

Подключение аналоговых сигналов и помехи

Обзор

К сожалению, измерение аналоговых сигналов с помощью устройства сбора данных не всегда сводится просто к соединению проводниками источника сигнала с устройством сбора данных. Для получения точных и свободных от помех результатов измерений необходимо знать природу источника сигнала, подходящую для измерений конфигурацию DAQ-устройства и соответствующую схему подключения. Целостность полученных данных зависит от всего тракта распространения аналогового сигнала. Чтобы охватить широкий диапазон приложений, большинство DAQ-устройств обладают определенной гибкостью конфигурирования узлов аналогового ввода. Однако ценой этой гибкости являются сложность правильного применения различных конфигураций входа и использования их достоинств. В настоящем документе рассматриваются разновидности конфигураций аналогового ввода, доступные в DAQ-устройствах, объясняется, как выбрать и использовать конфигурацию, наилучшим образом соответствующую создаваемому приложению, а также обсуждаются механизмы наведения помех и способы минимизации помех с помощью правильного подключения и экранирования. Понимание типов источников сигналов и измерительных систем — предпосылка для применения правильных методов измерений, так что обсуждение мы начнем именно с этих вопросов.

Содержание

1. Типы источников сигналов и измерительных систем
2. Измерения с заземленными источниками сигналов
3. Измерения с плавающими (незаземленными) источниками сигналов
4. Минимизация помех в схемах соединений
5. Сбалансированные системы
6. Решение проблемы помех в измерительных установках
7. Методы обработки сигналов для подавления помех

1. Типы источников сигналов и измерительных систем

Наиболее распространенный электрический аналог схемы кондиционирования (согласования) сигналов — это датчик с выходным сигналом по напряжению. Преобразование в другие электрические величины, например, в ток или частоту, может происходить в случаях, когда сигнал должен передаваться по длинным кабелям в неблагоприятных условиях. Практически во всех случаях преобразованный сигнал перед измерением, в конечном счете, преобразуется обратно в напряжение. Поэтому важно понимать, что представляет собой источник сигнала напряжения.

Помните, что сигнал напряжения измеряется как разность потенциалов между двумя точками. Это показано на рисунке 1.

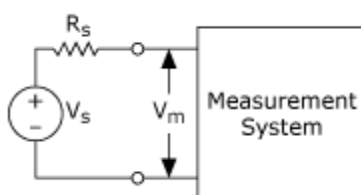


Рисунок 1. Источник сигнала напряжения и модель измерительной системы
Measurement System – измерительная система

Источник напряжения может относиться к одной из двух категорий — заземленные или незаземленные (плавающие). Аналогично, измерительная система также может относиться к одной из двух категорий — заземленные или незаземленные (плавающие).

Заземленный источник сигнала

Заземленный источник сигнала — такой, в котором сигналы напряжения снимаются относительно системы заземления здания. Наиболее распространенные примеры заземленных источников — это подключаемые через настенные розетки обычные измерительные приборы, выходной сигнал которых не является плавающим. На рисунке 2 показан заземленный источник сигнала.

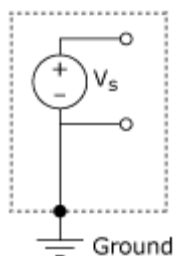


Рисунок 2. Заземленный источник сигнала
Ground - земля

Точки заземления двух независимо заземленных источников сигналов, как правило, находятся под разными потенциалами. Разность потенциалов между двумя приборами, подключенными к одной и той же цепи заземления здания, обычно составляет от 10 мВ до 200 мВ. Разность может быть больше, если схемы распределения питания подключены неправильно.

Незаземленные (плавающие) источники сигналов или источники сигналов, не привязанные к общей (опорной) цепи

У плавающего источника сигнала выходное напряжение не связано с общей цепью, например, заземлением в грунте или заземлением здания. Распространенными примерами плавающих источников являются гальванические элементы, источники сигналов, питающиеся от батареи, термопары, трансформаторы, изолирующие усилители и любые приборы, выходной сигнал которых является в явном виде *плавающим*. Незаземленный или плавающий источник сигнала показан на рисунке 3.

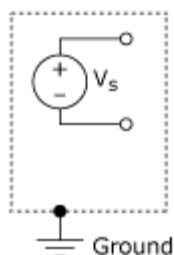


Рисунок 3. Незаземленный или плавающий источник сигнала
Ground - земля

Обратите внимание на то, что ни один из выводов источника не подключен к цепи заземления через настенную розетку. Каждый вывод независим от заземления системы.

Дифференциальная измерительная система (не привязанная к общей цепи)

Ни один из входов дифференциальной измерительной системы не соединен с общей шиной – заземлением в грунте или заземлением здания. Примерами подобных систем являются портативные приборы с батарейным питанием и устройства сбора данных с инструментальными усилителями. Типичное устройство производства National Instruments, в котором реализована 8-канальная измерительная система с дифференциальными входами, изображено на рисунке 4. Аналоговые мультиплексоры (MUX) в измерительных цепях позволяют увеличить количество измерительных каналов, при этом достаточно одного инструментального усилителя. Для такого устройства вывод AI GND (заземление цепей аналогового ввода) является заземлением измерительной системы.

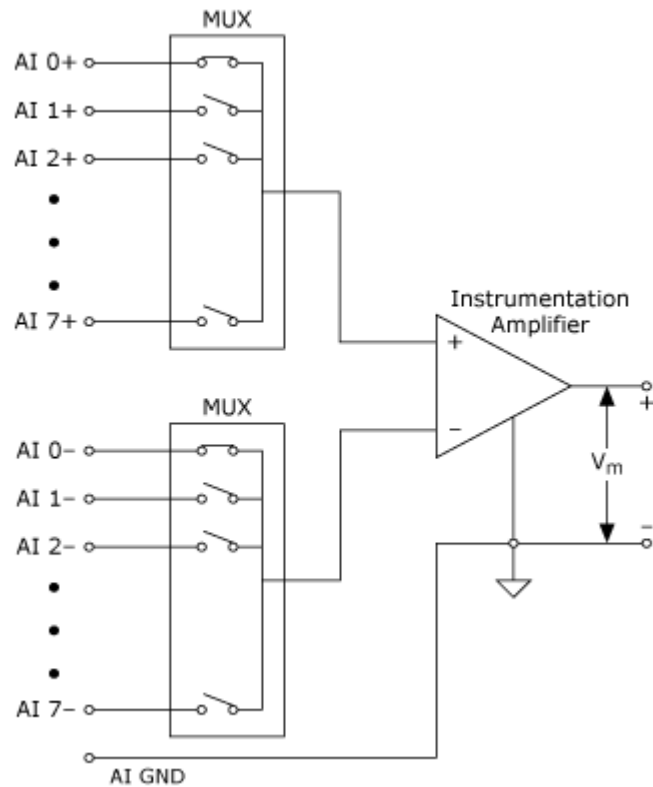


Рисунок 4. Восьмиканальная дифференциальная измерительная система
 MUX – мультиплексор, Instrumentation Amplifier – инструментальный усилитель

Идеальная дифференциальная измерительная система реагирует только на разность потенциалов между двумя выводами — положительным (+) и отрицательным (–). Синфазное напряжение (напряжение общего вида) — любое напряжение, измеренное относительно земли инструментального усилителя, присутствует на обоих входах усилителя. Идеальная дифференциальная измерительная система полностью подавляет (не измеряет) синфазное напряжение. Это свойство полезно для подавления помех, поскольку помехи часто вводятся в схему, как наведенные на линии связи синфазные напряжения. Однако на практике действуют несколько ограничений, такие, как диапазон синфазного напряжения и коэффициент подавления синфазного напряжения (CMRR), которые ограничивают возможность реальных дифференциальных измерительных систем подавлять синфазное напряжение.

Синфазное напряжение V_{cm} определяется следующим уравнением:

$$V_{cm} = (V^+ + V^-) / 2$$

где V^+ - напряжение на неинвертирующем выводе, а V^- - напряжение на инвертирующем выводе измерительной системы относительно системной земли. CMRR в децибелах (дБ) определяется следующим образом:

$$CMRR \text{ (дБ)} = 20 \log (\text{Дифференциальный коэффициент усиления} / \text{Коэффициент усиления синфазного сигнала}).$$

На рисунке 5 показана простая цепь, для которой CMRR в децибелах рассчитывается как: $20 \log V_{cm} / V_{out}$ где $V^+ = V^- = V_{cm}$.

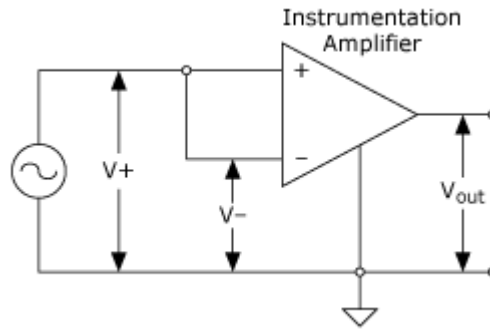


Рисунок 5. Иллюстрация Схема измерения коэффициента подавления синфазного напряжения
Instrumentation Amplifier – инструментальный усилитель

Диапазон синфазного напряжения ограничивает доступный размах напряжения на каждом входе относительно земли измерительной системы. Нарушение этого ограничения не только приводит к появлению погрешностей измерений, но может даже привести к повреждению компонентов устройства. Коэффициент подавления синфазного напряжения (CMRR) определяет способность дифференциальной измерительной системы подавлять синфазный сигнал. CMRR зависит от частоты и, как правило, уменьшается с увеличением частоты. Использование сбалансированной схемы может оптимизировать CMRR. Более подробно это будет рассмотрено ниже. Большинство устройств сбора данных задают CMRR для частоты 60 Гц, частоты линий электрической сети.

Заземленная измерительная система (связанная с общей цепью)

Заземленные измерительные системы похожи на заземленный источник сигнала в том плане, что измерения в них выполняются относительно заземления (общей цепи). На рисунке 6 показана 8-канальная заземленная измерительная система. Она также называется измерительной системой с несимметричным входом (*Single-ended measurement system*).

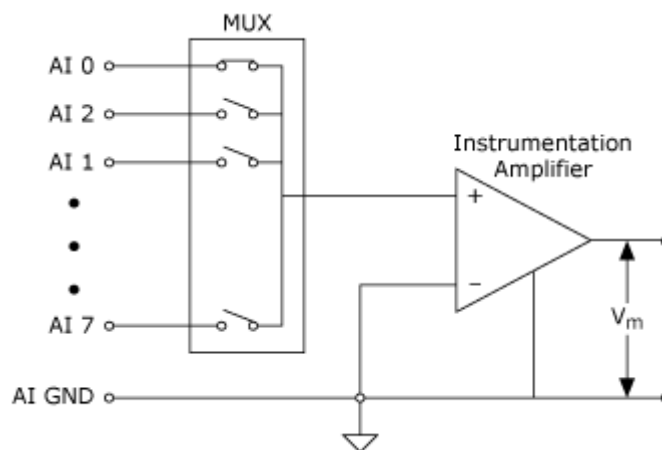


Рисунок 6. 8-канальная измерительная система с несимметричным входом и заземленным общим проводом (RSE)

MUX – мультиплексор, Instrumentation Amplifier – инструментальный усилитель

В устройствах сбора данных часто применяются схемы измерений с несимметричными входами без заземления общего провода (Non-Referenced Single-Ended Measurement Systems – NRSE). Такая система изображена на рисунке 7.

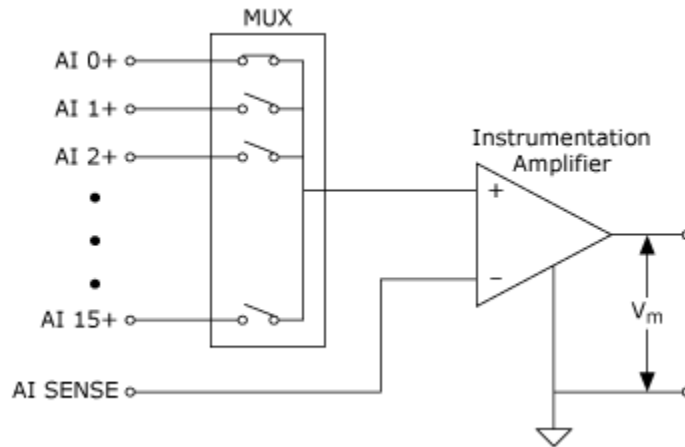


Рисунок 7. Восьмиканальная измерительная система с несимметричным входом и незаземленным общим проводом (NRSE)

MUX – мультиплексор, Instrumentation Amplifier – инструментальный усилитель

В системах типа NRSE все измерения проводятся относительно общего вывода аналоговой части схемы (AI SENSE), однако потенциал этого вывода может значительно отличаться от потенциала заземления системы (AI GND). На рисунке 7 показано, что одноканальная система с незаземленным несимметричным входом аналогична одноканальной дифференциальной системе.

Теперь, когда мы определили разницу между различными типами источников сигналов и измерительных систем, мы можем обсудить наиболее подходящую измерительную систему для каждого типа источников сигналов.

[В начало](#)

2. Измерения с заземленными источниками сигналов

Сигнал от заземленного источника лучше всего измерять с помощью дифференциальной (без соединения с общей цепью) измерительной системы. На рисунке 8 показана ошибка – заземленная измерительная система используется для измерения сигнала от заземленного источника. В этом случае измеряемое напряжение (V_m) представляет собой сумму напряжения сигнала (V_s) и разности потенциалов между заземлением источника сигнала и заземлением измерительной системы (ΔV_g). Значение этой разности потенциалов, как правило, не постоянно. Поэтому результаты измерения получаются зашумленными, часто с частотными компонентами линии электропередачи (60 Гц). Помехи, вносимые контуром заземления, могут иметь как компоненты постоянного тока, так и компоненты переменного тока, что вносит в измерения погрешность смещения, а также флуктуации. Разность потенциалов между двумя "заземлениями" заставляет ток контура заземления протекать по смежным ветвям. Такой ток называется током в заземляющем контуре.

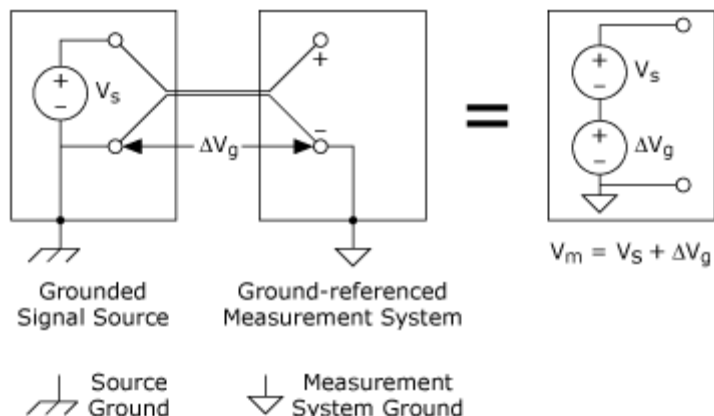


Рисунок 8. Появление контура заземления при использовании заземленной измерительной системы для измерения заземленного источника сигнала

Grounded Signal Source – заземленный источник сигнала, Ground-referenced Measurement System – заземленная измерительная система, Source Ground – заземление источника, Measurement System Ground – заземление измерительной системы

Вы можете использовать заземленные измерительные системы, если уровни напряжения сигнала высоки, а цепи подключения между источником и измерительным прибором обладают низким импедансом. В этом случае качество измерения напряжения сигнала ухудшается контуром заземления, но это ухудшение может быть приемлемым. Обратите внимание на полярность заземленного источника сигналов, прежде чем подключать его к заземленной измерительной системе, поскольку источник сигнала может замкнуться на землю, что может его повредить. Особенности подключения будут рассмотрены более подробно ниже.

Как схема с дифференциальными входами (DIFF), так и с несимметричными входами без заземления общего провода (NRSE) обеспечивают возможность измерений типичным DAQ-устройством. При любой из этих схем подключения разность между опорными точками источника сигнала и измерительного устройства проявляется, как синфазное напряжение для измерительной системы, и вычитается из измеряемого сигнала. Это показано на рисунке 9.

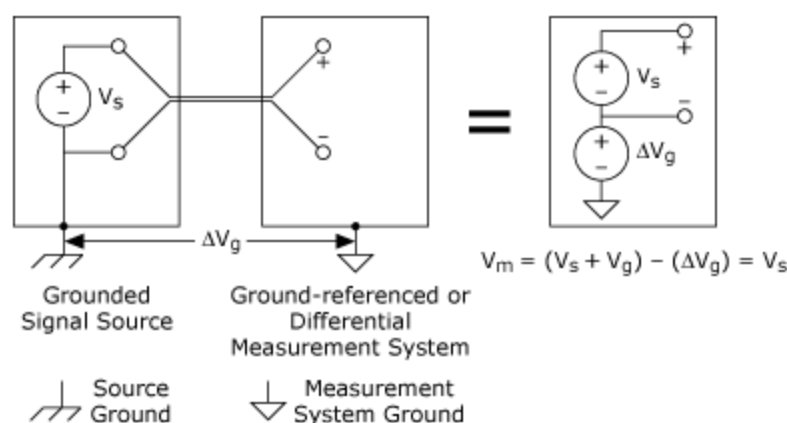


Рисунок 9. Использование дифференциальной измерительной системы с заземленным источником сигнала

Grounded Signal Source – заземленный источник сигнала, Ground-referenced or Differential Measurement System – заземленная или дифференциальная измерительная система, Source Ground – заземление источника, Measurement System Ground – заземление измерительной системы

[В начало](#)

3. Измерения с плавающими (не соединенными с общей цепью) источников сигналов

Вы можете измерять сигналы от плавающих источников как при помощи дифференциальной, так и несимметричной измерительной системы. Однако при использовании дифференциальной системы убедитесь, что уровень напряжения синфазного сигнала относительно заземления измерительной системы остается в пределах входного диапазона измерительного устройства.

Различные явления – например, входные токи смещения инструментального усилителя – могут сдвинуть уровень напряжения плавающего источника за пределы допустимого диапазона входной цепи DAQ-устройства. Для привязки этого уровня напряжения к некой опорной точке, используйте резисторы, как показано на рисунке 10. Эти резисторы, называемые резисторами смещения, предоставляют путь для постоянных токов от входов инструментального усилителя к его заземлению. Резисторы должны иметь достаточно большой номинал, чтобы позволить источнику «плавать» относительно опорной точки измерений (AI GND в ранее описанной измерительной системе) и не нагружать источник сигнала, но их сопротивление должно быть небольшим, чтобы напряжение не выходило за пределы входного диапазона устройства. Как правило, резисторы сопротивлением между 10 кОм и 100 кОм хорошо работают с источниками с низким импедансом, например, с термопарами, и выходами модулей согласования сигналов. Резисторы смещения подключаются между каждым проводником и заземлением измерительной системы.

Предостережение: Неиспользование резисторов смещения приведет к хаотическим показаниям или к насыщению (до положительной или отрицательной границы входного диапазона).

Если входной сигнал связан по постоянному току, для удовлетворения требований существования пути для тока смещения нужен только один резистор, подключенный между отрицательным (-) входом и заземлением измерительной системы, но это приводит к дисбалансу системы, если импеданс источника сигнала сравнительно высок. С точки зрения помехоустойчивости предпочтительнее сбалансированные системы. Поэтому при высоком импедансе источника сигнала следует использовать два резистора одинакового номинала, один для положительного (+) входа сигнала, а второй для отрицательного (-). Для источников сигнала с низким импедансом, связанных по постоянному току, например, термопар, достаточно одного резистора смещения. Сбалансированные схемы будут подробно рассмотрены далее в настоящем документе.

Если входной сигнал связан по переменному току, для удовлетворения требований к существованию пути для токов смещения инструментального усилителя требуется два резистора смещения.

Резисторы ($10 \text{ кОм} < R < 100 \text{ кОм}$) для входных токов смещения инструментального усилителя предоставляют путь возврата к заземлению, как показано на рисунке 10. Для источников, связанных по постоянному току, требуется только резистор R2. Для источников, связанных по переменному току, $R1 = R2$.

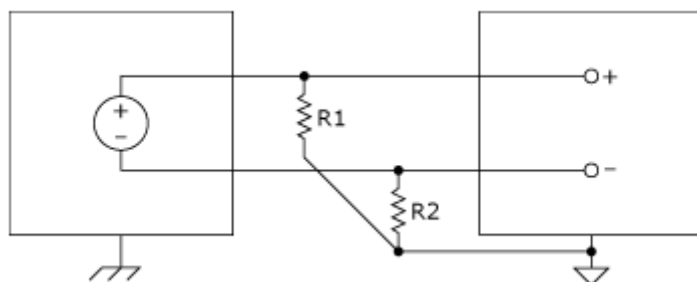
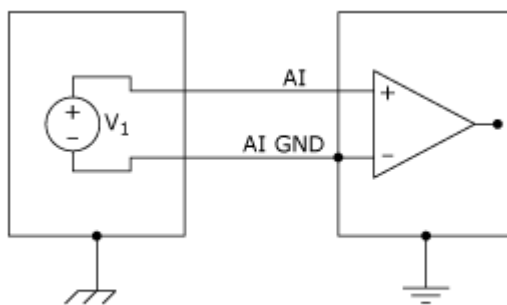
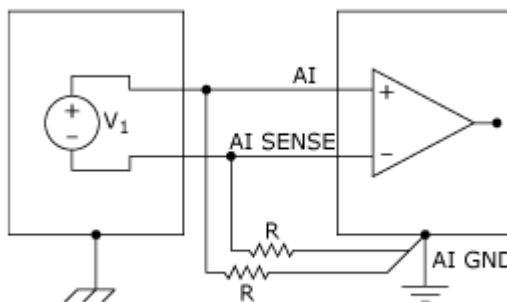


Рисунок 10. Плавающий источник и дифференциальная входная схема

Если вы выбираете несимметричную входную схему, то можете использовать систему RSE (рисунок 11а) для плавающего источника сигнала. В этом случае паразитного контура заземления не возникает. Вы можете также использовать систему NRSE (рисунок 11b), что предпочтительнее с точки зрения подавления помех. В этой конфигурации для плавающих источников требуется резистор (резисторы) смещения между входом AI SENSE и заземлением измерительной системы (AI GND).



a. RSE Input Configuration



b. NRSE Input Configuration

Рисунок 11. Плавающий источник сигнала и несимметричные конфигурации

В таблице 1 обобщены рассмотренные выше способы подключения источника сигнала к измерительной системе.

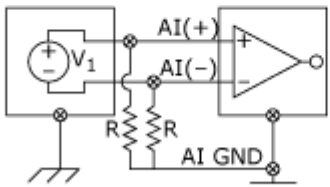
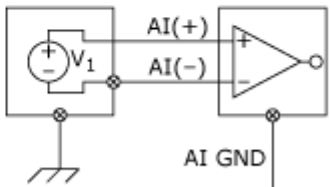
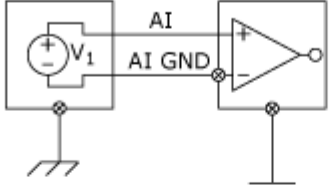
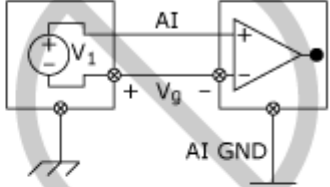
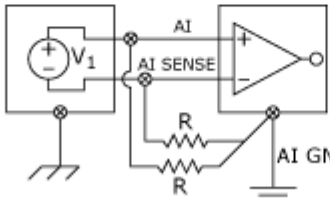
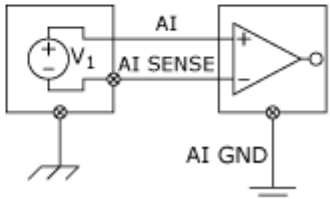
Input Configuration	Signal Source Type	
	Floating Signal Source (Not Connected to Building Ground)	Grounded Signal Source
	Examples <ul style="list-style-type: none"> • Thermocouples • Signal Conditioning with Isolated Outputs • Battery Devices 	Examples <ul style="list-style-type: none"> • Plug-in Instruments with Nonisolated Inputs
Differential (DIFF)	 <p>Two resistors ($10\text{ k}\Omega < R < 100\text{ k}\Omega$) provide return paths to ground for bias currents</p>	
Single-Ended - Ground Referenced (RSE)		<p>NOT RECOMMENDED</p>  <p>Ground-loop losses, V_g, are added to measured signal.</p>
Single-Ended - Nonreferenced (NRSE)		

Таблица 1. Подключение блока аналогового ввода

Предостережение: При использовании конфигураций DIFF и NRSE для измерения плавающих источников сигнала необходимо использовать резисторы смещения. Неиспользование резисторов смещения приведет к хаотическим показаниям или к насыщению (до положительной или отрицательной границы входного диапазона).

Как правило, предпочтительнее использовать дифференциальную измерительную систему, поскольку она подавляет не только погрешности, связанные с контуром заземления, но и, до определенной степени, подавляет помехи, наведенные из окружающей среды. Несимметричные конфигурации обеспечивают в два раза больше каналов, однако их использование оправдано только в том случае, если значение вносимой погрешности меньше, чем требуемая погрешность измерения. Несимметричные входные схемы могут быть использованы, когда все входные сигналы удовлетворяют следующим критериям.

- Входные сигналы высокого уровня (более 1 В)
- Сигнальные кабели короткие и находятся в свободной от помех среде или должным образом экранированы
- Все входные сигналы могут разделять общий опорный уровень

Когда не удовлетворяется любой из этих критериев, необходимо использовать дифференциальное подключение.

[В начало](#)

4. Минимизация помех в схемах соединений

Даже если, благодаря выполнению приведенных выше рекомендаций, в измерительной системе нет паразитных контуров заземления или насыщения схем аналогового ввода, измеренный сигнал почти неизбежно будет включать помехи или нежелательные сигналы, "подобранные" из окружающей среды. Это особенно большая проблема для аналоговых сигналов низкого уровня, которые усиливаются встроенным усилителем, имеющимся во многих устройствах сбора данных. Что еще хуже, платы сбора данных для персонального компьютера (ПК) обычно работают с какими-то цифровыми сигналами, вводимыми или выводимыми через разъем ввода-вывода. В результате любая активность этих цифровых сигналов, передающихся на некоторое расстояние в непосредственной близости от соединительного кабеля с низкоуровневыми аналоговыми сигналами, может являться источником помех в усиленном сигнале. Для минимизации помех от этого и прочих внешних источников необходимы правильные схемы монтажа и экранирования.

Перед началом обсуждения правильного монтажа и экранирования необходимо понимать природу проблемы наведения помех. У проблемы наводимых помех нет единственного решения. Более того, неправильный вариант решения может усугубить проблему.

Проблему наведения помех иллюстрирует рисунок 12.

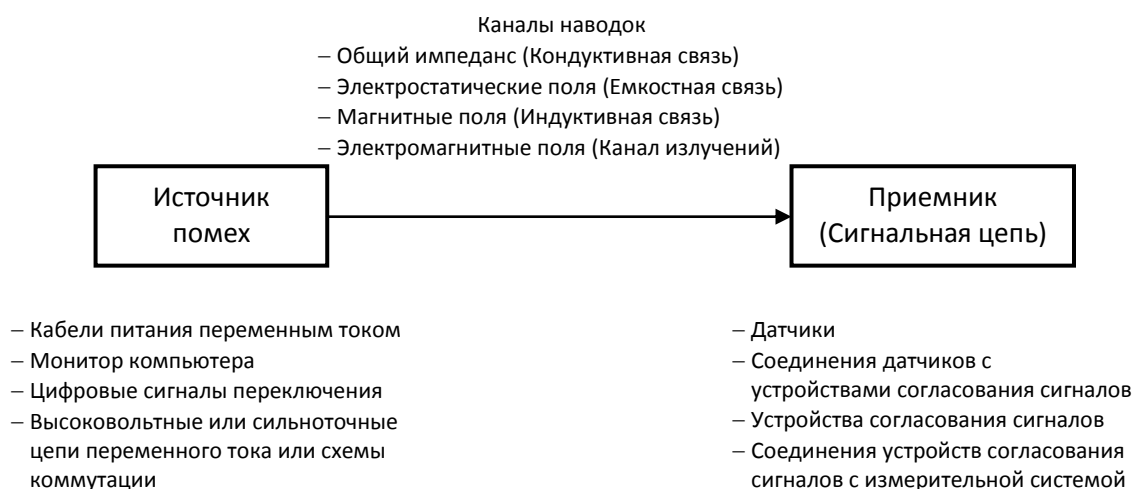


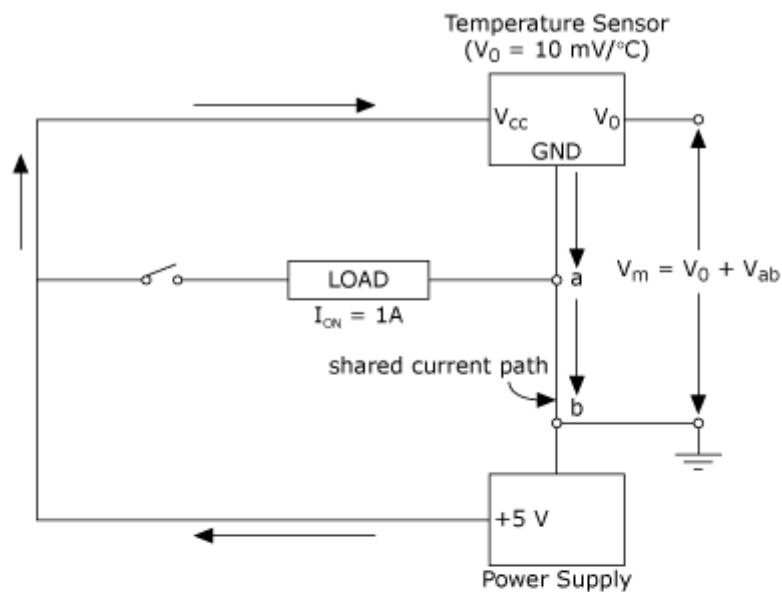
Рисунок 12. Схема наведения помех

Как показано на рисунке 12, существует 4 принципиальных типа наведения помех или механизмов связи - кондуктивная, емкостная, индуктивная и излучений. Кондуктивная связь возникает из-за протекания токов между различными схемами, имеющими общий импеданс. Емкостная связь возникает из-за переменных во времени электрических полей, возникающих рядом с сигнальной цепью. Индуктивная или магнитная связь возникает из-за переменных во времени магнитных полей, возникающих в области, ограниченной сигнальной схемой. Если источник электромагнитного поля находится далеко от сигнальной схемы, электрическая и магнитная связи считаются объединенной электромагнитной связью или связью излучения.

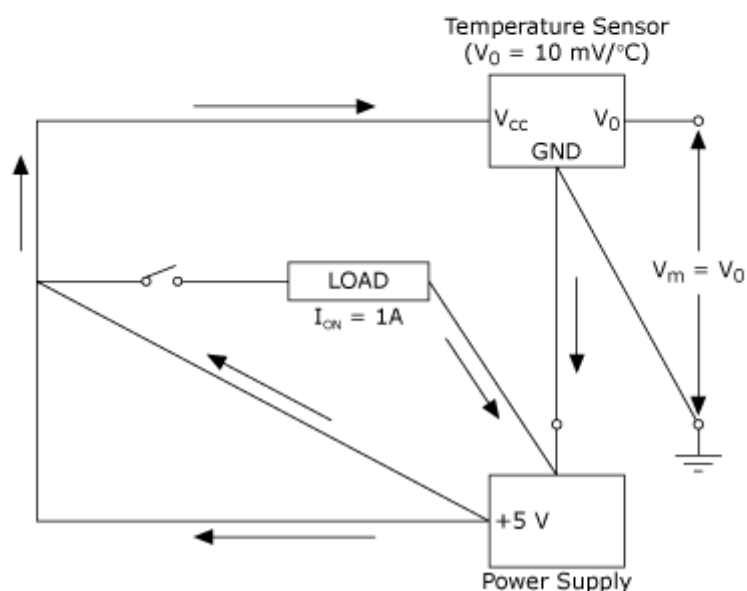
Кондуктивные помехи

Кондуктивные помехи возникают из-за конечного импеданса проводников. Необходимо учитывать влияние эффекта импедансов проводников при разработке монтажной схемы. Кондуктивные помехи могут быть устранены или минимизированы путем разрыва паразитных контуров заземления (если они есть) и обеспечения отдельных обратных токов для низкоуровневых и для высокоуровневых мощных сигналов. Последовательная схема подключения к заземлению, из-за которой появляются кондуктивные связи, показана на рисунке 13а.

Если сопротивление обратного общего проводника от А до В составляет 0.1 Ом, измеренное напряжение с датчика температуры будет отличаться на $0.1 \text{ Ом} * 1 \text{ А} = 100 \text{ мВ}$, в зависимости от состояния переключателя. Это приведет к погрешности при измерении температуры, равной 10° . Схема на рисунке 13b обеспечивает отдельные цепи возврата токов; поэтому выход датчика температуры не изменяется при включении и выключении цепи с высокой нагрузкой.



a. Series Ground Connections Resulting in Conductive Coupling



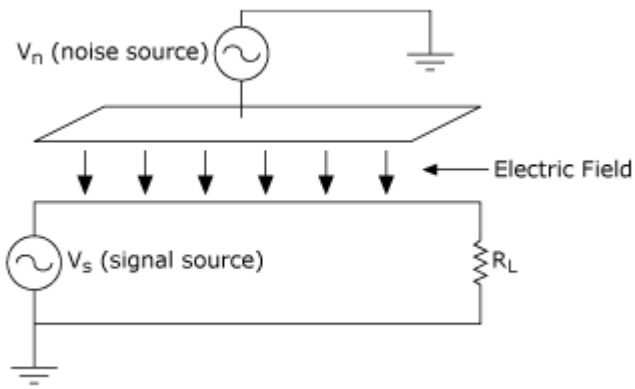
b. Separate Power and Ground Returns to Avoid Conductive Coupling

Рисунок 13. Кондуктивные помехи

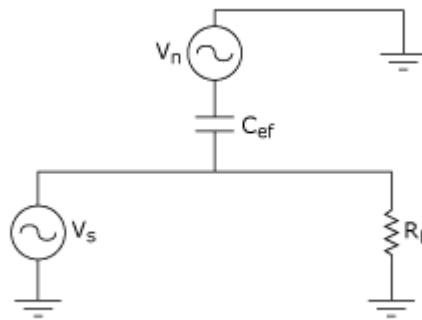
- а. Последовательное подключение к заземлению приводит к появлению кондуктивной связи
 б. Отдельное подключение к источнику питания и возврата в цепь заземления используется для устранения кондуктивной связи
 Temperature Sensor – датчик температуры, LOAD – нагрузка, Power Supply – источник питания, Shared current path – общая цепь для протекания токов

Емкостная и индуктивная связь

Аналитический инструмент для описания взаимодействия помех от электрических и магнитных полей и сигнальных цепей – математически нетривиальное уравнение Максвелла. Однако для интуитивного и понимания на качественном уровне этих каналов связи можно использовать эквивалент в виде схемы с сосредоточенными параметрами. На рисунках 14 и 15 показана эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами, иллюстрирующая связи с электрическим и магнитным полями.



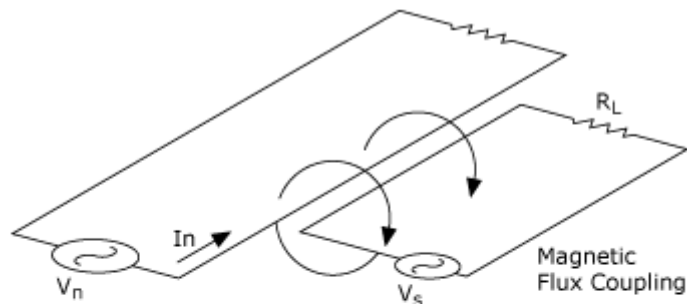
a. Physical Representation



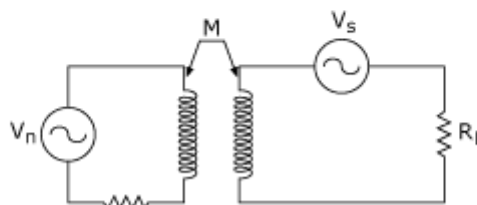
b. Equivalent Circuit

Рисунок 14. Емкостная связь между источником помех и сигнальной цепью, смоделированная с помощью конденсатора C_{ef} в эквивалентной схеме

а. Физическое представление, б. Эквивалентная схема
 Noise Source – источник помех, Signal Source – источник сигнала, Electric Field – электрическое поле



a. Physical Representation



b. Equivalent Circuit

Рисунок 15. Индуктивная связь между источником помех и сигнальной цепью, смоделированная с помощью взаимной индукции M в эквивалентной схеме

а. Физическое представление, б. Эквивалентная схема
 Magnetic Flux Coupling – связь по магнитному потоку

Введение моделей в форме эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами в эквивалентную схему помехи помогает справиться с нарушением двух основополагающих допущений анализа электрических схем, заключающихся в том; что все электрические поля ограничены внутренностью конденсаторов, а все магнитные поля ограничены внутренностью катушек индуктивностей.

Емкостная связь

Теперь вы видите полезность использования эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами для каналов связи. Связь по электрическому полю моделируется конденсатором между двумя схемами. Эквивалентная емкость C_{ef} прямо пропорциональна площади перекрытия и обратно пропорционально расстоянию между двумя схемами. Тем самым, увеличивая расстояние или минимизируя перекрытие, вы минимизируете значение C_{ef} и, соответственно, емкостную связь от цепи, создающей помехи, к сигнальной цепи. Из модели могут быть получены и другие характеристики емкостной связи. Например, уровень емкостной связи прямо пропорционален частоте и амплитуде источника помех и импедансу принимающей цепи. Поэтому емкостную связь можно уменьшить, уменьшив напряжение или частоту источника помехи или импеданс сигнальной цепи. Эквивалентная емкость C_{ef} может быть уменьшена применением емкостного экрана. Емкостное экранирование работает как шунт или предоставляя другого пути для наведенного тока, чтобы он не проходил по пути распространения сигнала. Для правильного емкостного экранирования следует обратить внимание, как на расположение экрана, так и на его подключение. Экран должен размещаться между проводниками с емкостной связью и быть подключен к заземлению только на стороне источника. При заземлении с обеих сторон в экране будут протекать значительные токи замыкания на землю. Например, разность потенциалов между заземлениями в 1 В может привести к протеканию через экран сопротивлением 0.5 Ом тока замыкания на землю в 2 А. Между заземлениями может существовать разность потенциалов порядка 1 В. Эффекты потенциально большого тока замыкания на землю будут рассмотрены позже при обсуждении индуктивных помех. По общему правилу, металлы-проводники или проводящие материалы вблизи от цепи, по которой проходит сигнал, не следует оставлять незаземленными из-за риска увеличения емкостных помех.

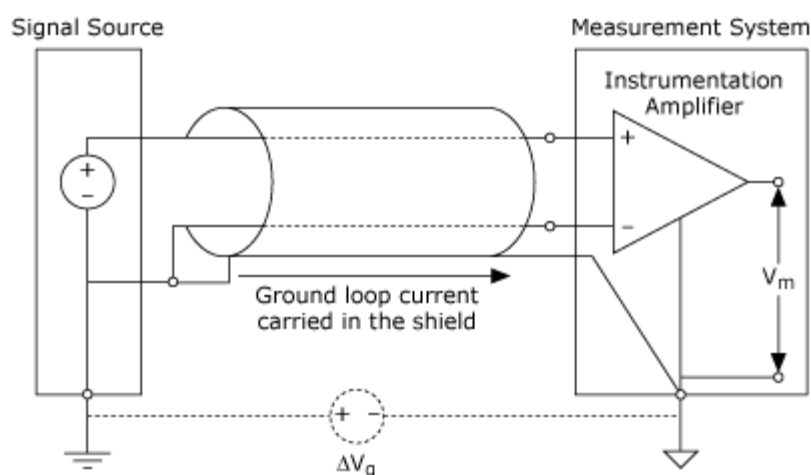


Рисунок 16. Неправильное подключение экрана - по экрану протекают токи замыкания на землю
Signal Source – источник сигнала, Measurement System – измерительная система, Instrumentation Amplifier – инструментальный усилитель, Ground loop current carried in the shield – ток в контуре заземления протекает через экран

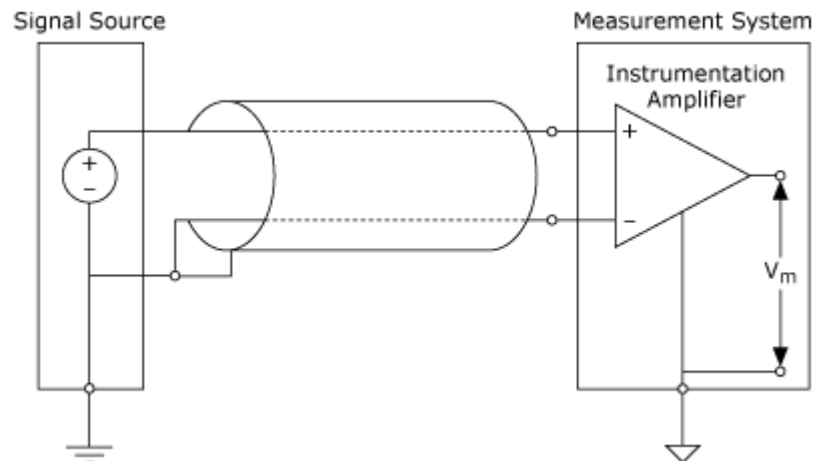


Рисунок 17. Правильное подключение экрана - через экран не протекают токи замыкания на землю и токи сигнала

Signal Source – источник сигнала, Measurement System – измерительная система, Instrumentation Amplifier – инструментальный усилитель

Индуктивная связь

Как описано выше, индуктивная связь возникает из-за переменных во времени магнитных полей в области, ограниченной контуром сигнальной цепи. Эти магнитные поля генерируются токами в расположенных поблизости цепях, создающих помехи. Наведенное в сигнальной цепи напряжение V_n рассчитывается по формуле:

$$V_n = 2\pi f B A \cos \alpha / \epsilon \quad (1)$$

где f - частота синусоидально изменяющейся магнитной индукции, B - среднеквадратическое значение магнитной индукции, A - площадь контура сигнальной цепи, α - угол между вектором магнитной индукции B и плоскостью A .

В эквивалентной схеме с сосредоточенными параметрами индуктивную связь представляет взаимная индукция M , как показано на рисунке 15(b). Выразив V_n через взаимную индукцию M , получаем формулу:

$$V_n = 2\pi f M I_n \quad (2)$$

где I_n - среднеквадратическое значение синусоидального тока в цепи, создающей помехи, а f - его частота.

Поскольку значение M прямо пропорционально площади контура схемы приемника и обратно пропорционально расстоянию между цепью, создающей помехи, и сигнальной схемой, увеличение расстояния или минимизация площади контура сигнальной схемы влекут за собой минимизацию индуктивной связи между двумя схемами. Уменьшение тока I_n в схеме, создающей помехи, или уменьшение его частоты также может уменьшить индуктивную связь. Магнитную индукцию B схемы, создающей помехи, также можно уменьшить, скрутив проводники этой схемы. Наконец, для минимизации связи можно применить магнитное экранирование к источнику помех или к сигнальной цепи.

Экранирование низкочастотных магнитных полей не столь просто, как экранирование электрических полей. Эффективность магнитного экранирования зависит от типа материала - его проницаемости, толщины, и частот наводимых помех. Из-за высокой относительной проницаемости сталь в качестве экрана значительно эффективнее алюминия и меди для низкочастотных магнитных полей (грубо - ниже 100 кГц). Однако при более высоких частотах могут быть использованы также алюминий и медь. Потери на поглощение меди и стали для двух значений толщины показаны на рисунке 18. Свойства магнитного экранирования этих металлов весьма неэффективны при низких частотах, например, частотах силовых электрических линий (от 50 до 60 Гц), которые являются принципиальными источниками низкочастотных, наводимых магнитными полями, помех в большинстве рабочих условий. Для низкочастотного магнитного экранирования могут быть найдены лучшие магнитные экраны, например, мю-металл, но он очень хрупок, и его проницаемость может сильно уменьшаться вследствие механических ударов, тем самым уменьшая его эффективность в качестве экрана.

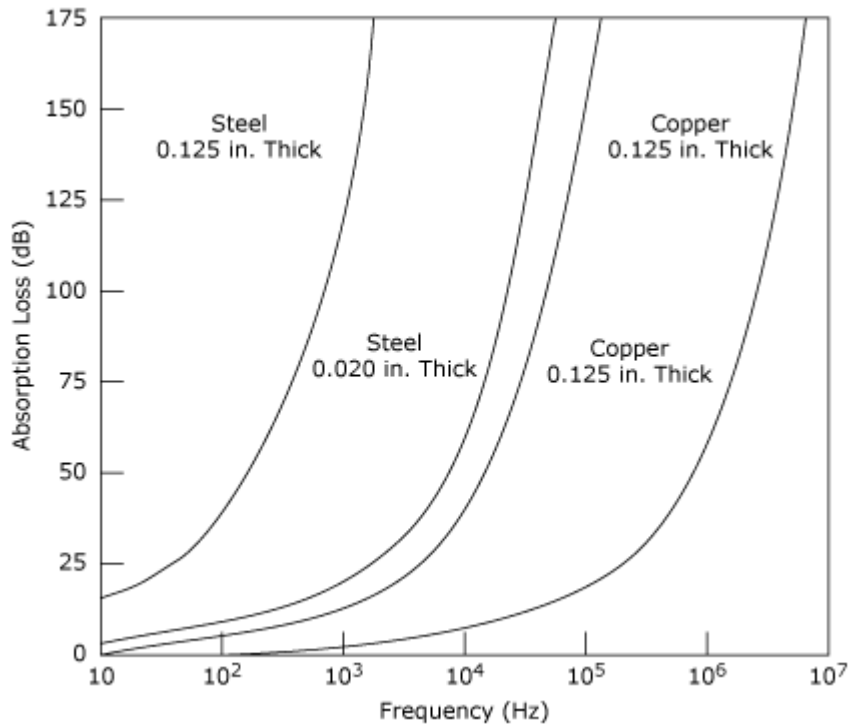


Рисунок 18. Потери на поглощение в функции от частоты (ссылка 1)

Absorption Loss (dB) – потери на поглощение (дБ), Frequency (Hz) – частота (Гц), Steel – сталь, Copper – медь, in. Thick – толщина (дюймов)

Из-за отсутствия контроля параметров цепи, создающей помехи, и относительной сложности магнитного экранирования, эффективным способом минимизации индуктивной связи является уменьшение площади контура сигнальной схемы. Подключение витой парой полезно, поскольку уменьшает площадь контура сигнальной схемы и устраняет наведенные помехи.

В формуле (2) определяется эффект переноса токов заземляющего контура в экран для схемы, показанной на рисунке 16. При $I_n = 2$ А; $f = 60$ Гц и $M = 1$ мкГ/фут для кабеля длиной в 10 футов получаем:

$$V_n = (2)(3.142)(60)(1 \cdot 10^{-6} \cdot 10)(2) = 7.5 \text{ мВ}$$

Такой уровень помех соответствует 3.1 LSB для 12-разрядной системе сбора данных с диапазоном 10 В. Таким образом, эффективность системы сбора данных уменьшается примерно до эффективности 10-разрядной системы.

При использовании устройства E-серии в дифференциальном режиме и с экранированным кабелем, площадь контура сигнальной схемы минимизирована, поскольку каждая пара сигнальных проводников выполнена в виде витой пары. Это не так при использовании того же устройства с тем же кабелем в несимметричном режиме, поскольку в других каналах могут сформированы контуры различных размеров.

Источники токовых сигналов менее подвержены такому типу помех, чем источники сигналов напряжения, поскольку возбуждаемое магнитным полем напряжение проявляется, как последовательно соединенное с источником, что показано на рисунке 19. V_{21} и V_{22} - индуктивно связанные источники помех, а V_c - источник помех через емкостную связь.

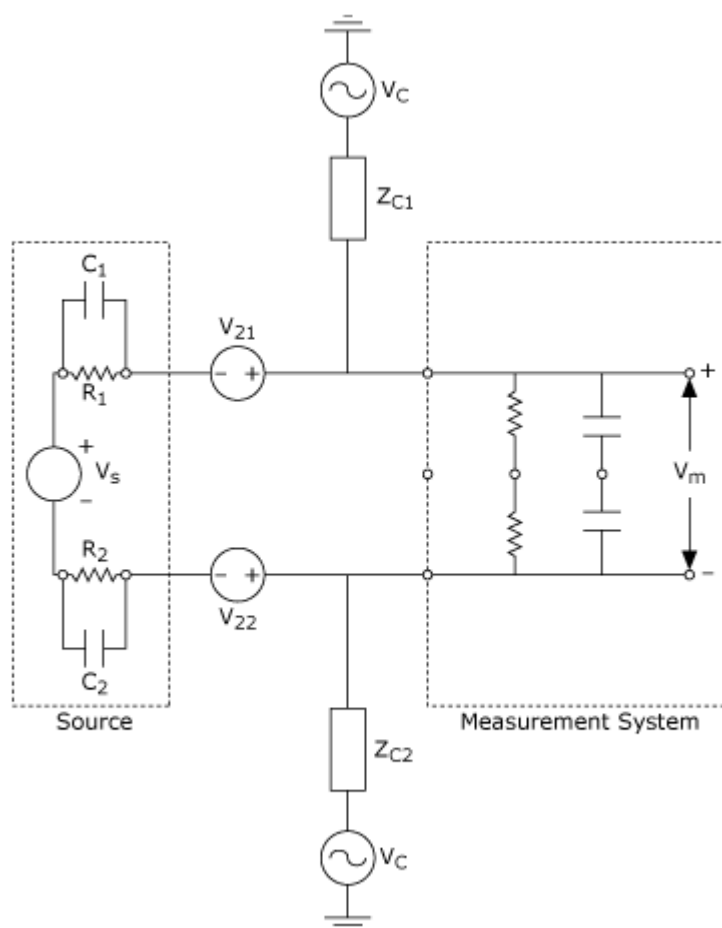


Рисунок 19. Эквивалентная схема с источниками напряжения, наводимыми индуктивными и емкостными помехами

(Г. В. Отт, Методы подавления помех в электронных системах, Wiley, 1976.)

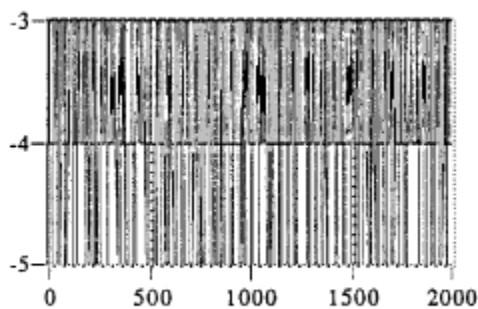
Source – источник, Measurement System – измерительная система

Уровень индуктивной и емкостной связи зависит от амплитуды помех и близости источника помех к сигнальной цепи. Поэтому полезно увеличивать расстояние от создающих помехи цепей и уменьшать амплитуду источника помех. Кондуктивная связь возникает из-за непосредственного контакта; поэтому увеличение расстояния до схемы, создающей помехи, не принесет пользы.

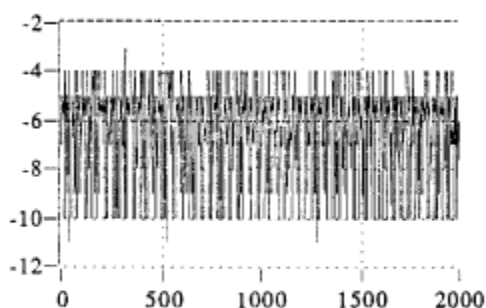
Связь через излучение

Связь с источниками излучения, например, теле- и радиостанциями и каналами передачи данных обычно не считаются источниками помех для низкочастотных (с полосой частот менее 100 кГц) измерительных систем. Но высокочастотная помеха может быть выпрямлена и внесена в низкочастотные цепи из-за процесса, называемого *выпрямлением аудио*. Этот процесс возникает из-за нелинейных элементов в интегральных схемах, действующих как выпрямители. Простые пассивные R-C фильтры нижних частот на приемном конце длинного кабеля могут уменьшить выпрямление аудио.

Повсеместно встречающийся компьютерный терминал является источником электрических и магнитных помех для расположенных рядом чувствительных схем. Это показано на рисунке 20, где представлен график данных, полученных устройством сбора данных со встроенным усилителем с программируемым коэффициентом усиления, когда этот коэффициент равен 500. Входной сигнал - цепь короткого замыкания в коннекторном блоке. Между коннекторным блоком и разъемом ввода-вывода устройства использован неэкранированный соединительный кабель длиной 0.5 м. Для дифференциального подключения сигнала положительный и отрицательный входы связаны между собой и с заземлением аналоговой системы. Для несимметричного подключения вход канал связан с заземлением аналоговой системы.



a. Differential Input Configuration



b. RSE Input Configuration

Рисунок 20. Сравнение помехоустойчивости дифференциальной и несимметричной (RSE) конфигурации входа (Коэффициент усиления платы DAQ: 500; Кабель: 0,5 м, неэкранированный; Источник помех: монитор компьютера.

a. Дифференциальная конфигурация, b. Конфигурация RSE

Прочие источники помех

Всякий раз при движении соединительного кабеля, например, из-за вибраций в окружающей среде, следует обратить внимание на трибоэлектрический эффект, а также на наведенное напряжение вследствие изменяющегося магнитного потока через контур сигнальной схемы. Трибоэлектрический эффект вызывается зарядом, генерирующимся на диэлектрике в кабеле, если он не поддерживает контакт с проводниками в кабеле.

Изменение магнитного потока может быть вызвано изменением площади контура сигнальной схемы, вызванным движением одного или обоих проводников – еще одно проявление индуктивной связи. Решение – избегать провисания проводников и использовать зажимы для кабелей.

В измерительных цепях с очень низким уровнем сигнала необходимо обратить внимание на еще один источник погрешности измерений – ненамеренное создание термопар в местах соединения различных металлов. Погрешности из-за эффекта термопары не считаются погрешностями из-за помех, однако стоят упоминания, поскольку они могут быть причиной непонятных смещений между каналами при измерении сигналов низкого уровня.

[В начало](#)

5. Сбалансированные системы

При описании дифференциальной измерительной системы упоминалось, что CMRR оптимизируется в сбалансированной схеме. Сбалансированная схема удовлетворяет следующим трем критериям:

- Источник сбалансирован – оба контакта источника имеют одинаковый импеданс относительно земли.
- Кабель сбалансирован – оба проводника имеют одинаковый импеданс относительно земли.
- Приемник сбалансирован – оба контакта измерительной схемы имеют одинаковый импеданс относительно земли.

Наведение помех в сбалансированную схему по емкостной связи минимизировано, поскольку напряжение наведенной помехи одинаково на обоих проводниках благодаря их одинаковым импедансам относительно земли и источника помехи.

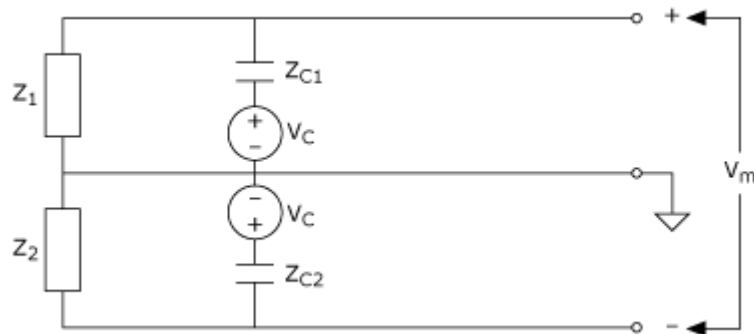


Рисунок 21. Модель схемы с наведением помех по емкостной связи (Г.В. Отт, Методы подавления помех в электронных системах, Wiley, 1976.)

Если модель схемы на рисунке 21 представляет сбалансированную систему, применяются следующие условия:

$$Z_1 = Z_2 \text{ и } Z_{c1} = Z_{c2}$$

Простой анализ показывает, что для сбалансированной схемы $V^+ = V^-$, т.е., напряжение, вызванное емкостной связью V_c ведет себя как синфазный сигнал. Для несбалансированной схемы $Z_1 \neq Z_2$ или $Z_{c1} \neq Z_{c2}$, и напряжение, вызванное емкостной связью V_c , проявляется, как дифференциальное напряжение ($V^+ \neq V^-$), которое не может быть подавлено операционным усилителем. Чем выше дисбаланс системы или несовпадение импедансов источника помех с емкостной связью относительно земли, тем выше будет дифференциальный компонент помех с емкостной связью.

Дифференциальное подключение представляет собой сбалансированный приемник на стороне устройства сбора данных, но вся схема не будет сбалансированной, если не сбалансированы источник или кабель. Это показано на рисунке 22. Устройство сбора данных настроено на режим с дифференциальным входом и коэффициентом усиления 500. Импеданс источника R_s был одинаковым (1 кОм) в обеих схемах. Номинал резисторов смещения, используемых в схеме на рисунке 22b, равен 100 кОм. Синфазная помеха лучше подавляется схемой на рисунке 22b, чем схемой на рисунке 22a. На рисунках 22c и 22d показаны графики данных во временной области, собранных схемами с рисунков 22a и 22b, соответственно. Обратите внимание на отсутствие частотных компонентов помехи для конфигурации со сбалансированным источником. Источником шума в такой конфигурации был монитор компьютера. В сбалансированной схеме источник сигнала был также нагружен

$$R = R_{g1} + R_{g2}$$

Данную нагрузку не следует игнорировать. В несбалансированной схеме источник сигнала не нагружается.

В схеме, подобной показанной на рисунке 22a, дисбаланс системы (несовпадение импеданса относительно земли в проводниках высокого и низкого уровня сигнала) пропорционален импедансу источника R_s . В предельном случае, когда $R_s = 0$ Ом, схема на рисунке 22a так же сбалансирована, и потому менее чувствительна к помехам.

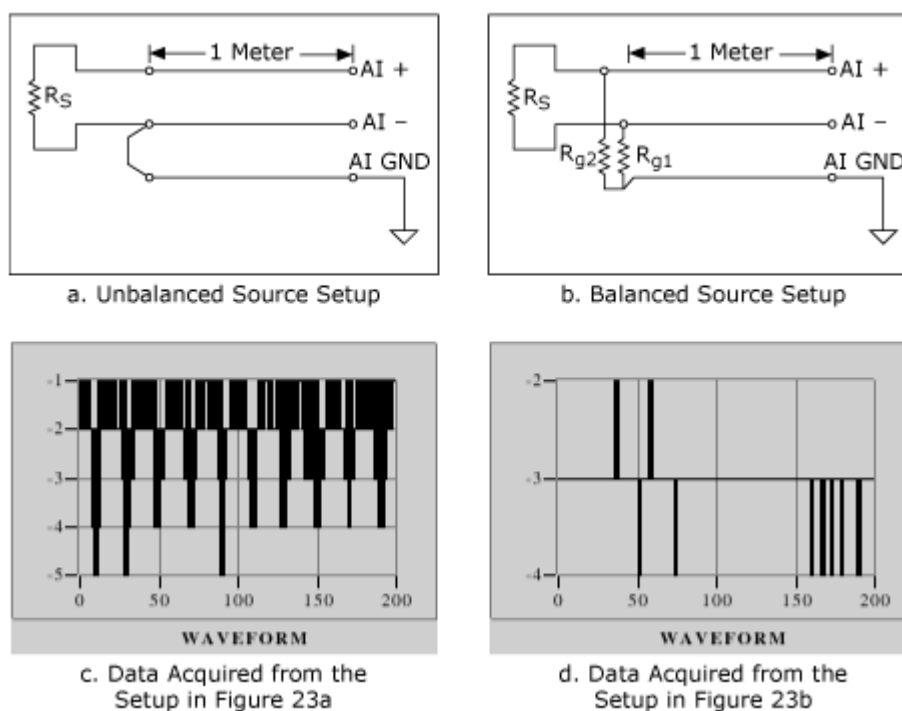


Рисунок 22. Настройка источника и собранные данные
 a. Unbalanced Source Setup – установка с несбалансированным источником,
 b. Balanced Source Setup – установка со сбалансированным источником,
 c. Data Acquired from the Setup in Figure 23a – данные, собранные схемой на рисунке 23а,
 d. Data Acquired from the Setup in Figure 23b – данные, собранные схемой на рисунке 23b

Примерами сбалансированных кабелей являются витые пары или экранированные витые пары. Коаксиальный кабель, напротив, несбалансирован, поскольку два проводника обладают разной емкостью относительно земли.

Характеристики импеданса источника

Поскольку импеданс источника важен для определения защищенность кабельного соединения между источником сигнала и системой сбора данных от емкостных помех, в таблице 2 приведены характеристики импеданса наиболее распространенных датчиков.

Датчик	Характеристика импеданса
Термопара	Низкий (< 20 Ом)
Термистор	Высокий (> 1 кОм)
Температурный датчик сопротивления	Низкий (< 1 кОм)
Полупроводниковый тензодатчик давления	Высокий (> 1 кОм)
Тензодатчик	Низкий (< 1 кОм)
Стеклянный рН-электрод	Очень высокий (> 1 ГОм)
Потенциометр (линейное перемещение)	Высокий (от 500 Ом до 100 кОм)

Таблица 2. Характеристики импеданса датчиков

Выходы датчиков с низким уровнем и высоким импедансом следует согласовывать с устройством согласования сигналов, расположенным рядом с датчиком.

6. Решение проблемы помех в измерительных установках

Решение проблемы помех в измерительных установках начинается с определения причины проблемы. Проблемы, связанные с помехами, могут быть вызваны чем угодно, начиная с датчика и заканчивая самим устройством сбора данных. Для определения виновника можно использовать метод проб и исключений.

Сначала необходимо проверить само устройство сбора данных, подключив к нему источник с низким импедансом и без кабелей, и наблюдая измеренный уровень помех. Это легко можно сделать, соединив накоротко входные сигнальные контакты с цепью заземления аналогового ввода как можно более коротким проводником, желательно на разъеме ввода-вывода устройства сбора данных. Наблюдаемые в данном испытании уровни помех дадут вам представление о наилучшем для этого устройства сбора данных уровне помехозащищенности. Если измеренные уровни помех не меньше тех, что наблюдаются при полном составе системы (устройство сбора данных плюс кабели плюс источники сигналов), тогда за наблюдаемые в измерениях помехи ответственна измерительная система. Если наблюдаемые в устройстве сбора данных помехи не укладываются в технические характеристики, может быть ответственно какое-либо другое устройство в компьютерной системе.

Попытайтесь удалить из системы другие платы и проверьте, не уменьшился ли уровень помех. Можно также попробовать изменить местоположение плат, то есть слот, в который подключена плата сбора данных.

Можно заподозрить местоположение монитора компьютера. Для измерений низкоуровневых сигналов лучше держать монитор как можно дальше от кабелей и от компьютера. Установка монитора сверху на компьютер нежелательна при измерении или генерации сигналов низкого уровня.

Если устройство сбора данных не является виновником помех, на следующем этапе можно проверить кабели от устройств согласования сигналов и окружающую среду, в которой проложены кабели. Устройство согласования сигналов или источник сигналов необходимо заменить на источник с низким импедансом и пронаблюдать уровни помех в оцифрованных данных. Контакты цепи к источнику с низким импедансом могут быть накоротко соединены с с цепью заземления аналогового ввода. Однако на этот раз короткое замыкание расположено на дальнем конце кабеля. Если наблюдаемые уровни помех примерно совпадают с таковыми при работе с реальным источником сигнала, виновником являются кабели и/или окружающая среда, в которой они находятся. Могут помочь изменение положения кабелей и увеличение расстояния до источника помех. Если источник помех неизвестен, спектральный анализ помехи может определить ее частоту, что, в свою очередь, может помочь определить источник шума. Если наблюдаемые уровни помех меньше, чем те, что наблюдаются при подключении реального сигнала, то вместо короткого замыкания на дальнем конце кабеля необходимо подключить резистор номиналом примерно равным выходному сопротивлению источника. При такой схеме станет ясно, виновата ли емкостная связь в кабеле из-за высокого импеданса источника. Если наблюдаемые уровни помех при таком подключении меньше, чем при подключении реального сигнала, можно исключить кабели и окружающую среду из списка виновников. В этом случае, виновником является либо сам источник сигнала, либо неправильная конфигурация устройства сбора данных для этого типа источника.

[В начало](#)

7. Методы обработки сигналов для подавления помех

Хотя методы обработки сигналов заменяют правильное подключение систем, их также можно использовать для подавления помех. Все методы обработки сигналов для подавления помех выделяют полосу пропускания сигнала для улучшения соотношения сигнал-шум. В общих чертах эти методы можно разделить на две группы: до измерения сигнала и после измерения сигнала. Примерами методов обработки до измерения сигнала является использование различных фильтров (ФНЧ, ФВЧ или полосовых) для уменьшения внеполосного шума в сигнале. Полоса частот при измерении не должна превышать динамического или частотного диапазона датчика. Методы, применяемые после измерения, могут быть отнесены к цифровой фильтрации. Самый простой тип фильтрации после сбора данных - усреднение. Это приводит к "прочесыванию" собранных данных и особенно полезно для подавления конкретных частот наводимых помех, например, 50 и 60 Гц. Помните, что индуктивную связь с низкочастотными источниками, например, с силовыми линиями 50 Гц и 60 Гц, сложнее заэкранировать. Для оптимального подавления помех путем усреднения, используемый для усреднения собранных данных временной интервал T_{acq} должен быть целым кратным $T_{rej} = 1/F_{rej}$, где F_{rej} - подавляемая частота.

$$T_{acq} = N_{cycles} \cdot T_{rej} \quad (3)$$

где N_{cycles} - количество периодов усредняемой помехи. Поскольку $T_{acq} = N_s \cdot T_s$, где N_s - количество отсчетов, используемых для усреднения, а T_s - интервал дискретизации, уравнение (1) можно записать в виде:

$$N_s \cdot T_s = N_{cycles} \cdot T_{rej}$$

или

$$N_s \cdot T_s = N_{cycles} / F_{rej} \quad (4)$$

Уравнение (4) определяет связь количества отсчетов и интервала дискретизации для подавления конкретной наведенной частоты путем усреднения. Например, для подавления частоты 60 Гц с использованием $N_{\text{cycles}} = 3$ и $N_s = 40$, можно рассчитать оптимальную частоту дискретизации следующим образом:

$$T_s = 3 / (60 \cdot 40) = 1.25 \text{ мс}$$

То есть, при усреднении 40 отсчетов, полученных с интервалом дискретизации 1.25 мс (или 800 отсчетов/с), можно подавить помеху 60 Гц. Аналогично, при усреднении 80 отсчетов, собранных с частотой 800 отсчетов/с (10 выборок/с) будут подавлены частоты 50 Гц и 60 Гц. При использовании низкочастотной цифровой фильтрации, например, усреднения, нельзя предположить, что результирующие данные не будут иметь погрешности оценки постоянной составляющей, например, смещения, вызванного паразитными контурами заземления. Другими словами, даже если помехи в измерительной системе устранены с помощью усреднения, в системе все равно могут оставаться погрешности измерения постоянной составляющей. Если для измерений требуется высокая точность, система должна быть проверена.