



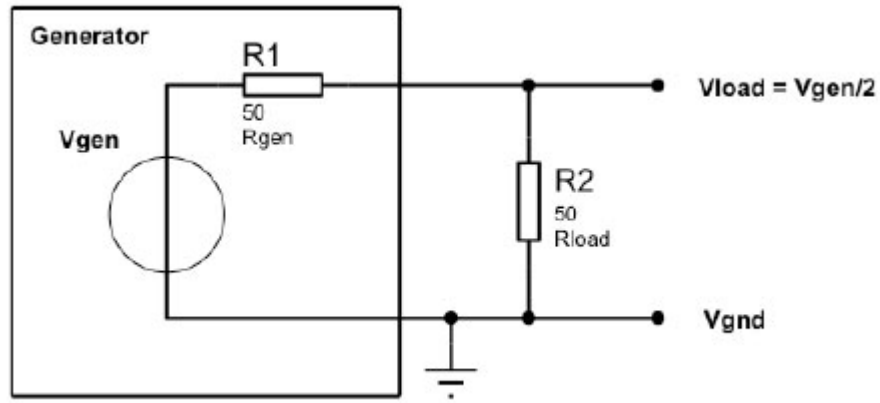
## Высоковольтные усилители и вездесущие 50 Ом: предостережения и преимущества

Замечание по применению Falco Systems, версия 1.0, сентябрь 2017 г.  
W. Merlijn van Spengen, PhD

### Подождите, мой сигнал увеличился/уменьшился вдвое !?

Каждый ученый-экспериментатор, работающий с электронными измерительными приборами, рано или поздно столкнется с необъяснимым фактором номер два. Видимо беспричинно, амплитуда электронного сигнала кажется удвоенной или сокращенной вдвое по амплитуде. Причина в том, что почти все электронное оборудование для высокочастотного использования (скажем, 1 МГц и выше) оснащено 50-омными входными и/или выходными резисторами. Правильный 50-омный интерфейс предотвращает отражения и искажения сигнала, вызванные конечной скоростью света, и соответствующим конечным временем, которое требуется электронному сигналу для прохождения длины кабеля; много об этом читайте далее. Однако, с этим преимуществом происходит постоянная путаница. Все эти 50 омные резисторы в используемом форм-факторе имеют два делителя напряжения, и неосторожному человеку легко случайно получить или потерять часть амплитуды сигнала.

Типичная ситуация изображена на рис. 1. Генератор функционального/произвольной формы сигнала имеет внутреннее выходное сопротивление 50 Ом, подключенное к выходному разъему BNC или SMA. К этому выходу подключается нагрузка, которая может быть, например, другой частью электронного оборудования, отдельной схемой или преобразователем. Резистор 50 Ом на выходе генератора образует делитель напряжения с нагрузкой. Генератор настроен на выходное напряжение  $V_{gen}$ , которое подключено к его внутреннему резистору 50 Ом. Если импеданс нагрузки очень высок, то напряжение на нем тоже будет  $V_{gen}$ . Если сопротивление нагрузки равно 50 Ом, как и резистор внутри генератора, то тогда напряжение будет  $V_{gen}/2$ . И оно, конечно, будет еще ниже при сопротивлении, близком к короткому замыканию. Экспериментально мы имеем доступ только к напряжению на нагрузке. Если мы установим  $V_{gen}$  на генераторе, его кажущийся выход через нагрузку может иметь напряжение  $V_{gen}$ ,  $V_{gen}/2$  или даже какой-то другой фракцией, в зависимости от свойств нагрузки.



**Рисунок 1.** Подключение 50-омного оборудования формирует делитель напряжения

если свойства нагрузки известны, то напряжение  $V_{load}$  на ней можно рассчитать с помощью уравнения делителя напряжения из внутреннего напряжения генератора  $V_{gen}$ :

$$V_{load} = R_{load} / (R_{gen} + R_{load}) * V_{gen} \quad (1)$$

Такая нагрузка выхода/входа очень важна, и о ней необходимо позаботиться для каждого измерения. К счастью, эффект прост, как показывает уравнение 1. Предостережение находится в  $V_{gen}$ . Некоторые производители показывают на дисплее функционального генератора напряжение  $V_{gen}$ , которое генерируется внутри устройства. Это напряжение, которое вы будете измерять на выходе, если используется высокоимпедансная нагрузка, скажем, открытое соединение, с помощью вольтметра или зонда высокоимпедансного осциллографа. Другие производители ожидают, что вы подключите нагрузку 50 Ом. В этом случае на дисплее отображается напряжение на нагрузке 50 Ом, причем внутреннее напряжение  $V_{gen}$  в два раза выше, чем указано на дисплее. Если к такому генератору подключить высокоимпедансный вольтметр, то измеренное выходное напряжение будет в два раза больше, чем указано на дисплее! Это имеет место, например, с большим количеством старых генераторов произвольной формы и импульсов HP/Agilent/Keysight. Более новое оборудование для генерации сигналов часто предлагает пользователю возможность установить выход для нагрузок "50 Ом" или "High-Z", так что пользователь может выбирать между этими двумя режимами индикации  $V_{gen}$  на дисплее, минимизируя возможность ошибочных показаний. Обратите внимание, что внутренний резистор 50 Ом подключен к выходу генератора независимо от выбранного режима. Резистор также будет находиться в режиме "High-Z"; только напряжение, указанное на дисплее, будет изменяться в соответствии с ожидаемой нагрузкой.

Все это означает, что фактическое выходное напряжение генератора с подключенной нагрузкой может быть  $2V_{gen}$ ,  $V_{gen}$  или  $V_{gen}/2$  (или даже другой долей), в зависимости от типа используемого генератора и импеданса нагрузки. Важно всегда проверять напряжение на нагрузке независимо, например, с помощью вольтметра или осциллографа, независимо от того, что говорит дисплей генератора сигналов; это особенно верно, если вы используете незнакомое (или чужое) оборудование. Источники питания обычно имеют незначительное выходное сопротивление. Здесь выходное напряжение на дисплее соответствует напряжению на нагрузке, если только нагрузка не потребляет столько тока, что достигается предел тока источника питания.

## Распространение и отражение сигналов

Причина, по которой резисторы 50 Ом используются так часто, заключается в следующем. Когда коаксиальный ("соак") кабель подключен к источнику напряжения  $V$ , выходное напряжение источника не достигает мгновенно дальнего конца кабеля. Как быстро напряжение источника перемещается вдоль по кабелю, определяется скоростью света, поскольку распространяющееся напряжение создает электромагнитную волну. Скорость распространения в кабеле немного меньше скорости света в свободном пространстве, на коэффициент  $\sqrt{\epsilon_r}$ , где  $\epsilon_r$ -диэлектрическая проницаемость внутренней изоляции кабеля. Пока напряжение не достигло дальнего конца кабеля, источник напряжения сбрасывает энергию в кабель, чтобы обеспечить энергию для распространения напряжения  $V$ . Чтобы обеспечить эту мощность, в кабель также подается ток. Величина требуемого тока  $I$  определяет "характеристическое сопротивление"  $R$  кабеля. Для коаксиальных кабелей этот характеристический импеданс представляет собой истинное сопротивление, обычно равное 50 Ом (стандарт для измерительного оборудования) или 75 Ом (стандарт для телевизионных кабелей). Это означает, что до тех пор, пока напряжение источника напряжения (после подключения кабеля) не достигнет дальнего конца, в кабель будет поступать ток  $I = V/R$  (закон Ома). Конечно, этот ток не будет течь вечно, если только кабель не будет бесконечно длинным. Как только напряжение достигнет конца кабеля, то что произойдет, зависит от того, что подключено к дальнему концу кабеля. Если кабель имеет короткое замыкание на дальнем конце, ток будет протекать через короткое замыкание и создавать отраженное напряжение противоположной полярности, которое отменяет исходную волну и возвращается к источнику напряжения. Если кабель представляет собой разомкнутую цепь, отраженная волна усилит уже имеющееся напряжение и временно удвоит напряжение на кабеле. Обе ситуации приводят к искажению формы волны и могут быть легко замечены, когда прямоугольная волна передается вдоль по кабелю, в то время как ее форма контролируется на ближнем и дальнем конце с помощью осциллографа. Чем быстрее фронты прямоугольной волны и чем выше частота прямоугольной волны, тем более искаженной становится прямоугольная волна. Точно так же в этих условиях амплитуда синусоидальных волн будет зависеть от их частоты. Однако, если к дальнему концу кабеля подключен 50-омный резистор, этот 50-омный резистор смотрит на распространяющееся напряжение точно так же, как 50-омный кабель бесконечной длины, и никаких отражений не произойдет. Сигнал остается нетронутым, как если бы он не сталкивался с концом кабеля; следовательно, напряжение выглядит точно так же, как и в источнике. Это является причиной использования 50-омного выходного и входного сопротивлений: при использовании согласующего 50-омного кабеля не будет отражений, и целостность сигнала сохраняется до очень высоких частот. Единственное, что делает кабель - это вызывает временную задержку между тем, когда сигнал вошел в кабель, и тем, когда он появляется на другой стороне. Существует очень проницательный фильм, доступный на BNC Instrumentation, где обсуждаемая выше теория кабеля демонстрируется с помощью простого эксперимента (рис. 2). Функциональный генератор соединен с кабелем, который имеет потенциометр (переменный резистор) на дальнем конце. По мере того, как резистор изменяется от короткого замыкания до 50 Ом и до высокого сопротивления, легко увидеть, что отражения появляются, исчезают и затем появляются снова в зависимости от значения сопротивления, устанавливаемого потенциометром.



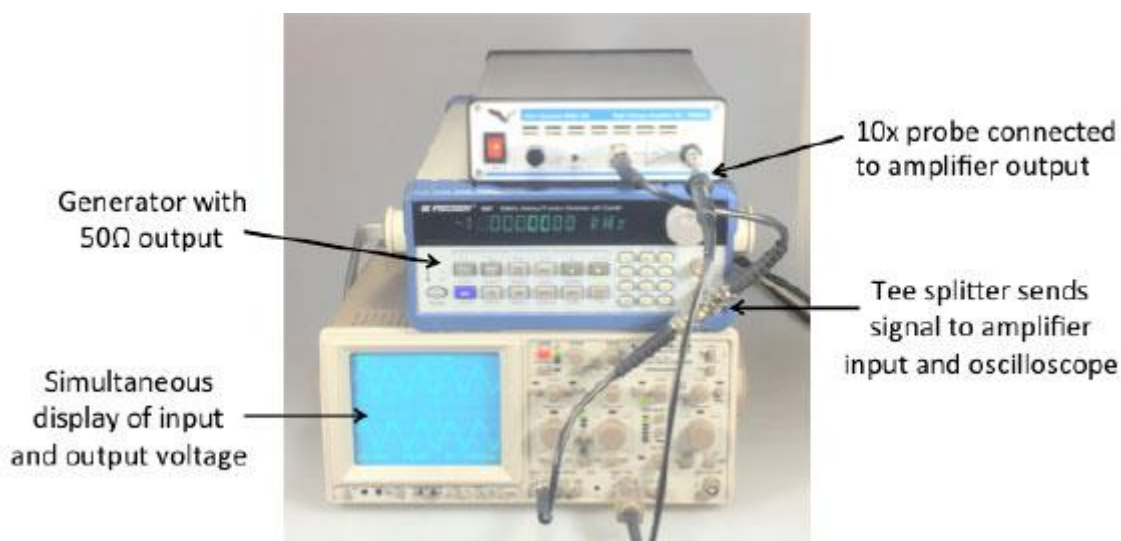
Рисунок 2. Демонстрация отражений в кабеле

### Входной импеданс высоковольтного усилителя

Различные высоковольтные усилители Falco Systems имеют широкий диапазон значений входного сопротивления. Эти различные входные сопротивления представляют различные условия нагрузки на генератор с его типичным выходным сопротивлением 50 Ом. Модели WMA-300 и WMA-320 являются высокоскоростными высоковольтными усилителями. Они имеют входное сопротивление 50 Ом, как и следовало ожидать от их максимальной рабочей частоты >1 МГц. Малошумные высоковольтные усилители WMA-200 и WMA-280 имеют входное сопротивление 1 кОм: эти относительно невысокие входные резисторы демонстрируют низкий уровень шума. Универсальные WMA-100 и WMA-005/-01/-02 высоковольтные усилители имеют входное сопротивление 100 кОм и представляют незначительную нагрузку на генератор. Доля напряжения, установленного на дисплее генератора, которая фактически будет присутствовать на входе усилителя, может быть вычислена с помощью уравнения 1. Именно эта доля (которая доступна на входе усилителя) будет усилена указанным коэффициентом усиления усилителя! В таблице показана доля сигнала генератора, доступная на входе усилителя, предполагающая сопротивление источника генератора 50 Ом.

Falco Systems amplifier model	Input resistance	Voltage divider fraction	Amplification factor
<b>WMA-300, WMA-320; high speed</b>	50Ω	0.5	50x
<b>WMA-200, WMA-280; low noise</b>	1000Ω	0.95238	20x
<b>WMA-100, -005, -01, -02; general purpose</b>	100kΩ	0.9995	20x

Невозможно переоценить, насколько важно на самом деле измерить напряжение сигнала на входе высоковольтного усилителя перед фактическим использованием. На рис.3 показана простая измерительная установка, которая позволяет получить входное и выходное напряжения и является предпочтительным способом проверки коэффициента усиления высоковольтного усилителя.

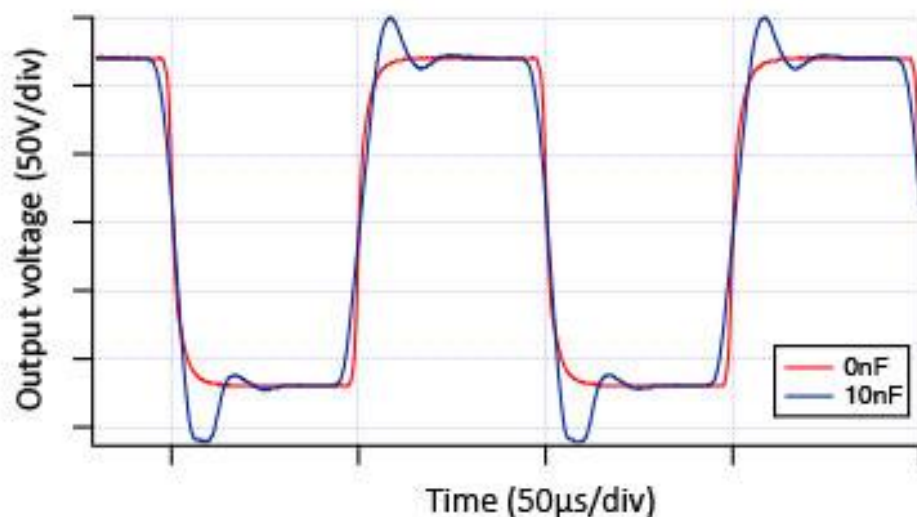


**Рисунок 3.** Установка для измерения коэффициента усиления высоковольтного усилителя путем одновременного отображения входного и выходного напряжений усилителя

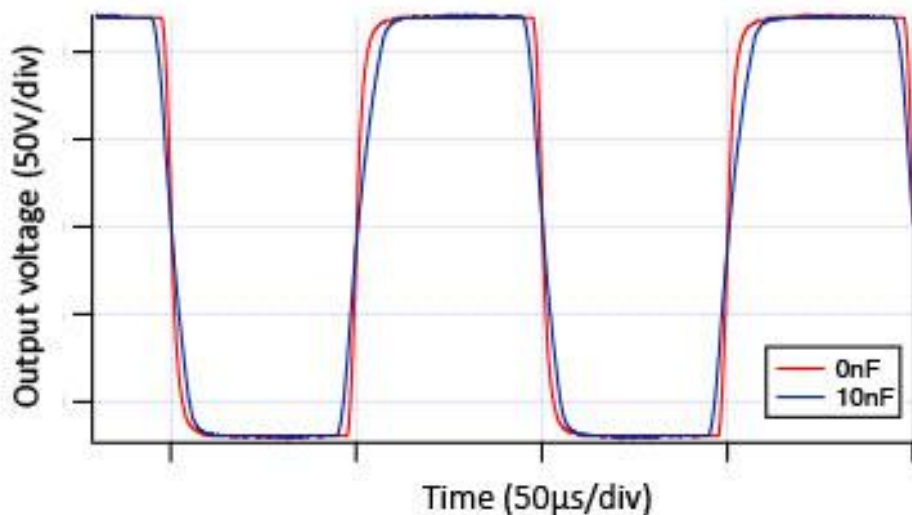
### **Высоковольтные усилители с выходным сопротивлением 50 Ом (или аналогичным)**

Сами высоковольтные усилители часто также имеют выходное сопротивление. Это сопротивление существует главным образом для предотвращения перегрузки усилителя в условиях емкостной нагрузки. Отрицательная обратная связь используется в этих усилителях для оптимизации скорости, шума и точности усиления, но будет хорошо работать только в том случае, если выходной сигнал усилителя не задерживается слишком сильно во времени по сравнению с входным сигналом. Емкостная нагрузка на выходе усилителя вызовет такую временную задержку. Конденсатор должен быть заряжен током, протекающим в нем, чтобы изменить напряжение на нем, что требует времени. Поскольку это время становится больше с увеличением емкости, контур отрицательной обратной связи усилителя не может работать в такт, и появляются перегрузки. Выходной резистор в усилителе "отделяет" выход усилителя от нагрузки и предотвращает возникновение этих перегрузок. Разница видна в поведении высоковольтного усилителя WMA-200, имеющего выходной резистор 50 Ом, и WMA-280, не имеющего этого резистора и имеющего выходное сопротивление почти 0 Ом. Влияние емкостной нагрузки на оба усилителя проиллюстрировано на рис. 4.





WMA-280 без выходного резистора



WMA-200 с выходным резистором 50 Ом

**Рисунок 4.** Перенапряжение высоковольтного усилителя из-за нагрузочного конденсатора 10 нФ: эффект внутреннего выходного резистора

И снова выходной резистор будет формировать делитель напряжения с нагрузкой, но поскольку нагрузка высоковольтного усилителя обычно имеет высокое сопротивление, эффект обычно незначителен. Выходной резистор высоковольтного усилителя может быть 50 Ом, так как это значение обычно работает хорошо, но оно не обязательно должно быть 50 Ом.

Резистор не предназначен для настройки 50-омной выходной - 50-омной входной системы, чтобы полностью предотвратить отражение в кабеле, как описано выше. Это видно из следующего. Если бы высоковольтный усилитель WMA-200 с выходным сопротивлением 50 Ом и выходным током 275 мА использовался в 50-омной системе с подключенной к выходу нагрузкой 50 Ом, то максимальное выходное напряжение было бы ограничено максимальным током до  $V = I * R = 0,275 \text{ A} * 50 \text{ Ом} = 13,75 \text{ В}$ . Это бесполезно, поскольку высоковольтный усилитель был специально разработан для обеспечения выходного напряжения до 175 В. Кроме того, рассеянная мощность в нагрузке 50 Ом с высоким

напряжением на ней была бы чрезмерной. Поэтому рекомендуется использовать более высокое сопротивление нагрузки.

Для высокоскоростных высоковольтных усилителей, таких как WMA-300, недостаток заключается в первую очередь в том, чтобы предотвратить превышение прямоугольных сигналов в условиях емкостной нагрузки, вызванное внутренним контуром отрицательной обратной связи в этих усилителях. Выходное сопротивление 50 Ом здесь имеет то преимущество, что отражения кабеля гасятся за один проход от усилителя к нагрузке и обратно. Но это не должно быть неправильно истолковано как стандартный выход 50 Ом, так как максимального выходного тока недостаточно, чтобы привести нагрузку 50 Ом к высокому напряжению. Рекомендуется нагрузка с более высоким импедансом, а при использовании с высокочастотными сигналами рекомендуется использовать короткий кабель от усилителя к нагрузке.

Существует некоторая выгода в отражении внутри кабеля при использовании выходного сопротивления усилителя 50 Ом, напряжение будет передаваться по кабелю к нагрузке, частично отражаться, перемещаться обратно к усилителю и снова достигнет сопротивления 50 Ом усилителя. Отражение будет там видеть согласованные 50 Ом и не будет многократно отражаться обратно между нагрузкой и усилителем, что приведет к дальнейшему ухудшению формы сигнала. Это означает, что отражения рассеиваются усилителем после того, как сигнал проходит один проход к нагрузке и обратно, без дальнейшего ухудшения сигнала после этого. Конечно, использование короткого кабеля все еще важно, потому что одно отражение действительно происходит.

## **Заключение**

Оборудование с входным и выходным сопротивлением 50 Ом используется с соответствующими кабелями 50 Ом для обеспечения свободного от отражения пути сигнала для обеспечения максимальной целостности сигнала на высоких частотах. Важно всегда проверять фактические амплитуды напряжения, присутствующие в такой системе, с помощью осциллографа. Причина заключается в том, что, например, функциональные генераторы не имеют стандартизированного способа борьбы с падениями напряжения, вызванными делителями напряжения 50 Ом - 50 Ом, созданными этими сопротивлениями. Некоторые источники напряжения будут отображать напряжение разомкнутой цепи, некоторые - напряжение в нагрузке 50 Ом, и это следует проверять со всем незнакомым оборудованием.

Высоковольтные усилители также иногда имеют выходное сопротивление 50 Ом, но это сопротивление в первую очередь предназначено для предотвращения перенапряжения для прямоугольных сигналов в условиях емкостной нагрузки, вызванного внутренним контуром отрицательной обратной связи в этих усилителях. Выходное сопротивление 50 Ом в данном случае имеет то преимущество, что отражения кабеля затухают за один проход от усилителя к нагрузке и обратно. Но его не следует неверно истолковывать как стандартный выходной сигнал 50 Ом, так как максимальный выходной ток недостаточен для подведения нагрузки 50 Ом к высокому напряжению. Рекомендуется нагрузка с более высоким импедансом, и при использовании с высокочастотными сигналами рекомендуется использовать короткий кабель от усилителя к нагрузке.