

Высоковольтные высокоскоростные усилители WMA-300: насколько они быстры на самом деле?

W . Merlijn van Spengen, PhD

Март 2016

Высокоскоростной высоковольтный усилитель: критерии эффективности

Быстродействие высоковольтного усилителя определяется не только полосой пропускания и скоростью нарастания, но и максимальным устойчивым выходным током усилителя и емкостью нагрузки. В данной статье рассматриваются технические характеристики высоковольтных усилителей, необходимые для определения того, подходят ли они для определенной комбинации усилитель-нагрузка. Соответствующий калькулятор выходного тока может быть использован для оценки тока и скорости нарастания, необходимых для возбуждения определенной емкостной нагрузки. Он доступен по адресу: http://www.falco-systems.com/high_voltage_amplifier_current_calculator.php

Ширина полосы пропускания

Основными характеристиками, описывающими скорость линейного высоковольтного усилителя, такого как Falco Systems WMA-300, являются его полоса пропускания большого сигнала, полоса пропускания малого сигнала и скорость нарастания. Полоса пропускания большого сигнала показывает, какова амплитуда выходного напряжения высоковольтного усилителя для заданной входной амплитуды синусоидальной волны в зависимости от частоты, которая приводит его к максимальному выходному напряжению (рис. 1). Поскольку выходное напряжение высоковольтного усилителя постепенно падает выше определенной переходной частоты, единственное магическое число под названием "полоса пропускания", составляющее столько-то кГц, полезно только в том случае, если также указано уменьшение полосы пропускания полной мощности высоковольтного усилителя на этой частоте. Она часто выражается как точка -3 дБ, где амплитуда становится ниже в 0,707 раза максимальной амплитуды на низких частотах, но это не всегда так, как указано, поэтому нужно быть осторожным с единственным числом. График, показывающий максимальное выходное напряжение в зависимости от частоты, передает гораздо больше информации. Полоса пропускания малого сигнала (иногда, путая, также называемая "полосой пропускания") - это частотная характеристика высоковольтного усилителя при некотором очень низком выходном напряжении, например 1% от максимальной мощности. Эта полоса пропускания обычно превышает полосу пропускания большого сигнала на значительную величину.

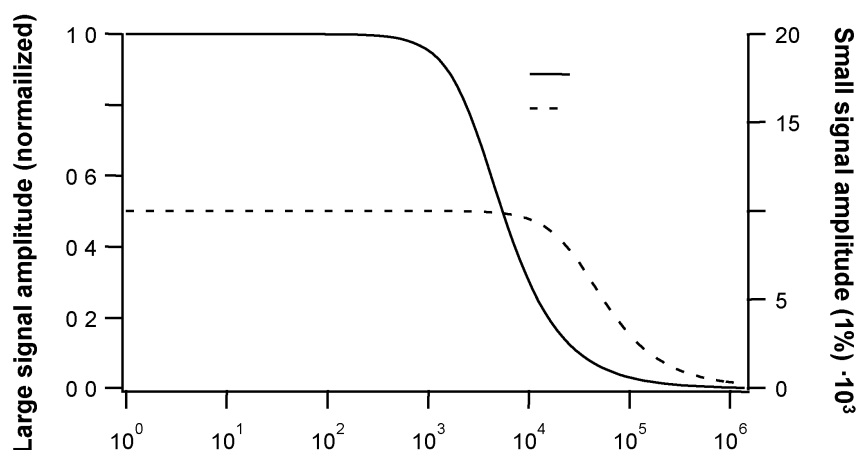


Рисунок 1. Ширины полос пропускания большого сигнала и малого сигнала усилителя высокого напряжения могут отличаться

Переходная характеристика и скорость нарастания выходного напряжения

Переходная характеристика - это время, за которое усилитель должен перейти от 10% до 90% от общего выходного напряжения в ответ на скачок напряжения на входе (рис. 2). Соответствующая скорость нарастания высоковольтного усилителя является довольно тонкой характеристикой. Это самое быстрое изменение напряжения, которое может произвести выход, и поэтому это наклон самой быстрой части кривой на Рис. 2. Он задается в В/мкс, количестве вольт напряжения, на которое выход может подняться (или упасть) за одну микросекунду, если бы он мог продолжать расти в течение одной микросекунды. Эта спецификация, очевидно, ограничивает способность усилителя генерировать высоковольтные импульсы с резкими восходящими и нисходящими фронтами (рис. 3), но также является ограничивающим фактором полосы пропускания для синусоидальных или произвольных сигналов. Это можно увидеть следующим образом. Наибольшая скорость изменения выходного напряжения синусоидальной волны приходится на пересечение значения 0 В (рис. 4). Чем выше частота, тем быстрее там должно подниматься напряжение, чтобы предотвратить искажение синусоиды. Если высоковольтный усилитель не может следовать из-за его ограниченной скорости нарастания, синусоидальная волна будет искажена до треугольника, и ее амплитуда будет ниже, чем на низких частотах. Максимальное пиковое выходное напряжение синусоидальной волны V_{pp} связано со скоростью нарастания S : $V_{pp} = S/nf$, где f -частота синусоидальной волны.

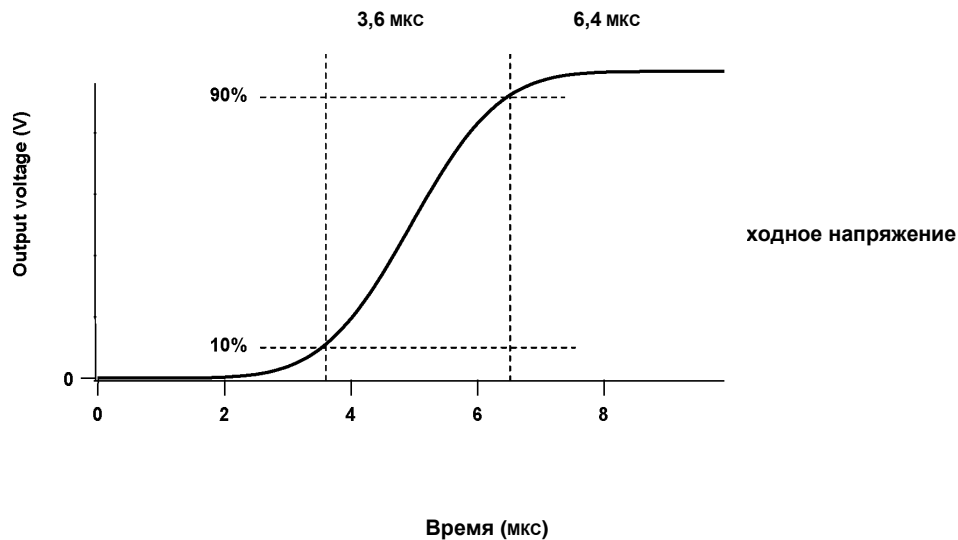


Рисунок 2. Переходная характеристика высоковольтного усилителя - это время, необходимое для изменения выходного сигнала от 10% до 90% амплитуды. В этом примере скорость нарастания (самый быстрый подъем кривой) может быть оценена как $80 \text{ В} / 2,8 \text{ мкс} = 29 \text{ В/мкс}$ на основе переходной характеристики. На самом деле, скорость нарастания немного выше расчетной, так как самый быстрый подъем (в середине) выше, чем у полного перехода 10 - 90%.

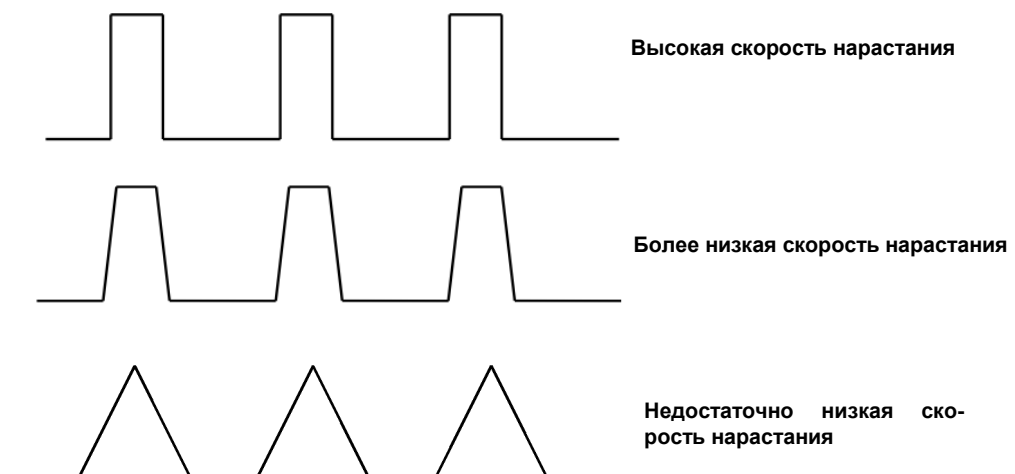


Рисунок 3. В зависимости от скорости нарастания усилителя, набор импульсов может быть либо усилен неискаженным, либо серьезно искаженным.

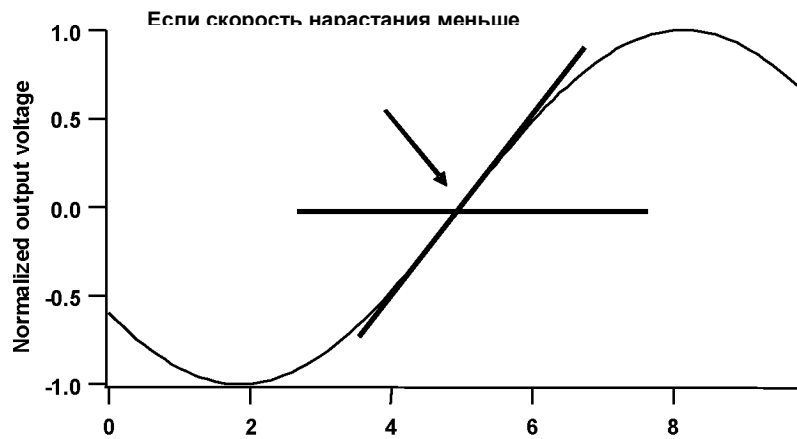


Рисунок 4. Если скорость нарастания усилителя недостаточна, синусоидальные волны также искажаются. Чем выше частота и амплитуда сигнала, тем важнее скорость нарастания высоковольтного усилителя.

Скорость нарастания в зависимости от токовой - емкостной нагрузки

В приведенном выше обсуждении предполагалось, что нагрузка на выходе высоковольтного усилителя никак не влияет на поведение усилителя. Это относится к очень малым емкостным или резистивным нагрузкам. Однако типичные нагрузки для высоковольтного усилителя являются высоко емкостными, такими как PZT (пьезо) преобразователи, EO (электрооптические) модуляторы и, в меньшей степени, коаксиальные кабели (кабель RG58 имеет около 100 пФ на метр!). Чтобы иметь возможность довести выходное напряжение высоковольтного усилителя до определенного уровня, эта составляющая на выходе (представляющая собой электронный конденсатор) должна быть заряжена до этого напряжения (рис. 5). Если высоковольтный усилитель имеет предел тока IL ампер, он может заряжать конденсатор C только с определенной максимальной скоростью. Максимальное повышение напряжения за микросекунду (опять же скорость нарастания, но теперь определяется максимальным током и нагрузочным конденсатором, поэтому мы называем его SA) тогда $SA = IL/C$, что может при больших значениях емкости быть значительно ниже собственной скорости нарастания усилителя S , рассмотренной выше. Соответственно уменьшается полоса пропускания синусоидальных сигналов. Еще хуже, если высоковольтный усилитель имеет предел тока, но перегревается, когда максимальный ток тянется непрерывно, он сломается или (предпочтительно) отключится через некоторое время при подаче высокочастотного, высоковольтного выходного сигнала, даже если нагрузка на низких частотах незначительна. Это реальная проблема с усилителями, которые имеют высокий пиковый выходной ток, но гораздо более низкую максимальную среднюю характеристику тока.

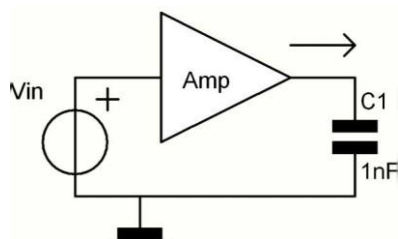


Рисунок 5. Емкостная нагрузка на выходе высоковольтного усилителя может изменять его скорость нарастания

Неустойчивости и превышения из-за емкостной нагрузки

Многие высоковольтные усилители имеют внутреннюю схему, которая выглядит как высоковольтная версия общего операционного усилителя (опамп, рис. 6). Конденсатор на выходе такой схемы в сочетании с выходным сопротивлением операционного усилителя создает временную задержку выходного напряжения, поскольку конденсатор должен быть заряжен первым, как обсуждалось выше. Это означает, что напряжение на входе (-) операционного усилителя также задерживается, что может заставить сигнал на входах (+) и (-) на определенных

частотах быть по фазе на 180 градусов, а не в фазе. Если это происходит с определенным значением емкости на частотах, значительно превышающих частоту, на которой усилитель имеет усиление меньше 1, это не проблема, но когда это происходит на частоте, на которой усилитель все еще способен усиливать сигнал, схема эффективно превращается в генератор. Результатом этого является, по крайней мере, превышение или дребезг на выходе, а в крайних случаях спорадические или непрерывные колебания (рис. 7). Если значение конденсатора выбрано достаточно большим, этот эффект снова исчезает (хотя и с резко уменьшенной полосой пропускания в результате). Это означает, что многие усилители имеют определенное значение емкостной нагрузки, где они с наибольшей вероятностью генерируют паразитные сигналы. Только при размещении выходного каскада вне контура обратной связи (рис. 8) в конструкции усилителя высокого напряжения этот эффект обходится стороной.

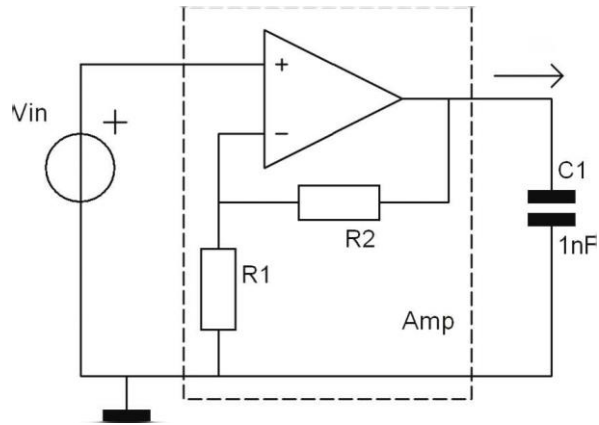


Рисунок 6. Большинство высоковольтных усилителей имеют внутреннюю структуру, аналогичную структуре операционного усилителя. Определенные значения емкости нагрузки могут привести к нестабильности усилителя

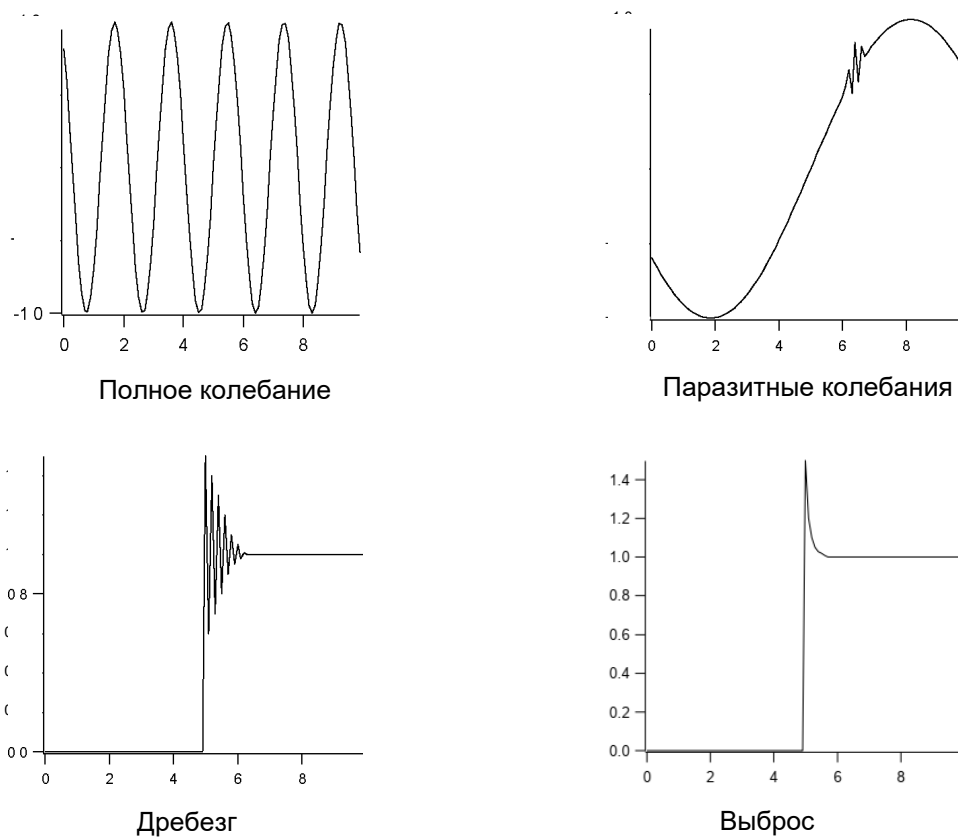


Рисунок 7. Нестабильность усилителя проявляется на осциллографе по-разному

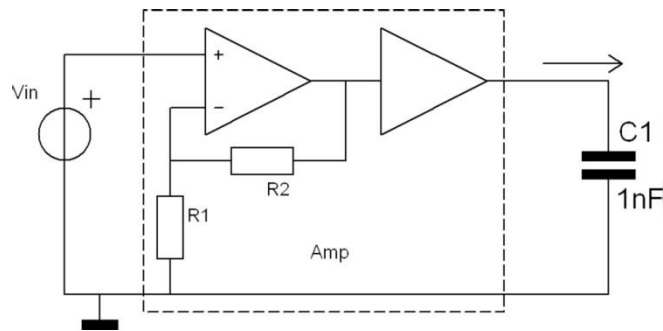


Рисунок 8. Добавляя независимый выходной каскад, который не находится в контуре обратной связи, устраняются нестабильности обычного высоковольтного усилителя при определенных условиях емкостной нагрузки

Пример с цифрами, используя высокоскоростной высоковольтный усилитель Falco Systems WMA-300 в следующем разделе, мы проиллюстрируем принципы, рассмотренные выше, сравнивая их со спецификациями реального высоковольтного усилителя Falco Systems WMA-300 (рис. 9). Он сделан для очень высокоскоростной работы и, следовательно, имеет очень большую полосу пропускания мощности от 0 до 5 МГц (-3 дБ) и скорость нарастания 2000В/мкс. Основное применение находится в МЭМС (микроэлектромеханических системах) или ЭО-модуляторах, где соединительные коаксиальные кабели обычно являются основной емкостной нагрузкой (~100 пФ), но поучительно посмотреть, что происходит, когда емкостная нагрузка увеличивается до значений, характерных для пьезопреобразователей (~нФ). Полоса пропускания большого сигнала WMA-300 с выходным напряжением 300 Впп (максимальная) приведена на рис. 10. Скорость нарастания измеряется путем контроля времени нарастания импульса на осциллографе (рис. 11). Характеристики полосы пропускания и скорости нарастания приводят к хорошей прямоугольной волне 300 Впп 100 кГц (рис. 12) с быстрыми поднимающимися и падающими фронтами без нагрузки. Эта форма сигнала искажается, если мы добавим значительную емкость нагрузки (рис. 13). Для 150 пФ эффект незначителен, но когда мы запитываем несколько нанофард, скорость значительно снижается. Причина заключается в ограничении тока 300 мА WMA-300, которое ограничивает скорость, с которой конденсатор может быть заряжен, и, следовательно, скорость нарастания нагрузки SA меньше для нагруженных условий. Обратите внимание, что нет емкостной нагрузки, при которой система создает перерегулирование. В отличие от многих других усилителей, в WMA-300 использовалась конфигурация на рис. 8, которая эффективно предотвращает любую нестабильность, вызванную нагрузкой.



Рисунок 9. Усилитель высокого напряжения с широкой полосой пропускания, The Falco Systems WMA-300

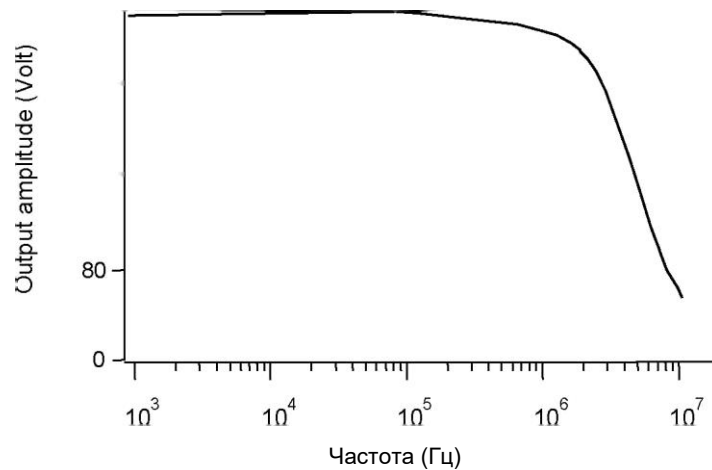


Рисунок 10. Ширина полосы пропускания большого сигнала WMA-300

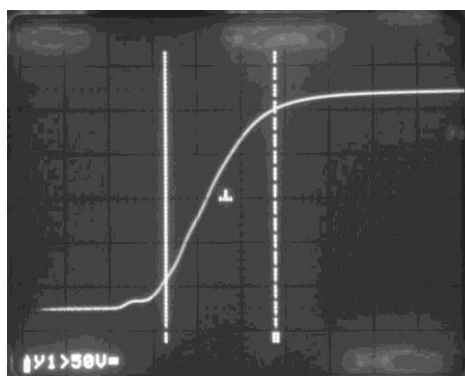


Рисунок 11. Скорость нарастания WMA-300 получается путем исследования времени переходной характеристики, которое требуется для импульса напряжения от -150 до +150 В, чтобы перейти от амплитуды 10 % до 90 %. На экране осциллографа отметки 0%, 10%, 90% и 100% слева используются для правильного выполнения измерений. 240V за 125 нс дает консервативную оценку 1920 В/мкс.

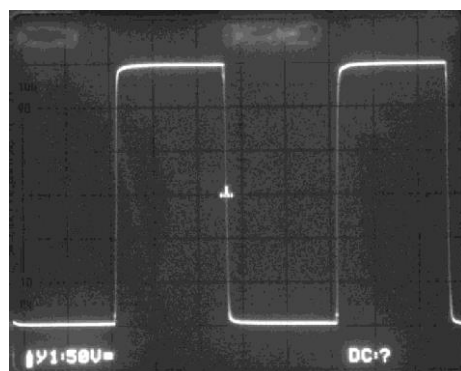


Рисунок 12. Изображение осциллографа усиленной неискаженной прямоугольной волны 100 кГц, 300 Впп без нагрузки на выходе усилителя высокого напряжения

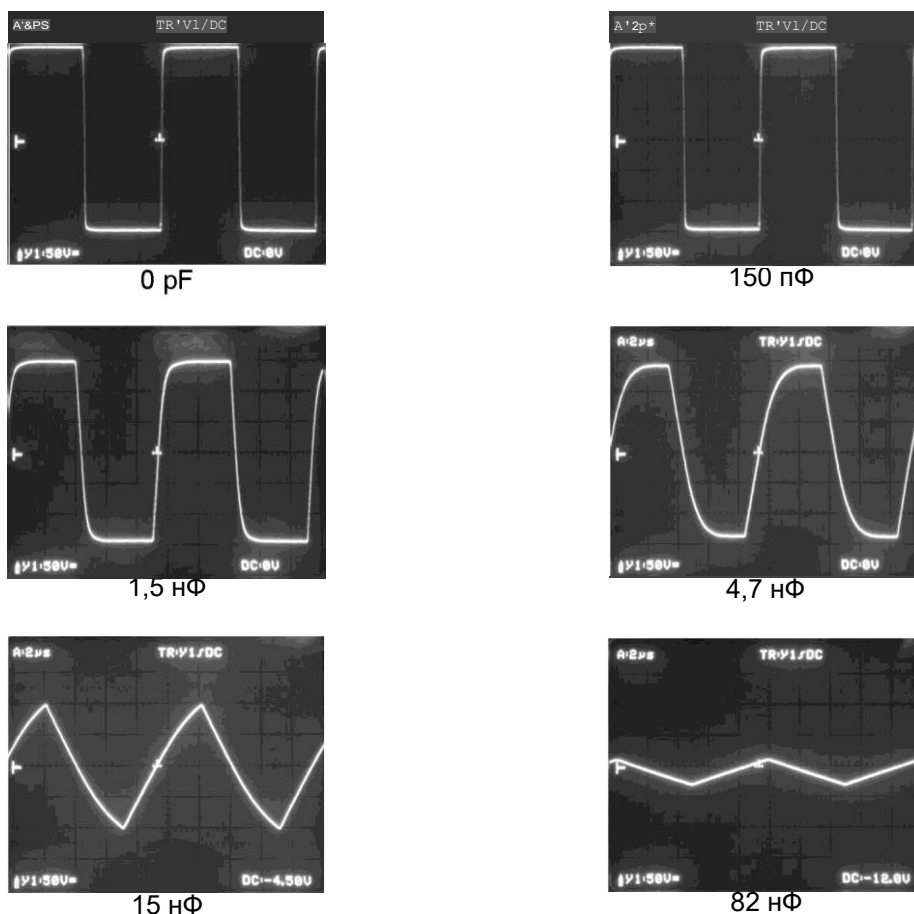


Рисунок 13. Загрузка высоковольтного усилителя различными конденсаторами на его выходе ограничивает скорость

Заключение

Чтобы выбрать быстродействующий высоковольтный усилитель для определенной цели, нужно смотреть не только на полосу пропускания и/или скорость нарастания усилителя, но и на ожидаемую емкостную нагрузку, максимальный *устойчивый* выходной ток (в отличие от пикового тока) и возможность неустойчивости и перерегулирования напряжений, повреждающих нагрузку. Контроль над всем этим необходим для достижения оптимального результата.