

Слово на букву "з" или Как оторвать ваше аудио от земли

Bruno Putzeys

Разместил [Yamazaki](#) 17 июня 2016. [Источник](#)



Слышали ли вы о **Bruno Putzeys**, человеке и пароходе? Это тот самый дядька, который изобрел **UcD-усилители**, которые теперь выпускаются под маркой Нурех. На их оф.сайте и лежал этот материал. То есть я и раньше знал, что он крутой инженер, но это... ух! Ребята, статья настолько шикарная, что я просто не мог не взяться за перевод. Все байки и заблуждения, касающиеся сигнальной земли и межблочных соединений Бруно настолько раскладывает по полочкам, что вопросов больше не остается.

Хотите что-то понимать в этой теме? Читать однозначно!
У вас раз за разом конструкции гудят и фонят? Читать 100%.
Все ещё ~~жнннн~~ рисуете звезды? Бойтесь земляных петель? Ну, вы поняли...

Надеюсь, статья вам понравится так же, как и мне.



Мои комментарии даются [в квадратных скобках].

В конце статьи рассмотрен практический проект предусилителя. Если найдется добрый человек, который его печатку перерисует в Sprint или DipTrace, будет вообще круто. Также в конце приложены документы, на которые ссылается автор.

Я стараюсь исключить из своего лексикона слова, которые раздражают, причиняют боль, вызывают непонимание или просто являются бессмысленным трёпом. К счастью, я никогда не пользовался сексистскими или расистскими эпитетами. От нецензурных слов мне тоже легко отказаться.

Гораздо труднее воздержаться от выражений «болван» или «у тебя IQ как комнатная температура».

Но наиболее тревожит меня употребление слова на букву «з». Я с трудом могу себе представить, чтобы я произнес его в приличном обществе, однако часто ловлю себя на том, что все-таки произношу его непреднамеренно.

*Глубокий вдох... Я говорю о **ЗЕМЛЕ** (GND). Вот. Простите меня. Больше никаких гадких*

словечек.

Аудиосигналы это напряжения. Напряжение это разность потенциалов между двумя точками. Мы берем вольтметр, подсоединяем щупы к двум точкам и находим напряжение между ними. Нам и в голову не придет подсоединять только один щуп и надеяться получить какой-либо результат.



Рис. 1. Примерно такой был у нас в школьной лаборатории

«Заземлённое» мышление

И все же для аудио инженеров не является чем-то необычным думать, что аудиосигнал использует только один провод цепи, на который мы подаем или с которого берем форму напряжения, как будто этот провод вдруг по волшебству стал способен иметь какое-то напряжение сам по себе. Второй, противоположный провод, кажется слишком неважным, слишком очевидным, чтобы его упоминать. И вот тут возникает вопрос: что, блин, такое эта ваша «земля»?

По мнению некоторых гуру, корень всех гудений и шипений в том, что ток течет «по той же самой земле» которая является точкой отсчета напряжения. Поэтому они предлагают использовать «разные земли».

Здесь кроется предположение, что сигнал передаётся одним проводом. Но любой человек с вольтметром знает, что второй провод так же важен, как и первый. И всё же, кажется, мы знаем, что есть смысл использовать в качестве второго провода эту «помойку», по которой бродят возвратные токи, экранные токи и т.д. И потом удивляемся, что там присутствует мусор.

Предлагается решение проблемы — «соединение земли звездой» — некоторая точка, в которой сходятся все земли.

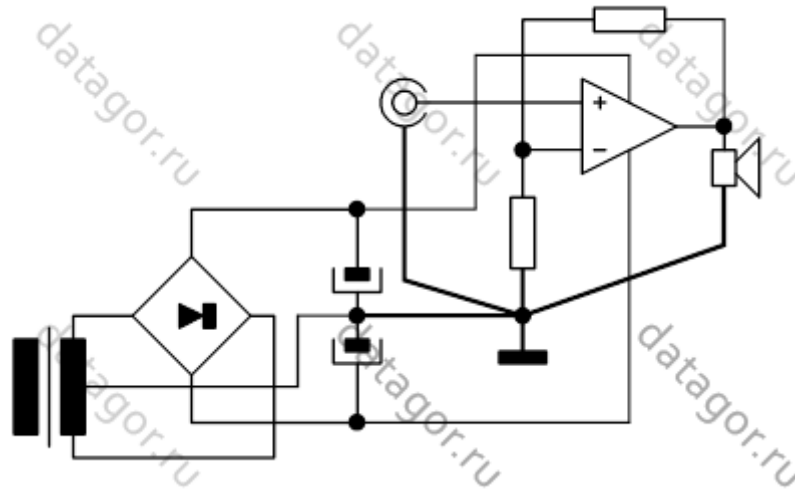


Рис. 2. Как будто нормальный выбор общей точки

Выглядит неплохо на первый взгляд, и адепты такого решения будут его защищать. Практически же оно не имеет шансов на успех. Это работает только тогда, когда выполняется неукоснительно.

Можно соединить звездой земли усилителя. Можно соединить звездой земли предусилителя. И потом вы соединяете их между собой. Опаньки! И какая же из этих двух звезд будет той самой точкой отсчета, от которой отмеряются остальные напряжения? Вот тут опять выходят на свою тропу GND-гуру... Цепочки из звезд, звезды из звезд, целое космическое безумие. Все сводится к тому, чтобы минимизировать токи через соединения, которые связывают звезды вместе. Веселье продолжается с отсоединением защитного заземления.

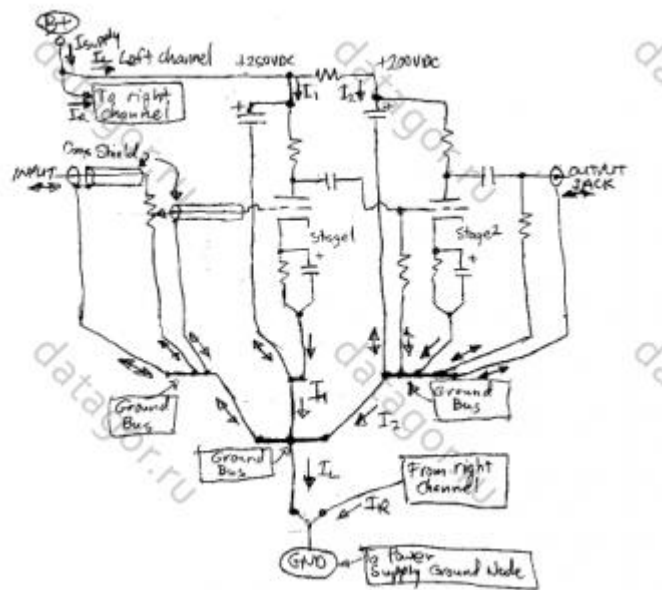


Рис. 3. Продвинутое гуру в действии. Да, я нашел это в интернете

Да, вы не ослышались! Большинство звукового оборудования не имеет защитного заземления, поскольку мы не можем себе представить, чтобы сигнальные соединения не имели общей точки отсчета.

И часто даже это не работает. Представьте, что у нас есть телевизор, DVD плеер и усилитель. Когда я смотрю телевизор, я хочу, чтобы звук воспроизводился через мою стереосистему. Когда я смотрю DVD, я хочу, чтобы аудиосигнал шел от плеера сразу к усилителю, минуя телевизор и его тухлый аудиопроцессор. Поэтому мы соединяем видеовыход DVD плеера с телевизором, затем соединяем аудиовыход телевизора со входом усилителя и, наконец, соединяем аудиовыход

плеера со вторым входом усилителя.

Получилась кошмарная земляная петля. Нельзя собрать аудиосистему совсем без земляных петель, если только речь не идет о минималистских аудиофильских системах. Земляные петли — факт, с которым приходится иметь дело. Поэтому, если мы хотим избавиться от гудения, лучше вообще не полагаться на избавление от «земляных петель».

Последний гвоздь в крышку гроба «звездных» соединений — то, что они работают должным образом только на постоянном токе. Все дело в индуктивности проводника и взаимоиנדуктивности двух проводников. Случайно разместите «грязный» возвратный провод рядом с «чистым» сигнальным, и вот вам шум и гудение. И как мы теперь добавляем блокировку питания? Мы тянем длинные провода к звезде от блокировочных конденсаторов и добавляем столько же индуктивности, сколько пытались убрать. Применяя соединение звездой можно построить только слегка коматозный усилитель в классе А. Что-то более быстрое обязательно будет иметь проблемы с устойчивостью.

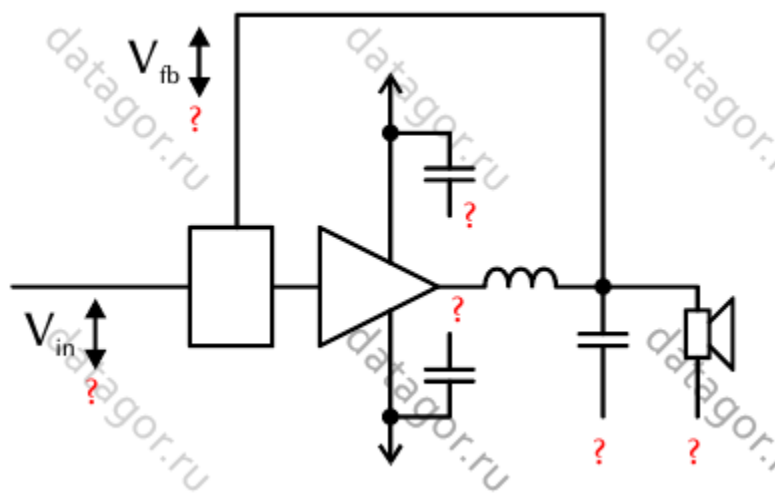


Рис. 4. Насколько длинные провода может иметь блокировочный конденсатор до тех пор, пока он не станет бесполезен?

Короче, любой научный труд, в котором изначально полагается, что гудение и шум имеют какое-то отношение к земле, должен быть заклеен и втопан в землю [тут пропала просто невероятно тонкая игра слов]. Нам следует конструировать схемы, которые работают с напряжениями как вольтметр: по двум проводам. Результат никак не должен зависеть от того, что происходит на ближайшей помойке электронов.

Обратить особое внимание! Когда изменение в «заземлении» вызывает гудение, это потому, что мы наивно полагаем, что сигнал течет только по одному проводу. «Звезды» это костыли, которые заставляют такой неправильный подход хоть как-то работать.

Совсем другое дело!

Конечно, такой способ работы уже существует. В разьеме XLR на один контакт больше, чем в RCA. Контакт 1 соединяет корпуса, а контакты 2 и 3 — сигнальные, между которыми и измеряется сигнал. К сожалению, это загадка с непонятным смыслом. Балансный, дифференциальный, симметричный, какой он будет? Прежде чем я разберусь с каждым из этих понятий, позвольте мне быстренько припомнить, что школьные учебники и аудио-мурзилки пишут по этому вопросу.

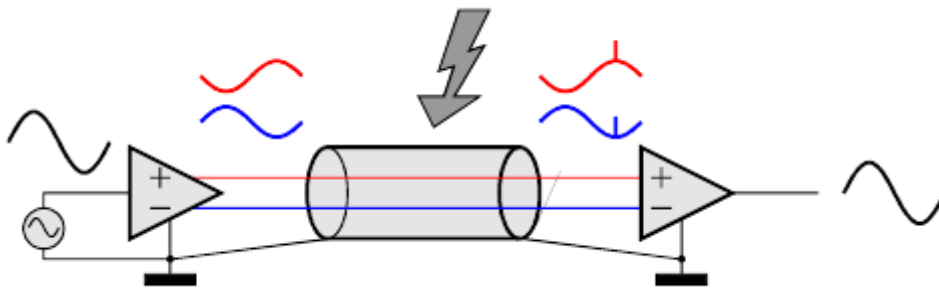


Рис. 5. Изначальное объяснение балансного соединения

Источник, по их словам, производит два сигнала, каждый из которых является зеркальным отражением противоположного. Поскольку внешнее воздействие будет влиять на оба проводника одинаково, помеха будет устраняться, поскольку приемник вычитает один сигнал из другого. Заметьте, что у авторов такого объяснения имеются явные сложности в рамках GND-мышления. Если два сигнала симметричны, относительно какого именно потенциала они симметричны? Относительно возвратного провода источника сигнала? Или относительно его корпуса? Или относительно одной из точек на стороне приемника? И имеет ли это какой-то значение? Ведь вход должен реагировать только на разницу между этими двумя сигналами. Причина того, почему вход измеряют разницу только между двумя сигнальными проводами в том, что он пытается игнорировать потенциал, который не важен.

Можно просто отрезать на передающей стороне половину схемы и произвольно выбрать удобный потенциал и подсоединить на него один из проводов. Все, что нам нужно — сделать этот потенциал таким, чтобы разница между ним и сигналом в другом проводе дала нужное выходное напряжение.

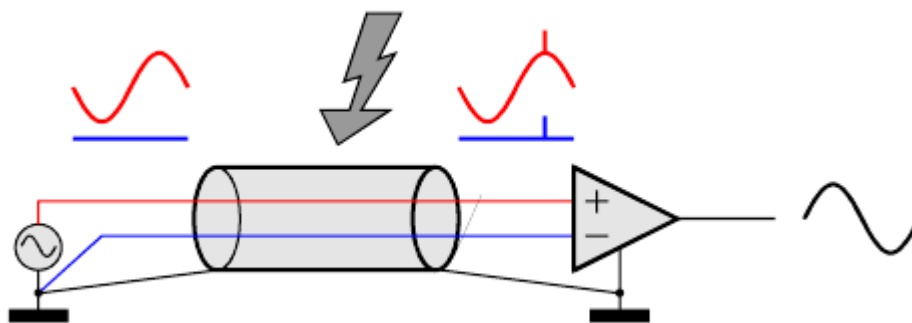


Рис. 6. Симметрия бесполезна

Эта схема работает ничуть не хуже предыдущей. Нет необходимости активно кочегарить оба сигнальных провода. Одного достаточно. Для приемника важна только разница между ними. Если провод подсоединен к какой-то точке, которая для приемника будет нулевой, приемник все равно увидит только разницу сигналов, независимо от того, какую точку мы выбрали нулевой по отношению к этим сигналам.

Проще говоря, если мой рост 1.8 м, он будет одинаковым, стою я на земле или на полу офиса. Чтобы узнать мой рост, достаточно измерить расстояние от макушки до стоп, а не вычитать высоту стоп над уровнем моря из высоты макушки над уровнем моря.

И это действительно хорошая новость. Чтобы превратить обычный сигнал в дифференциальный нужно лишь добавить провод, чтобы довести потенциал выбранной точки отсчета до приемника. Все остальные заботы ложатся на приемник сигнала.

Обратить особое внимание! Дифференциальная передача аудиосигнала не означает, что вам нужно делать симметричное напряжение.

Вход, требующий симметричного сигнала не является дифференциальным, поскольку вводит третий потенциал в уравнение, в котором важно только напряжение между двумя точками.

Немного терминологии. Сигнал, который мы хотим передать, измеряется между двумя проводами. Он называется *дифференциальным сигналом*. Сигнал ошибки, который мы хотим проигнорировать, прибавляется к потенциалам на обоих проводниках (относительно потенциала шасси приемника). Эта помеха может быть вызвана внешними наводками, но чаще всего то просто разность между потенциалами шасси приемника и источника [откуда бы она ни взялась]. Этот сигнал ошибки называют *синфазным сигналом*.

Баланс

Идеальным дифференциальным приемником был бы трансформатор. «Идеальным» в том смысле, что он работает с сигналом как вольтметр с двумя щупами. Даже если между корпусами источника и приемника сотни Вольт, трансформатор этого не заметит.

В отличие от этой фантазии реальное балансное соединение выглядит примерно так:

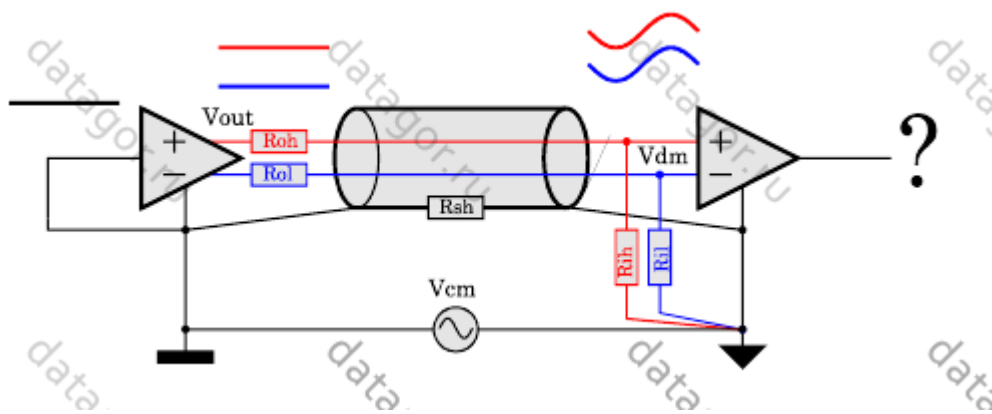


Рис. 7. Типичное бестрансформаторное балансное соединение

V_{cm} обозначает напряжение между корпусами источника и приемника, откуда бы оно ни взялось. Если бы вход был трансформатором, ток не шел бы через сигнальные провода, но бестрансформаторный вход требует некоторых цепей на входе, хотя бы чтобы предоставить путь для базовых токов.

Задача в том, чтобы обеспечить минимальное влияние этого тока на восстановленный аудио сигнал.

Давайте предположим, что источник выдает 0 Вольт и перерисуем эту схему как мост Уитстона. Любой сигнал, возникающий между входами дифференциального усилителя нежелателен.

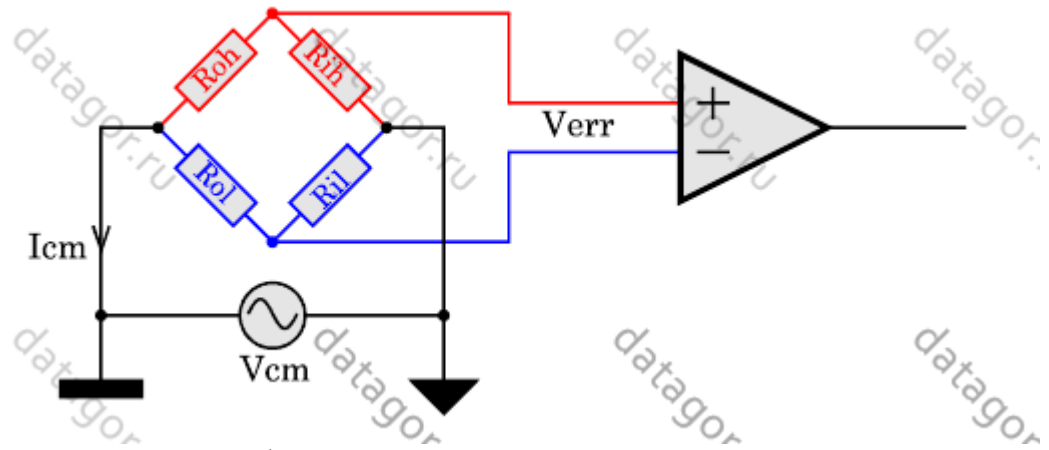


Рис. 8. Входные/выходные сопротивления в виде моста Уитстона

$$\frac{V_{err}}{V_{cm}} = \frac{R_{ih}}{R_{oh} + R_{ih}} - \frac{R_{il}}{R_{ol} + R_{il}}$$

$$\frac{V_{dm}}{V_{out}} = \frac{R_i}{R_o + R_i}$$

Очевидно, что нам вообще не нужен трансформатор. Мы можем позволить токам течь через сигнальные провода до тех пор, пока выполняется равенство $R_{oh}/R_{ih}=R_{ol}/R_{il}$. Если входные резисторы подобраны точно, никакое синфазное напряжение не пролезет в выходной сигнал.

Когда мост Уитстона выдает точно нуль, говорят, что мост *сбалансирован*. Отсюда и пошло понятие «балансное соединение». Это никак не связано с тем, что в одном проводе напряжение растет, а в другом падает... Просто правильное соотношение сопротивлений в делителе. Не вверх-вниз, а равновесие. Дзен. Оммм...

Отношение между напряжением ошибки и синфазным напряжением это отношение преобразования синфазного напряжения. Чем меньше, тем лучше. Обычно принято указывать эту величину по отношению к полезному сигналу, выраженному в децибелах. Это отношение называется [**Common Mode Rejection Ratio (CMRR)**] коэффициентом подавления синфазного напряжения.

$$CMRR = -20 \cdot \log \left(\left| \frac{V_{err}/V_{cm}}{V_{dm}/V_{out}} \right| \right)$$

Давайте представим себе, что получится, если выходные сопротивления подобраны точно, т.е. $R_{oh}=R_{ol}$, а входные различаются: $R_{il}=R_i$ и $R_{ih}=R_i+\Delta R_i$

$$\left| \frac{V_{err}/V_{cm}}{V_{dm}/V_{out}} \right| \approx \frac{\Delta R_i \cdot R_o}{R_i \cdot (R_o + R_i)} \approx \frac{\Delta R_i \cdot R_o}{R_i^2}$$

Чувствительность к разбалансу входных резисторов возрастает с увеличением выходного

сопротивления. Следует уменьшать выходное сопротивление. Также чувствительность к разбалансу падает с увеличением входного сопротивления. Так что это тоже хорошая идея. Наконец, давайте исследуем воздействие на схему разбаланса выходных сопротивлений.

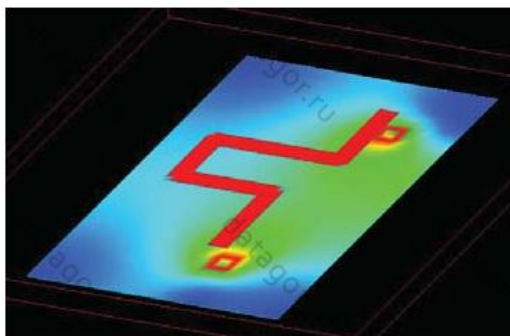
$$\left| \frac{V_{err}/V_{cm}}{V_{dm}/V_{out}} \right| \approx \frac{\Delta R_o}{R_i + R_o} \approx \frac{\Delta R_o}{R_i}$$

Это довольно важно. Если ваша входная цепь состоит из двух резисторов, подключенных к некой локальной опорной точке, увеличение номинала настолько, насколько возможно, принесет много пользы. И когда вы измеряете CMRR, делайте это с разбалансом в несколько Ом на стороне источника, это гораздо больше скажет нам о реальной способности входа подавлять синфазный сигнал, чем лабораторное измерение с закороченными входами.

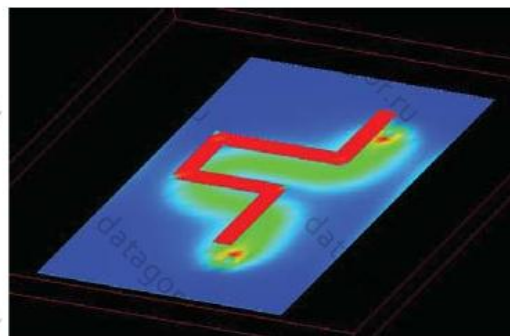
Действуя локально

Самые большие возможности для дифференциальных сигналов открываются *внутри корпуса*, где малые сигналы и большие токи оказываются заперты вместе в ограниченном пространстве. Только подумайте об этом. В усилителе класса D ток в десятки Ампер переключается за наносекунды, и всё это происходит в сантиметрах от цепей малых сигналов, которые туда приходят, обрабатываются и модулируются. Это точно не то место, где можно применить звездную организацию земли.

Для ограничения электромагнитного взаимодействия требуется плата с одним слоем, целиком заполненным медью, который все-таки допустимо назвать «землей». Это тот слой, в который возвращаются силовые и сигнальные токи. Все блокировочные конденсаторы цепляются непосредственно на этот слой. Преимущества этого подхода основываются на том, что внутри проводника ток распределяется обратно пропорционально полному сопротивлению.



(a) Frequency of 1 kHz



(b) Frequency of 1 MHz

[Картинка не из этой статьи, но уж очень она в тему]

Если вы проследите все возможные пути высокочастотного тока через дорожку и обратно через медный полигон, вы увидите, что импеданс имеет в основном индуктивную природу и определен площадью контура, по которому течет ток. Очевидно, что один из путей наиболее компактный: тот, который проходит строго под дорожкой, следуя за всеми её поворотами. Если вы заставите ток течь по другому пути, в обход разреза в полигоне, контур станет индуктивным и будет создавать сильное магнитное поле. **Разрезы в сплошном слое абсолютно под запретом.** Не стоит следовать рекомендациям производителей микросхем, если они предусматривают отдельные аналоговый и цифровой слои или делают разрезы в земляном слое.

На низких частотах влияет только сопротивление. Низкочастотные токи пойдут по всей доступной площади меди. Разности потенциалов будут возникать между любыми точками по всему полигону. Нам не следует верить, что по всей земляной поверхности всегда будет один и тот же потенциал. Правильно сконструированный земляной слой (сплошной) *бесполезен* как точка отсчета сигнальных напряжений.

Будем париться об этом? Нет. Мы просто не будем использовать этот слой как землю сигнала. Вместо этого мы будем передавать каждый сигнал по паре проводов.

Вы можете поверить, что мы сможем это сделать, не добавляя к схеме активных элементов? Просто смотрите!

Шаг 1. Дифференциальный усилитель

В принципе можно сделать дифференциальный усилитель по классической схеме.

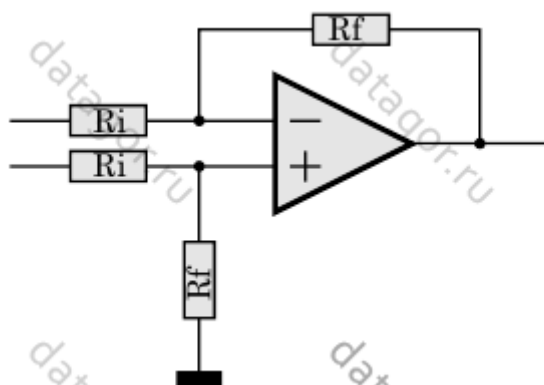


Рис. 9. Плохо нарисованный дифусилитель

Погодите... Стоп. Что-то не так на этой картинке. Приглядитесь внимательнее! Вы заметили?

Вот что: какой у нас тут выходной сигнал? Мы опять расчехлили *волшебный однопроводный вольтметр*? К этому нужно относиться серьезно. У каждого сигнала должно быть два провода, вот и нарисуем два.

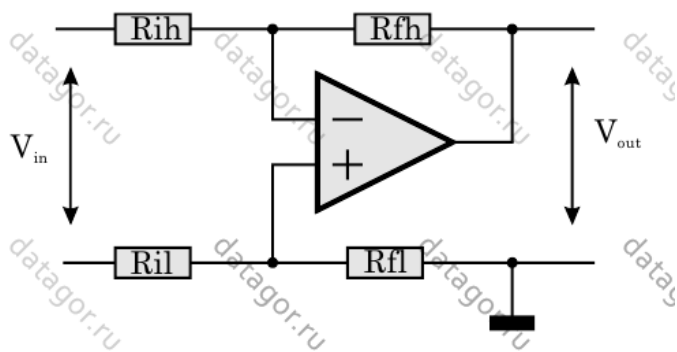


Рис. 10. Хорошо нарисованный дифусилитель

Так-то лучше. Кажется, мы начали вникать в происходящее.

Как видите, Усилитель не просто увеличивает входное напряжение в Rf/Ri раз, а *выдает усиленное напряжение между выходом усилителя, и любой опорной точкой, к которой подсоединен Rfi*

Вот так это работает:

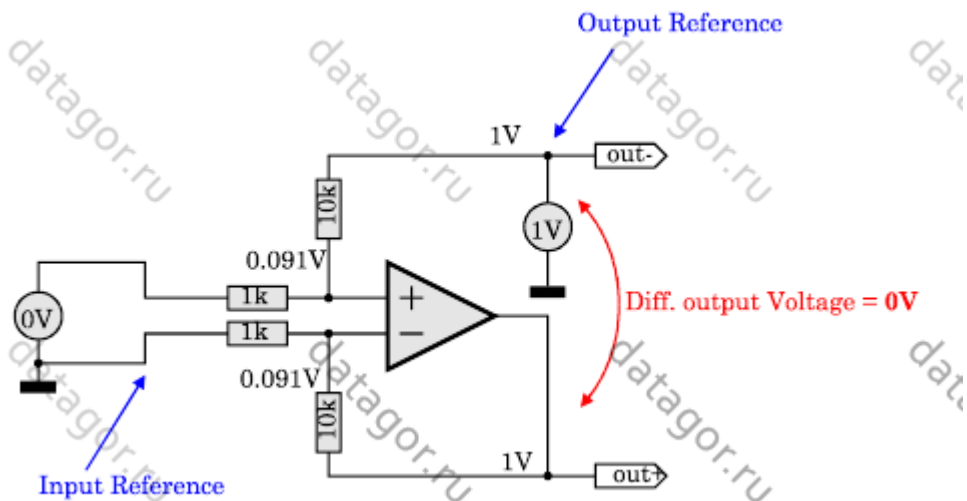


Рис. 11. Диффузитель как опорный транслятор напряжения

Это позволяет нам иначе взглянуть на дифференциальный усилитель. [Теперь] это опорный транслятор напряжения. [в смысле от одной опорной точки к другой] Вроде как плавающий источник напряжения, который можно прицепить к любой удобной опорной точке.

Шокирующий факт: функцию опорного транслятора напряжения можно прицепить к любой схеме, для которой возможно построить её инвертирующую версию.

Шаг 2. Обобщенный метод

Представьте себе, что у вас есть схема, например ФНЧ или, скажем, петлевой фильтр усилителя D-класса. Прежде всего преобразуйте схему так, чтобы неинвертирующий вход был подключен к опорному потенциалу. Блок, называемый схемой обратной связи, может иметь несколько входов. в этом примере он имеет два входа: один сигнальный, один для обратной связи. Точно так же у него может быть несколько таких входов. Наконец, он тоже может быть подсоединен к опорному потенциалу.

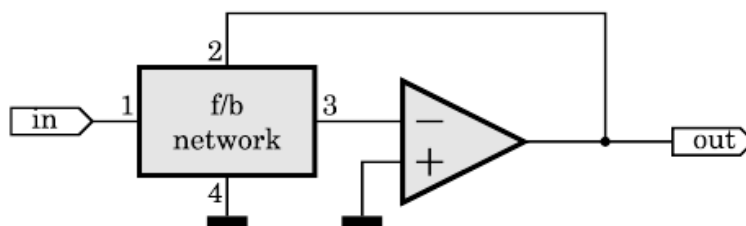


Рис. 12. Обобщенная инвертирующая схема

Как только мы закончили, вывернем обратную связь наизнанку.

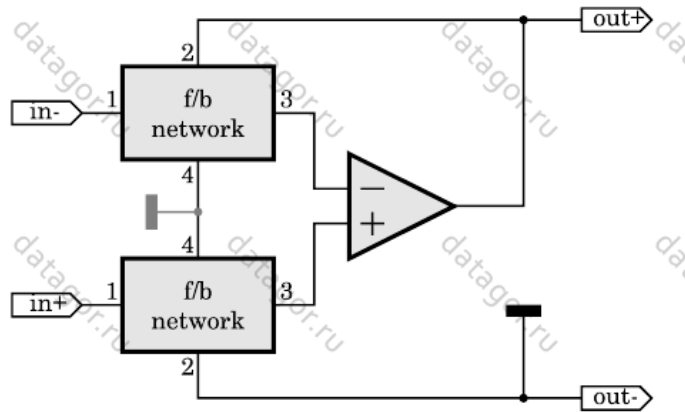


Рис. 13. Дифференциальное исполнение инвертирующей схемы

Вот и все!

Вывод, который раньше должен был быть подсоединен к непонятной точке, называемой «землей» больше вообще никуда подсоединять не надо, разве только чтобы защитить входы от перегрузки синфазным сигналом. В таком случае чувствительное место будет находиться на земляном слое возле точки, на которую подключены блокировочные конденсаторы питания ОУ, т.к. это его опорная точка по ВЧ. В идеале с этой точки на выход ничего не проникает, поэтому мы имеем такую возможность.

Вот теперь у нас получилась правильная дифференциальная пара. Один провод активно кочегарится операционным усилителем, второй — пассивно, низкоимпедансной связью с землей, которая может быть сделана практически *где угодно*. Важно чтобы провод имел только одну такую точку, чтобы следующий каскад, работающий аналогичным образом, получал сигнал с тех двух точек, к которым подключены цепи обратной связи. Всегда ведите сигнал двумя дорожками, расположенными вплотную друг к другу чтобы уменьшить магнитные наводки и сбалансировать емкостные. Возможно, кое-где вам придется использовать 0-омные резисторы, чтобы ваше программное обеспечение для рисования печатных плат не видело КЗ и работало с этим проводом и земляным слоем как с разными цепями, даже если они гальванически связаны в одной точке.

Шаг 3. Пусть сильное поможет слабому

Некоторые схемы не имеют варианта с виртуальной землей. Схемы с потенциометрами, в общем случае, плохо поддаются такому подходу.

В таком случае мы можем использовать способность этой схемотехники сдвигать уровень, чтобы решить проблему. Представьте проблемный участок, стоящий между двумя дифференциальными схемами:

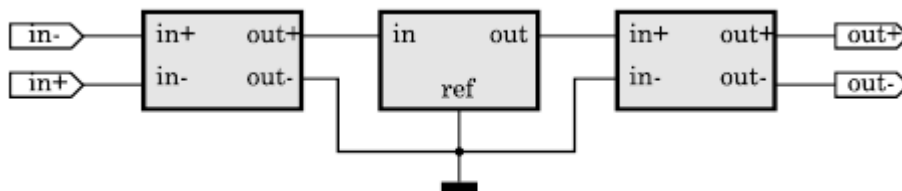


Рис. 14. Имеющиеся ступени как решение проблемы

Проблемный участок имеет только одну опорную точку, которая используется и как входная, и как выходная. Привяжите это точку к земле и используйте её для всех земляных соединений в этом конкретном участке цепи.

Теперь мы видим, как ловко решается проблема заземления. Когда у вас есть цепочка сигнальных каскадов, расположенных на плате с общим земляным слоем, каждый сигнал отсчитывается относительно самой удобной точки на этом слое. Нет никаких причин делать глобальную опорную точку, сигнал просто прыгает от одной до другой локальной опорной точки по мере продвижения по схеме.

Баланс импедансов против баланса токов

Каверзный аспект применения дифференциальных усилителей в том, что входные токи почти никогда не бывают равны. Вот ситуация. Если я подтяну к земле потенциал одного из входов дифференциального усилителя с десятикратным усилением, получится одиннадцатикратная разница во входных токах, в зависимости от того, какой вход мы выбрали. Ничего не подозревающий инженер может решить, что входной импеданс разбалансирован и должен быть исправлен.

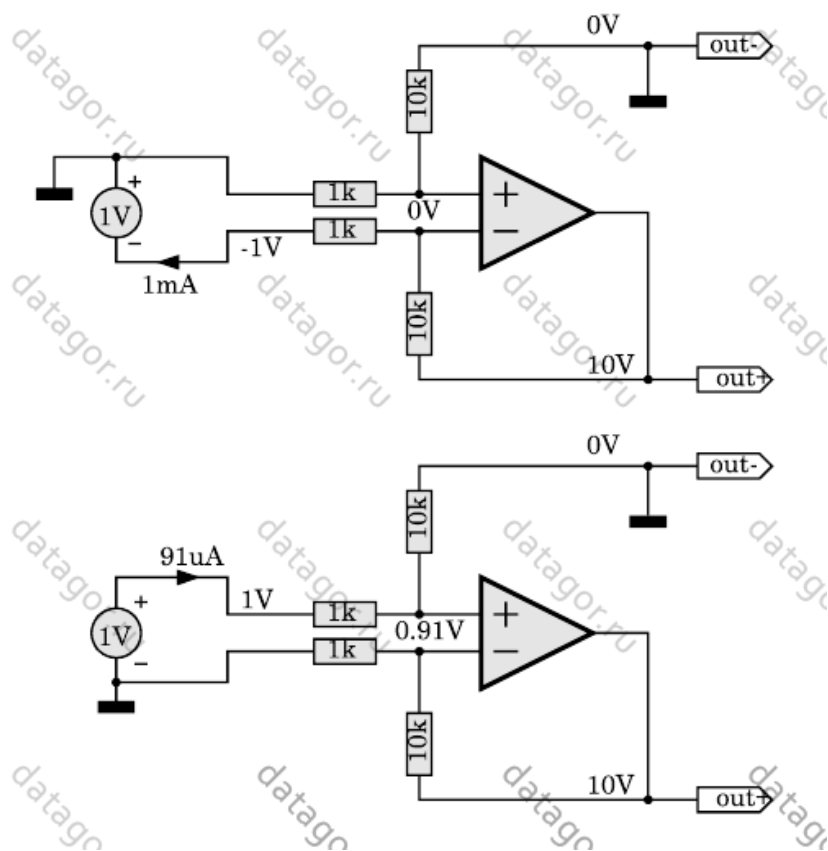


Рис. 15. Иллюзия дисбаланса

В результате этого недопонимания они делают довольно жуткие вещи.

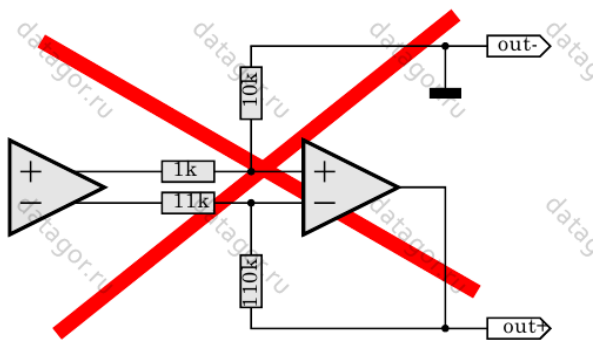


Рис. 16. Неудачный выход из когнитивной иллюзии

Вы легко можете увидеть, что здесь не так. Вместо того, чтобы кочегарить один вход, когда другой заземлен, мы подали симметричный сигнал, отношение между токами стало не 11:1, а 21:1. Нельзя масштабировать импедансы таким образом, чтобы токи всегда были одинаковыми.

Что происходит здесь? Помните, что мы считаем вход (вместе с сопротивлениями в источнике) мостом Уитстона. Если вы добавите эти резисторы, получится нечто, что точно больше не будет дифференциальным усилителем.

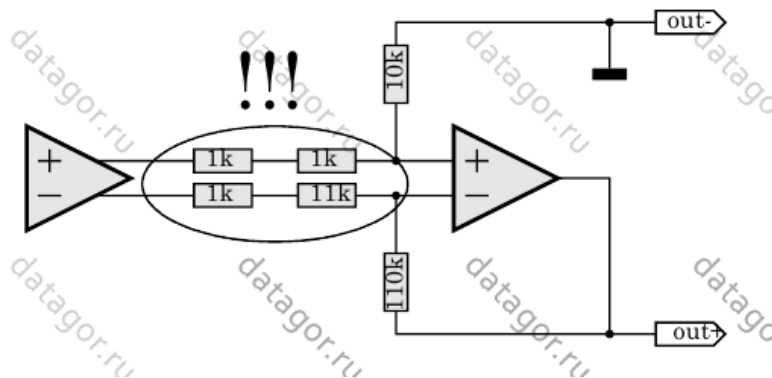


Рис. 17. Почему это неправильно

Нам нужно исправить схему, чтобы две ноги опять стали равными. И вот у нас получился полностью функциональный дифамп. Если токи в двух входах разные, это не означает дисбаланса.

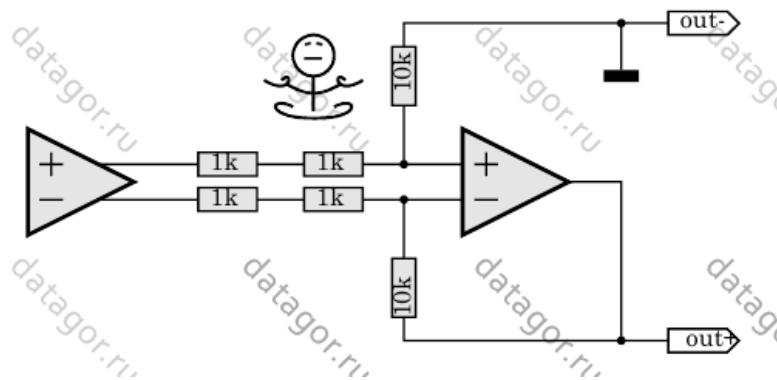


Рис. 18. Принцип «У-вэй» в действии: баланс восстанавливается невмешательством

Нам следовало увидеть с самого начала, что проблема была иллюзорной. Чтобы изобрести её, нам пришлось втянуть в решение выходную опорную точку дифференциального усилителя, и прийти к ложному выводу, что это та самая точка, относительно которой измеряется импеданс по синфазному сигналу. Схема сбалансирована правильно, просто так получается, что входной импеданс измеряется относительно виртуальной земли, а не относительно другой удобной точки, называемой землей.

Обратить особое внимание! Превращение схемы в дифференциальную не требует введения дополнительных каскадов усиления.

У каждого сигнала своя опорная точка.

Сделать сигнал дифференциальным — не то же самое, что сделать два одинаковых сигнала, симметричных относительно земли.

Не пытайтесь уравнять сигнальные токи. Это не работает, и в конце концов вы создадите еще больший дисбаланс.

В дом с мороза

Как средство сделать схему безразличной к токам в земляном слое, дифференциальный усилитель это просто сногшибательная идея. Но чтобы построить надежный интерфейс с внешним миром, нам нужен ещё один компонент.

Ранее мы заметили, что чувствительность к синфазным помехам сильно зависит от входного импеданса. Чем он ниже, тем более важным станет попарное соответствие резисторов. В конце концов, низкое входное сопротивление будет конвертировать синфазное напряжение в синфазный ток, и любое несоответствие превратится в дифференциальное напряжение на входе.

Дифференциальные усилители, по причинам, связанным с шумом, всегда делаются с небольшими номиналами сопротивлений, и поэтому их балансировка легко расстраивается дисбалансом импедансов источника. Для соединения с внешним миром хорошей практикой будет использование буферов по входу.

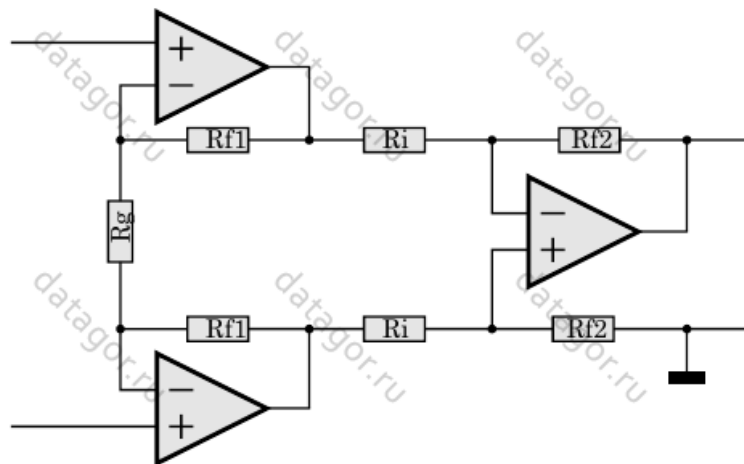


Рис. 19. Инструментальный усилитель

Схема, которую мы получили, называется инструментальным усилителем. Обычно она строится таким образом, чтобы входной каскад был не только буфером, но и давал все усиление. И на это есть веские причины. Обратите внимание, что, независимо от разброса R_{f1} и R_{f2} , первый каскад никогда не конвертирует синфазную помеху в дифференциальный сигнал. Синфазный компонент сигнала проходит неизменным, а дифференциальный — усиливается. Способность второго каскада отделять дифференциальный сигнал от синфазного возрастает во столько раз, во сколько раз усиливает первый каскад. Усиление входного буфера улучшает подавление синфазного сигнала.

Предвижу, что читатель тут насторожится. Разве добавление лишней ступени усиления не хуже, чем изначальная проблема? Что ж, если у вас есть сомнения, могу сказать только одно: попробуйте. Вы откроете, что современные операционные усилители ухудшают звук гораздо меньше, чем шум, вносимый небалансным соединением. Именно поэтому аудиофильская среда породила целую кустарную индустрию по производству кабелей. Небалансное соединение сильно влияет на звук по причинам, которые к этому моменту для нас очевидны. Сама идея того, что один и тот же провод и проводит сигнал, и делает грязную работу, пропуская через себя уравнивающие токи, нелепа. Пытаться решить проблему, уменьшая эти токи — глупость. Пытаться побороть искажения, вызванные этим подходом, с помощью каких-то экзотических кабелей — безумие! RCA разъемы, и все, что с ними связано, должны быть запрещены законом.

О чем это я? Ах да, инструментальные усилители. Было бы замечательно, если бы мы могли просто подсоединить входы первой пары усилителей ко внешнему миру. Но это не очень практично, поскольку там есть токи утечки. Вот поэтому используют входные резисторы. Как раз те, которые мы хотели сделать максимально большого номинала, чтобы синфазное напряжение не превращалось во входной ток. Посмотрим. Их можно рассматривать двояко. В идеале мы бы хотели, чтобы они были достаточно низкими, чтобы при открытом входе ток смещения не создавал постоянно настолько большую, чтобы испортить громкоговорители. Если мы взглянем в даташиты широко применяемых ОУ, то увидим, что речь идет о десятках кОм. Или мы можем уменьшить наши требования, и считать допустимым, чтобы входные токи не вызывали дрейф входа больше, чем несколько Вольт. В конце концов, источник вообще может быть развязан по постоянному току.

Что ж, мы можем удовлетворить этим требованиям. Сигнал, который выдает динамик, это дифференциальный DC компонент. Добавление резистора в несколько кОм между двумя входными контактами это исправит. Теперь мы можем позволить, чтобы оба входа могли уплывать на несколько Вольт от центра. Это синфазный компонент, ну и что. Так что пусть это сопротивление будет большим (мегаОмы). Импеданс по синфазному компоненту пусть будет побольше, не как по дифференциальному.

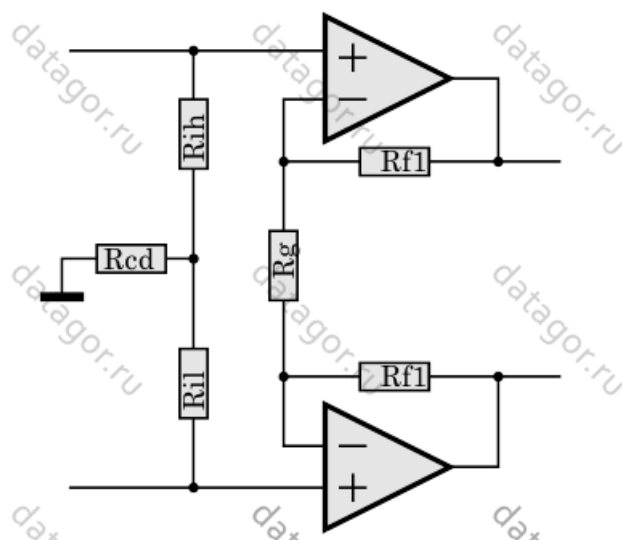


Рис. 20. Оптимальное оформление входа

По сути мы включили резистор большого номинала **Rcd** последовательно с земляным выводом моста Уитстона на стороне приемника (см. Рис. 8). Этот резистор будет значительно уменьшать токи, текущие через сигнальные провода. Подсчет точного значения CMRR оставляю как упражнение читателю. В то же самое время два входных резистора гарантируют, что входные токи смещения ОУ не приведут к слишком большой величине постоянного напряжения, даже если один вход заземлен, а другой висит в воздухе.

То же самое условно верно и на стороне источника. Если выход плавающий, это ограничивает преобразование синфазного напряжения в ток. Но если на стороне приемника легко получить сопротивление по синфазному напряжению в районе мегаом, причем не с помощью трансформатора, то сделать это на стороне источника действительно проблематично. Поэтому, если у нас нет веских причин делать плавающий выход, не будем этим заморачиваться...

Слон, которого мы не заметили, это входные фильтры. Хотя о них не упоминают в мире High End, входные фильтры неизменно добавляются к правильно сконструированному набору чтобы обеспечить работу в мире мобильных телефонов и раций такси. Ожидается, что входные фильтры будут блокировать радиоизлучения, проникающие в корпус. Обычно там стоят конденсаторы 100 пФ или более, подсоединенные прямо на корпус. Они являются частью моста Уитстона, редко

бывают хорошо подогнаны в пары, и кроме того понижают импеданс входа по синфазному сигналу. 2 по 100 пФ при 20кГц имеют импеданс порядка 40 кОм. Далеко до мегаОм, которые мы имеем по постоянной составляющей. Проблема была элегантно решена Биллом Уитлоком*, использовавшим метод самонастройки (bootstrapping technique) для увеличения синфазного импеданса входного фильтра.

К сожалению, единственный способ использовать этот метод — купить микросхемы у нынешнего лицензиата его патента. [Речь идет о семействе микросхем THAT120* от THAT Corporation.]

* *Whitlock, Bill, A New Balanced Audio Input Circuit for Maximum Common-Mode Rejection in Real-World Environments, AES pre-print 4372*

Обратить особое внимание! Разбалансирующие эффекты от парного несоответствия сопротивлений в источнике усугубляются низким импедансом входа по синфазной составляющей. Неинвертирующее дифференциальное усилительное звено позволяет иметь очень высокий импеданс по синфазной составляющей и понижает требования к подбору резисторов в дифференциальной усилительной ступени.

Проводное подключение

Балансные аудиокабели это экранированные витые пары. Часто можно сделать хорошее соединение неэкранированной витой парой, если корпуса устройств имеют примерно одинаковый потенциал (в пределах допустимого синфазного смещения входов), но «часто» это недостаточно хорошо в реальном мире.

До сей поры я относился к дифференциальным сигналам как и положено: как к двум проводам. Смущает только, что в XLR разьеме три контакта. Контакты 2 и 3 это неинвертирующий «горячий» и инвертирующий «холодный» проводники. Пока все нормально. Контакт 1 обозначен как земля. К этому моменту мы уже знаем, какой вопрос напрашивается: что блин должно значить это слово?

Несмотря на возникшие сомнения, на этот вопрос есть четкий и однозначный ответ. Все должно быть соединены таким образом, который позволяет экрану (оплетке, идущей вокруг витой пары) выполнять свою работу. Работа заключается в том, чтобы создавать туннелеобразное соединение между корпусами, внутри которого сигнальные провода будут хорошо защищены. Вот что означает «экран».

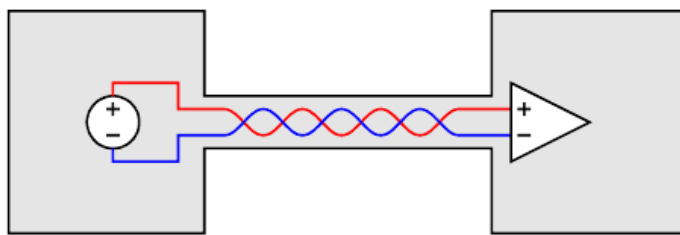


Рис. 21. Зачем нужен экран на кабеле

В идеале мы хотим чтобы экран провода был непосредственно присоединен к краю круглого отверстия в корпусе. Если это невозможно, постарайтесь сделать настолько близко к этому, насколько возможно. Чтобы понять, насколько эффективен экран кабеля, вдумайтесь в это: ток через полый проводник не создает магнитного поля внутри этого проводника. Все магнитное поле остается снаружи, следовательно, не влияет на сигнальные провода.

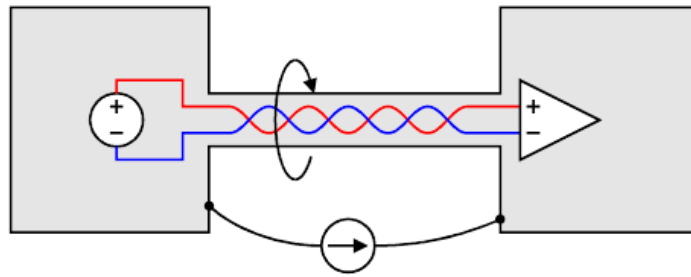


Рис. 22. Эффект понижения синфазной помехи благодаря экранированию

Это тот же самый трюк, который заставляет работать коаксиальный кабель. Высокочастотный ток через экран наводит такое же напряжение на внутреннем проводнике, как и на оплетке. На высокой частоте входное напряжение коаксиального кабеля (измеренное между проводом и экраном) такое же, как и выходное. По той же самой причине экран помогает понизить синфазное напряжение на принимающей стороне балансного кабеля.

На высокой частоте, это значит насколько высокой? Ну, практически для нормального плетеного экрана и кабеля в несколько метров длиной эффект становится заметен от нескольких сотен герц и выше. Ниже этой частоты экран это просто чистое сопротивление и полная разность напряжения вдоль экрана проявляет себя как синфазное напряжение.

Чтобы это работало, экран должен быть привязан к шасси с минимально возможным импедансом. Экран должен быть круглым и цилиндрическим, идти вокруг проводов и иметь низкое сопротивление. Экран из фольги с дополнительной жилой неприемлем, потому что эта жила концентрирует ток в себе и тем самым уничтожает эффект экранирования вплоть до частот, далеких от аудио диапазона. На самом деле она даже может наоборот наводить шум в один из сигнальных проводников, тем самым превращая ток через экран в дифференциальную помеху. Этот эффект известен как шум, наведенный током в экране **Shield Current Induced Noise (SCIN)** *Brown, Jim; Whitlock, Bill, Common-Mode to Differential-Mode Conversion in Shielded Twisted-pair Cables (Shield-Current-Induced Noise), AES preprint 5747*

Проблема контакта №1 в XLR

Коннектор XLR это в некотором роде упущенный шанс. Это должна была быть круглая оболочка с двумя контактами внутри. Никто бы не сомневался, что оболочка должна соединяться с шасси. Но теперь там есть третий пин, который заставляет людей думать, что там должно быть соединение «аудио-земли», которое должно подключаться где-то еще, а не на корпусе.

Получилось так, что множество людей соединяют контакт 1 с внутренней нулевой точкой (к несчастью называемой «землей»). Вместо того, чтобы сливать токи на корпус, такое решение приглашает их устроить в вашем усилителе вечеринку, потанцевать на столе и заблевать ковер.

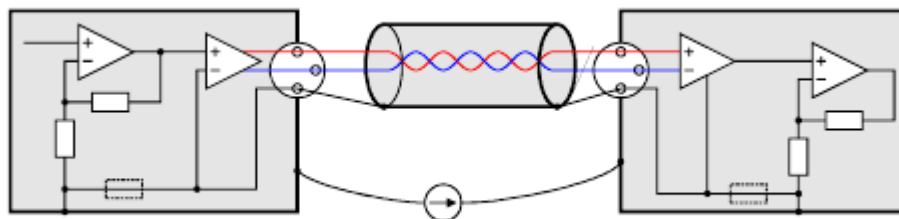


Рис. 23. Следуй за белым кроликомди за током

Схемы, разработанные согласно дифференциальному методу, описанному выше, безразличны

к проблемам контакта 1. Сплошной слой меди на плате по функциям ближе к шасси, чем к опоре напряжения. Позже в нашем демонстрационном проекте мы радостно соединим первый контакт и оболочку с землей, без нежелательных эффектов. Но большинство оборудования сконструировано не так. В основном оно не дифференциальное и использует землю как глобальную опору. «Земляной ток», означает ток, который течет через внутреннюю опору. Вместо того, чтобы быть удобной точкой для подключения экрана к шасси, контакт 1 неумышленно сделали входом.

Проблемы с первым контактом сводят пользователей с ума. Беда в том, что это в равной степени касается и входных и выходных разъемов. Во многих изделиях можно вызвать шум на контакт 1 выхода. Поэтому вы можете впасть в заблуждение, считая что «на выходе нет постороннего шума» поскольку он появляется только при подключении к определенному входу. И тогда во всем обвиняется этот вход.

Часто считают, что проблема в «земляных петлях». Мммдаа, блин! Все равно что винить гравитацию в том, что стаканы бьются, падая на пол. Циркулирующие токи в аудио кабелях практически неизбежны. Просто нормальный инженерный подход состоит в том, чтобы делать оборудование, безразличное к этому. В какой-то момент проблема назрела настолько, что AES пришлось описать очевидные вещи в соответствующем стандарте. Называется **AES48**, и он терпеливо объясняет, что экран кабеля должен быть соединен с корпусом кратчайшим путем, и что соединение между корпусом и землей печатной платы должно быть сделано где-то в другом месте.

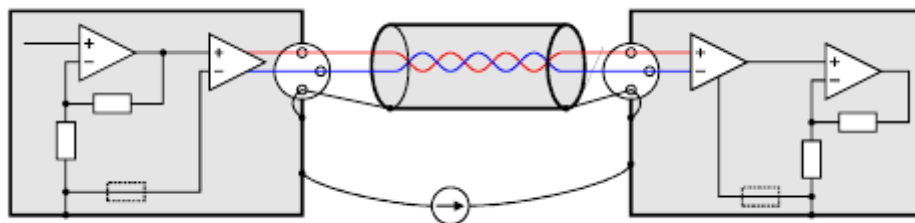


Рис. 24. Правильный способ соединения первого контакта

К счастью это всё, что вам нужно знать, чтобы решить проблему. Знающие студийные техники вообще не парятся в поисках источников гудения. Они просто открывают корпус каждого студийного прибора и модифицируют его в соответствии со стандартом **AES48**. Всё, вопрос снят. Вам следует очень серьезно отнестись к призыву соединять контакт № 1 максимально близко к корпусу. Кабели подвергаются воздействию излучения сотовых сетей и даже чего похуже. Если между корпусом и первым контактом длинный кусок провода, внешние излучения проникают внутрь корпуса.

Обратить особое внимание. Экран является эффективной мерой по снижению синфазного шума. Чтобы экран работал, он должен быть круглым цилиндром с сигнальной витой парой строго по центру, и он должен быть подсоединен прямо на корпус с обеих сторон.

Практика! Демонстрационный проект балансного регулятора громкости

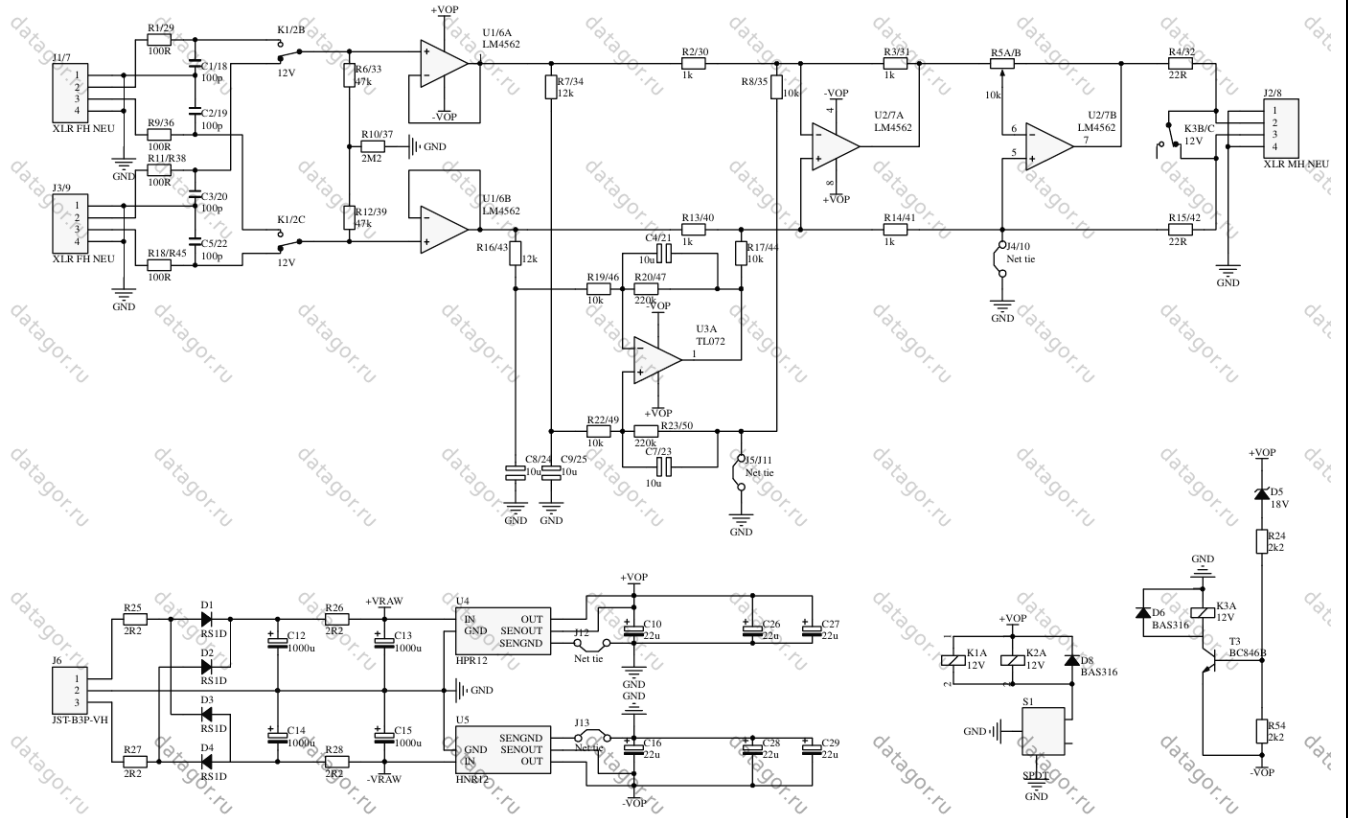
Мы многое узнали. Давайте проверим некоторые вещи на практике.

Быстрый анализ форумов по профессиональному аудио показал, что самый популярный вопрос — как построить безупречный [purist] балансный регулятор громкости. Две постоянно всплывающие темы это Н-аттенюаторы и сдвоенные потенциометры. Н-аттенюаторы регулируют только дифференциальную составляющую сигнала, не затрагивая синфазную. Соответственно, на малых уровнях громкости эффективное значение CMRR может даже стать отрицательным. Н-

аттенюаторы не рассматриваем. Сдвоенный потенциометр будет конвертировать синфазную помеху в дифференциальный сигнал, если только точность соответствия двух дорожек не будет феноменальной. Кроме того, импеданс по синфазной составляющей будет определен импедансом по дифференциальной составляющей.

Из соображений наименьшего шума и искажений нам бы хотелось взять потенциометр небольшого номинала, но для хорошего CMRR хотелось бы взять большой номинал. В общем, оба пути ведут в никуда. Получается, что нет приемлемого метода конструирования пассивного балансного регулятора громкости. И вообще нет нормальной возможности оформить потенциометр по-дифференциальному.

Поэтому мы будем использовать тактику, показанную на **рис. 14** Поскольку у регулятора громкости есть только одна опорная точка, общая для входа и для выхода, предыдущая и последующая ступени возьмут на себя работу с сигналом.



Список деталей

Designator — Part description

C1, C2, C3, C5, C18, C19, C20, C22 100p 50V NPO 0805
C4, C7, C8, C9, C21, C23, C24, C25 10u 50V Non-Polar
C10, C16, C26, C27, C28, C29 22u 63V
C12, C13, C14, C15 1000u 25V
D1, D2, D3, D4 RS1D
D5 BZX384C18
D6, D8 BAS316
J1, J3, J7, J9 NC3FAN2
J2, J8 NC3MAH1
J6 JST-B3P-VH
K1, K2, K3 Relay 12V 2×1A DPDT
R1, R9, R11, R18, R29, R36, R38, R45 100R 0805 thin film
R2, R3, R13, R14, R30, R31, R40, R41 1k 0805 precision thin film
R4, R15, R32, R42 22R 0805
R5 PTD902-2015F-A103
R6, R12, R33, R39 47k 0805
R7, R16, R34, R43 12k 0805
R8, R17, R35, R44 10k 0805 precision thin film
R10, R37 2M2 0805
R19, R22, R46, R49 10k 0805
R20, R23, R47, R50 220k 0805
R24, R54 2k2 0805
R25, R26, R27, R28 2R2 1206 high current
S1 Toggle switch SPDT
T3 BC846B
U1, U2, U6, U7 LM4562 SO8
U3 TL072 SO8
U4 7812 or HPR12
U5 7912 or HNR12

У меня двойная цель в этом проекте. Во-первых продемонстрировать, как «новая» методология работает на практике, во-вторых открыть для сомневающихся, что разумный инженерный подход может дать ошеломительный звуковой результат без применения понтowych экзотических деталей и соответствующего мышления. Это будет самый дешевый и самый звучащий прототип, который вам только доводилось изготовить.

Входная ступень

Входная ступень это обычный буфер с улучшенными входными цепями. Я бы использовал микросхемки Уитлока [имеются в виду вышеупомянутые TНАТ1200], только вот их характеристики по искажениям недостаточны на мой взгляд.

Дифференциальная ступень

Как я уже говорил, у нас не получится включить обычный потенциометр дифференциально, так что не будем пытаться. Вместо этого мы используем два дифференциальных звена, чтобы дать опорную точку регулировочному звену. Так что между регулятором громкости и входным буфером воткнем дифференциальный усилитель. Эта часть схемы будет определять CMRR всего изделия, так что точный подбор резисторов здесь критически важен. Выходной дифференциальный усилитель будет использовать «холодную» опорную точку потенциометра.

Серво постоянного тока

Я всегда считал важной задачей предусилителя убирать постоянную составляющую. Я использован необычную схему подавления постоянки, которая вообще-то сервой не является и не измеряет постоянную составляющую на выходе. Вместо этого используется ФНЧ второго порядка, выходной сигнал которого далее вычитается из полезного сигнала.

Регулятор громкости

Как многие экспериментаторы могут заметить, потенциометры оказывают различное и непредсказуемое влияние на звук. Постмодернистский этикет требует поздравить себя с тем, что ты услышал что-то такое, что объективистское сборище несомненно никогда бы не заметило, и скорее всего отрицало бы, так что объективными измерениями пренебрегают ради восторга, мистики и, что самое важное, эксплуатации производителями очень дорогих деталей.

Вот тут я должен расстроить постмодернистов. Проблема хорошо известна и понятна далеко не всем. Тут две составляющих. Во-первых резистивная дорожка редко бывает линейной. Да ещё нелинейность зависит от плотности тока в дорожке. В логарифмических потенциометрах ослабление делителя нелинейно [ну еще бы!] Кроме того, подвижный контакт тоже является источником искажений. Во-вторых очень немногие усилители имеют идеально линейный входной импеданс. Не важно даже, лампы это, JFETы, или биполярные, операционники или что-то ещё. Все они, в большей или меньшей степени имеют изменяемую входную емкость. Сопротивления на входе должны быть порядка килоом, на ваше усмотрение.

Два исключения. Схемы с виртуальной землей не имеют проблем с модуляцией входной емкости, поскольку входной сигнал равен нулю. Дифференциальные схемы также не имеют этой проблемы, поскольку нелинейные токи заряда взаимовычитаются.

Ух ты. Дифференциальный дизайн не только решает проблемы, но и устраняет существенный источник искажений. Если панацеи существуют, это должна быть одна из них.

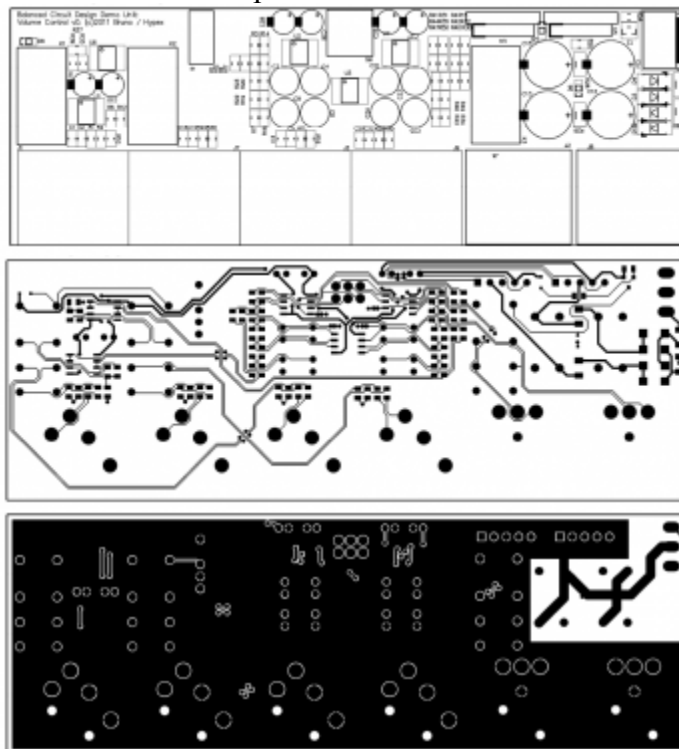
Кратко. Вместо того, чтобы использовать его в качестве аттенуатора, мы используем потенциометр как единственный элемент обратной связи в инвертирующем усилителе. Теперь линейность регулирования почти полностью зависит от линейности соотношения в делителе. Это почти гарантируется в линейных потенциометрах. Сопротивление дорожки может быть очень нелинейным, пока это не станет проблемой. Чтобы поставить точку, я использовал дешевый 9 мм потц из автомагнитолы. Характеристика искажений, тем не менее, на высшем уровне! Единственное неудобство в S-образной характеристике регулирования. На краях диапазона регулирование становится слишком чувствительным. Мы должны жить с этим, поскольку добавление внешних резисторов внесет линейность дорожки обратно в уравнение. Соответствие правой и левой дорожек удивительно хорошее, даже на довольно низкой настройке громкости.

Выходная ступень?

А нет тут выходной ступени! Ну, на самом деле конечно есть, в своем роде. Есть только два резистора 22 Ом, изолирующих выход от паразитной емкости кабеля. Возвращаясь к **Рис. 6**, нет смысла больше ничего делать с сигналом, сверх того, чтобы подключить оба сигнальных провода: один к выходу ОУ, второй к его нулевой опорной точке.

Печатная плата

Дифференциальный дизайн обращается с каждым сигналом как с парой проводов. Хотя обычно только один из них активно кочегарится. Другой привязан к земляному слою в некоторой точке, которая для двух сигнальных ступеней является «опорной точкой».



Похоже, программам для рисования печатных плат такое положение вещей не нравится. Когда соединение номинально принадлежит в той же сети, что и земляной слой, программа так и норовит пригвоздить к нему соответствующую площадку при малейшей возможности. А если вы сделаете отдельную сеть, как только вы попытаетесь гальванически связать её с земляным слоем, программа будет находить ошибку конструирования.

В некоторых программах ничего не остается кроме как использовать нулевой резистор для соединения. Другие, вроде Altium, позволяют применить т.н. «net tie» — межсетевую связь. Когда деталь объявлена как «net tie», проверка на КЗ для нее выключается, что позволяет создавать на плате перекрывающиеся площадки. Что я и сделал в данном случае. Мои «net tie» хорошо узнаваемы на плате и выглядят как две перекрывающихся круглых площадки, и служат в том числе как визуальные маркеры.

Важная особенность платы — все компоненты стоят парами. Это идет в разрез с общепринятой практикой делать «холодную» и «горячую» стороны платы и размещать детали зеркально. Вспомните, что мы пытаемся сделать: мы пытаемся достичь того, чтобы все внешние воздействия влияли на обе линии одинаково. Зеркальное размещение тут совершенно не уместно. Если вы хотите визуальной симметрии, сделайте симметрично правый и левый каналы.

Блок питания

Ясное дело, блок питания построен на моих регуляторах HPR12/HNR12 [исключительно малозумящие дискретные стабилизаторы разработки Бруно, выпускаются Нурех' ом]. По цоколевке они совместимы с обычными 7812/7912.

Результаты измерений

Я проверял схему с нагрузкой 600 Ом и начал с измерения THD+N на 1кГц в зависимости от уровня сигнала. Напряжение ограничения где-то на уровне 19dBu (6.9в RMS). Явно, дифференциальная ступень первой достигает клиппинга.

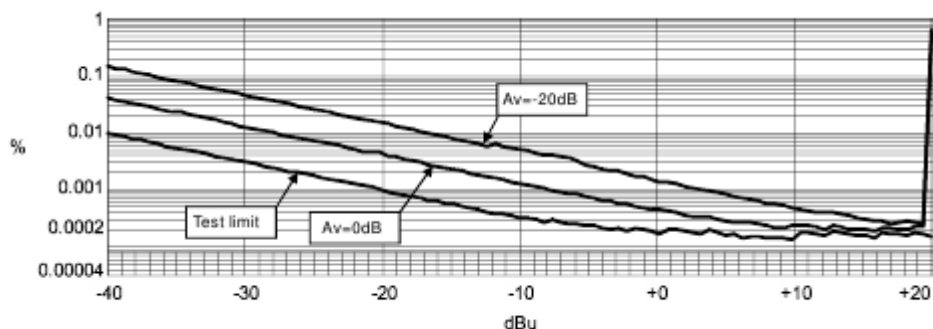


Рис. 25. Искажения+шум как функция входного уровня при 1кГц

Кроме демонстрации максимального уровня сигнала этот график мало что говорит нам. Шум хорошо виден на малых уровнях громкости, на более высоких уровнях он подбирается близко к шумовой полке измерительной установки. График THD от частоты более показателен. Для этого теста я настраиваю анализатор таким образом, чтобы он показывал гармоники и игнорировал шум. Уровень на входе был установлен на 18dBu, что довольно близко к ограничению и довольно часто применяется в профессиональном оборудовании

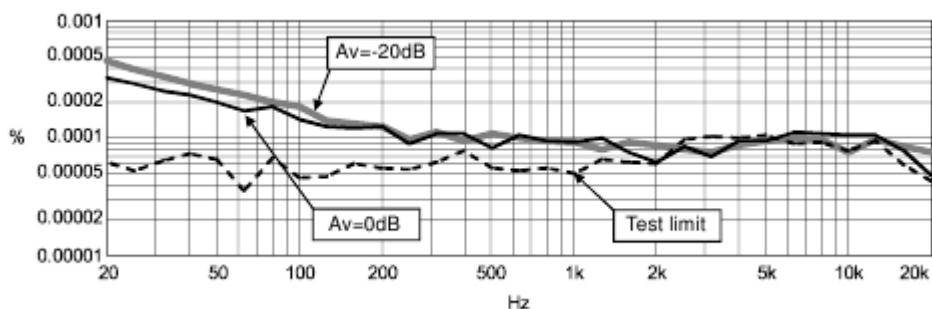


Рис. 26 THD без шума как функция частоты при 18 dBu

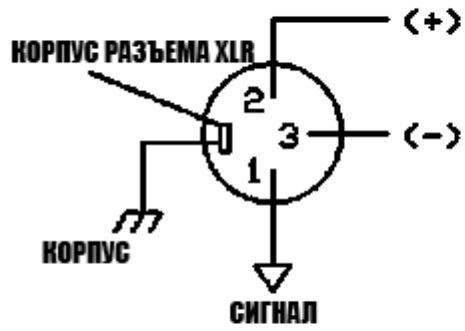
Рост искажений на низких частотах объясняется тепловой модуляцией сопротивления дорожки. Пожалуй, все-таки стоило взять металло-керамический потенциометр. Впрочем, вы едва ли найдете более чистый предусилитель, независимо от цены и понтности деталек. Отметьте отсутствие искажений в верхней части диапазона. Любая модуляция емкости привела бы к росту искажений с ростом частоты.

При измерении с нагрузкой 100 кОм и 600 Ом измеряемой разницы нет, даже несмотря на то, что такая нагрузка загоняет ОУ в класс В. Это демонстрирует полное безразличие схемы к наличию пульсирующих возвратных токов в земляном слое.

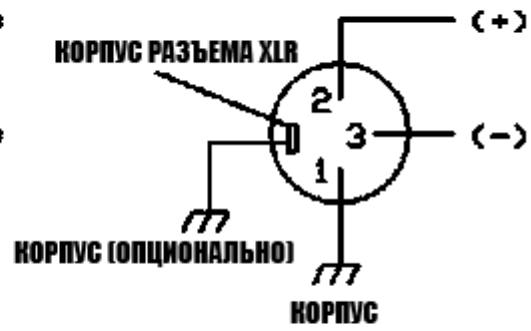
Прослушивание

Если захотите изготовить такой предусилитель, сделайте два. Тогда вы сможете использовать второй предусилитель как переключатель с регулировкой громкости, чтобы сравнивать, скажем, дорогой Highend'овый предусилитель, этот предусилитель и прямое подключение. Послушайте, с каким из них сигнал больше всего похож на изначальный. Вы можете получить просветляющий опыт.

раньше так делали
НЕПРАВИЛЬНО



СТАНДАРТ AES 48
ПРАВИЛЬНО



T = 2 = +

R = 3 = -

S = 1 = КОРПУС