

## Когда плохо от хорошего заземления — изолируйте!

Томас КУГЕЛЬСТАДТ  
(Thomas KUGELSTADT)  
Перевод: Дмитрий ИОФФЕ  
dsioffe@yandex.ru

**В этой статье рассказывается о том, как во время монтажа электрооборудования возникает разность потенциалов между удаленными землями, как непреднамеренно создаются земляные контуры и как преодолеть и то и другое при помощи изоляции и создать надежно работающую систему передачи данных. Эта информация поможет разработчику избежать множества «подводных камней» при создании таких систем.**

При создании промышленного оборудования часто возникает необходимость передачи сигналов по длинным линиям. Если разработчик не подозревает о разности земляных потенциалов (ground-potential differences, GPD) между удаленными участками шин, или же надеется на локальное заземление как на надежный путь возврата сигнала, или непосредственно соединяет удаленные участки «земли» один с другим, то тем самым он создает земляные контуры, которые порождают помехи. В любом из этих случаев целостность передаваемых сигналов поставлена под угрозу, может произойти сбой системы и, в худшем случае, выйдут из строя шинные приемопередатчики.

### Соединение «земель»

Связь между локальной землей электронной схемы и опорным земляным потенциалом питающей сети обычно обеспечивается через источник питания, который преобразует напряжение этой сети в постоянное напряжение, необходимое для данной схемы. На рис. 1 показана упрощенная блок-схема недорогого импульсного источника питания, из тех, которые обычно используются в персональных компьютерах, лазерных

принтерах и другом оборудовании. Здесь «земля» выходного напряжения источника питания связана с шиной защитного заземления питающей сети через шасси источника. Это прямое соединение, таким образом, работает как контрольный кабель, который уравнивает земляной потенциал локального источника питания и потенциал защитного заземления.

### Линейная и нелинейная нагрузки

В больших офисных и промышленных зданиях работает огромное количество оборудования, представляющего собой нелинейную нагрузку: персональные компьютеры, лазерные принтеры, полупроводниковые регуляторы мощности, люминесцентные лампы, бесперебойные источники питания, управляемые электроприводы. По сравнению с линейной нагрузкой, такой, как лампы накаливания, в которой фазный ток сохраняет синусоидальную форму, нелинейная нагрузка искажает фазный ток, внося широкий спектр гармоник (рис. 2).

Если третья и пятая гармоники основной частоты в 60 Гц представляют львиную долю состава гармоник, векторная сумма всех частотных составляющих (включая основную частоту) может достигать пиковых значений,

превышающих амплитуду основной гармоники фазного тока более чем на 100%.

Все нулевые провода подключаются к одному нулевому проводу большого диаметра на распределительном щите, ведущему к трансформатору. В случае линейной нагрузки токи нейтрали в многофазной системе в значительной степени компенсируют друг друга. Остается только составляющая, которая возникает из-за разбаланса нагрузок (рис. 3).

Однако для нелинейных нагрузок к общему току нейтрали добавляются индивидуальные токи, которые содержат, главным образом, третью гармонику (рис. 4). Поэтому большие токи нейтрали из-за нелинейных нагрузок создают значительно большие падения напряжения на сопротивлениях линий электрических установок, чем при линейных нагрузках.

### Системы заземления

В большинстве электрических установок используется одна из двух систем заземления: TN-C или TN-C-S. Эти системы показаны на рис. 5. В системе TN-C (рис. 5а) разность земляных потенциалов обычно больше, чем в системе TN-C-S (рис. 5б).

TN означает, что нейтраль соединена с «землей» (terre по-французски) трансформатора.

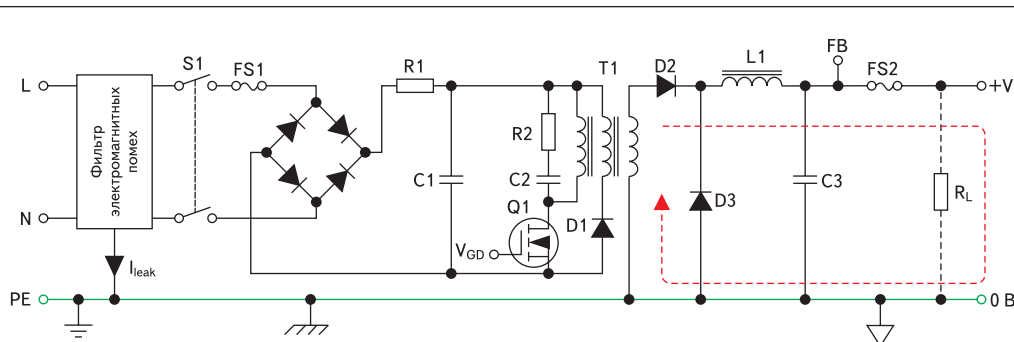


Рис. 1. Упрощенная блок-схема импульсного источника питания

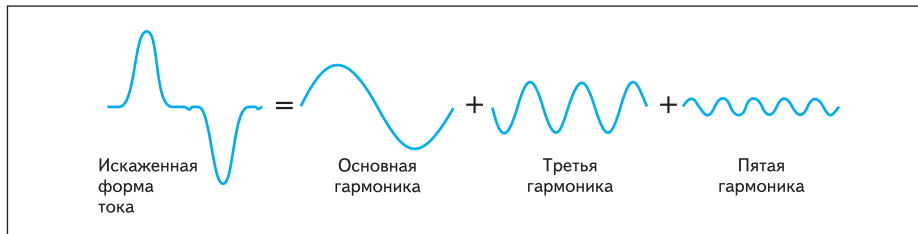


Рис. 2. Искаженный фазный ток и его гармонические составляющие

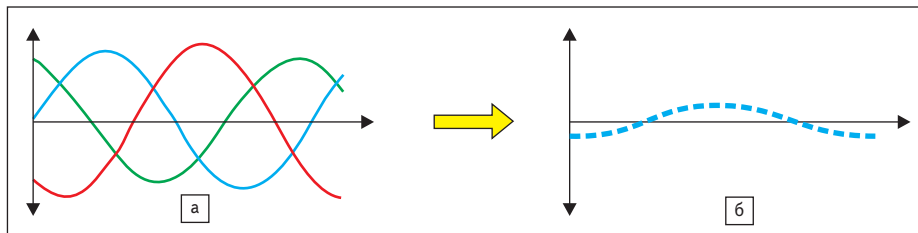


Рис. 3. Многофазные токи при линейной нагрузке: а) синусоидальные фазные токи; б) суммарный ток нейтрали при разбалансе нагрузок

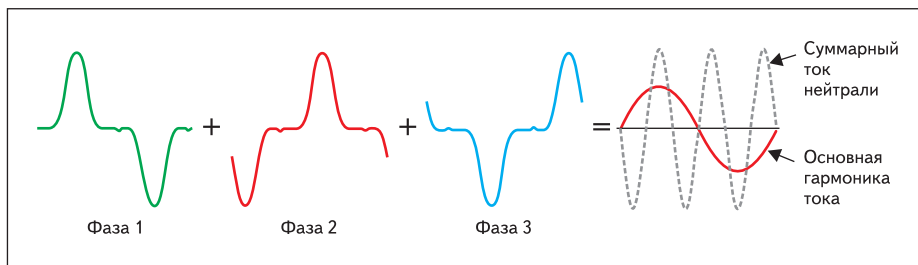


Рис. 4. Суммарный ток нейтрали содержит, в основном, третьи гармоники

Буква С означает комбинированное (combined) использование для защитного заземления (protective earth, PE) и линий нейтрали одного и того же проводника, обозначенного как PEN. PEN проходит через всю систему до точки распределения (то есть до монтажной панели) рядом с нагрузками, возле которых он расщепляется на отдельные провода защитного заземления (PE) и нейтрали, которые и подключаются непосредственно к нагрузке.

Несмотря на то, что система заземления TN-C уже устарела, интерес к ней сохраняет-

ся, потому что она обходится дешевле, чем системы, в которых требуется отдельный провод для защитного заземления. Однако у нее есть серьезный недостаток. Так как разделение на защитное заземление и нейтраль происходит рядом с нагрузкой, потенциал локального подключения защитного заземления включает большое падение напряжения на сопротивлении длинной линии провода нейтрали RL-N. Поэтому в системе TN-C может присутствовать большая разность потенциалов между удаленными участками заземления (GPD), порой достигающая десятков вольт.

В системе TN-C-S падение напряжения между удаленными участками «земли» меньше, так как отдельный провод защитного заземления прокладывается от распределительного щита. Кроме того, звездообразное подключение проводов системной нейтрали и защитного заземления обеспечивает второе соединение с «землей», уменьшая потенциал в этой точке и нейтрализуя большое падение напряжения, которое могло бы возникнуть на PEN из-за сопротивления линии RLS.

В соответствии с Национальным электрическим кодексом Соединенных Штатов (United States National Electrical Code, NEC) предполагается, что через провод защитного заземления при нормальной работе не протекает ток. Однако большинство нелинейных нагрузок создает в этом проводе токи утечек около 1 мА. Эти токи, небольшие для каждой схемы, легко достигают единиц ампер, когда к одной линии подключаются сотни нагрузок.

Несмотря на свои пренебрежимо малые значения по сравнению с током нейтрали, токи утечек создают разности потенциалов между удаленными участками «земли» из-за падений напряжения на сопротивлении провода защитного заземления. Эти разности потенциалов, однако, имеют размах порядка единиц милливольт и, таким образом, они намного меньше, чем в системах TN-C.

Разность потенциалов «земли» не создает проблем для электронных схем, которые работают только от одного локального источника питания. Трудности появляются при разработке линий связи между двумя удаленными схемами, которые питаются от разных источников.

### Разработка длинных линий передачи данных

При создании длинной линии передачи данных разработчик должен предполагать, что разность потенциалов «земли» существует. Ее напряжение добавляется как синфазный шум  $V_n$  к выходному сигналу передатчика. Даже если суммарный сигнал находится в пределах диапазона допустимых синфазных напряжений приемника, рассчитывать на ло-

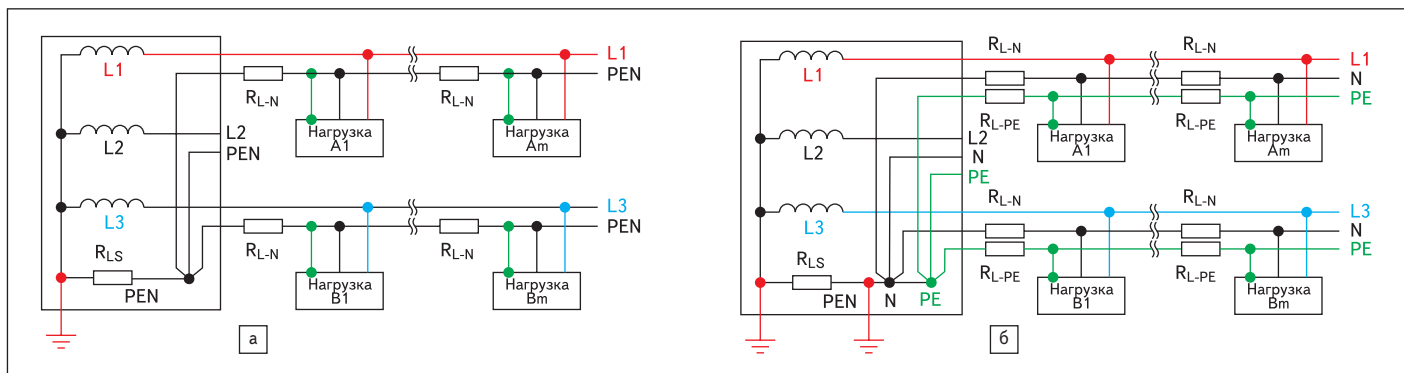


Рис. 5. Системы заземления: а) система TN-C; б) система TN-C-S. Обозначения: Li — фазные провода; N — нулевой провод (neutral); PE — защитное заземление (protective earth); PEN — совмещенный нулевой рабочий и защитный провод (protective earth neutral)

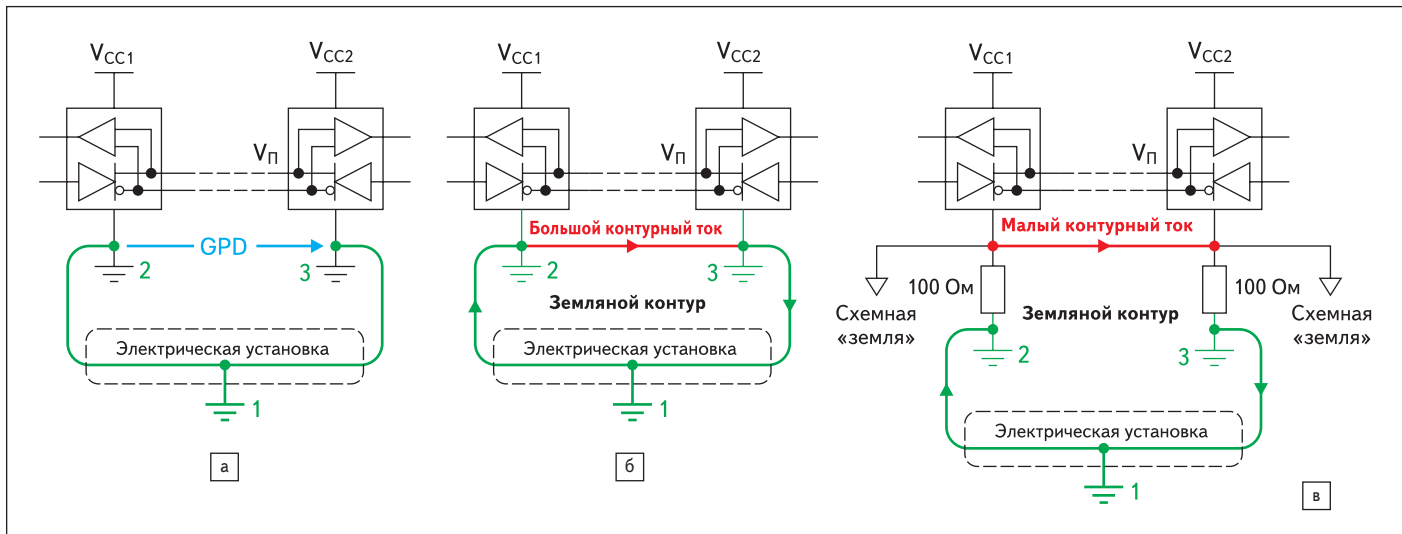


Рис. 6. «Подводные камни» для разработчика: а) большая разность земляных потенциалов; б) большой контурный ток; в) при уменьшении контурного тока остается высокая чувствительность к шумам, возникающим в протяженном контуре

кальное заземление как на надежный путь возврата сигнального тока опасно (рис. 6а). Это относится даже к «супер-приемопередатчикам», таким как семейство SN65HVD2х фирмы Texas Instruments, для которого допустимый диапазон синфазных входных сигналов простирается от  $-20\text{ В}$  до  $+25\text{ В}$ .

Любая модификация электрической установки (например, во время работ по периодическому обслуживанию) неподвластна контролю со стороны разработчика. Эта модификация может увеличить разность земляных потенциалов до такой степени, что допустимый диапазон синфазных сигналов приемника будет периодически или постоянно превышать. Таким образом, канал передачи данных, который прекрасно работает сегодня, может перестать работать когда-либо в будущем.

Не рекомендуется для устранения разности земляных потенциалов непосредственно соединять проводом удаленные «земли» (рис. 6б). Надо иметь в виду, что электрическая установка состоит из очень сложных цепей, которые содержат множество пересекающихся линий и сопротивлений «земли», возникающих из-за многофазности систем,

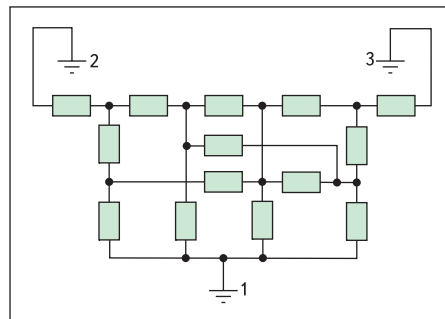


Рис. 7. Пример сложного сопротивления земляных цепей

разной длины кабелей и разной прокладки заземления (рис. 7).

Непосредственное соединение удаленных «земель» шунтирует эти цепи, создавая токовые контуры. Начальная разность земляных потенциалов «пытается» скомпенсировать свое уменьшение, порождая большой контурный ток через низкоимпедансную земляную шину. Этот ток попадает в линии передачи данных и вызывает появление шумового напряжения, которое синфазно накладывается на передаваемый сигнал. Это, опять-таки, не-

сет риск снижения надежности системы передачи данных.

Для того чтобы можно было непосредственно соединять удаленные «земли», стандарт RS-485 рекомендует отделять «землю» устройства от локальной земли системы через резисторы (рис. 6в). Наряду с тем, что при таком подходе уменьшается контурный ток, существование большого земляного контура вызывает чувствительность линий данных к шумам, возникающим в разных местах этого контура. Таким образом, получить высоконадежный канал передачи данных не удастся. Большинство надежных каналов RS-485, выдерживающих разность земляных потенциалов в сотни и тысячи вольт, содержат гальваническую изоляцию между локальными сигналами и источниками питания шинных приемопередатчиков (рис. 8).

Изоляторы питания, такие как изолированные преобразователи постоянного напряжения, и изоляторы сигнала, такие как цифровые емкостные изоляторы, предотвращают появление токовых контуров и протекание токов между удаленными участками «земли» с разностью потенциалов до нескольких тысяч вольт.

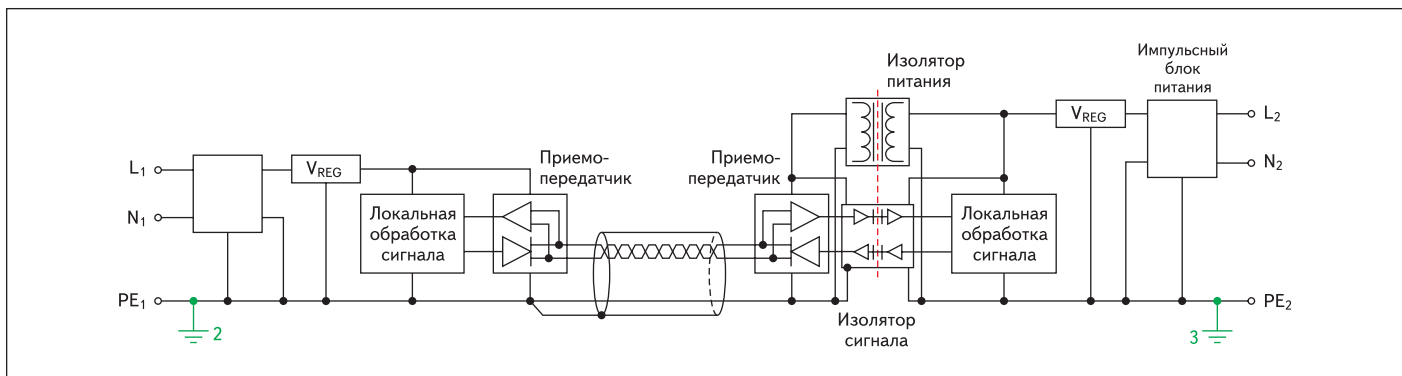


Рис. 8. Изоляция двух удаленных приемопередающих устройств с одним опорным заземлением

Если бы не было опорного заземления, шинные приемопередатчики работали бы с плавающим питанием. Тогда броски тока или напряжения вызывали бы искрение, нарушения заземления или другие помехоопасные обстоятельства, способные поднять плавающее напряжение до опасного уровня. Эти явления могут повреждать компоненты, подключенные к шине, так как уровни их сигналов и питания отсчитываются от общего провода шины и складываются с разницей опорных потенциалов.

Когда передающие кабели подключаются к разъемам на печатных платах разных приемопередающих узлов, высокая разность потенциалов между ними, если ее не исключить, может вызвать электрическую дугу и повредить компоненты, расположенные на печатной плате рядом с разъемом. Чтобы предотвратить переходные процессы в общем проводе шины, необходимо связать его с одной из точек системного заземления. Это место обычно соединяют с неизолированным приемопередающим узлом, который будет обеспечивать единый уровень «земли» для всей системной шины.

На рис. 8 детально показано соединение двух удаленных приемопередающих устройств, на рис. 9 — пример изолированной

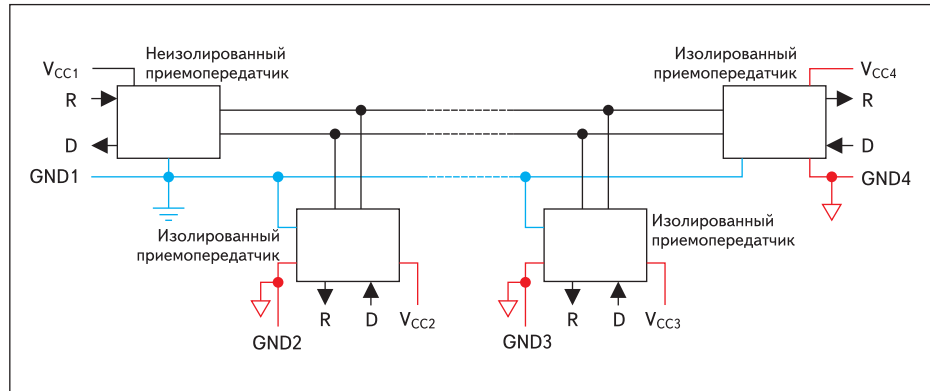


Рис. 9. Изоляция нескольких приемопередающих устройств на шине

системы передачи данных с использованием нескольких приемопередатчиков. Все приемопередатчики, кроме одного, подключены к шине через изоляторы. Неизолированный приемопередатчик обеспечивает единый опорный уровень «земли» для всей системы.

### Заключение

При создании длинных линий передачи данных необходимо изолировать источники питания и сигнальные линии приемопереда-

ющих устройств, чтобы предотвратить нежелательное влияние разности земляных потенциалов и земляных контуров на целостность сигналов и компонентов.

Несмотря на то, что на некоторых рисунках в этой статье показаны дифференциальные линии данных, обсуждаемые здесь подходы пригодны и для несимметричных линий, таких как RS-232. ■

### Литература

1. [www.interface.ti.com](http://www.interface.ti.com)