

Высоковольтные усилители: вы думаете, что у вас будет шум?

Применение сверхмалозумящих высоковольтных усилителей **WMA-200** Falco Systems, www.falco-systems.com

W. Merlijn van Spengen, PhD апрель 2020

Введение

Мы обсудим вопросы шума и помех, связанные с использованием высоковольтных усилителей. Многие из рассмотренных здесь концепций в равной степени применимы и к другим формам прецизионных измерений, таким как прецизионные предусилители низкого напряжения или I/V-преобразователи (усилители тока в напряжение или транзисторные усилители). Высоковольтные усилители часто используются, например, в качестве пьезо-драйверов или для устройств управления MEMS (микроэлектромеханических систем). Во многих приложениях характеристики шума высоковольтного усилителя имеют первостепенное значение, поскольку выходной шум непосредственно преобразуется в позиционный шум/неопределенность пьезо или МЭМС привода, который содержит нагрузку усилителя.

Мы рассмотрим основные свойства случайного электронного шума и способы правильной интерпретации характеристик. Мы также рассмотрим различные способы, которыми производители могут "усилить" свои характеристики шума усилителя, чтобы можно было сделать обоснованный выбор наиболее подходящего усилителя для конкретного применения. Во второй половине статьи мы обсудим типичные механизмы интерференции (часто также называемые "шумом", просто чтобы запутать всех вокруг) и эффекты, которые интерференция может оказывать на измерения с низким уровнем шума. Мы увидим способы уменьшения помех и предложим "оптимальные" измерительные решения, которые максимально ослабляют различные типы помех.

Раздел 1 - Шум

Случайный электронный шум – немного теории

Шумовые напряжения определяются как колебания определенной величины, то есть бесшумные сигнальные напряжения. Эти флуктуации обычно имеют гауссово амплитудное распределение, причем малые отклонения гораздо более вероятны, чем большие (Рис.1). Поскольку максимальные пиковые отклонения напряжения шума статистически плохо определены, мы обычно используем среднеквадратичный (скз) шум напряжения для количественной оценки количества шума. Среднеквадратичное значение соответствует одному стандартному отклонению в статистике. Типичные наблюдаемые значения шума от пика к пику в 6-8 раз превышают среднеквадратичное значение.

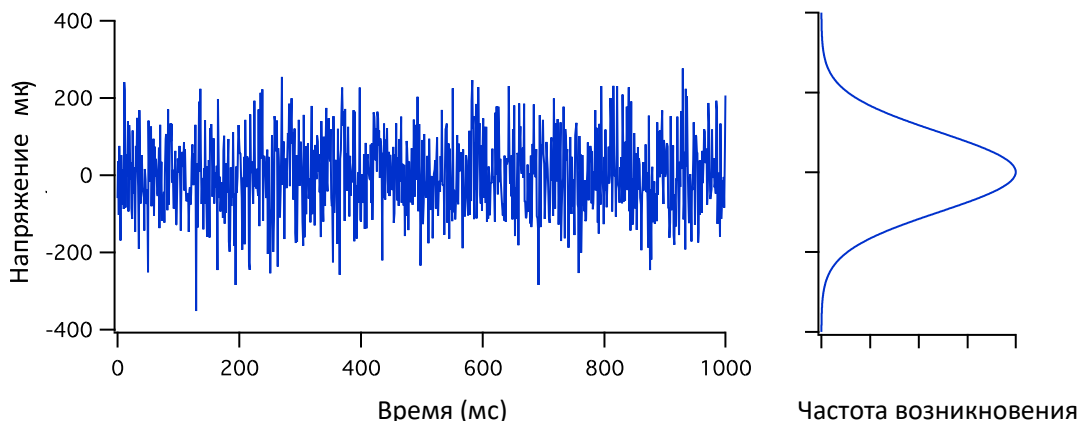


Рисунок 1. Пример электронного шума

Электронный шум встречается почти везде, где производятся точные измерения. Два основных типа электронного шума - это *тепловой* (также называемый *Джонсоновским*) шум и *дробовой шум*. Кроме того, на относительно низких частотах часто встречается *1/f-шум*, тип шума, при котором мощность (а не напряжение) возрастает по закону единица делить на частоту f , если смотреть на все более низкие частоты. Последнее, как правило, вызвано несовершенством процесса изготовления электронных компонентов, и как таковое оно менее фундаментально, чем первые два.

Тепловой шум является основным фактом физики и находит свои корни в теореме о флуктуации-диссипации. Любая физическая система с диссипацией показывает этот шум: не только резисторы (которые являются очевидным классом "диссипативных" элементов в электронике), но и, например, механические системы с демпфированием показывают этот вид шума. Как таковой он проявляется в таких разнообразных областях, как электроника, стабильность частоты лазера и броуновское движение. Он также устанавливает окончательный предел разрешения кантилевера АСМ (атомно-силового микроскопа).

В электронике величина среднеквадратичного напряжения теплового шума v_n в Вольтах задается $v_n = \sqrt{4kTRB}$, где k - постоянная Больцмана ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К), T - абсолютная температура в Кельвинах, R - сопротивление в Омах, B - полоса пропускания системы (в Гц). Тепловой шум снижается, когда температура, сопротивление и/или пропускная способность системы уменьшаются, и поэтому чувствительные детекторы часто охлаждаются жидким азотом или даже жидким гелием.

Например, термически индуцированное среднеквадратичное шумовое напряжение на клеммах резистора мощностью 1 Вт в полосе пропускания 1 Гц при комнатной температуре составляет $v_n = \sqrt{1.38 \times 10^{-23} \times 293 \times 1 \times 1} = 0,127$ нВ. Если сопротивление выше, то шум будет расти пропорционально квадратному корню из этого сопротивления (так что он станет, например, 1,27 нВ для 100 Вт). Он также будет расти пропорционально квадратному корню из полосы пропускания, если полоса пропускания будет увеличена (так что это становится, например, 12,7 нВ для 100 Вт в полосе пропускания 100 Гц). Поскольку пропускная способность системы часто не известна априори, тепловой шум часто выражается в виде числа с единицей нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$, указывающей, что среднеквадратичное напряжение шума получается, если это значение умножить на квадратный корень из пропускной способности системы.

Дробовой шум появляется везде, где дискретные частицы пересекают энергетический барьер одна за другой. В электронике он возникает, когда электроны независимо пересекают полупроводниковый переход, например в диодах и транзисторах (или свободное пространство в электронной трубке). Многие люди также знакомы с "зернистостью" фотографического изображения, полученного в условиях низкой освещенности, которая вызвана дискретностью частиц света: фотоны также имеют дробовой шум.

В электронике зашумленность (флуктуации) тока, протекающего через барьер, задается как среднеквадратичный шум тока i_n в Амперах, заданный $i_n = \sqrt{2qIBB}$, где q - элементарный заряд ($q = 1,60 \times 10^{-19}$ Кл), I - установившийся постоянный ток в Амперах, протекающий через барьер, а B - полоса пропускания системы в Гц, как и в случае теплового шума. Это уравнение затем приводит к значению токового шума, которое обычно имеет единицы пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$ или нА/ $\sqrt{\text{Гц}}$, где снова нужно умножить это значение на квадратный корень из полосы пропускания, чтобы получить общий среднеквадратичный токовый шум, присутствующий в системе с определенной полосой пропускания.

И тепловой шум, и токовый шум имеют *белый цвет*, что означает, что на каждой частоте мощность шум одинакова: спектр шума плоский. Только в этом случае умножение на квадратный корень из полосы пропускания приведет к правильному полному шуму. На самом деле, то, что вам нужно сделать, это взять интеграл по спектру шума.

Шум $1/f$ гораздо менее четко определен. Различные компоненты, которые на первый взгляд кажутся имеющими одинаковые характеристики (например, они имеют одинаковое сопротивление и полосу пропускания), могут иметь сильно отличающийся $1/f$ шум, даже если

они происходят из одной и той же партии. Единственный способ получить хорошее представление о шуме $1/f$ в системе - это фактически измерить его.

Оценка основных шумов высоковольтных усилителей

Производитель малошумящего высоковольтного усилителя должен был позаботиться о том, чтобы вклад теплового шума компонентов и вклад текущего шума в усилитель были низкими. Вплоть до полосы пропускания самого усилителя спектр шума выходного напряжения, в идеале, будет белым, довольно плоским, независимым от частоты. При определенной, предпочтительно очень низкой, частоте $1/f$ - шум также может присутствовать, рассматриваемый как растущий наклон шумового спектра на низкочастотной стороне.

Поскольку высоковольтные усилители имеют различные коэффициенты усиления и различные полосы пропускания, шумовые характеристики таких усилителей можно справедливо сравнить только с учетом этих различий.

Если один усилитель усиливает в 10 раз, а другой в 100 раз, но последний имеет в 10 раз больше выходного шума, то усилители одинаково "хороши", если смотреть с точки зрения входного сигнала. Однако, вы должны спросить себя, нужно ли вам 100-кратное усиление, потому что фактический шум напряжения первого усилителя действительно будет в 10 раз ниже на выходе просто потому, что его внутренний шум не усиливается так сильно. Аналогично, если один высоковольтный усилитель в остальном идентичен другому, но имеет в 100 раз большую полосу пропускания, он, вероятно, будет иметь в 10 раз ($= \sqrt{100}$) больше шума, если шум действительно белый.

"Идеальный рецепт", как вы пожелаете для сравнения шумовых характеристик высоковольтных усилителей, тогда будет довольно прост. Разделите уровни выходного напряжения шума, указанные для усилителей (обычно в среднеквадратичном значении мкВ), на квадратный корень из их соответствующих полос пропускания, чтобы получить "нормализованное" значение на $\sqrt{\text{Гц}}$. Это подскажет вам, какой усилитель имеет самый низкий уровень шума на выходе для каждой частоты. Вы также можете принять во внимание коэффициент усиления, но вы захотите выбрать усилитель с коэффициентом усиления, близким к наименьшему значению, совместимому с максимальным выходным уровнем вашего источника сигнала. Например, если у вас есть функциональный генератор, который может генерировать 20 Вп (пик к пику), в вам нужно от -200 В до + 200 В, то есть 400 Вп, вам нужен по крайней мере 20-кратный усилитель. Но не выбирайте усилитель с гораздо большим коэффициентом усиления, так как он просто усилит свой собственный шум и шум вашего генератора больше, чем это необходимо.

В качестве примера представим, что есть выбор между двумя усилителями А и В. Усилитель А имеет выходное шумовое напряжение 100 мкВ, усиливает в 10 раз и имеет полосу пропускания 1 кГц. Усилитель В усиливает в 50 раз, имеет полосу пропускания 100 кГц и выходное шумовое напряжение 2 мВ. Какой из них является лучшим усилителем? Если вы торопитесь, вам нужно только 10-кратное усиление, а ваша пропускная способность меньше 1 кГц, то непременно выбирайте усилитель А. Однако, по сути, усилитель В лучше: если бы его пропускная способность была в 100 раз меньше, как в случае с усилителем А, его выходной шум был бы 200 мкВ. И если бы, к тому же, его коэффициент усиления был 10 вместо 50, как у усилителя А, то он обеспечивал бы выходное шумовое напряжение 40 мкВ, что в 2,5 раза лучше, чем у усилителя А для того же выходного сигнала. Тогда производитель усилителя В, вероятно, сможет построить усилитель, который будет лучше, чем усилитель А, даже если вам нужна полоса пропускания усилителя и коэффициент усиления А и не повредит спросить производителя усилителя В, может ли он предоставить такой усилитель. Или, как, например, в случае сверхмалошумящего высоковольтного усилителя Falco Systems WMA-200, пропускная способность может быть уменьшена извне. Это делается путем размещения блока конденсаторов нагрузки на выходе.

В общем, при сравнении усилителей хорошо нормализовать их все с одной полосой пропускания и коэффициентом усиления. Затем выбирается единица измерения шума с усилением 1 (это называется входным опорным шумом), как среднеквадратичное напряжение, деленное на квадратный корень полосы пропускания 1 Гц. С помощью высоковольтных усилителей для лабораторных целей вы обычно получаете уровни от нескольких нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ до нескольких сотен нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ входного опорного шума.

Реальный мир

Если бы каждый высоковольтный усилитель имел плоский спектр шума по всей своей полосе пропускания, и ноль вне этой полосы пропускания, то все производители просто цитировали бы это число и жизнь была бы легкой. Однако, ряд эффектов разрушают эту идеалистическую картину и должны быть приняты во внимание:

- Усиление начинает падать до заявленной полосы пропускания (- 3 дБ) и будет плавно снижаться дальше, выше заявленной полосы пропускания. Если усиление падает как характеристика фильтра первого порядка, то общий измеренный шум составит $1,571 \times \sqrt{(\text{полоса пропускания в Гц}) \times \text{шум (в нВ}/\sqrt{\text{Гц}})}$, в то время как характеристика фильтра второго порядка может дать немного меньший коэффициент умножения, в зависимости от добротности [1]. Таким образом, усилитель с характеристикой фильтра первого порядка и входным относительным шумом $10 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ будет измерять среднеквадратичное шумовое напряжения 157 нВ (с усилением $1x$), если собственная полоса пропускания усилителей составляет 100 Гц , но шум на выходе измеряется по всем частотам.
- Полоса пропускания мощности усилителя может быть намного меньше полосы пропускания малого сигнала из – за *ограничения скорости нарастания* (см. Примечание по применению Falco Systems 1 - высоковольтные усилители: насколько они быстры на самом деле?). Поскольку шум всегда является низкоуровневым, именно (как правило, БОльшая) малая полоса пропускания сигнала определяет поведение в данном случае.
- Многие высоковольтные усилители имеют полосу пропускания, которая зависит от емкостной нагрузки, подключенной к выходу, поэтому полоса пропускания (а следовательно, и шум) не является постоянной
- Хуже того, многие усилители демонстрируют пиковую характеристику (превышение переходной характеристики) при определенных емкостных нагрузках, изменяя значение $1,571$ коэффициента умножения в зависимости от нагрузки, даже если полоса пропускания не изменится
- На низких частотах значение шума в $\text{нВ}/\sqrt{\text{Hz}}$ вполне может быть (намного) выше из-за шума $1/f$. Однако, на общем уровне шума этот эффект обычно невелик, если только полоса пропускания усилителя не очень мала (менее 1 кГц).
- На низких частотах частоты сети питания $50/60 \text{ Гц}$ или кратные этим частотам также могут присутствовать как помехи и проявляться в выходном сигнале. Если усилитель имеет импульсный источник питания, то могут присутствовать и гораздо более высокие частоты, вплоть до $100 (!) \text{ МГц}$. Последние часто трудно отфильтровать полностью.
- Производители иногда выбирают/подгоняют свои технические характеристики и условия измерения таким образом, чтобы их высоковольтный усилитель выглядел как можно великолепнее.

Справедливым решением для производителя высоковольтного усилителя является измерение выходного шума в широкой полосе пропускания (намного большей, чем полоса пропускания усилителя) для ряда типичных емкостных нагрузок. Если усилитель демонстрирует тенденцию к пикированию, то для различных емкостных нагрузок должны быть приведены графики Бode частотной характеристики. Если шум сильно возрастает на низких частотах из-за $1/f$ или помех, то фактический спектр шума выходного сигнала усилителя также может быть иллюстративным. Это может быть либо обычный шумовой спектр (пример на рис. 2), но очень показательным также является кумулятивный спектр шума, где общий среднеквадратичный шум измеряется и строится в зависимости от полосы пропускания измерения. Чтобы перейти от полосы пропускания к спектральной плотности мощности шума, а затем к суммарным спектрам мощности и напряжения, нужно иметь в виду, что мощность пропорциональна квадрату напряжения. Правильная процедура расчета кумулятивного шумового напряжения заключается в том, чтобы начать со спектральной плотности шумового напряжения, возвести ее в квадрат, чтобы получить спектральную плотность мощности, затем интегрировать спектральную плотность мощности, чтобы получить кумулятивную шумовую мощность, и оттуда взять квадратный корень, чтобы получить спектр кумулятивного шумового напряжения. Иногда графики видны там, где вместо этого интегрируется спектральная плотность шумового напряжения (называемая совокупным амплитудным спектром), но обычно это не приводит к правильному результату. Высокие частоты внутри и вокруг полосы пропускания, по-видимому,

вносят наибольший вклад в общий шум, но обратите внимание, что графики (как это обычно делается) логарифмические по частоте: там просто больше полоса пропускания. Учтите, что существует примерно в $\sqrt{9} = 3$ раза больше мощности шума от 10 Гц до 100 Гц, чем от 1 Гц до 10 Гц.

Когда вся эта информация присутствует, можно сделать справедливую оценку усилителя в отношении шума: потенциальный пользователь уже может оценить количество шума, которое будет присутствовать в его/ее реальном приложении, прежде чем усилитель будет куплен.

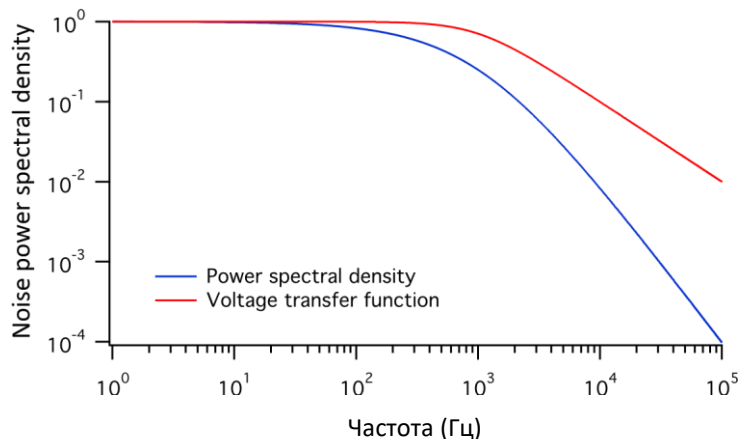


Рисунок 2. Пример шумового спектра: передаточная функция и спектральная плотность мощности фильтрованного белого шума

Пример с измеренными данными

В качестве практического примера мы покажем шумовые характеристики и их интерпретацию для высоковольтных усилителей Falco Systems WMA-100 (общее назначение, низкий уровень шума) и WMA-200 (сверхнизкий уровень шума) на (Рис. 3). Их технические характеристики приведены в Таблице 1.



Рисунок 3. Усилители WMA-200 сверхмалошумящий и WMA-100 малошумящий (общего назначения)

Таблица 1. Технические характеристики высоковольтных усилителей WMA-100 и WMA-200

	WMA-100	WMA-200
Максимальное выходное напряжение	350 Впп	350 Впп
Максимальный выходной ток	100 мА	150 мА
Частотный диапазон	от 0 до 500 кГц	от 0 до 100 кГц
Выходное шумовое напряжение	~800 мкВ	~50 мкВ

Соответствующие спектральные плотности шума и кумулятивные шумовые напряжения в зависимости от частоты приведены на Рис.4. Общая плотность шума на $\sqrt{\text{Гц}}$ WMA-200 ниже, чем у WMA-100 во всей полосе пропускания, и, кроме того, амплитуда начинает колебаться на более низких частотах, чем у WMA-100, из-за меньшей полосы пропускания WMA-200. Обратите внимание, что низкочастотные компоненты помех (50 Гц и другие магнитные помехи до 10 кГц) очень хорошо видны на графиках спектральной плотности мощности (рис.4а), но они вносят лишь несколько микровольт в общее выходное шумовое напряжение $50\text{ мкВ}_{\text{СКЗ}}$ (рис. 4b). Высокочастотные помехи в эксперименте (резкие пики выше 1 МГц на рис.4а) вызваны радиосигналами, но их вклад в суммарный шум незначителен.

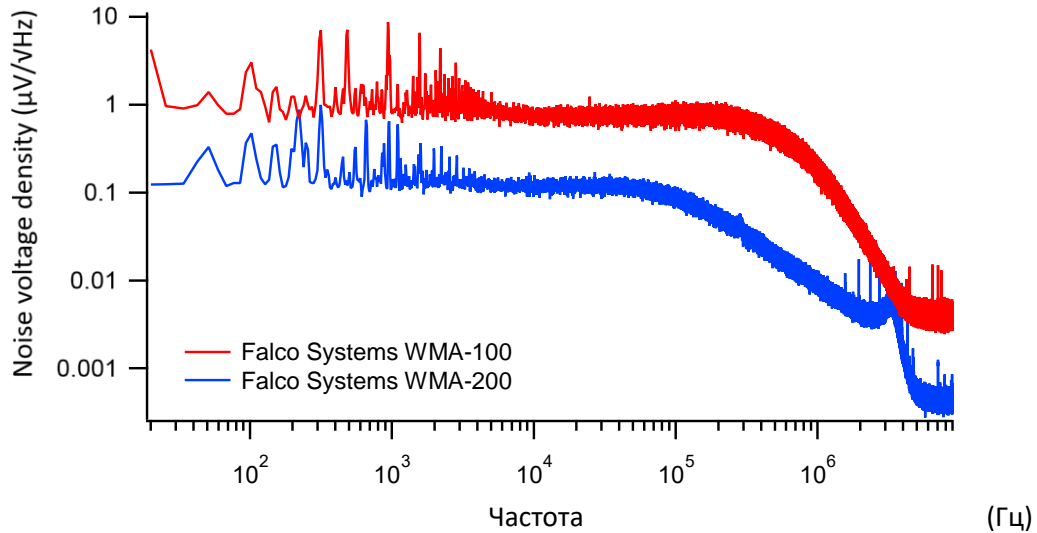


Рис. 4а. Спектральная плотность шумового напряжения

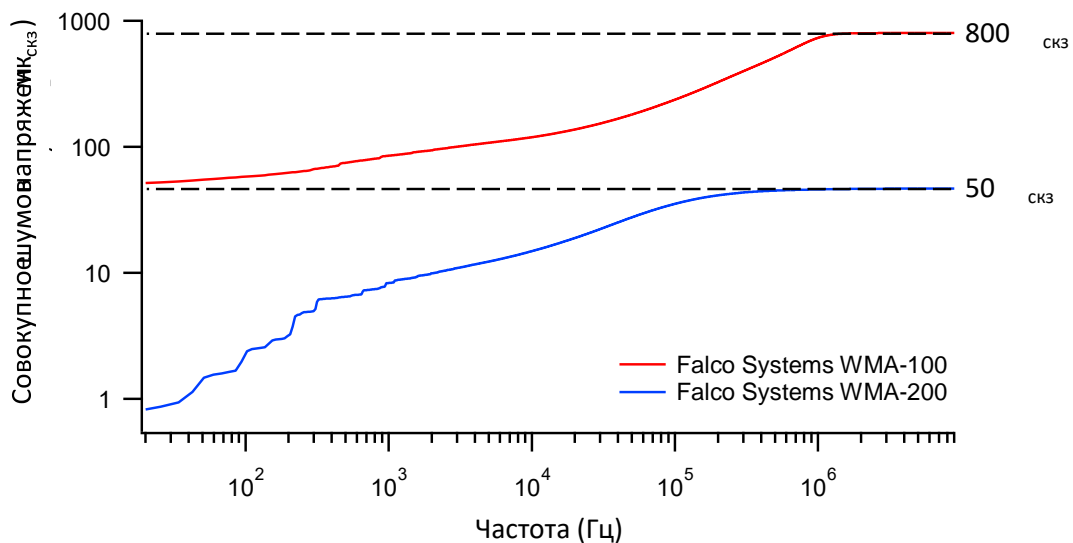


Рис. 4б. Кумулятивное шумовое напряжение

Рисунок 4. Экспериментальная оценка спектральной плотности шумового выходного напряжения и соответствующего суммарного графика выходного шумового напряжения для высоковольтных усилителей WMA-100 и WMA-200

Подводные камни оценки шума усилителя Типичные проблемы, на которые следует обратить внимание, заключаются в следующем:

- Усилитель имеет большую полосу пропускания, но производитель приводит только уровень шума с огромной емкостной нагрузкой, где полоса пропускания намного меньше, но не упоминает об этом снижении полосы пропускания.
- Если высоковольтный усилитель достигает пика при определенных емкостных нагрузках, это может значительно усилить шумы на пиковой частоте.
- Существует ли более низкочастотный предел измеряемого выходного шума? Осциллограф на "переменном токе", для блокировки напряжения смещения постоянного тока от влияния на измерения? Преднамеренная попытка не показывать шум $1/f$? Подлая версия этой ошибки состоит в том, чтобы цитировать только "плоский шум" без каких-либо графиков.
- Коэффициент усиления можно регулировать, но задается только выходной шум для самого низкого коэффициента усиления.
- Шум был измерен (правильно) в гораздо большей полосе пропускания, чем полоса пропускания усилителя, но полоса пропускания усилителя не упоминается. В этом случае у вас может возникнуть соблазн подумать, что выходной шум распространяется на эту гораздо большую полосу пропускания с соответственно более низкой оценкой нВ/ОГц.
- Шум задается в полосе пропускания только до уровня полосы пропускания усилителя -3 дБ, давая значение, которое примерно в 1,571 раза ниже, чем оно есть на самом деле. Это ловушка, в которую добросовестно могут попасть даже производители, когда строят кумулятивный спектр шума до уровня полосы пропускания усилителя -3 дБ вместо того, чтобы строить его до частоты, которая по крайней мере в десять раз выше.
- Никакой малозумящий высоковольтный усилитель не поможет вам если ваш источник сигнала имеет слишком много шума...

Раздел 2 - Интерференция

Виды интерференций (помех)

Интерференция-это не случайный сигнал, генерируемый внутри измерительной системы из-за физических свойств самой системы. Она вызвана внешними источниками паразитных сигналов, которые каким-то образом умудряются попасть в измерительную систему. Электрические помехи могут быть связаны через емкостную, магнитную связь, в виде наведенного тока в общем проводнике или путем улавливания высокочастотного электромагнитного излучения. Найти источник неэлектрических помех может быть довольно легко, если они вызваны, например, тепловыми эффектами (медленный дрейф) или вибрациями и звуком ("микрофонный эффект" цепи). Последний может быть идентифицирован (и оценены контрмеры), слушая ваш шум с наушниками, трюк, о котором не все знают. Примером микрофонного эффекта, который не так очевиден, является трансформаторный гул, который акустически соединяется с заряженным конденсатором, вызывая токи с частотами 50/60 Гц. Но неэлектрические помехи могут быть еще более глупыми, как в ситуации, когда космическое излучение создает ток утечки (короткими импульсами!) через высококачественный диэлектрик.

Емкостные помехи

Емкостные помехи обычно проникают в высокоимпедансные (высокоомные) узлы цепи, которые мы используем в измерительной установке. По существу, металл высокоимпедансного узла цепи и проводник у источника помех действуют вместе как две пластины конденсатора с воздухом между ними в качестве диэлектрика. Изменение разности напряжений между ними может затем вызвать ток, протекающий через этот "паразитный" конденсатор, и в конечном итоге в узле высокого импеданса цепи. Чем выше частота изменения напряжения на источнике помехи, тем выше ток, и тем более хлопотным он становится, так как импеданс конденсатора изменяется как $1/j\omega C$, с частотой помехи $2\pi\omega$ в Гц и C - емкостью паразитного тракта в Фарадах. Типичные емкости находятся в диапазоне от пФ (10^{-12}) до фФ (10^{-15}).

Примером может служить наводка сигнала от сетевой проводки в стенах (скажем, 230 В скз, 50 Гц) на небольшой неэкранированный провод, торчащий из входа осциллографа 1 МОм. Многие читатели заметят, что это приведет к появлению на осциллографе сигнала с частотой 50 Гц. Все становится хуже (более высокая амплитуда), когда человек касается провода пальцем. Ситуация и эквивалентная схема приведены на рис.5.

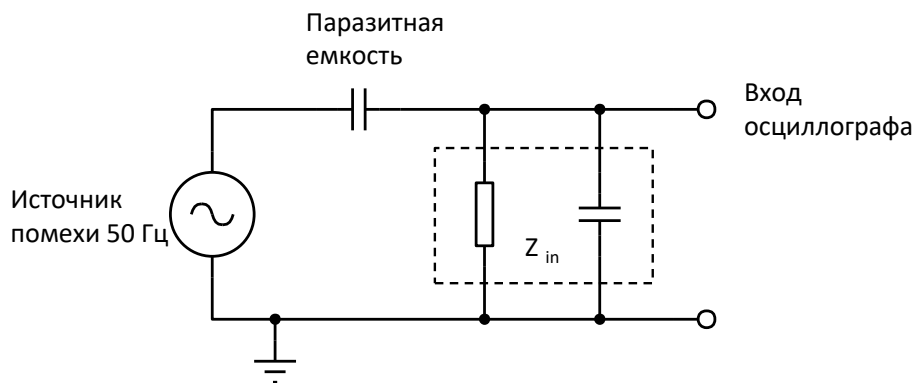


Рисунок 5. Емкостные помехи на входе осциллографа

Паразитная емкость между сетевым проводом и входом осциллографа образует фильтр высоких частот с входным сопротивлением осциллографа. Входная емкость осциллографа (обычно около 30 пФ) приведет к тому, что график нарастающего интерференционного сигнала на высоких частотах снова выровняется. Используя значение паразитной емкости в несколько пФ и входное сопротивление в 1 МОм, можно легко рассчитать ожидаемое паразитное напряжение на входе осциллографа.

Многие системы демонстрируют этот тип помех и будут улавливать низкочастотные сетевые помехи, как в приведенном примере, или высокочастотные помехи, такие как радиоволны в диапазоне МГц. Последние могут находиться вне полосы пропускания схемы, но все же вызывать проблемы, если паразитный сигнал выпрямляется рп-переходами транзисторов или диодов в схеме. Тогда он будет выглядеть как сигнал на гораздо более низкой частоте. Контрмеры против таких помех, по существу, всегда одинаковы: уменьшите паразитную емкость между источником и чувствительным узлом цепи. Это можно осуществить, сделав проводящую область восприимчивого узла схемы меньше или увеличив расстояние между источником помех и схемой. И то, и другое снизит паразитную емкость. Но на сегодняшний день наиболее эффективным является размещение третьего, заземленного, экранирующего проводника между двумя узлами таким образом, чтобы восприимчивый узел больше не мог "видеть" мешающий узел (рис.6).

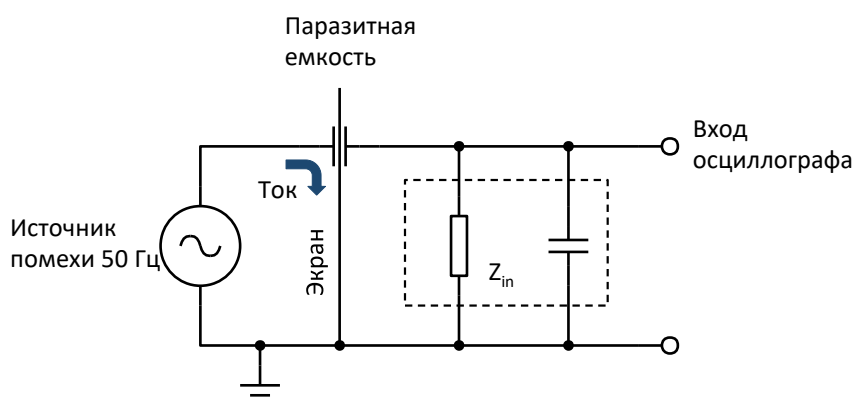


Рисунок 6. Экранирование чувствительного высокоимпедансного узла от емкостных помех

С таким проводящим экраном, мешающий емкостный ток будет проведен к земле, прежде чем он сможет причинить какой-либо вред. Когда этот экранирующий проводник помещается по всей восприимчивой цепи, мы говорим о клетке Фарадея. Он может принимать форму небольшой коробки на печатной плате или проводящего заземленного корпуса (как в большинстве маломощных высоковольтных усилителей). Но даже целые комнаты могут быть экранированы, как это имеет место, например, в комнатах измерения ЭЭГ (электроэнцефалограммы) в больницах. Другой пример - экранированный кабель, такой как коаксиальный кабель, но мы должны будем сказать больше о кабелях позднее. На низких и средних частотах (до диапазона МГц) это экранирование может быть удивительно

эффективным, при этом снижение помех на 120 дБ (коэффициент 10^6) не является чем-то неслыханным.

В заключение, чтобы предотвратить емкостные помехи, уменьшите паразитную емкость как можно больше и используйте заземленный экран, предпочтительно вокруг восприимчивого узла, так чтобы экран эффективно служил клеткой Фарадея.

Магнитные помехи

Магнитные помехи - это в основном "трансформаторный эффект". Это произойдет, если есть проводящая петля, в которой изменение магнитного поля от окружающей среды может вызвать ток. Поскольку этот ток протекает по контуру, он будет создавать напряжения на каждом значительном сопротивлении и импедансе, присутствующих в контуре. Петля не обязательно является физически различимой петлей: ток петли может, например, проходить через (паразитные) емкости, что иногда затрудняет понимание того, откуда берутся помехи.

Контур заземления - это хорошо известный тип магнитных помех (рис. 7). Здесь опорная точка заземления 0 вольт не везде имеет одинаковый потенциал, потому что индуцированный циркулирующий ток создаст напряжения на сопротивлении контура. Большая площадь петли особенно вредна, потому что через нее будет проходить много магнитного потока. Типичный пример - два устройства, которые оба заземлены на защитную землю сети, но которые также связываются друг с другом с помощью одного конца кабеля, такого как экранированный коаксиальный кабель. Здесь низкоуровневые измерения будут улавливать магнитные помехи через обычно большую площадь контура защитных заземляющих проводов (в сетевом кабеле) и коаксиальных кабелей.

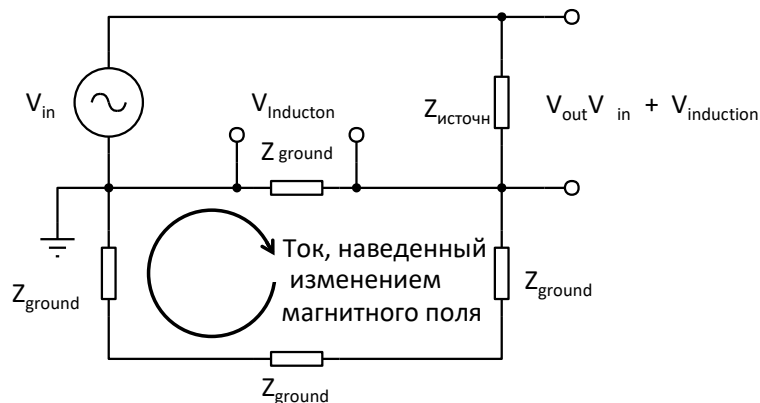


Рисунок 7. Ток, индуцированный изменяющимся потоком магнитного поля в "контуре заземления", вызовет появление напряжений вдоль контура, потому что ток протекает через ненулевое сопротивление/импеданс.

Наиболее важными контрмерами против магнитных помех являются увеличение расстояния до источника помех и создание петли, которая улавливает магнитные помехи, как можно меньше. В отличие от емкостных помех, которые могут быть полностью устранены с помощью проводящего корпуса, магнитные помехи гораздо труднее экранировать. Причина в том, что нет совершенного магнитного материала. Сталь (не нержавеющая – большинство нержавеющих сталей немагнитны) будет работать разумно хорошо, и в сложных случаях мю-металл является вариантом. Однако, мю-металл дорог, и его трудно обрабатывать, потому что при напряжении (например, изгибе) он теряет свои превосходные магнитные свойства.

Просто поместить кусок магнитного материала между источником помех и приемной петлей не получится, так как линии магнитного поля будут просто идти к экранирующей части, а затем дальше к приемной цепи. Вместо этого нужно направить магнитные поля вокруг восприимчивой цепи (рис. 8).

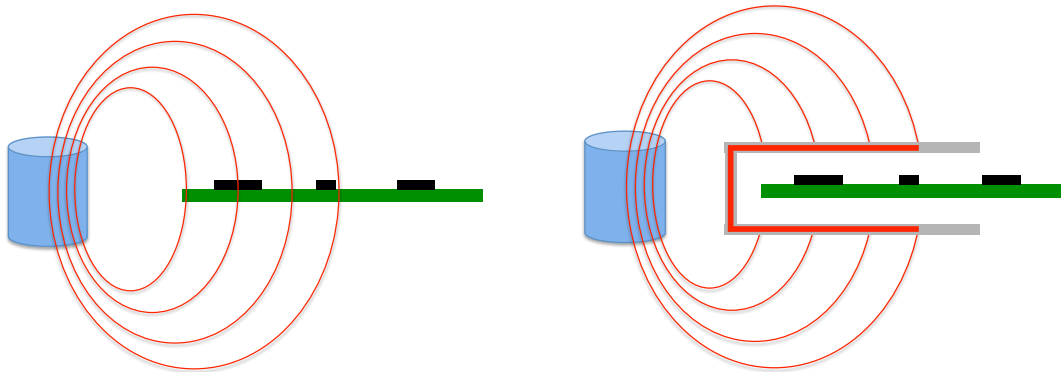


Рисунок 8. Чтобы защититься от магнитных полей, нужно направлять силовые линии вокруг восприимчивой цепи с помощью магнитного материала.

Вынужденные токи

Если ток протекает между двумя точками заземления, которые, как предполагается, имеют одинаковый потенциал, это вообще не работает, потому что ток будет индуцировать напряжение на любом сопротивлении, которое он встречает между этими двумя точками. Например, чувствительная схема видит различные потенциалы заземления в разных местах из-за большого тока, протекающего от источника питания к силовой цепи, которая проводит свой ток через чувствительную схему. Решение состоит в том, чтобы снабдить силовую цепь *отдельным* проводником для каждого соединения, через которое ожидается протекание значительных токов.

Здесь также помогает "заземление звездой" чувствительной цепи, где все узлы 0 В чувствительной цепи связаны вместе в одной точке. Даже если через эту точку протекает ток, сопротивление между различными заземляющими соединениями ничтожно мало, потому что они больше не разделены в пространстве. Поэтому между точками заземления чувствительной цепи не будет разности напряжений. Но часто плоскость заземления с низким импедансом на печатной плате (PCB) является еще лучшим решением.

Электромагнитное излучение

На высоких частотах физическая длина электромагнитных волн становится сравнимой с физическими размерами измерительной системы или меньше их. В этом случае упрощение отдельных емкостных и магнитных помех уже не имеет смысла. Длина волны λ в метрах связана с частотой сигнала f в Гц как $\lambda = v/f$, причем v - скорость света, 3×10^8 м/с. Эмпирическое правило состоит в том, что для частот, длина волны которых меньше 10 крат наибольшего размера вашей системы, вам придется учитывать электромагнитные эффекты. Но для высокочувствительной схемы вы уже испытаете эффекты на гораздо более низких частотах.

К счастью, экранирование с помощью клетки Фарадея, обычно очень хорошо работает против электромагнитных помех. Электромагнитное излучение создаст вихревые токи в экране, которые, если экран имеет достаточно низкое сопротивление, полностью погасят электромагнитное излучение с другой стороны щита. Прием радиосигнала в хорошо сконструированной клетке Фарадея совершенно невозможен! Если требуются отверстия в клетке Фарадея, они должны быть малы по сравнению с длиной электромагнитной волны, которую вы пытаетесь удержать.

Корпуса и кабели

Металлический корпус, который проводит через все поверхности, является очень хорошей универсальной клеткой Фарадея. Коаксиальный кабель между двумя корпусами также будет действовать как таковой (рис. 9). Эта схема даст отличные характеристики подавления помех. Если корпус плохо проводит через все поверхности и интерфейсы (особенно если корпус состоит из различных панелей, привинченных друг к другу), эффективность экранирования снижается, и может потребоваться экспериментальная оценка уровней помех внутри корпуса.

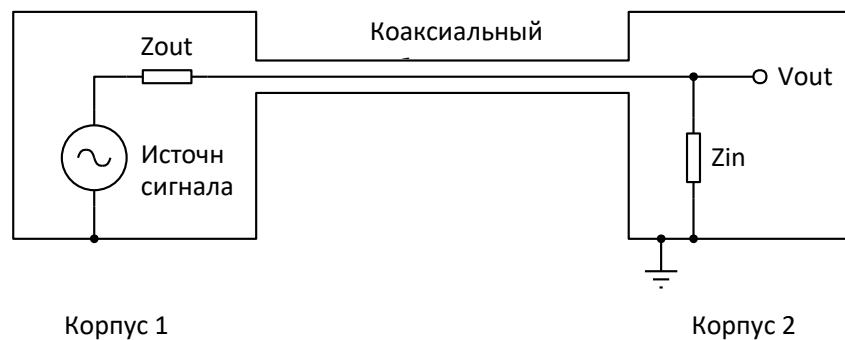


Рисунок 9. Два корпуса с коаксиальным кабелем между ними действуют как одна клетка Фарадея. Внутренняя схема не будет подвержена емкостным или электромагнитным помехам.

К сожалению, чаще всего здесь присутствует больше кабелей, чем на схеме фиг. 9. Это создает опасность возникновения петель заземления и магнитных помех. Сохранение кабелей как можно короче и минимальной площади петли заземления несколько поможет, но лучшим решением является использование дифференциального сигнала между частями оборудования. Некоторые функциональные генераторы имеют два выхода для выполнения этой задачи, а сверхмалошумящие высоковольтные усилители имеют дифференциальный вход для компенсации помех, вызванных процессами, описанными выше. Несимметричный сигнал имеет фиксированную значение 0 В, как правило, это экран. Именно так функционирует коаксиальный кабель. В дифференциальной схеме источник посылает два напряжения на два сигнальных провода. Эти провода несут сигнальное напряжение противоположной полярности по отношению друг к другу. Заземленный экран теперь может принимать любое паразитное напряжение из окружающей среды, но это не повлияет на разницу напряжений между двумя сигнальными проводами. Эта разница в напряжении используется на приемном конце и поэтому нет никаких помех.

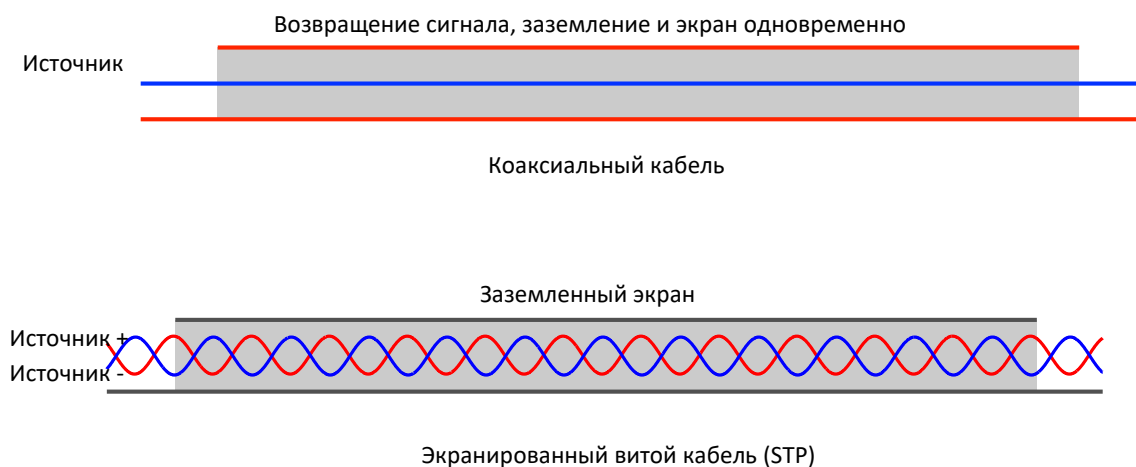


Рисунок 10. Выбор как коаксиального кабеля, так и экранированной витой пары (STP) основан на том, что токи, индуцированные изменяющимся однородным магнитным полем в одном контуре, будут компенсированы в другом контуре, благодаря их симметричной геометрии. В дополнение к компенсации магнитных помех, кабель STP также будет защищать от напряжений, генерируемых в экране токами заземления, чего не обеспечивает коаксиальный кабель.

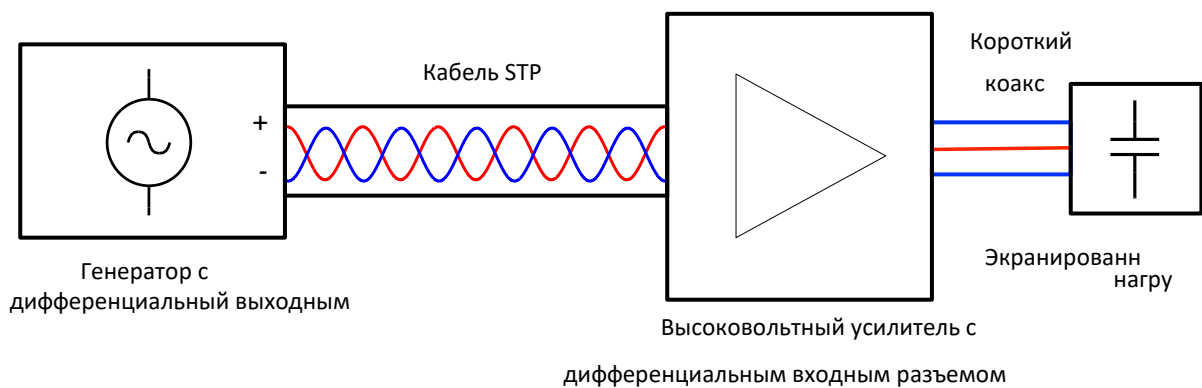
Дифференциально связанная система все еще может быть несколько восприимчива к магнитным помехам. Существует петля между двумя сигнальными проводами, потому что они не находятся точно в одном и том же месте. Скручивание проводов предотвратит влияние изменяющегося магнитного поля на каждой скрутке. Небольшая магнитная интерференция, полученная небольшим участком петли провода, будет компенсирована следующей петлей, где магнитная интерференция индуцируется с противоположной полярностью. Этот принцип лежит в основе кабеля витой пары (рис. 10).

Рекомендации для высоковольтных усилителей

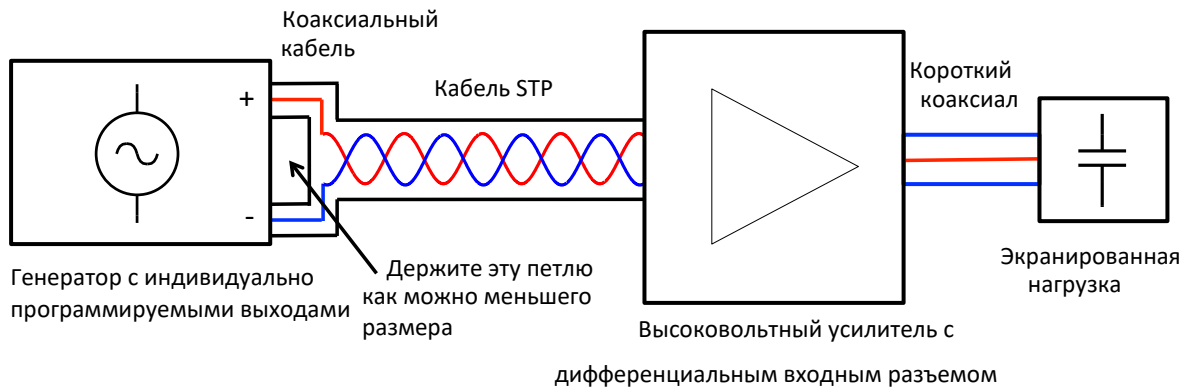
Высоковольтные усилители не являются уникальными по своей восприимчивости к внешним помехам, и все приведенные выше рекомендации применимы. В частности следует отметить следующее:

- По возможности используйте дифференциальный сигнал и STP - кабель между источником сигнала и усилителем высокого напряжения.
- Если необходим несимметричный (коаксиальный) кабель между источником сигнала и усилителем высокого напряжения, используйте коаксиальный кабель как можно короче. Между генератором сигналов и усилителем высокого напряжения может существовать петля заземления, поскольку оба они часто подключаются к защитному заземлению сети через свои сетевые кабели. Некоторые генераторы имеют независимую сигнальную землю или предлагают возможность отсоединить эту землю от защитной земли сети, если это необходимо, тем самым предотвращая возникновение прямой петли заземления. Другие генераторы сигналов могут работать на батарейках. По-прежнему может существовать контур с емкостной связью меньшей степени тяжести. Используйте короткие сетевые кабели, подсоедините их к одной и той же розетке и держите их вместе по всей длине, насколько это возможно.
- Выход типичного высоковольтного усилителя является несимметричным, если только два усилителя не используются в мостовом режиме, и, следовательно, подвержен всем перечисленным выше внешним воздействиям. Используйте заземление выходного разъема усилителя для заземления нагрузки высоковольтного усилителя, например пьезо, МЭМС и т. д. Если бы кто-то сделал отдельное соединение от нагрузки к другой точке заземления, контур заземления был бы создан мгновенно, и точность напряжения на нагрузке будет нарушена. Используйте соединительный коаксиальный кабель от усилителя к нагрузке как можно короче: на уровне мкВ, сантиметры куда лучше дециметров!
- Экранируйте нагрузку клеткой Фарадея, если это вообще возможно, и заземляйте эту клетку только на землю выхода высоковольтного усилителя.

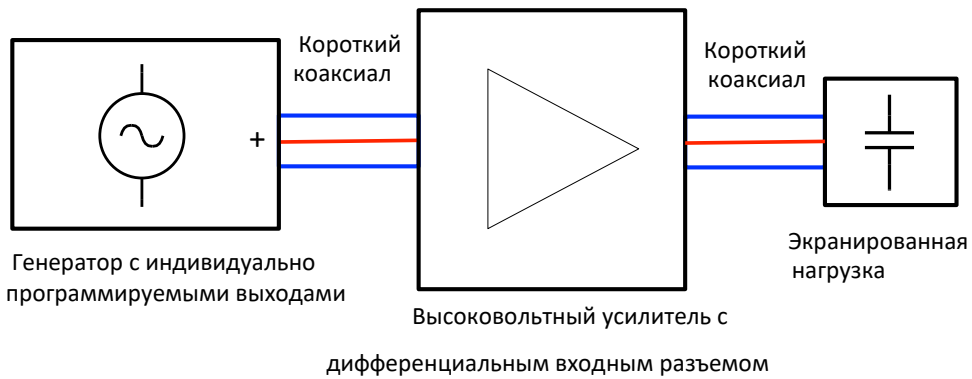
На рис. 11 показаны рекомендуемые способы подключения генератора, высоковольтного усилителя и нагрузки для оптимального подавления помех. Полностью дифференциальная работа не всегда возможна, особенно на стороне нагрузки, и в этом случае остается не оптимальное решение, где всегда будут присутствовать некоторые помехи. Однако, прислушиваясь к приведенным выше советам по минимизации помех (короткие кабели, минимизация площади контура, экранирование высокоимпедансных узлов и т. д.), часто может быть получен работоспособный компромисс. Разумно также рассмотреть возможность использования двух высоковольтных усилителей и дифференциального управления самой нагрузкой, также называемого "мостовым режимом". Дополнительным преимуществом является удвоение пикового напряжения по сравнению с тем, что возможно с одним высоковольтным усилителем.



Полностью дифференциальное решение с дифференциальным функциональным генератором



Дифференциальное решение для функционального генератора с двумя независимо программируемыми несимметричными выходами



Полностью несимметричное решение ставит под угрозу целостность сигнала: держите кабели очень короткими

Рисунок 11. Рекомендуемые способы подключения генератора, усилителя высокого напряжения и нагрузки при наличии внешних помех

Список использованной литературы

[1] C. D. Mothenbacher and J. A. Conelly, Low-noise electronic system design, Wiley, New York, 1993