

А. В. ГАРМАНОВ

ПОДКЛЮЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

**РЕШЕНИЕ ВОПРОСОВ
ЭЛЕКТРОСОВМЕСТИМОСТИ И ПОМЕХОЗАЩИТЫ**

На примере продукции фирмы L-Card



*Москва. Январь 2003
Ревизия 3.1.0*

ЗАО "Л-КАРД"

117105, г. Москва, Варшавское ш., д. 5, корп. 4, стр. 2

тел.: (095) 785-95-25

факс: (095) 785-95-14

Адреса в Интернет:

www.lcard.ru

[ftp.lcard.ru](ftp://lcard.ru)

E-Mail:

Отдел продаж: sale@lcard.ru

Техническая поддержка: support@lcard.ru

Отдел кадров: job@lcard.ru

Общие вопросы: lcard@lcard.ru

Представители в регионах:

Украина: HOLIT Data Systems, www.holit.com.ua, (044) 241-6754

Санкт-Петербург: Autex Spb Ltd., www.autex.spb.ru, (812) 567-7202

Новосибирск: Сектор-Т, www.sector-t.ru, (383-2) 396-592

Екатеринбург: Аск, www.ask.ru, 71-4444

Казань: ООО 'Шатл', shuttle@kai.ru, (8432) 38-1600

Подключение измерительных приборов

© Copyright 1989–2003, ЗАО Л-Кард. Все права защищены.

Глава 1

Введение

Выражаю искреннюю благодарность Бакланову Н.И. за справедливые критические замечания, побудившие автора полнее раскрыть ряд важных вопросов по теме статьи

Эта статья написана в помощь пользователю, столкнувшегося с нелегкой по сути проблемой подключения измерительного прибора на основе АЦП, ЦАП и прочих устройств к конкретным источникам сигналов и нагрузкам. Как подключить? Что и где заземлять? Как подключать экран? Как побороть помеху? – вот типичные жизненные вопросы, с которыми сталкивается системный интегратор, пытающийся электрически соединить 'ежа с ужом', при этом добиться, чтобы параметры полученной измерительной системы соответствовали расчетным, или, иначе говоря, чтобы помехи и наводки не мешали...

В статье сделана попытка классификации понятий¹ с точки зрения обычного потребителя, купившего, скажем, плату АЦП от фирмы L-Card и пытающегося приспособить или создать заново кабельное хозяйство для грамотной стыковки своих источников сигналов с АЦП.

Сразу же следует оговориться, что любая классификация всегда огрубляет детали, которые существуют в реальности. Приведем пример: Дифференциальный (симметричный) вход (или выход) устройства на высокой частоте может оказаться совсем не симметричным, вследствие² неодинаковых емкостей проводов относительно внешней среды, в то же время на низкой частоте он сохраняет свойства симметрии. 'Не слишком-то дифференциальный', 'дифференциальный, но не очень', 'плохой дифференциальный, а поэтому однофазный' – все это многочисленные оттенки суровости реальной жизни не может осилить приводимая классификация. Поэтому автор надеется на разумное, с точки зрения электротехники, применение настоящей классификации.

¹ в частности, *тип источника сигнала, тип аналогового входа*

² по каким-либо техническим причинам

Глава 2

Общие сведения о совместимости устройств

При выборе устройств системному интегратору первоначально необходимо учитывать общие сведения о *принципиальной совместимости* стыкуемых устройств, т.е. перед тем как думать о том, *как* соединить устройства между собой, нужно ответить на вопрос, *совместимы ли они в принципе*. В свете этого важного вопроса и была написана настоящая глава, где сделана попытка классификации **типов источников сигналов**, а также **разновидностей входов** устройств, после чего приведена **карта совместимости** первого со вторым.

2.1 Договоримся о терминах

Сразу поясним термины, которые будем активно употреблять.

2.1.1 Источник сигнала

Это часто употребляемое понятие означает тот объект, от которого приходит сигнал на вход подключаемого прибора. Физически под *источником сигнала* будем называть выход датчика или выход прибора, рассматриваемые совместно с соединительным кабелем, если такой кабель используется.

2.1.2 Сигнальная цепь

Это замкнутая электрическая цепь полезного¹ сигнала между *источником* и *приемником*. По сигнальной цепи протекает *ток сигнальной цепи*.

2.1.3 Общий провод

Это провод *условно* нулевого опорного потенциала, соединяющий источник и приемник сигнала, позволяющий выровнять потенциалы аналоговых земель (AGND) выходных узлов источника с входными узлами приемника сигнала. Термин *условно нулевой потенциал* употреблен в том смысле, что общий провод в ряде случаев может быть не заземлен и иметь потенциал относительно Земли.

¹т.е. информационного

2.1.4 Заземление

С одной стороны требования безопасности эксплуатации оборудования подразумевают заземление корпусов (панелей) приборов, что подразумевает подсоединение соответствующих цепей (штатных клемм) заземления приборов к *шине заземления*, имеющей непосредственный контакт с Землей. Такое заземление называют иногда *защитным*. С другой стороны, в больших системах, состоящих из разнородных приборов, существует проблема взаимовлияния устройств по *цепи заземления*, приводящая к сбоям и помехам. Собственно, исходя из опыта борьбы с этим явлением, возник термин *сигнальное заземление*.

2.1.5 Сигнальное заземление

В настоящей статье под *заземлением* всегда подразумевается именно *сигнальное заземление*, обозначаемое символом, как показано на рис. 2.1. Попросту говоря, это 'чистая'



Рис. 2.1: Символ сигнального заземления

ветка основной цепи заземления системы, по которой не текут в Землю токи заземления сильнопотребляющих устройств², а протекают токи заземления относительно чувствительных сигнальных устройств. Сам термин *сигнальное заземление* возник по причине осознания того факта, что 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 даже несколько веток сигнального заземления со своеобразной иерархией, - в зависимости от чистоты веток заземления. По вопросу заземления - см. раздел 3.3, стр. 20. Если символ заземления на рисунках присоединяется пунктирной линией, то подразумевается, что заземление в показанной точке необязательно.

2.1.6 Ток заземления

Это ток, текущий по *цепи заземления* данного прибора³. Направление тока заземления на

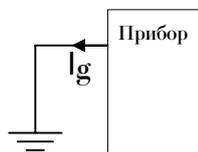


Рис. 2.2: Ток заземления

рис. 2.2 показано условно. Как правило, ток I_g , носит сложный переменный характер, обусловленный утечками тока от внутренних источников помехового сигнала⁴. Как правило,

²силовое оборудование, станки, мощные импульсные устройства и пр.

³иногда этот ток называют *уравновешивающим током заземления*, поскольку он приводит к выравниванию разности потенциалов заземляемых точек

⁴например, импульсный источник питания, силовые коммутационные цепи

внутренние утечки устройств носят активно-емкостной характер, а спектр земельного тока I_g крайне широкополосен – энергия гармоник достаточно высока даже на сотях мегагерц. Это прежде всего относится к устройствам, имеющим импульсный источник питания, и в меньшей степени – к устройствам с линейным источником питания.

2.1.7 Местное заземление

*Находясь на Луне, заземляться не стоит.
Сразу уж залуняйтесь. От автора*

Это тот случай, когда цепь заземления системы по каким-либо причинам не соединена⁵ с Землей. Если не касаться вопросов электробезопасности, такая цепь может являться цепью *сигнального заземления* для системы, если она имеет *значительную емкость* относительно Земли и окружающей обстановки⁶.

2.1.8 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 разъема с обозначением⁷ GND (DGND, GNDD) и AGND (GNDA) говорит только о том, что провод цепи GND, подключенный к соответствующему контакту разъема, исходит непосредственно из точки подключения внутреннего общего провода цифровых и импульсных узлов устройства, а провод цепи AGND исходит из общего провода аналоговых узлов. При этом – **внимание!** – сами по себе обозначения GND, AGND *не говорят* о том, куда их нужно подключать. Для выяснения этого важнейшего вопроса нужно знать тип входа устройства (см. раздел 2.3, стр. 11), к которому относится данная цепь GND или AGND, либо тип выхода устройства (см. раздел 2.2, стр. 5), и следовать принципам подключения, изложенным в настоящей статье и относящимся к Вашему уникальному случаю подключения устройств.

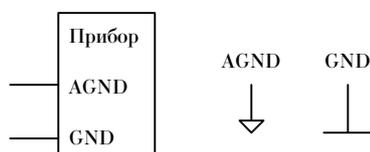


Рис. 2.3: Символы аналоговой и цифровой земель

На рис. 2.3 показаны типичные обозначения цепей аналоговой и цифровой земли.

Вообще говоря, большинство проблем помехозащищенности возникают именно в аналоговых цепях подключения к приборам, в то же время цифровые интерфейсные сигналы

⁵или явно с ней не соединена

⁶попросту говоря, достаточно массивна, имеет значительную площадь поверхности

⁷в скобках указаны альтернативные названия, которые Вы можете встретить

(TTL, CMOS) являются специализированным случаем аналоговых однофазных входо-выходов напряжения, - поэтому большинство примеров в настоящей статье приводятся для случая аналогового интерфейса с применением понятия аналоговой земли AGND. При этом те же самые принципы с наслаждением можно применить и для цифрового интерфейса. Еще один пример: известный цифровой интерфейс *токовая петля* подпадает под случай соединения однофазных однополярных токовых входо-выходов. Любой цифровой интерфейс - это частный случай аналогового⁸. Особым случаем является прибор, на разъем которого одновременно выведены цепи аналоговой и цифровой земли. Такой подарок имеют, как правило, многофункциональные приборы, имеющие цифровой интерфейс управления и аналоговый измерительный интерфейс⁹. Такой случай рассматривается отдельно - см. раздел 4.1, стр. 26.

2.1.9 Экран

Экран, в изначальном понимании, - это защитная токопроводящая оболочка системы, по которой не текут корпусные токи прибора и токи общих проводов сигнальных цепей. Увлекательные подробности этого понятия даны в разделе 2.2.4.1, стр. 9.

2.2 Типы источников сигналов

Под *источником сигнала* будем понимать то, что пользователь намерен подключить ко входу купленного им объекта, имеющего электрические входы. В любом случае - это выход какого-либо датчика или прибора, который нужно соединить кабелем со входом пользовательского объекта. Классификация таких источников сигнала и приводится в настоящем разделе.

2.2.1 По характеру внутреннего сопротивления

Сразу следует оговориться, что внутреннее сопротивление *источника сигнала* почти всегда не носит чисто активный характер из-за влияния емкостей 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.

2.2.1.1 Источник напряжения

К источнику напряжения можно отнести:

- низкоомный¹⁰ 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 *емкостные наводки*
- согласованная, как минимум, на приемной стороне (а лучше на обоих концах) длинная линия¹¹. Согласование производится концевыми низкоомными резисторами 50

⁸куда ж ему деться, ведь цифровая техника исторически произошла из аналоговой

⁹например, модуль E-270

¹⁰до 100-500 Ом

¹¹например, радиочастотный кабель типа РК

или 75 Ом. Выход такого источника можно отнести к качественному источнику напряжения, поскольку для сигнальной цепи, вследствие согласованности длинной линии, соблюдается энергетическая оптимальность при передаче, а для *помех* - не соблюдается

К основным параметрам источника напряжения относятся:

- внутреннее сопротивление
- полярность
- максимальный выходной ток

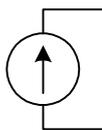


Рис. 2.4: Символ источника напряжения

2.2.1.2 Источник тока

К классическому источнику тока 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 напряжение¹² которого может находиться лишь в заданных пределах для обеспечения рабочего режима самого генератора тока.

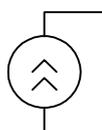


Рис. 2.5: Символ источника тока

2.2.1.3 Источник заряда

К типичному источнику заряда относится *пьезодатчик*, имеющий ярко выраженный емкостной характер внутреннего импеданса. В подавляющем большинстве приложений постоянная составляющая заряда не представляет интереса¹³, поэтому будем рассматривать этот источник как *источник переменного заряда*.

¹²упавшее на входном сопротивлении измерителя тока

¹³например, в виброметрии

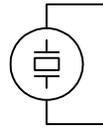


Рис. 2.6: Символ источника заряда

2.2.2 По наличию заземления

Здесь рассматривается классификация источников сигналов по факту наличия заземления, но *не обсуждается вопрос: нужно ли его заземлять*. Вопросы заземления – см. раздел 3.3, стр. 20.

2.2.2.1 Заземленный источник

К заземленному можно отнести источник, гальванически связанный с землей. Если для однофазного источника оказывается заземленной точка сигнальной цепи, то для дифференциального – *электрически симметричная* относительно фазовых проводов общая точка, связанная общим проводом источника. Как правило, заземленным бывает источник заряда; источники напряжения и тока бывают заземленными или изолированными.

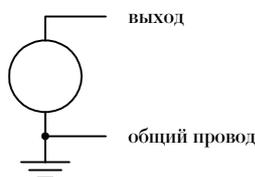


Рис. 2.7: Однофазный заземленный источник сигнала

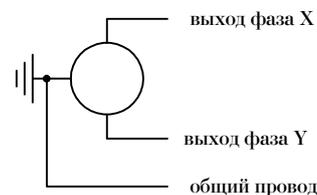


Рис. 2.8: Дифференциальный заземленный источник сигнала

Достаточно интересным является типичный случай выхода массивного прибора – например, генератора – общий провод которого соединен с большим незаземленным корпусом прибора¹⁴. Можно отнести такой 'крамольный' источник сигнала к заземленному¹⁵, поскольку имеются признаки *местного заземления*.

2.2.2.2 Изолированный (незаземленный, отвязанный от земли) источник

В отличие от заземленного источника, этот источник не связан с землей. 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 среде¹⁶.

¹⁴инженерам по технике безопасности нужно следить, чтобы такого безобразия не было

¹⁵в смысле сигнального заземления, а не защитного

¹⁶например, к *паразитной емкостной связи* относительно внешней гальваноразвязанной цепи, в частности к Земле

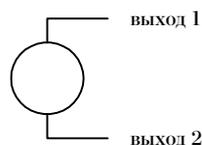


Рис. 2.9: Однофазный незаземленный источник сигнала

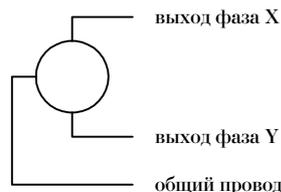


Рис. 2.10: Дифференциальный незаземленный источник сигнала

2.2.3 По числу фаз

2.2.3.1 Дифференциальный (двухфазный) источник сигнала

Такой источник всегда содержит в себе два *противофазных* источника сигнала, работающих относительно общего провода источника. Всего у этого источника три выходных провода.

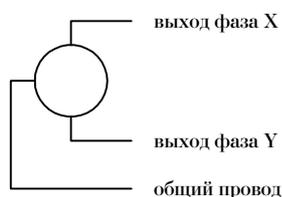


Рис. 2.11: Дифференциальный источник сигнала

2.2.3.2 Однофазный источник сигнала

К однофазным относится большинство простых источников сигнала, имеющих два полюса, - а попросту говоря, всего два выходных провода.

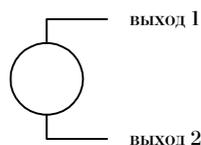


Рис. 2.12: Однофазный источник сигнала

2.2.3.3 Дифференциальный с ложной второй фазой (ДЛВФ) источник напряжения

Фактически это однофазный *источник напряжения* с внутренним сопротивлением¹⁷ R_{src} , который был дополнен *эквивалентом второй фазы* с нулевым выходным напряжением. При этом выходное сопротивление *ложной фазы* $R_{src} + R_1$ стремятся сделать равным выходному сопротивлению *истинной фазы* для того, чтобы достичь приблизительной *симметрии* выходного импеданса фаз по отношению к общей аддитивной (*синфазной*) помехе.

¹⁷см. рис. 2.13

Образование ложной второй фазы имеет смысл, когда однофазный источник напряжения стремятся соединить с дифференциальным входом, используя 3-проводное подключение. Некоторые приборы - например, ЦАП - имеют встроенный *дифференциальный выход с ложной второй фазой*.

Принципиально ДЛВФ источник напряжения может быть заземленным, но только в точке, как показано на рис. 2.13.

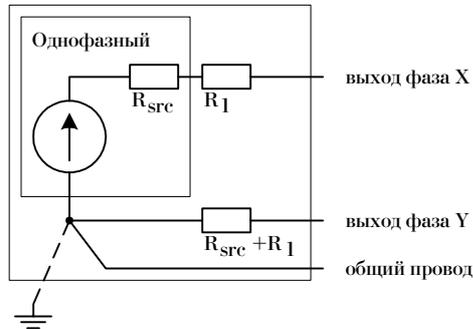


Рис. 2.13: ДЛВФ источник напряжения

2.2.4 По наличию экранирующей поверхности

Здесь подразумевается **электростатический**, а не электромагнитный экран.

2.2.4.1 Экранированный источник сигнала

Это источник, имеющий сплошной внешний токопроводящий контур, который называется экранирующей цепью. Экран - это токопроводящая оболочка системы.

Пытливый ум системного интегратора может напрячься в справедливых вопросах:

- Корпус - это то же самое, что экран?
- Общий провод - это то же самое, что экран?

Поясним, что само понятие *экран* возникло из-за того, что человечеству не хватило понятий *корпус* и *общий провод* для того, чтобы бороться с внешней помехой, наводившейся на высокочувствительные входы: нужно было изобрести *некую поверхность*, которая бы, с одной стороны, являлась продолжением корпуса, с другой стороны, чтобы по ней не текли *корпусные токи*, которые и создавали помехи на высокочувствительные входы.

В то же время общим проводом эту 'некую поверхность' назвать тоже не хотелось, поскольку входов может быть много и каждый вход для обеспечения взаимной независимости должен иметь индивидуальную подводку общего провода, а защитная 'некая поверхность' требовалась одна: И решило человечество назвать *эту* поверхность экраном.

Итак, **экран, в изначальном понимании, - это защитная токопроводящая оболочка системы, по которой не текут корпусные токи и токи общих проводов сигнальных цепей.**

В тоже время, в реальных устройствах само человечество сплошь и рядом в той или иной степени нарушает эти принципы, называя экраном *то, что фактически получилось*. Например:

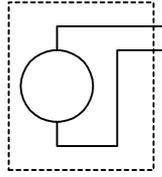


Рис. 2.14: Экранированный источник сигнала

- в обычном одножильном коаксиальном кабеле оплетка выполняет роль экрана и нулевого провода
- корпуса разъемов коаксиальных кабелей часто соединяются непосредственно с корпусом прибора и с оплеткой кабеля. Получается, что в этом примере корпус, экран, и общий провод сигнальной цепи – это *плохоразличимые* понятия

Автор ни в коем случае не утверждает, что так соединять коаксиальный кабель в приведенных примерах нельзя, – просто выбирая тот или иной способ подключения экрана, нужно всегда отдавать себе отчет 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!**

В настоящей статье под *экранированным источником* подразумевается, что физически экранирован и сам источник, и кабель, идущий от него. В реальной жизни часто встречается случай, когда экранирован только кабель¹⁸ – такой источник тоже можно отнести к экранированному.

2.2.4.2 Неэкранированный источник сигнала

К неэкранированному можно отнести источник сигнала, не имеющий окружающего токопроводящего контура. Также источник не экранирован, если имеющийся токопроводящий контур нельзя отнести к экрану – см. раздел 2.2.4.1, стр. 9.

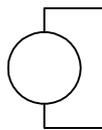


Рис. 2.15: Неэкранированный источник сигнала

2.2.5 По полярности источника сигнала

Очевидно, что физическая величина на выходе источника может принимать однополярное или двуполярное значение. В зависимости от этого источник называется *однополярным* или *двуполярным*. Следует учитывать, что встречаются источники сигналов и с *несимметричным* выходом.

¹⁸например, в случае применения датчиков, которые принципиально не могут быть экранированы

2.2.6 Примеры источников сигналов

Таблица 2.1: 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 термодпары	Источник напряжения	Изолированный	Однофазный	Не экранированный	2-полярный (общий случай)
3 провода от от изолированной обмотки трансформатора со средней точкой	Источник напряжения	Изолированный	Дифференциальный	Не экранированный	2-полярный
Коаксиальный выход низкочастотного измерительного прибора (генератора)	Источник напряжения (в большинстве случаев)	Заземленный	Однофазный	Экранированный	1 или 2-полярный
Экранированная витая пара с заземленным экраном от удаленного выхода прибора (общий случай)	Определяется в зависимости от выходного сопротивления удаленного прибора	Заземленный	Дифференциальный	Экранированный	1 или 2-полярный
Экранированный провод от источника заряда	Источник заряда	Как правило, заземленный	Однофазный	Экранированный	2-полярный
ЦАП Н-34	Источник напряжения	Не определено [†]	Однофазный / ДЛВФ [‡]	Не определено [†]	2-полярный
Токовые выходы измерителя сопротивления Н-27R	Источник тока	Изолированный	Однофазный	Не определено [†]	1-полярный
ЦАП LC-352	Источник напряжения	Заземленный	Однофазный	Экранированный	2-полярный

[†] в том смысле, что пользователь сам вправе определить, применять ли ему *экранирование* и/или *заземление* в системе, где он использует данный прибор

[‡] альтернативные способы подключения выходных сигналов в Н-34

2.3 Типы входов устройств

2.3.1 По полярности входного сигнала

По диапазону входного сигнала входы разделяются на *однополярные* и *двуполярные*. Следует также учитывать, что встречаются приборы с несимметричным¹⁹ входным диапа-

¹⁹относительно нуля

зоном сигнала²⁰.

2.3.2 По количеству фаз и степени симметрии входа

Этот признак классификации относится напрямую к вопросу схемотехнической способности входного узла в устройстве подавить пришедшую из внешней среды *помеху*, приложенную к входным проводам устройства. Эта схемотехническая способность входного узла связана с вопросом о *степени симметричности* входной сигнальной цепи по отношению к *общей помехе*, приложенной к сигнальной цепи относительно внешней среды (Земли).

Когда дотошный читатель прочтет эту главу и озарится пониманием, что *симметричный вход бывает не только дифференциальным*, тогда и станет окончательно понятен смысл классификации типов входов по степени их симметрии.

2.3.2.1 Дифференциальный вход

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 δ , выполнив над входными аналоговыми сигналами $X + \delta$ и $Y + \delta$ операцию вычитания:

$$(Y + \delta) - (X + \delta) = Y - X$$

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

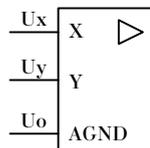


Рис. 2.16: Вход дифференциальный

По смыслу (более точно) дифференциальный вход можно назвать *разностным входом*, но первое название прочно укоренилось в радиотехнической терминологии.

Аддитивный помеховый сигнал δ называется *синфазным*, полезный разностный сигнал $Y - X$ - *противофазным*.

Коэффициент подавления синфазного сигнала, $\delta/(Y - X)$, определяет качество дифференциального входа.

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

Важно помнить, что дифференциальный вход - это всегда трехточечное подключение.

Очень часто дифференциальный вход является входом напряжения, реже встречаются дифференциальные (разностные) токовые входы и дифференциальные входы заряда.

²⁰например, измеритель напряжения термпары Н-27Т имеет входной диапазон -25...+75 мВ

2.3.2.2 Однофазный вход

Это простой вход, использующий двухточечное подключение. По физическому смыслу можно считать, что *однофазный* – значит '*испорченный*' *дифференциальный*, у которого соединили входную фазу сигнала U_x с общим проводом AGND. Однофазный вход – это наибо-

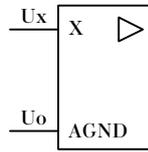


Рис. 2.17: Вход однофазный

лее часто встречающийся вход. Это может быть вход напряжения, токовый вход или вход заряда.

2.3.2.3 Дифференциальный вход с динамическим коммутатором каналов (ДВДКК)

Этот вход схемотехнически получен из *дифференциального* путем добавления аналогового *мультиплексора* входных цепей для реализации *многоканальных* режимов. Это решение традиционно применяется в 16-канальных АЦП с мультиплексированием каналов.

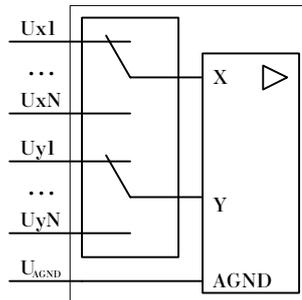


Рис. 2.18: Вход ДВДКК

Этот вход является полноценным дифференциальным, поскольку *симметрия* входов практически не нарушена. Тем не менее, в динамическом режиме работы аналогового мультиплексора²¹ этот вход является несколько ухудшенным дифференциальным входом. Остановимся на этом подробнее.

Аналоговый мультиплексор (коммутатор, ключ) не идеален. Его неидеальность в данном применении объясняется, в частности, наличием проходных емкостей полевых транзисторов, из которых этот ключ состоит. Попросту говоря, существуют паразитные емкости порядка 30 .. 100 пФ между управляющим сигналом ключа и каналом ключа, а также другие *перекрестные* емкости. При динамической коммутации каналов получается, что на *сигнальную цепь* канала относительно *общего провода* AGND динамически разряжается эквивалентная паразитная емкость C_{par} порядка 100 пФ. Поскольку поданные на входы каналов напряжения в общем случае разные, то начальные условия перезаряда паразитных емкостей²² тоже разные.

²¹режим *динамического опроса* каналов АЦП

²²в отдельно взятый момент коммутации с одного канала на другой

Если внутреннее сопротивление источника сигнала R_{src} , то в течении времени $t \simeq 3 * R_{src} * C_{par}$ перезаряда коммутационной емкости после момента коммутации на фазы X и Y дифференциального входа воздействует в общем случае неодинаковая помеха, искажающая информационный (разностный Y-X) сигнал дифференциального входа.

Эффект перезаряда коммутационной емкости накладывает определенные ограничения на выбор типа и способа подключения источника сигнала к дифференциальному входу с динамической коммутацией каналов, а также ограничения на выбор самого режима коммутации, которым в большинстве случаев можно управлять.

Следует отметить, что при постоянном режиме коммутации ДВКК эквивалентен обычному дифференциальному входу - см. раздел 2.3.2.1, стр. 12.

2.3.2.4 Псевдодифференциальный вход

Этот вход схемотехнически получен из дифференциального путем подключения динамического коммутатора (аналогового мультиплексора) ко входу одной из фаз дифференциального входа. Полученная коммутация позволяет динамически собирать данные со входов N каналов. Такое решение традиционно применяется в 16-ти канальных АЦП с мультиплексированием каналов, где существует так называемый 32 - канальный псевдодифференциальный режим, когда динамически коммутируется только одна из фаз внутреннего дифференциального входа, а вторая фаза GND32 не коммутируется и является своеобразным общим проводом для сигнальной цепи 32-х каналов. Название входа GND32 устоялось во множестве АЦП фирмы L-Card и поэтому сохранено без изменения.

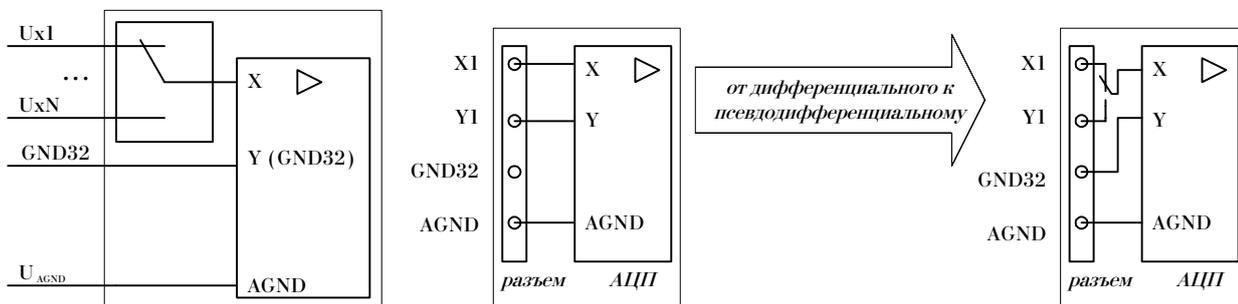


Рис. 2.19: Вход псевдодифференциальный

С одной стороны, этот вход не назовешь симметричным, с другой стороны, - он частично сохранил свойства дифференциального, поскольку имеет дифференциальный общий провод AGND. При использовании псевдо-дифференциального входа следует учитывать эффект перезаряда коммутационной емкости - см. раздел 2.3.2.3, стр. 13.

2.3.2.5 Однофазный гальваноразвязанный вход

Этот частный, но часто встречающийся случай улучшенного однофазного входа. Такое решение применяется в точных измерителях²³.

Улучшение заключается в том, что отвязанный от земли однофазный вход приобретает свойство симметрии: на рис. 2.20 общая наводка на входы X и Y относительно земли прикладывается ко входам X и Y одинаково, поскольку входы X и Y никак не связаны с

²³например, в преобразователях напряжения Н-27Т, Н-27У

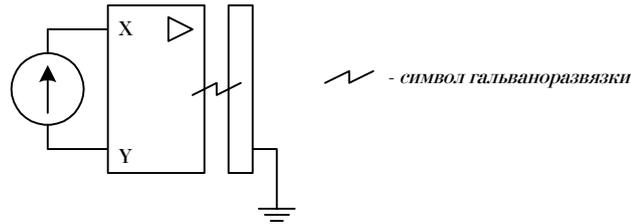


Рис. 2.20: Вход гальваноразвязанный однофазный

землей²⁴, а входной сигнал снимается непосредственно между точками X и Y и не зависит от потенциала земли.

О способах и особенностях гальваноразвязок – см. раздел 2.3.3, стр. 15.

Особо интересующийся читатель может задать вопрос: 'Однофазный гальваноразвязанный вход хуже дифференциального?'. Ответ будет следующий: в случае идеальной гальваноразвязки – не хуже. Но при реальной импульсной трансформаторной гальваноразвязке²⁵ существует межобмоточная емкость²⁶, а значит, существует утечка тока высокой частоты со входов X и Y на землю. Поскольку по отношению к гальваноотвязанной части внутренний вход все же однофазный и несимметричный, то и утечки высокочастотного тока с входов X и Y на землю будут неодинаковыми. Следовательно, на высокой частоте к однофазному гальваноразвязанному входу все же прикладывается небольшая помеха. В то же время, качественный (широкополосный) дифференциальный вход достаточно хорошо симметричен даже на высокой частоте.

2.3.3 По способу гальваноразвязки

Лучший вход – это независимый вход. В этой короткой фразе и заключен смысл гальваноразвязки входа измерительного прибора. Главный смысл гальваноразвязки сигнальной цепи напряжения вообще заключается в исключении тем или иным способом паразитного сквозного тока по общему проводу от источника к приемнику сигнала. Этот ток, вызывающий помеховое падение напряжения на сопротивлении общего провода²⁷, вызывается разностью потенциалов между аналоговыми землями источника и приемника сигнала.

Существуют несколько принципов гальваноразвязки, перечислим в этом разделе наиболее распространенные.

2.3.3.1 Трансформаторная гальваноразвязка сигнальной цепи

Трансформаторная развязка относится к индивидуальному способу гальваноразвязки *входа напряжения*. Трансформаторная развязка может быть как однофазной, так и дифференциальной²⁸.

Наиболее существенный недостаток трансформаторной развязки – это наличие проходной емкости между обмотками, которая не дает возможности обеспечить полную независимость развязываемых цепей по высокой частоте – **об этом надо всегда помнить**.

²⁴с них нет утечек тока на землю

²⁵ как правило, применяемой в источнике питания внутренних узлов гальваноотвязанного входа

²⁶порядка 10 пФ

²⁷в т.ч. индуктивного характера

²⁸по принципу дифференциального входа

2.3.3.2 Оптоэлектронная гальваноразвязка сигнальной цепи

Этот способ с применением оптопар дает достаточно качественную гальваноразвязку сигнальной цепи. Как правило, применяется для развязки цифровых сигнальных цепей.

2.3.3.3 Импульсная поканальная гальваноразвязка

Это своеобразная развязка входной сигнальной цепи, которая делается не на уровне входных проводов устройства, а на уровне развязки всех остальных цепей, которыми устройство связано с остальным миром, – это развязка цепей питания, управления и пр. *Суть этого способа* – в разрыве цепи прохождения паразитного сквозного тока по нулевому проводу за счет гальваноразвязки источника питания входного устройства.

Недостаток этого способа проявляется, главным образом, наличием высокочастотных помех, проникающих через межобмоточные емкости трансформаторной развязки источника питания входного устройства. По вопросу заземления – см. раздел 3.3.5, стр. 23.

2.3.3.4 Импульсная групповая гальваноразвязка

Эта гальваноразвязка аналогична описанной в разделе 2.3.3.3 (стр. 16), но применена на уровне развязки группы каналов, при этом *внутри группы гальваноразвязки нет*.

2.3.4 По входному сопротивлению

2.3.4.1 Вход напряжения

Вход, имеющий *большое* входное сопротивление, выделяет информацию из напряжения, приложенного к его входу.

2.3.4.2 Точковый вход

Вход, имеющий *малое* входное сопротивление, выделяет информацию из тока I , протекающего через его входное сопротивление R_{inp} . Падение напряжения на входном сопротивлении токового входа $U_{max} = I_{max} * R_{inp}$ определяет *запас по напряжению* токового входа.

2.3.4.3 Вход заряда

Вход имеет *малое* входное сопротивление. Он выделяет информационную составляющую из заряда Q , пропускаемого через его входное сопротивление R_{inp} .

Сущность входа заряда поясним с использованием эквивалентной схемы источника заряда Q в виде последовательно соединенных емкости и источника переменного напряжения U , – при этом эквивалентный заряд будет равен $Q = C * U$. Как и у *токового входа*, входное сопротивление R_{inp} *входа заряда* должно быть достаточно низким, в этом сходство входов тока и заряда. *Отличие же носит принципиальный характер*: вход заряда схемотехнически обеспечивает частотную независимость²⁹ 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 вышеописанной эквивалентной схемы источника заряда будет равен

²⁹в широкой полосе частот

$I_{inp} = U/(Z_c + R_{inp})$, и следовательно, частотно-зависим от реактивного сопротивления емкости источника заряда Z_c .

2.3.5 Примеры типов входов реальных устройств

Таблица 2.2: Примеры входов устройств

Устройство	По входному сопротивлению	По числу фаз и степени симметрии входа	По полярности входного сигнала	По способу гальваноразвязки
Усилитель заряда LE-41	Вход заряда	Однофазный	Двуполярный	Без гальваноразвязки
АЦП Н-22, Н-25	Вход напряжения	Дифференциальный	Двуполярный	Импульсная групповая
АЦП Н-11, LC-111	Вход напряжения	Дифференциальный или ДВДКК или псевдо-дифференциальный ^{a)}	Двуполярный	Импульсная групповая
Измерители напряжения Н-27U10, Н-27Т	Вход напряжения	Однофазный ^{b)}	Двуполярный	Импульсная поканальная
Измеритель напряжения Н-27U20	Вход напряжения	Однофазный ^{b)}	Однополярный	Импульсная поканальная
Измерители тока Н-27I5, Н-27I20	Токовый вход	Однофазный ^{b)}	Однополярный	Импульсная поканальная
Измеритель тока Н-27I10	Токовый вход	Однофазный ^{b)}	Двуполярный	Импульсная поканальная
Интерфейс 'Манчестер -II' ^{c)} LC-010, LCI-01, LCPI-01	Вход напряжения	Однофазный ^{b)}	Двуполярный	Трансформаторная
8 канальное АЦП в E-270USB	Вход напряжения	Однофазный	Однополярный	Без гальваноразвязки
Устройство ввода цифровых сигналов с поканальной опторазвязкой Н-41	Вход напряжения или тока ^{d)}	Однофазный	Однополярный	Оптоэлектронная

^{a)} альтернативные режимы работы

^{b)} однофазный вход с гальваноразвязкой обладает свойством симметрии, смысл которой пояснен в разделе 2.3.2.5, стр. 14

^{c)} интерфейс 'Манчестер -II' - двунаправленный, в данном случае подразумевается режим работы устройства на вход

^{d)} входное сопротивление входных цепей управления оптронами резко нелинейно: при нулевом токе оно очень большое, а при токе открытых оптронов (порядка 10 мА) оно составляет около 1.5 кОм, поэтому этот вход можно отнести как к входу напряжения, так и к токовому

2.4 Принципиальная совместимость входов устройств и источников сигнала

Знаком '+' в таблице отмечены принципиально совместимые пары *тип входа - тип источника*, знаком '+/-' отмечены плохосовместимые пары, а знаком '-' - принципиально несовместимые пары.

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	1-пол.	2-пол.
Тип входа												
По входному сопротивлению	U - вход по напряжению	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
	I- токовый вход	-	+	+/ -	+	+	+	+	+	+	+	+
	Q - вход заряда	-	+/ -	+	+	+	+	+	+	-	-	+
По полярности входного сигнала	1-полярный	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
	2-полярный	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
По количеству фаз и степени симметрии входа	Однофазный	+	+	+	+	+	+	+/ - ^{b)}	+	+	+	+
	Псевдодифференциальный	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+
	Дифференциальный	+	+ ^{a)}	+ ^{a)}	+	+	+	+	+	+	+	+

Рис. 2.21: Карта совместимости типов входов с типами источников сигнала

^{a)}случай встречается редко

^{b)}можно считать совместимым, но только в случае, если однофазный вход имеет индивидуальную гальвано-развязку и это вход-выход напряжения, а не тока или заряда

Глава 3

Обзор способов повышения помехозащищенности

В этой главе кратко перечислены способы и принципы обеспечения помехозащищенности – тот арсенал, которым, по мнению автора, должен владеть профессиональный системный интегратор при решении своей конкретной задачи. Причем, чем жестче требования к качеству системы и к реальной точности приборов, которые необходимо получить в измерительной системе, тем глубже со стороны системного интегратора должно быть понимание существующих технических принципов достижения указанных целей.

Ради исключения повторов, на принципы, которые уже были изложены выше, будут даны ссылки, остальные же будут рассмотрены подробно.

3.1 Гальваническая развязка

Под этим термином подразумевают семейство технических способов обеспечения изоляции между частями системы, которая обеспечивает *непроводимость* гальванического барьера для земляных и питающих сквозных токов и *проводимость* для информационного сигнала – фактически это устройство отделения информационного сигнала от среды, по которой он пришел, что само по себе очень полезно.

В большинстве измерительных приборах гальванически развязывают именно вход прибора¹. Принципы и особенности гальваноразвязок входов объяснены в разделе 2.3.3, стр. 15. Следует учитывать, что практически возможна и гальваноразвязка выхода прибора² – этот вариант в статье не рассмотрен, но суть гальваноразвязки от этого не меняется, и практически нет разницы при соединении двух приборов, – вне зависимости от того, с какой стороны он гальваноразвязан.

3.2 Согласование кабеля

В электрически длинной линии отсутствуют *отражения* от ее концов, если эквивалентное сопротивление нагрузок на ее концах равно волновому сопротивлению длинной линии – теоретически доказанный факт. Практически, если используется радиочастотный кабель

¹хотя бы потому, что измерительных приборов, работающих на вход гораздо больше приборов, работающих на выход

²например, генератора или ЦАП

для подсоединения источника сигнала с волновым сопротивлением 50 или 75 Ом, то в любом случае полезно его согласовывать, если это технически возможно. Даже если сигнал от источника сигнала низкочастотный³, все равно согласование имеет смысл, поскольку согласованная линия гораздо более помехоустойчива при воздействии внешних помех, в отличие от несогласованной. Достаточно эффективно обеспечить равенство волнового сопротивления и нагрузки *хотя бы на одном конце линии*. В частности, добавление последовательного резистора⁴ на передающем конце источника напряжения согласовывает линию на передающем конце. *Этот принцип называют последовательным согласованием*. Нагружать же линию на приемном конце дополнительной низкоомной нагрузкой иногда бывает неприемлемо из-за возникновения большого тока нагрузки источника сигнала; в то же время, если такая нагрузка допустима, то согласование кабеля еще и на приемном конце даст очень большую помехоустойчивость⁵.

3.3 Заземление

Перед тем, как менять схему заземления системы, помните, что Ваша карьера может неожиданно прерваться при несоблюдении правил техники безопасности.

ВНИМАНИЕ! ОПАСНО ДЛЯ ЖИЗНИ! Выключите из питающей сети электроприбор, схему заземления которого Вы хотите менять. Это значит, что перед тем как 'голыми руками' подключать или отключать земельный провод Вашего прибора, нужно физически выдернуть сетевую ~ 220 V вилку прибора из розетки!

Главная цель заземления состоит в привязке потенциала точки заземления устройства⁶ к потенциалу земли. Этой мерой, с одной стороны, достигается выполнение требования безопасности эксплуатации данного прибора, а с другой стороны - обеспечивается выравнивание потенциалов точек заземления приборов в системе, что обеспечивает помехоустойчивость работы оборудования. То есть, ответ на вопрос: 'Заземлять или нет?' - будет почти всегда: 'Да'. Почти всегда нужно заземлять - это значит, что если правильно заземлять, то это может улучшить помеховую ситуацию⁷, а если неправильно, то лучше и не браться за это благодарное занятие.

Итак, если коротко 'на пальцах': главная цель заземления состоит в привязке потенциала точки заземления устройства, а не для того, чтобы отводить ток какой-нибудь цепи. Тем более, если ток вашей сигнальной тепи отводится в землю! Если Вы обнаружили, что это так, то могу поздравить - Вы 'сваяли' не что иное, как систему регистрации собственных помех, которая 'взглючивает', когда включается или выключается сторонний электроприбор.

Если Вы не увидели смысла последнего авторского пассажа, значит не стоит бросать чтение этой статьи и следует сразу перейти к осознанию основных правил заземления.

Сформулируем и поясним на примерах основные правила заземления, которые достаточно сильно связаны между собой, поскольку непосредственно вытекают из базовых законов электротехники.

Не пугайтесь, автор не станет сыпать формулами теории анализа цепей, поскольку он взялся объяснить основные принципы заземления 'на пальцах', надеясь втайне, что Вы

³для него кабель не является электрически длинной линией

⁴увеличивающего выходное сопротивление источника напряжения точно до величины, равной волновому сопротивлению длинной линии

⁵практически определяемую качеством кабеля и качеством согласования

⁶как правило это определенная точка корпуса прибора

⁷в крайнем случае не навредить

сохранили понимание из школьного курса физики, чем отличается ток от напряжения...

3.3.1 Правило 1

Низкочастотный ток заземления гальваносвязанной части системы должен быть равен нулю. Ток сигнальных цепей не должен иметь контура распространения 'через землю'.

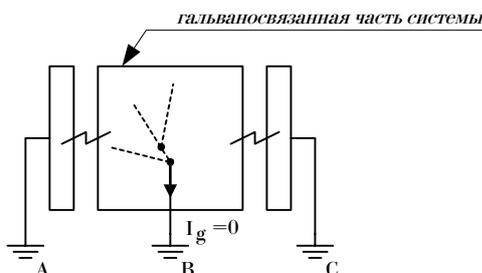


Рис. 3.1: Иллюстрация к Правилу 1 заземления (гальваносвязанная часть системы)

На рис. 3.1 показана гальваносвязанная часть системы, заземленная в точке 'В' контура сигнального заземления. Пусть гальванически отвязанные части системы заземлены в точках 'А' и 'С', при этом потенциалы точек 'А', 'В' и 'С' отличаются.

Суть этого правила заключается в том, что если *гальваноразвязка действительно имеется*, то у земельного тока I_g нет контура для распространения и поэтому он равен нулю, следовательно, токи сигнальных цепей⁸ не имеют контура распространения через землю. В этом случае сигналы гальваносвязанной части системы не зависят от разности потенциалов разнесенных точек заземления 'А', 'В' и 'С', а следовательно, помехозащищены от земельных токов сторонних электроприборов.

Если I_g не равен нулю, то это значит, что либо Вы не полностью отдаете себе отчет, где простираются границы Вашей гальваносвязанной части системы (это более вероятно), либо хотя бы одна гальваноразвязка Вашей системы подтекает, т.е. сломалась (это менее вероятно).

Слова о *низкочастотном токе* говорят о том, что на высокой частоте импульсные гальваноразвязки из-за проходных емкостей подтекают, а следовательно - высокочастотный ток I_g вряд ли будет равен нулю.

Все сказанное вовсе не означает, что ток I_g нужно явно мерить - просто точное понимание расположения границ Вашей гальваносвязанной системы уже дает понимание, от каких земельных токов она защищена, а от каких нет.

3.3.2 Правило 2

Если должны заземляться две точки общего провода сигнальной цепи, то провода к цепи заземления необходимо подсоединить в одной точке.

Это правило относится к проблеме обеспечения взаимной независимости сигнальных цепей внутри гальваносвязанной части системы в случае, когда необходимо заземлять нулевой провод сигнальной цепи в двух или более точках.

Вы должны понимать, что такой вариант заземления потенциально проблематичен, поскольку мы в любом случае образуем ответвление тока сигнальной цепи, протекающего по

⁸например, токи общих проводов

каждой паре заземляющих проводов, что само по себе *плохо*, но если это просто необходимо (см. 3.3.2.1), то сделать это можно оптимально, соблюдая *Правило 2*.

Очевидно, что *две сигнальные цепи независимы, если ток одной сигнальной цепи не создает дополнительного падения напряжения на участке другой сигнальной цепи*.

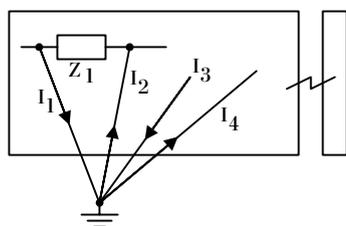


Рис. 3.2: Иллюстрация к *Правилу 2* заземления (одна точка заземления)

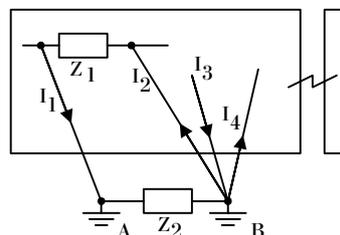


Рис. 3.3: Иллюстрация к *Правилу 2* заземления (не одна точка заземления)

На рис. 3.2, 3.3 показан участок общего провода сигнальной цепи, имеющий комплексное сопротивление⁹ Z_1 . В случае, когда все провода заземления гальваносвязанной системы сходятся в одну точку, токи I_3 , I_4 не могут вызвать прямое воздействие на падение напряжения на импедансе Z_1 - потому, что они там явно не текут (см. 3.3.2.2). В то же время, на рис. 3.3, где заземление произведено не в одной точке, падение напряжения на образованном дополнительном импедансе Z_2 земельного проводника сместит соотношения токов I_1 и I_2 , что явно изменит падение напряжения на Z_1 , а значит, - явно привнесет помеху в рассматриваемую сигнальную цепь.

Рис. 3.3 соответствует недопустимому случаю *удаленного заземления в разных точках* гальваносвязанной сигнальной цепи, при котором по общему проводу Z_1 течет разностный земельный ток.

3.3.2.1 Примечание 1

Типичный случай: два прибора осциллограф и генератор, имеющие коаксиальные выход и вход, с экраном (общим проводом), соединенным с корпусами приборов. *Правило Техники безопасности* требует индивидуального заземления корпуса каждого прибора, а *Правило 2* объясняет, как это нужно сделать правильно.

3.3.2.2 Примечание 2

Данные рассуждения относятся для простого случая, когда токи I_3 и I_4 не ответвляются в рассматриваемый общий провод Z_1 по дополнительным цепям, не показанным на рис. 3.2. Но даже если это так, то соблюдая *принцип заземления в одной точке*, Вы значительно уменьшите взаимные влияния Ваших сигналов.

3.3.3 Правило 3

Гальваническую связь сигнальных цепей следует стремиться производить только в одной точке. При этом именно эта точка будет оптимальна для заземления всей гальваносвязанной системы с помощью единственного заземляющего проводника.

⁹импеданс общего провода локальной сигнальной цепи

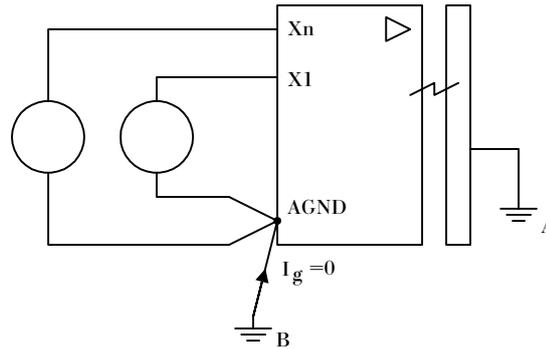


Рис. 3.4: Иллюстрация к Правилу 3 заземления (правильное соединение гальваносвязанных цепей, к тому же, с заземлением)

Можно сказать то же самое, но другими словами: если связать две независимых цепи более чем в одной точке, то появятся сегменты цепи (в виде петель), одновременно принадлежащие двум или более цепям - значит, напряжение, упавшее на сопротивлении этих общих участков цепи, создаст *перекрестную помеху* в соответствующих сигнальных цепях.

3.3.4 Правило 4

Если две локальные системы имеют разные (удаленные) точки заземления, то они должны иметь между собой гальваническую развязку сигнальных цепей.

Это прямое следствие¹⁰ из *Правила 2*, но оно настолько важно, что вынесено отдельно на всеобщее обозрение.

3.3.5 Заземлять или не заземлять гальваноразвязанные части системы?

Заземление гальваноразвязанных частей системы полезно и необходимо, пусть даже в далеких точках заземления. Дело в том, что если оставить гальваноотвязанную часть цепи явно не привязанной ни к какому потенциалу, то этот потенциал может быть любым¹¹, а это означает, что такая система может потенциально сломаться или 'сбойнуть' от разряда гигантского напряжения через собственную гальваноразвязку; в то же время, система может и не сломаться, если заряд все-таки потихоньку стекает¹². Следовательно, *заземление гальваноразвязанных частей системы, даже в далеких точках заземления, необходимо в случае, когда потенциал гальваноразвязанной части системы ничем не ограничен.*

3.3.6 Слабосвязанный с заземляющей цепью источник

Это 'дурной' случай, когда источник сигнала, с одной стороны, специально не изолирован от цепи заземления, а с другой стороны - имеет с ней связь 'неведомыми путями'. При

¹⁰см. раздел 3.3.2

¹¹например 10000В от электростатического накопленного заряда

¹²например, из-за большой влажности воздуха

соединении такого источника со входом прибора данный случай эквивалентен случаю далекого заземления устройств, при котором обязательно необходимо наличие гальваноразвязки входа прибора. В противном случае паразитный ток, втекающий в нулевой провод с 'неведомого пути', вызовет *неопределенное* падение напряжение на общем проводе.

3.3.7 Заземлять нужно на стороне источника или на стороне приемника сигнала?

Здесь речь идет о *гальваносвязанной* части системы¹³.

На этот вопрос нельзя дать однозначный ответ. Начнем с того, что гальваносвязанных источников и/или приемников в системе может быть несколько. В том случае, когда нет технической возможности индивидуально отвязать вход от выхода, образуются те самые 'завязки', которые приводят к ситуации, в которой *все влияет на все* - из-за наличия участков сигнальных цепей, принадлежащих нескольким сигнальным цепям сразу¹⁴ и, может быть, в этой ситуации нужно заземлять одновременно и на стороне источника, и на стороне приемника, соблюдая *Правило 2* - см. 3.3.2, стр. 21. *Да, для сложных случаев эти правила начинают противоречить друг другу* - тогда соблюдайте хотя бы одно из них, наверняка полегчает!

Ответ на вопрос, вынесенный в заголовок, в общем случае будет таким: главное, заземляйте так, чтобы максимально удовлетворить *хотя бы каким-то правилам* из раздела 3.3, стр. 20. Подразумевается, что в сложных случаях гальванической связи Вы *экспериментально* должны добиваться улучшения ситуации.

3.4 Экранирование

Сведения, приведенные в данной главе, и касающиеся рекомендаций по экранированию, следует воспринимать в контексте продолжения увлекательного описания самого термина *экранированный источник сигнала*, см. раздел 2.2.4.1, стр. 9. Остался нерасмотренным вопрос, с чем соединять экран. Об этом - ниже.

3.4.1 Экран - это хорошо, но с чем же его соединять?

Если экран не является корпусом и общим проводом - значит, это *именно электростатический экран* в своем изначальном понимании, который является своеобразной обкладкой конденсатора¹⁵. В этом случае 'честного' экрана для полного счастья остается привязать потенциал экрана где-нибудь в одной точке, заземлив экран в точке заземления системы. В этом случае поверхность экрана 'разрежет' пространство вокруг него на две области, не связанные между собой *емкостной* связью. Итак, электростатический экран дает взаимоемкостную независимость разделяемых областей¹⁶.

Теперь, рассмотрим различные отступления от изначального понимания термина *экран*, которые возникают очень часто из-за простой экономии проводящих поверхностей в системе - они увеличивают стоимость, вес и габарит прибора.

Если экран уже является токопроводящим корпусом системы - значит, единственная точка заземления *этого* корпуса должна одновременно являться и точкой привязки

¹³о гальваноразвязанной см. раздел 3.3.5, стр. 23

¹⁴см. *Правило 3* - 3.3.3, стр. 22

¹⁵второй после корпуса 'оболочкой' системы, но, в отличие от корпуса, изначальное ни с чем не соединенная

¹⁶для сравнения, электромагнитный экран - взаимоиндуктивную независимость

потенциала *этого* экрана. Если на этот корпус нет соединений в других точках, значит этот корпус действительно является экраном. Если же другие соединения на корпус есть, значит это уже совсем не экран, потому что в нем имеются *корпусные токи*.

Если экран является общим проводом, то это – типичный случай подключения посредством одножильного коаксиального кабеля (если подключение однофазное), либо экранированной витой парой (если подключение дифференциальное). В этом случае правила его подключения¹⁷ должны соответствовать правилам, относящимся к общему проводу в контексте *типа источника сигнала* и *типа входа*, и правил их подключения, описанных в настоящей статье. Особенно следует учитывать *Правила 2, 3, 4* заземления (см. раздел 3.3, стр. 20), соблюдая которые, Вы подключите этот экран – *общий провод* правильно.

Если экран является общим проводом согласованной линии¹⁸, то здесь фактор согласования кабеля (см. раздел 3.2, стр. 19) дает настолько высокий уровень помехозащищенности по сравнению с другими факторами, что даже подсоединив экран между корпусами приборов¹⁹, вы скорее всего не заметите помех из-за сквозных экранных токов между корпусами приборов²⁰.

3.5 Уменьшение входного импеданса прибора

Токовый вход гораздо более помехоустойчив, чем вход напряжения. Это объясняется, в частности, значительно более низким входным сопротивлением токового входа по сравнению со входом напряжения.

С другой стороны, вход напряжения гораздо более помехоустойчив, если он подключен к источнику напряжения с низким выходным сопротивлением.

Эти факторы необходимо учитывать при проектировании соединений устройств *по току* или *по напряжению*²¹.

Кроме того, для входов тока и напряжения оказывается полезной входная емкость прибора, уменьшающая сопротивление входа на высокой частоте. В частности, дополнительную входную емкость прибора создает экранированное подключение. Это дополнительный плюс экранированного подключения.

С другой стороны, слишком большая дополнительная входная емкость может заваливать АЧХ канала в области высоких частот, а в случае входа с ДВДКК (см. раздел 2.3.2.3, стр. 13), накапливать заряд коммутационной емкости, создавая дополнительную ошибку – напряжение смещения.

3.6 От однофазного подключения к дифференциальному

Дифференциальное подключение – это одна из эффективных мер улучшения *соотношения сигнал/помеха* на входе прибора – см. соответствующие примеры в главе 4, стр. 26.

¹⁷В т.ч. и заземления

¹⁸Этот вариант часто применяется в высокочастотной технике

¹⁹так часто и делают

²⁰В тоже время, принцип заземления корпусов приборов в одной точке дополнительно минимизирует корпусную разность потенциалов

²¹к сигнальной цепи заряда эти рассуждения не относятся

Глава 4

Примеры подключения типичных приборов

Невозможно охватить все практически возможные ситуации подключения устройств, которые встречаются в реальной жизни. Но, доработав реальную схему, приблизив ее к приведенным примерам, и соблюдая рекомендации, Вы имеете реальный шанс улучшить *соотношение сигнал/помеха* на входах приборов, межканальное прохождение, а также устранить возможные сбои устройств, вызванные электрическими помехами.

Во всех приведенных примерах использовано обозначение AGND – аналоговая земля, подразумевая, что устройство аналоговое и имеет аналоговую землю. Но аналогичные принципы можно применить и для борьбы с помехами в цифровых приборах, имеющих цифровую землю GND или DGND.

Все рассуждения, относящиеся к подключению дифференциального источника напряжения, справедливы также и для ДЛВФ-источника напряжения (см. раздел 2.2.3.3, стр. 8).

4.1 Устройства и с аналоговыми, и с цифровыми землями

Если в устройстве аналоговые и цифровые земли гальваноразвязаны, то проблем быть не должно. Но, если из устройства выходят уже связанные там обе цепи¹, то в силу вступает *Правило 3* – см. 3.3.3, стр. 22 – из которого следует, что внешние аналоговые и цифровые цепи должны быть с гальваноразвязкой, иначе будет образована вторая точка связи общих проводов разнородных цепей, а это *недопустимо*.

Тогда возникает вопрос: 'Для единственной точки заземления системы использовать вывод аналоговой или цифровой земли?'. Если специальная точка заземления не предусмотрена, то, скорее всего, нужно заземлять аналоговую землю, хотя дать жесткую рекомендацию для этого случая невозможно, поскольку это зависит от величины и рода помех, которые существуют в конкретной системе.

Нарисуйте контуры протекания емкостной помехи между гальваноразвязанными участками Вашей системы – тогда Вы имеете реальный шанс понять, какая единственная точка гальваносвязанной части системы будет наиболее эффективно замыкать на землю высокочастотные токи утечек². А может точка заземления должна быть не одна? – см. *Правило 2*, 3.3.2, стр. 21.

¹ например, в модуле E-270 аналоговая земля АЦП контроллера гальваносвязана с цифровой землей цифровых сигналов ввода-вывода

² про утечки см. *Правило 1* – 3.3.1, стр. 21

4.2 Подключение сигнальной цепи напряжения

4.2.1 Однофазный вход

К одиночному входу напряжения без гальваноразвязки может быть достаточно корректно подключен одиночный изолированный источник напряжения, как на рис. 4.1.

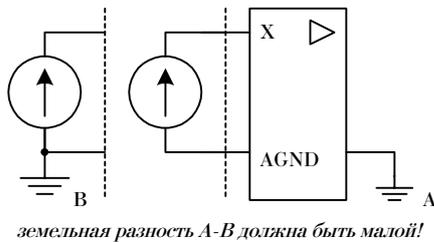


Рис. 4.1: Однофазное подключение источника напряжения

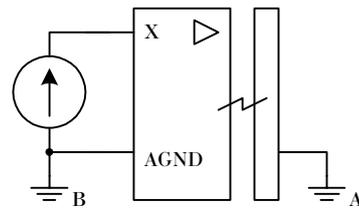


Рис. 4.2: Однофазное подключение источника напряжения с заземлением

Любая взаимосвязь источника сигнала с цепью заземления может породить помехи. Если источник заземлен, и по другому соединить нельзя, то, как крайняя мера, нужно хотя бы обеспечить *малую разность потенциалов*³ между точками А-В, заземлив все в одной точке – см. *Правило 2, 3.3.2, стр. 21.*

При наличии гальваноразвязки у входа напряжения заземлять источник сигнала можно (см. рис. 4.2) и в большинстве случаев необходимо – см. раздел 3.3.5, стр. 23.

4.2.1.1 Группа однофазных входов

При подключении нескольких источников напряжения к группе однофазных входов напряжения без гальваноразвязки важно, чтобы их общие провода соединялись только в одной точке – непосредственно на AGND входа прибора. Заземление здесь крайне нежелательно по той же причине, что и в случае одиночного входа⁴, но если без него не обойтись, то его нужно сделать в точке AGND – см. *Правило 3, 3.3.3, стр. 22.*

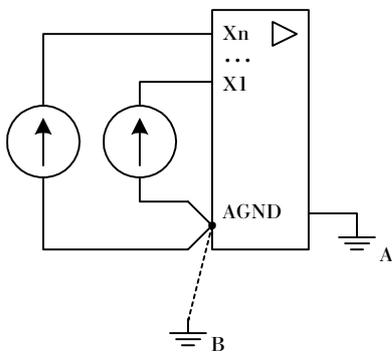


Рис. 4.3: Однофазные входы напряжения без гальваноразвязки

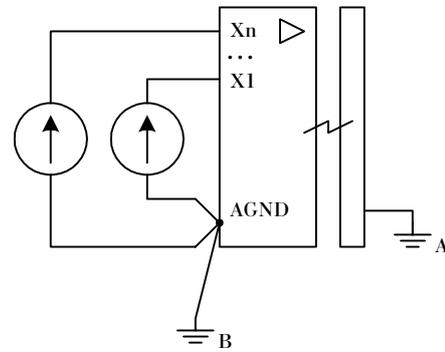


Рис. 4.4: Однофазные входы напряжения с гальваноразвязкой

³В том числе высокочастотную

⁴см. *Правило 2, 3.3.2, стр. 21*

Это же справедливо для случая групповой гальваноразвязки. Заземлять источники сигналов полезно (см. раздел 3.3.5, стр. 23), но только в точке В, – см. *Правило 3*, 3.3.3, стр. 22, – как показано на рис. 4.4.

4.2.1.2 Экранирование однофазных входов

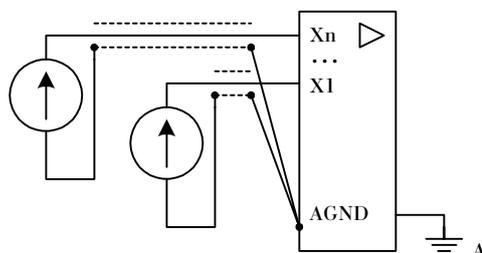


Рис. 4.5: Экранирование однофазных входов напряжения без гальваноразвязки. Совместный экран и общий провод

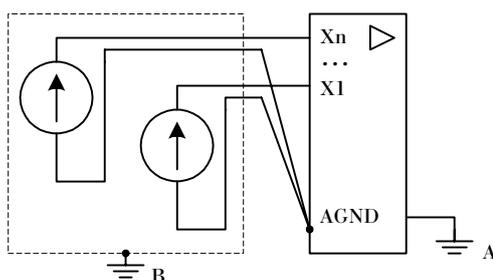


Рис. 4.6: Экранирование однофазных входов напряжения без гальваноразвязки. Раздельный экран и общий провод

4.2.1.3 Подключение дифференциального источника

Дифференциальный источник напряжения можно подключить к однофазному входу с гальваноразвязкой. Этот случай является практически корректным, но только для выхода и входа напряжения и только, когда однофазный вход имеет индивидуальную гальваноразвязку.

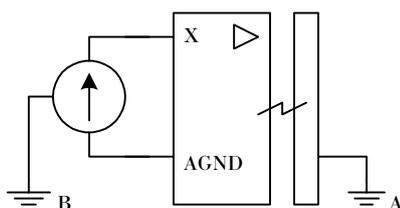


Рис. 4.7: Подключение дифференциального источника напряжения к однофазному входу с гальваноразвязкой

В этой схеме используется *свойство симметрии* однофазного отвязанного входа – см. раздел 2.3.2.5, стр. 14.

4.2.2 Дифференциальный вход

При дифференциальном подключении источника напряжения не следует забывать, что подключение ведется *тремя* проводами.

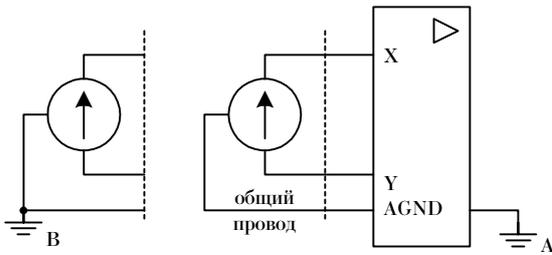


Рис. 4.8: Дифференциальное подключение источника напряжения

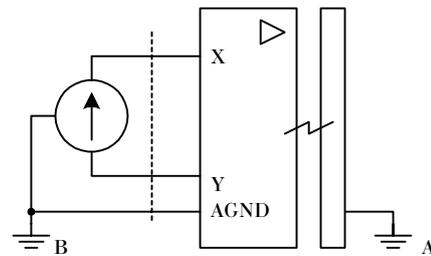


Рис. 4.9: Дифференциальное подключение источника напряжения с заземлением

Заземлять источник сигнала не рекомендуется: при наличии высокочастотной разности потенциалов между точками заземления А-В коэффициент подавления возникшей синфазной помехи на высокой частоте может оказаться недостаточным для подавления помехи. Если дифференциальный вход широкополосный, то значимость указанной проблемы менее существенна.

Для случая гальваноразвязанного входа – см. раздел 3.3.5, стр. 23.

4.2.2.1 Группа дифференциальных входов

При подключении нескольких источников напряжения к группе дифференциальных входов напряжения без гальваноразвязки важно, чтобы их общие провода соединялись только в одной точке: непосредственно на AGND входа прибора – см. *Правило 3*, 3.3.3, стр. 22. Заземление источников здесь нежелательно по той же причине, что и в случае одиночного входа.

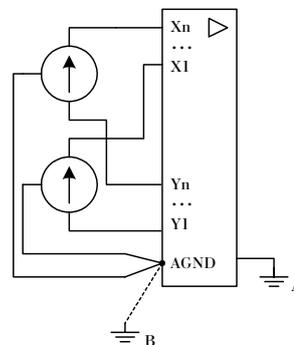


Рис. 4.10: Дифференциальные входы напряжения без гальваноразвязки

При наличии групповой гальваноразвязки входов заземление полезно (см. раздел 3.3.5, стр. 23), но только в одной точке В, как показано на рис. 4.10.

4.2.2.2 Подключение однофазного источника

При подключении однофазного источника напряжения к дифференциальному входу принципиально, чтобы оно было *трехпроводным*, а также, чтобы внутреннее сопротивление источника напряжения⁵ было минимальным - в этом случае реализуются преимущества дифференциального входа по сравнению с однофазным. Например, если Вы хотите под-

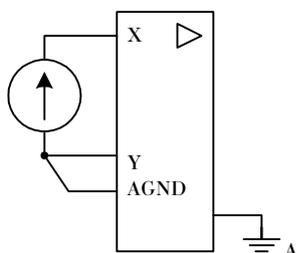


Рис. 4.11: Подключение однофазного источника напряжения к дифференциальному входу

ключить термопару к дифференциальному входу *оптимально*, то придется тянуть от нее третий провод.

4.2.2.3 Подключение однофазных источников

При подключении нескольких однофазных источников напряжения к группе дифференциальных входов напряжения без гальваноразвязки важно, чтобы подключение к каждому источнику было *трехпроводным*, а также, чтобы их общие провода соединялись только в одной точке - непосредственно на AGND входа прибора - см. *Правило 3, 3.3.3, стр. 22*.

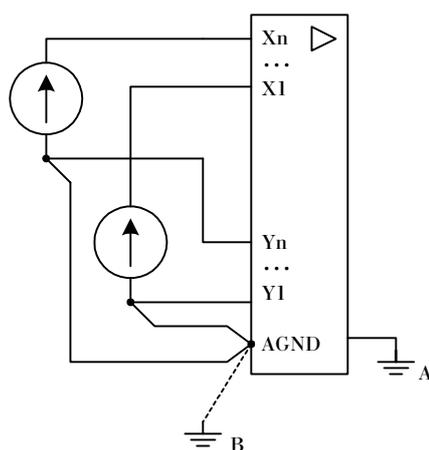


Рис. 4.12: Подключение однофазных источников напряжения к дифференциальным входам

Заземление источников в этой схеме нежелательно по той же причине, что и в случае одиночного входа - см. *Правило 2, 3.3.2, стр. 21*. При наличии групповой гальваноразвязки входов заземление полезно (см. раздел *3.3.5, стр. 23*), но только в одной точке В, как показано на рис. *4.12*

⁵в т.ч. и на высокой частоте

4.2.3 Псевдодифференциальные входы

При подключении нескольких однофазных источников напряжения к группе псевдодифференциальных входов напряжения без гальваноразвязки важно, чтобы их общие провода соединялись только в одной точке - непосредственно на AGND входа прибора (см. *Правило 3, 3.3.3, стр. 22*). В свою очередь, AGND должна объединяться с GND32 в *той же самой точке*.

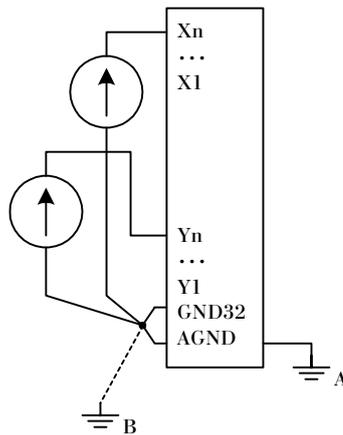


Рис. 4.13: Подключение однофазных источников напряжения к псевдодифференциальным входам

Заземление источников в этой схеме нежелательно - см. *Правило 2, 3.3.2, стр. 21*. При наличии групповой гальваноразвязки входов заземление件лезно (см. раздел 3.3.5, стр. 23), но только в одной точке В, как показано на рис. 4.13

4.3 Подключение сигнальной цепи тока

Стыковку устройств по току желательно делать при наличии поканальной гальваноразвязки входов.

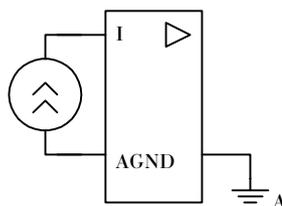


Рис. 4.14: Однофазное подключение по току

Заземление и экранирование токовой цепи, как правило, не требуются, но возможны в специальных случаях.

4.4 Подключение сигнальной цепи заряда

Для подключения сигнальной цепи заряда принципиально, чтобы это подключение было экранированным, со *сплошной экранирующей поверхностью*, не имеющей просветов. Указанным свойством обладает, например, коаксиальный кабель с *ленточным*, а не плетеным, экраном. Также важно *большое* сопротивление между центральной жилой и экраном кабеля, которое не должно быть меньше 1 ГОм - в противном случае появится завал АЧХ на низких частотах.

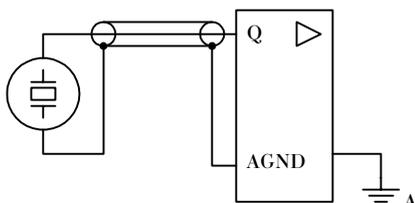


Рис. 4.15: Подключение источника заряда к входу заряда

Заземление устройства с входом заряда обязательно. Заземление на стороне источника, как правило, не требуется, хотя возможно.

4.5 Резервированное подключение устройств

Здесь рассматривается наиболее частый случай резервированного подключения АЦП, при объединении их по аналоговым входам. Следует учитывать следующие вопросы:

1. Поддерживает⁶ ли АЦП режим резервирования?
2. Необходимо ли делать специальные соединения⁷ для обеспечения режима резервирования?
3. В какой степени входы АЦП не будут влиять друг на друга? Этот вопрос актуален для АЦП с входной динамической коммутацией каналов - см. раздел 2.3.2.3, стр. 13
4. Как оптимально сделать соединения? Для ответа на этот вопрос можно руководствоваться принципами правильных соединений, изложенными в разделе 3.3, стр. 20

⁶например, АЦП системы Н-2000 такой режим поддерживают

⁷при резервировании АЦП системы Н-2000 необходимо дополнительно объединять одноименные *выводы питания преусилителя*

Глава 5

Заключение

Не следовало бы воспринимать эту статью, как полный справочник болезней вашей измерительной системы. До справочника она явно не дотягивает. Если Вы с пониманием все же дочитали эту статью, то наверняка увидели ту проблему, которую раньше не видели или неправильно видели. Значит, Вы знаете с чем бороться.

В этом и заключалась главная цель этой статьи.

Список таблиц

2.1	Типичные примеры источников сигнала	11
2.2	Примеры входов устройств	17

Список иллюстраций

2.1	Символ сигнального заземления	3
2.2	Ток заземления	3
2.3	Символы аналоговой и цифровой земель	4
2.4	Символ источника напряжения	6
2.5	Символ источника тока	6
2.6	Символ источника заряда	7
2.7	Однофазный заземленный источник сигнала	7
2.8	Дифференциальный заземленный источник сигнала	7
2.9	Однофазный незаземленный источник сигнала	8
2.10	Дифференциальный незаземленный источник сигнала	8
2.11	Дифференциальный источник сигнала	8
2.12	Однофазный источник сигнала	8
2.13	ДЛВФ источник напряжения	9
2.14	Экранированный источник сигнала	10
2.15	Неэкранированный источник сигнала	10
2.16	Вход дифференциальный	12
2.17	Вход однофазный	13
2.18	Вход ДВДКК	13
2.19	Вход псевдодифференциальный	14
2.20	Вход гальваноразвязанный однофазный	15
2.21	Карта совместимости типов входов с типами источников сигнала	18
3.1	Иллюстрация к Правилу 1 заземления (гальваносвязанная часть системы)	21
3.2	Иллюстрация к Правилу 2 заземления (одна точка заземления)	22
3.3	Иллюстрация к Правилу 2 заземления (не одна точка заземления)	22
3.4	Иллюстрация к Правилу 3 заземления (правильное соединение гальваносвязанных цепей, к тому же, с заземлением)	23
4.1	Однофазное подключение источника напряжения	27
4.2	Однофазное подключение источника напряжения с заземлением	27
4.3	Однофазные входы напряжения без гальваноразвязки	27
4.4	Однофазные входы напряжения с гальваноразвязкой	27
4.5	Экранирование однофазных входов напряжения без гальваноразвязки. Совмещенный экран и общий провод	28
4.6	Экранирование однофазных входов напряжения без гальваноразвязки. Раздельный экран и общий провод	28
4.7	Подключение дифференциального источника напряжения к однофазному входу с гальваноразвязкой	28
4.8	Дифференциальное подключение источника напряжения	29

4.9	Дифференциальное подключение источника напряжения с заземлением . . .	29
4.10	Дифференциальные входы напряжения без гальваноразвязки	29
4.11	Подключение однофазного источника напряжения к дифференциальному вхо- ду	30
4.12	Подключение однофазных источников напряжения к дифференциальным вхо- дам	30
4.13	Подключение однофазных источников напряжения к псевдодифференциаль- ным входам	31
4.14	Однофазное подключение по току	31
4.15	Подключение источника заряда к входу заряда	32

Оглавление

1	Введение	1
2	Общие сведения о совместимости устройств	2
2.1	Договоримся о терминах	2
2.1.1	Источник сигнала	2
2.1.2	Сигнальная цепь	2
2.1.3	Общий провод	2
2.1.4	Заземление	3
2.1.5	Сигнальное заземление	3
2.1.6	Ток заземления	3
2.1.7	Местное заземление	4
2.1.8	Цепи цифровой и аналоговой земель	4
2.1.9	Экран	5
2.2	Типы источников сигналов	5
2.2.1	По характеру внутреннего сопротивления	5
2.2.1.1	Источник напряжения	5
2.2.1.2	Источник тока	6
2.2.1.3	Источник заряда	6
2.2.2	По наличию заземления	7
2.2.2.1	Заземленный источник	7
2.2.2.2	Изолированный (незаземленный, отвязанный от земли) источник	7
2.2.3	По числу фаз	8
2.2.3.1	Дифференциальный (двухфазный) источник сигнала	8
2.2.3.2	Однофазный источник сигнала	8
2.2.3.3	Дифференциальный с ложной второй фазой (ДЛВФ) источник напряжения	8
2.2.4	По наличию экранирующей поверхности	9
2.2.4.1	Экранированный источник сигнала	9
2.2.4.2	Неэкранированный источник сигнала	10
2.2.5	По полярности источника сигнала	10
2.2.6	Примеры источников сигналов	11
2.3	Типы входов устройств	11
2.3.1	По полярности входного сигнала	11
2.3.2	По количеству фаз и степени симметрии входа	12
2.3.2.1	Дифференциальный вход	12
2.3.2.2	Однофазный вход	13
2.3.2.3	Дифференциальный вход с динамическим коммутатором каналов (ДВДКК)	13

2.3.2.4	Псевдодифференциальный вход	14
2.3.2.5	Однофазный гальваноразвязанный вход	14
2.3.3	По способу гальваноразвязки	15
2.3.3.1	Трансформаторная гальваноразвязка сигнальной цепи	15
2.3.3.2	Оптоэлектронная гальваноразвязка сигнальной цепи	16
2.3.3.3	Импульсная поканальная гальваноразвязка	16
2.3.3.4	Импульсная групповая гальваноразвязка	16
2.3.4	По входному сопротивлению	16
2.3.4.1	Вход напряжения	16
2.3.4.2	Токовый вход	16
2.3.4.3	Вход заряда	16
2.3.5	Примеры типов входов реальных устройств	17
2.4	Принципиальная совместимость входов устройств и источников сигнала	18
3	Обзор способов повышения помехозащищенности	19
3.1	Гальваническая развязка	19
3.2	Согласование кабеля	19
3.3	Заземление	20
3.3.1	Правило 1	21
3.3.2	Правило 2	21
3.3.2.1	Примечание 1	22
3.3.2.2	Примечание 2	22
3.3.3	Правило 3	22
3.3.4	Правило 4	23
3.3.5	Заземлять или не заземлять гальваноразвязанные части системы?	23
3.3.6	Слабосвязанный с заземляющей цепью источник	23
3.3.7	Заземлять нужно на стороне источника или на стороне приемника сигнала?	24
3.4	Экранирование	24
3.4.1	Экран - это хорошо, но с чем же его соединять?	24
3.5	Уменьшение входного импеданса прибора	25
3.6	От однофазного подключения к дифференциальному	25
4	Примеры подключения типичных приборов	26
4.1	Устройства и с аналоговыми, и с цифровыми землями	26
4.2	Подключение сигнальной цепи напряжения	27
4.2.1	Однофазный вход	27
4.2.1.1	Группа однофазных входов	27
4.2.1.2	Экранирование однофазных входов	28
4.2.1.3	Подключение дифференциального источника	28
4.2.2	Дифференциальный вход	29
4.2.2.1	Группа дифференциальных входов	29
4.2.2.2	Подключение однофазного источника	30
4.2.2.3	Подключение однофазных источников	30
4.2.3	Псевдодифференциальные входы	31
4.3	Подключение сигнальной цепи тока	31
4.4	Подключение сигнальной цепи заряда	32
4.5	Резервированное подключение устройств	32

ОГЛАВЛЕНИЕ	39
5 Заключение	33
Список таблиц	34
Список иллюстраций	35