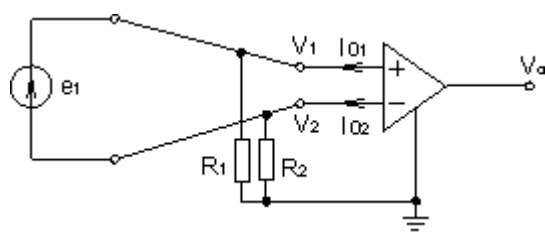


Рис.8. Устранение насыщения дифференциального приемника с помощью резисторов

Дифференциальные приемники сигнала всегда дают более высокую помехозащищенность по сравнению с приемниками с одиночным входом, однако они требуют больше соединительных проводов и технически сложнее. Поэтому выбор между дифференциальным или одиночным входом может быть сделан только при рассмотрении конкретных условий применения и требований к системе.

Нами было проделано экспериментальное сравнение величины помех для приемников с одиночным и дифференциальным входом. В качестве источника сигнала был выбран терморезистор сопротивлением 20 КОм, соединенный витой парой длиной 5 метров с приемником. В качестве дифференциального приемника был использован инструментальный усилитель RL-4DA200 и система сбора данных RealLab! фирмы RLDA. Переход от одиночного включения к дифференциальному в данном случае уменьшает среднее квадратическое значение напряжения помехи в 136 раз. Это объясняется тем, что усилитель с одиночным входом воспринимает без ослабления помеху, которая была ослаблена в дифференциальном усилителе благодаря его коэффициенту подавления синфазного сигнала.

В первом приближении можно сказать, что приемники 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 1В) и если "землянные" выводы источника и приемника соединены коротким низкоомным проводником в одной точке. Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, следует использовать приемники 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, например, некоторая вспомогательная цифровая схема, заземляющий провод компьютера или случайное соприкосновение земляного провода с корпусом энергетического оборудования, через которые протекает ток I_N . Даже 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 приемника 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).

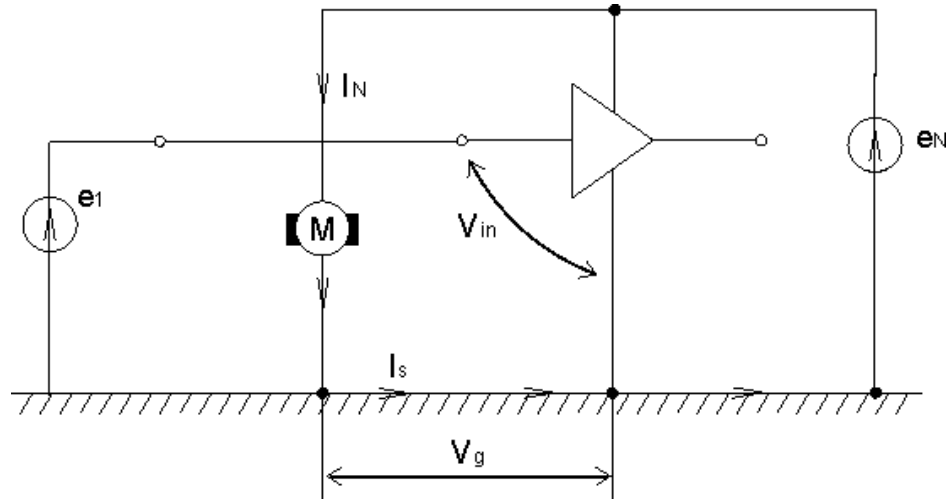


Рис.9. Ток нагрузки M , равный I_s и протекающий по общему участку "земляного" провода, создает падение напряжения V_g

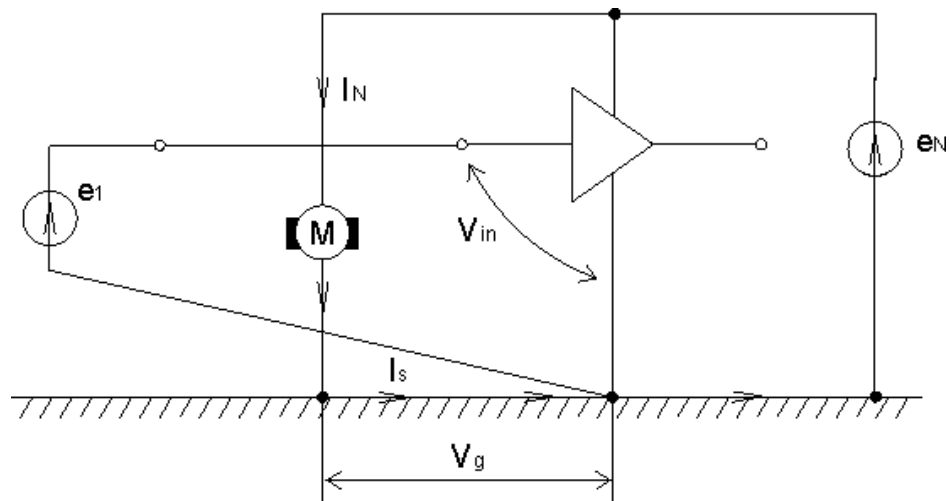


Рис.10. Решение проблемы: "земли" источника сигнала и приемника следует соединять отдельным проводом

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 емкостные связи

Предположим, что рядом с сигнальным проводом проходит некоторый провод, по которому протекает ток помехи амплитудой I_N (рис.11). Тогда вследствие эффекта электромагнитной индукции на сигнальном проводе будет наводиться напряжение помехи V_M . В случае синусоидальной формы тока амплитуда напряжения помехи, наводимого на сигнальном проводе, будет равна

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

где M - взаимная индуктивность между проводами, L - индуктивность сигнального провода; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, f - частота тока помехи.

Величина взаимной индуктивности пропорциональна площади витка, который пересекается магнитным полем помехи. "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 приемника, проводом "земли" и выходным сопротивлением источника сигнала. Для уменьшения взаимной индуктивности площадь данного контура должна быть минимальной, т.е. сигнальный провод должен быть проложен максимально близко к земляному. Эффективную площадь "витка" можно уменьшить, если расположить его в плоскости, перпендикулярной плоскости контура с током помехи.

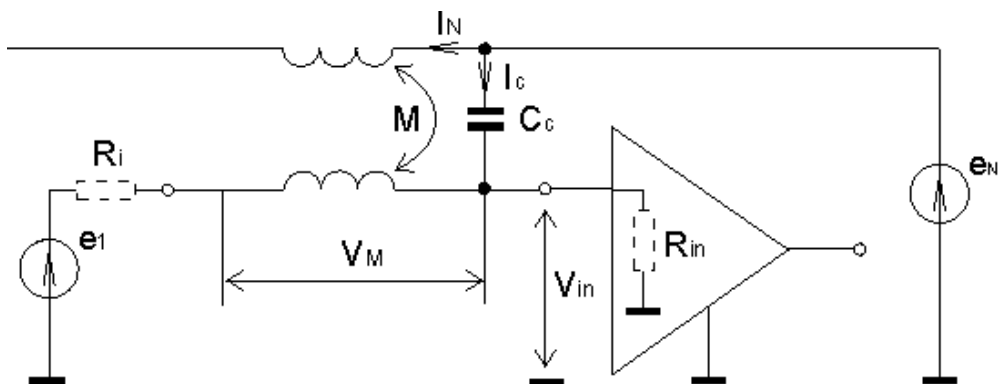


Рис.11. Пути прохождения емкостной и индуктивной помехи от источника e_N

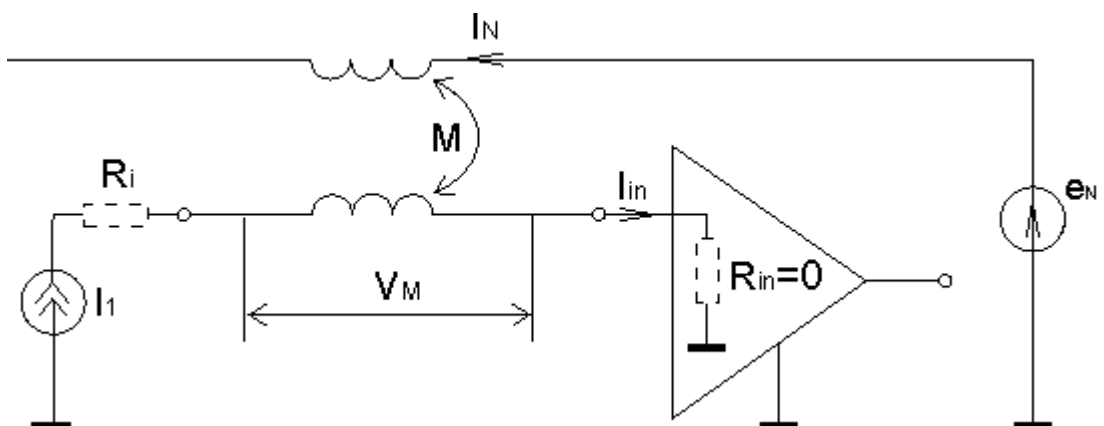


Рис.12. Канал передачи сигнала с помощью тока менее чувствителен к индуктивным наводкам

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 приемника имеет вид:

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

и не зависит от сопротивления источника сигнала.

Емкостная наводка через паразитную емкость 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 емкости C_c (рис.11):

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

Как следует из (7), при $R_i = 0$ емкостная помеха полностью отсутствует. В действительности сигнальный проводник имеет некоторое индуктивное и резистивное сопротивление, падение напряжения помехи на котором не позволяет полностью устранить емкостную 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

Таблица 1. Типовые датчики и порядок величин их сопротивлений

<i>Источник сигнала</i>	<i>Полное сопротивление</i>
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

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.

Дуальная ситуация по отношению к рассмотренной означает, что для устранения индуктивной наводки носителем сигнала должен быть ток, а не напряжение, т. е. источником сигнала должен быть идеальный источник тока (рис.12). Ток источника тока не зависит от характера нагрузки (по определению), в том числе от величины наведенной э.д.с.

Таким образом, для снижения емкостной 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 конкретном случае зависит от того, какая помеха преобладает: токовая или емкостная. Как правило, емкостные 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. Отметим, что экранирование магнитной наводки технически гораздо сложнее, чем емкостной.

Стремление совместить преимущества передачи сигнала в форме тока и в форме напряжения приводит к передаче информации сигналом большой мощности $e_1^2 / (R_i + R_{in})$. Отношение мощности сигнала к мощности помехи определяет величину погрешности, вносимую помехами в результат измерения. Этот же вывод следует непосредственно из формулы (6): при сопротивлении нагрузки, стремящемся 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 емкостных связей является применение источников сигнала с дифференциальным токовым выходом и приемников с низкоомным (токовым) дифференциальным входом (рис.13). В них индуктивная наводка мала, поскольку информация передается в форме тока (см. объяснения в предыдущем разделе), а емкостная наводка мала, поскольку при хорошей симметрии линии передачи она является синфазной и подавляется входным дифференциальным приемником. Дополнительной защитой линии является ее 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 могут быть причиной появления синфазной помехи на высоких частотах.

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

Примером реализации дифференциального способа передачи сигнала может служить пара дифференциального токового передатчика SSM2142 и дифференциального приемника SSM2141 (Analog Devices), которые имеют коэффициент ослабления синфазного сигнала 100 дБ на частоте 60 Гц, и работают на нагрузку 600 Ом, создавая на ней максимальное падение напряжения 10В.

Для предотвращения насыщения выходных каскадов источников тока разностью токов ($I_1 - I_2$) можно использовать способ, аналогичный представленному на рис.8. Однако резисторы в данном случае должны быть соединены с "землей" источника сигнала.

Недостатком токовых каналов передачи информации является то, что в соответствии с выражением (7) при бесконечно большом сопротивлении источника и приемника сигнала (относительно "земли") напряжение емкостной 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.

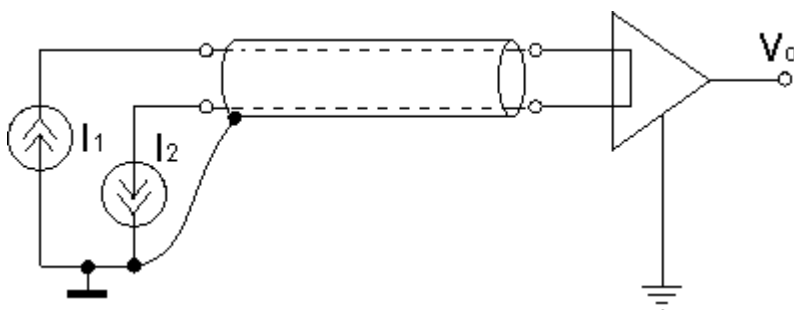


Рис.13. Дифференциальный источник и приемник тока - наилучшее решение проблемы качественной передачи сигнала

Экранирование сигнальных проводов

Методы экранирования сигнального провода непосредственно следуют из изложенного выше материала о путях прохождения помехи. Для устранения паразитной емкостной 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.

Нельзя соединять электростатический экран с "землей" 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. 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 (рис.15), причем со стороны источника сигнала.

Высокочастотные электромагнитные наводки на экране можно дополнительно ослабить, используя емкость C_{HF} (рис.15). При этом низкочастотный ток, создающий индуктивную наводку, остается малым, а высокочастотные наводки заземляются через емкость.

Заземление экрана со стороны приемника приводит к тому, что ток, вызванный помехой V_g , протекает по пути: общий провод источника сигнала - емкость между проводниками кабеля - емкость между верхним (на рис.15) проводником и оплеткой - проводник заземления кабеля - земля. Протекание такого тока создает падение напряжения на емкости между проводниками кабеля, которая включена параллельно входам приемника сигнала.

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 электростатических экранов. Для частот ниже 100 КГц можно использовать экран из стали или пермаллоя. На более высоких частотах можно также использовать алюминий и медь.

В связи со сложностью экранирования магнитной составляющей помехи особое внимание следует уделить уменьшению индуктивности сигнального провода и выбору подходящей схемы приемника и передатчика.

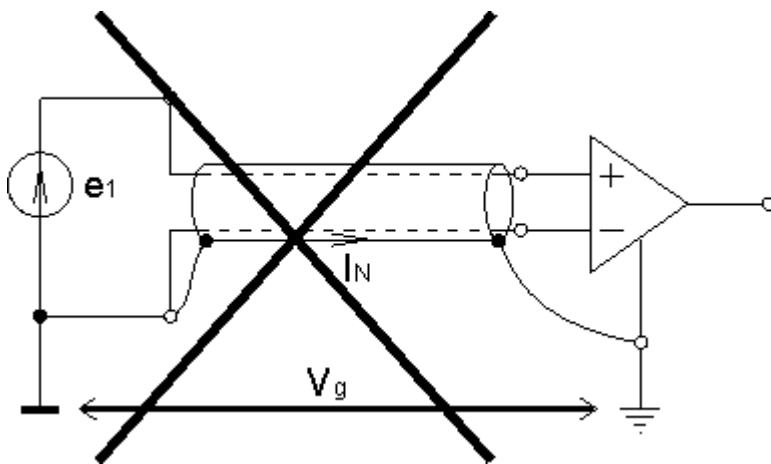


Рис. 14. Пример неправильного заземления экрана

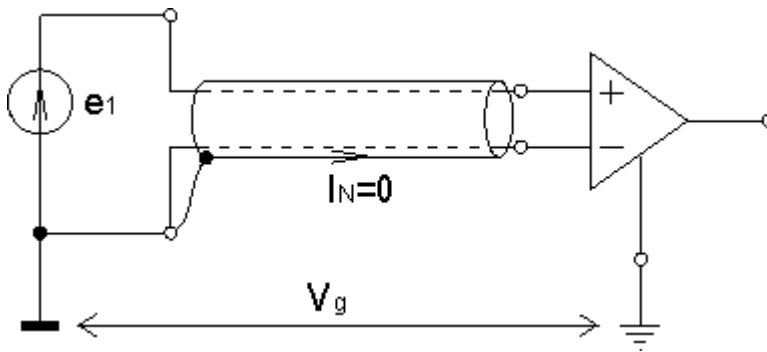
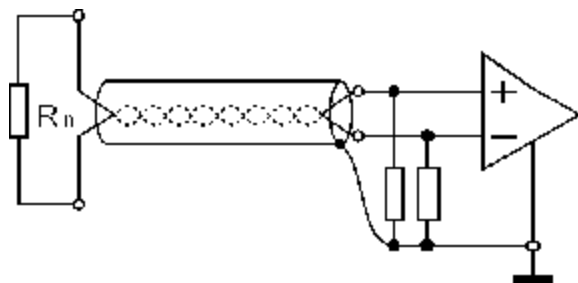


Рис. 15. Пример правильного заземления экрана

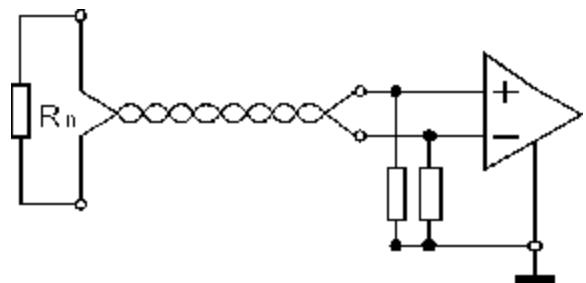
Если источник сигнала не заземлен, как, например, в случае большинства температурных датчиков, то экран применяют в сочетании с дифференциальным усилителем и резисторами на входе, назначение которых обсуждалось выше. При этом экран заземляют, как показано на рис.16,а.

Нами было проведено экспериментальное сравнение различных способов подключения источника сигнала (терморезистор сопротивлением 20 КОм) через экранированную витую пару (0,5 витка на сантиметр) длиной 3,5м. Был использован инструментальный усилитель RL-4DA200 с системой сбора данных RL-40AI фирмы RLDA. Коэффициент усиления канала усиления был равен 390, полоса пропускания 1 КГц. Вид помехи для схемы рис.16, а) представлен на рис.17.

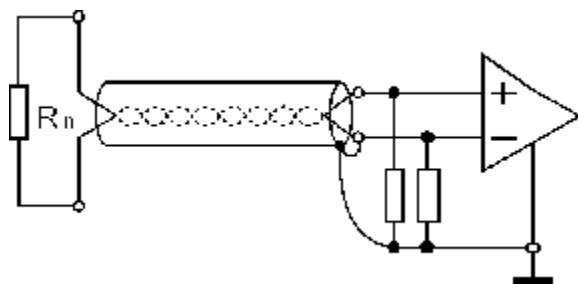
Как следует из рис.16, отказ от экранирования увеличивает величину помехи в 4 раза (рис.16, b), переход к одиночному включению вместо дифференциального (рис.16, c) увеличивает помеху в 5 раз, а если еще и отказаться от экрана, то помеха увеличивается в 230 раз (рис.16, d). На рисунках приведено среднее значение напряжения помехи в полосе частот 0,01...5 Гц, полученное на выходе приемника сигнала.



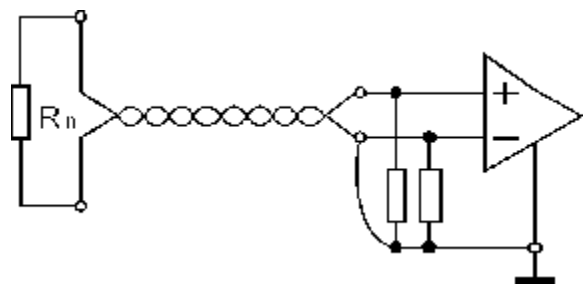
а) величина помехи - 15 мкВ



б) величина помехи - 61 мкВ



с) величина помехи - 78 мкВ



д) величина помехи - 3584 мкВ

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

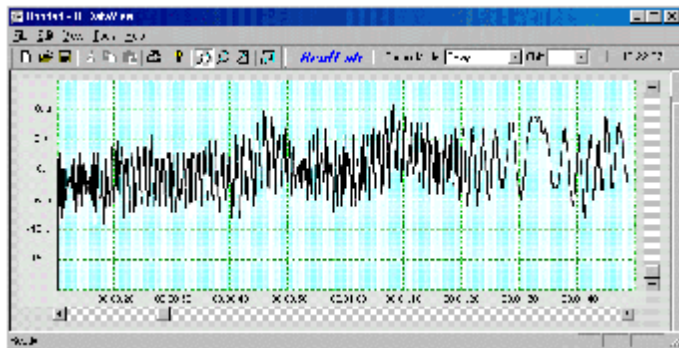


Рис.17. Вид помехи, соответствующий схеме включения по рис.16, а)

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

В измерительных цепях, находящихся в состоянии движения (вибрации), источником помех может быть трибоэлектричество, возникающее при трении диэлектриков друг о друга, а также пьезоэлектрический эффект, и эффект электростатического или электромагнитного микрофона.

Методы борьбы с помехами такого типа сводятся к закреплению и механическому демпфированию движущихся частей электрической схемы.

В системах с очень высокой чувствительностью могут наблюдаться паразитные напряжения, вызванные термоэлектрическим эффектом в контактах разнородных металлов. Эти источники помех опасны тем, что встречаются редко, поэтому о них зачастую забывают.

С чего начать

На практике решение проблемы помех следует начинать с поиска их источника. Для этого в первую очередь следует измерять уровень помех отдельно в приемнике сигнала, в источнике и в соединительном кабеле.

Для проверки приемника следует максимально коротким проводом соединить его вход (или входы для дифференциального входа) с земляным выводом системы. Нельзя оставлять часть входов многоканальной системы незаземленными. На выходе при этом будут видны собственные шумы приемника 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, нужно подключить его к системе сбора данных и закоротить кабель со стороны источника сигнала, т.е. симитировать нулевое внутреннее сопротивление источника. Если уровень помехи будет сильно отличаться от случая, когда источник сигнала подключен, то причина может быть в недостаточно низком сопротивлении источника и для его уменьшения следует использовать подходящий согласующий усилитель или выбрать более помехоустойчивый способ передачи сигнала.

Для оценки уровня помех источника его нужно соединить максимально коротким проводом со входом приемника.

Если источник помех заранее неизвестен, его поиску может помочь спектральный анализ помехи.

Для увеличения точности передачи каждый сигнал должен передаваться витой парой в индивидуальном экране. При изготовлении витых пар для промышленных применений особое значение уделяется симметрии импедансов проводов в паре и равномерности их частотных характеристик в полосе рабочих частот. Равномерность характеристики позволяет выполнять компенсацию асимметрии линий и тем самым уменьшать влияние паразитных наводок. 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.

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

Если полоса частот сигнала меньше, чем полоса приемника, или если некоторые 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. Если измерения производятся на частотах, близких к граничной частоте фильтра, следует учитывать погрешность коэффициента передачи фильтра в полосе пропускания.

Дальнейшее ослабление помех возможно путем цифровой фильтрации. Однако она не может полностью заменить аналоговую в связи с тем, что ее возможности ограничены быстродействием системы сбора данных, требуемым временем измерения и разрядностью аналого-цифрового преобразователя. Кроме того, цифровой фильтр всегда стоит после аналого-цифрового преобразователя, а это означает, что постоянная составляющая, которая может появиться в аналоговой части системы вследствие выпрямления напряжения помехи на ее нелинейностях, не может быть отфильтрована цифровым фильтром.

Заключение

К проблеме помехозащищенности систем промышленной автоматизации следует относиться с максимальным вниманием, поскольку неправильный выбор схемы подключения, разводки кабелей, системы заземления и экранирования могут свести на нет оплаченные достоинства электронной части системы. В то же время правильное понимание описанных проблем позволит в ряде случаев достичь хороших результатов с применением недорогого оборудования.