

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

В.В. Репков

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСИЛИТЕЛИ
НА ТРАНЗИСТОРАХ

ИЯФ 2010-32

Новосибирск
2010

Высоковольтные линейные усилители на транзисторах

В.В. Ренков

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В работе рассмотрены принципы построения и примеры реализации линейных высоковольтных (до десяти киловольт) усилителей на транзисторах. Был предложен вариант построения усилителей с параллельным управлением полевыми транзисторами, в котором быстродействие каскада не зависит от количества транзисторов (от размаха выходного напряжения.) Предложена оригинальная схема гальванически развязанного драйвера.

1. Введение

В работах, связанных с использованием электронно-лучевых пушек, в экспериментах с электронным охлаждением, в задачах электростатической фокусировки, приходится стабилизировать и управлять напряжением в большом диапазоне.

Параметры модуляторов определяются конкретным приложением. Обычно нагрузкой подобного усилителя является емкость управляющей сетки, иногда приходится учитывать сопротивление сетка-катод.

Так, например, диапазон изменения напряжения при стабилизации тока в электронно-лучевой пушке может достигать 6 кВ при постоянном токе сетки не более 2 мА.

При стабилизации тока в ИЛУ-8 потребовался модулятор с напряжением до 3.6 кВ и током до 0.5 А.

Во всех этих случаях диапазон изменения напряжения на выходе усилителя составляет несколько киловольт, поэтому в качестве регулирующих элементов часто используются лампы со всеми присущими лампам недостатками, на которых мы здесь останавливаться не будем.

В препринте рассматриваются решения, позволяющие использовать для построения подобных усилителей полевые транзисторы с последовательным включением.

Так как промышленностью не выпускаются маломощные и достаточно высокочастотные транзисторы на напряжения больше 1500 вольт, необходимо включать эти транзисторы последовательно. При этом возникает две проблемы. Во-первых, надо позаботиться о том, чтобы напряжение на каждом транзисторе не превышало его паспортных значений, во-вторых, нужна схема управления транзисторами в цепочке. Особенно это важно, если поставлена цель, сделать широкополосный усилитель. В работе рассматриваются варианты высоковольтных схем с полевыми транзисторами.

Напомним некоторые особенности полевого транзистора.

Каждый транзистор имеет ряд емкостей, которые определяют его частотные свойства. Они изображены на рисунке 1.

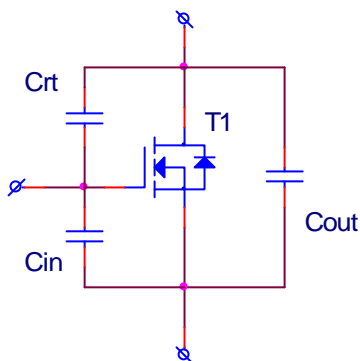


Рис. 1. Емкости транзистора.

Быстродействие полевого транзистора ограничивается емкостями, которые изображены на рисунке. Основные емкости это: C_{in} – емкость затвора (входная емкость), C_{out} – выходная емкость, и C_{rt} – емкость сток-затвор. На практике обычно оперируют эквивалентной входной емкостью $C = C_{in} + |A| \cdot C_{rt}$, где A – коэффициент усиления схемы по напряжению. Такое увеличение входной емкости перехода сток-затвор называется эффектом Миллера. Он связан с тем, что напряжение на конденсаторе C_{rt} в $(1 + |A|)$ раз превышает входное. Для высоковольтных транзисторов, которые мы использовали (2SK1317), эти емкости соответственно равны $C_{in} = 990$ пФ, $C_{rt} = 60$ пФ, $C_{out} = 125$ пФ.

Иногда удобнее использовать не входную емкость как таковую, а величину заряда, который требуется для перезарядки данной емкости.

Так, если напряжение на истоке транзистора должно поменяться на 1200 вольт, то для переключения транзистора заряд на емкости C_{rt} надо изменить на величину: $Q = 60 \text{ пФ} \cdot 1200 \text{ В} = 72 \text{ нКл}$.

При последовательном включении транзисторов надо позаботиться о том, чтобы напряжение на транзисторах распределялось равномерно, а главное, чтобы напряжение не превысило максимально допустимое. Проще всего это сделать, если включить параллельно каждому транзистору какой-либо ограничитель напряжения. Это может быть варистор или лавинный диод.

Все ограничители обладают определенной емкостью (варисторы СН-2 на 1200 вольт – 120 пФ), что увеличивает выходную емкость транзистора.

2. Модулятор для ускорителя ИЛУ-8

Для управления ускорителем ИЛУ-8 был сделан высоковольтный усилитель с максимальным напряжением 3600 вольт. Выходной каскад собран на трех последовательно включенных полевых транзисторах. Режим

работы ускорителем импульсный. Частота повторения – не более 50 Гц. Усилитель должен обеспечивать быстрый фронт включения и стабилизацию тока в течении 0.5 мс.

На рисунке 2. показана схема высоковольтного каскада.

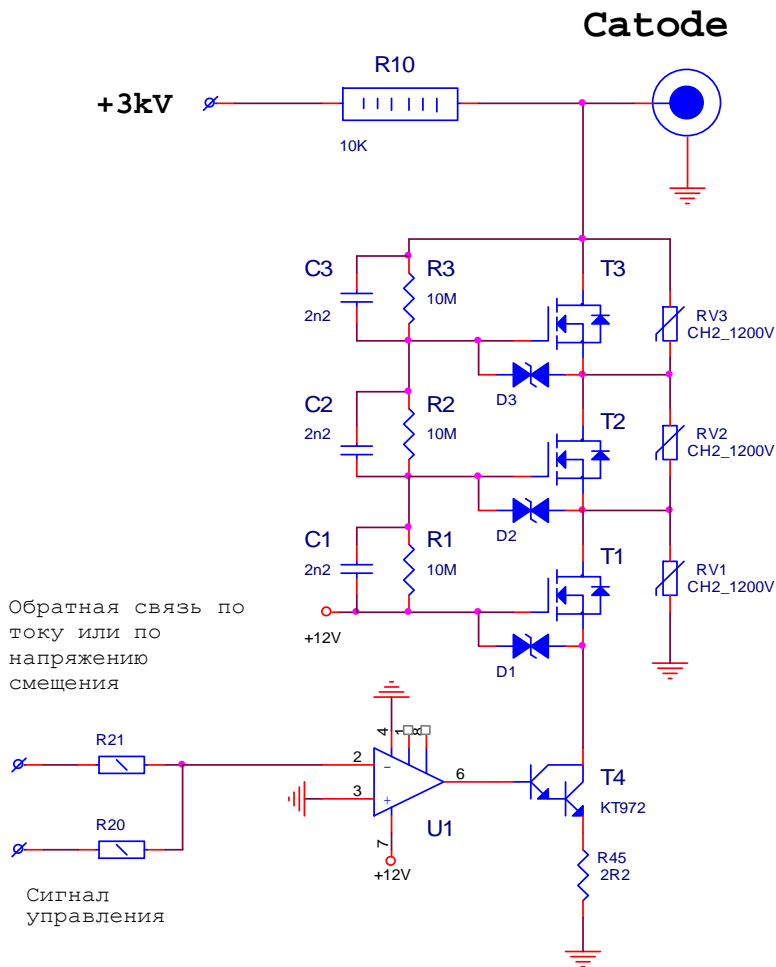


Рис. 2. Каскодная схема.

Как видно из рисунка, высоковольтный усилитель построен по каскодной схеме.

В этой схеме транзистор T4 – биполярный, он включен по схеме с общим эмиттером, остальные транзисторы – полевые, включены последовательно с общим затвором.

Для защиты транзисторов от перенапряжения параллельно каждому транзистору включен варистор СН-2.

С помощью резисторов R1-R3 устанавливается рабочая точка для каждого транзистора по постоянному току.

Быстродействие каскада в основном определяется тем, насколько быстро перезаряжаются входные и выходные емкости полевых транзисторов. Для быстрой перезарядки входных емкостей, резисторы R1-R3 шунтируются конденсаторами C1-C3.

Выбор этих емкостей противоречив. Они должны быть достаточно большими, чтобы обеспечивать перезаряд входных емкостей транзистора, в то же время, эти емкости сами являются нагрузкой каскада, и ограничивают его быстродействие.

Недостаточная величина емкостей C1-C3 приводит к тому, что ограничивается амплитуда фронта сигнала.

Можно показать, что остаточное напряжение на каскаде, состоящем из N транзисторов (после отработки фронта) будет равно:

$$U = (N-1)/N * U_0 * C_{rt}/C_I,$$

где: N – количество полевых транзисторов в каскаде;

U₀ – начальное напряжение на каскаде;

C_I – шунтирующая емкость.

Для данной схемы при емкостях C1, C2, C3 = 2200 пФ, остаточное напряжение будет равно 65 В.

Надо обратить внимание, что для перезаряда этих емкостей может потребоваться приличная мощность. Для формирования фронта полной амплитуды (3600 вольт), следует затратить энергию 4.7 мДж.

Для непрерывной работы на частоте 10 кГц потребуется мощность 95 Вт.

В данном случае с этим потерями можно мириться, поскольку ускоритель работает в импульсном режиме и амплитуда переменного напряжения в режиме стабилизации невелика.

По сравнению с ламповой схемой транзисторная схема обладает более высоким быстродействием, особенно это важно во время включения пучка (ускорителя) [1]. Время включения пушки составило не более 100 мкс. После этого, в течении 0.5 мс модулятор стабилизирует заданный ток с полосой регулирования не менее 10 кГц. Ток каскада до 1 А.

3. Модулятор для электронно-лучевой сварки

Аналогичная схема используется в модуляторе для управления электронно-лучевой сваркой. В отличие от предыдущей схемы, в модуляторе для сварки сигнал подается на управляющую сетку (а не на катод), поэтому, средний ток определяется только утечками изоляторов и он, при исправной пушке, не превосходит 1 мА. Режим работы – непрерывный. Нагрузкой

модулятора является, в основном, емкость подводящего кабеля и схем защиты. Для пушки напряжение на сетке может меняться в диапазоне 0 В – 6 кВ. Схема симметричная, в ней используются два одинаковых каскада.

На рисунке 3 приведена упрощенная схема модулятора для сварки, а на рисунке 4 – фотография платы.

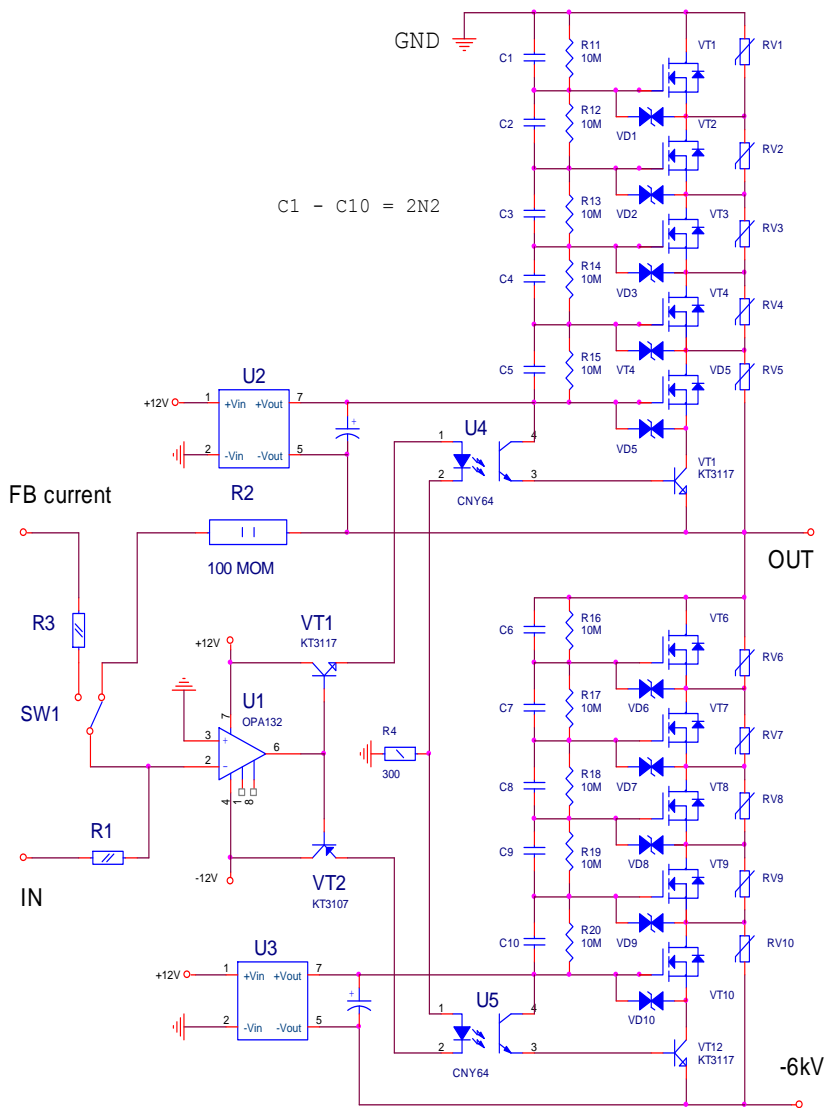


Рис.3. Схема модулятора для сварки.

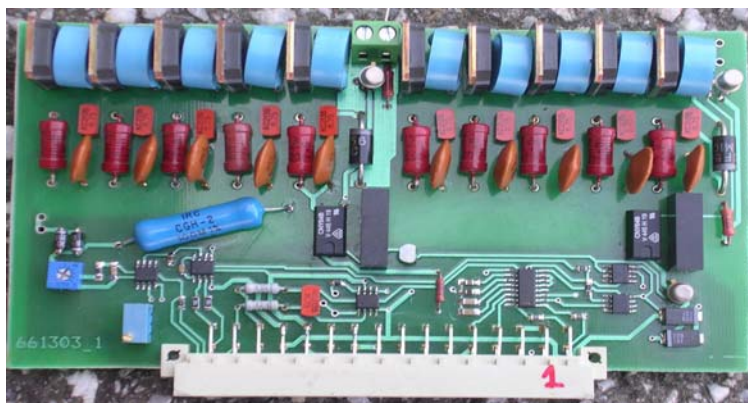


Рис. 4. Модулятор для сварки.

Основу схемы составляют два одинаковых каскада, каждый из которых включает в себя пять последовательно включенных полевых транзисторов.

В связи с тем, что напряжение питания отрицательное, управлять обоими каскадами приходится через оптроны U4, U5. Для питания выходных транзисторов оптронов используются DC-DC конвертеры с изоляцией 6 кВ (U2, U3).

Микросхема U1 – усилитель сигнала ошибки. На ее вход поступает управляющий сигнал через резистор R1, а обратная связь берется либо с выхода усилителя через резистор R2, либо с датчика тока через резистор R3.

Как было описано выше, емкости C1 – C10 нужно брать такой величины, чтобы обеспечивать необходимый перепад напряжения на выходе усилителя.

Самым жестким режимом работы электронно-лучевой сварки является режим, когда надо быстро включить максимальный ток. При этом усилитель должен обеспечить перепад от -6 кВ, до напряжения, близкого к нулю. Номинал емкостей C1 – C10 выбран 2200 пФ. Эти емкости обеспечивают остаточное напряжение после фронта не более 100 вольт и полосу пропускания усилителя около 1 кГц.

Отметим, что емкости C1 – C10 почти в 10 раз увеличили выходную емкость каскада, поскольку выходная емкость транзистора равна $C_{out} = 125$ пФ и емкость варистора равна 120 пФ.

Кроме того, как уже упоминалось ранее, перезаряд этих емкостей требует приличной мощности от источника питания. Так, не трудно показать, что при работе усилителя на частоте 1 кГц и с полной амплитудой сигнала, для перезаряда емкостей требуется мощность около 15 ватт.

Отметим еще одну особенность. При последовательном включении транзисторы открываются (закрываются) последовательно, потому

приходится учитывать задержки включения и выключения каждого транзистора.

Итог. Схема с последовательным управлением полевыми транзисторами проста и эффективно работает на относительно низких частотах. Частотные свойства каскада ухудшаются при увеличении количества транзисторов в цепочке.

4. Схема с параллельным управлением транзисторами

Из вышесказанного следует, что для построения более высокочастотного усилителя надо управлять всеми транзисторами одновременно, иными словами, для управления каждым транзистором нужен гальванически изолированный драйвер.

Для гальванической развязки может использоваться оптрон или трансформатор.

Схема с оптроном требует источника питания и усилителя под потенциалом истока полевого транзистора, поскольку оптрон не передает необходимую мощность (ток) для управления затвором.

Было решено произвести испытание трансформаторного драйвера. Поскольку, трансформатор не передает постоянную составляющую, для передачи аналогового сигнала используется высокочастотная несущая.

Трансформаторный драйвер должен передавать необходимую мощность, иметь малую проходную емкость, иметь необходимую изоляцию и быть технологичным в изготовлении.

Наиболее просто удовлетворить этим требованиям – это использовать трансформатор, у которого первичная (или вторичная) обмотка представляет собой один виток провода с высоковольтной изоляцией. На рисунке 5 показан один такой трансформатор.

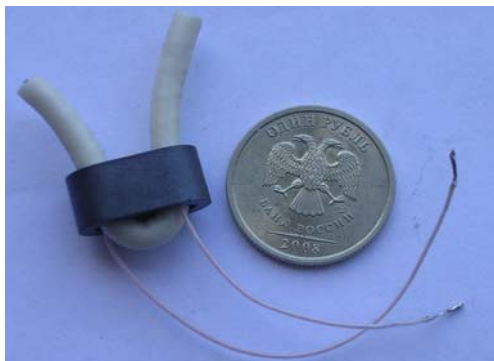


Рис. 5. Трансформатор с изоляцией до 30 кВ.

В качестве магнитопровода для трансформатора используется ферритовый сердечник с двумя отверстиями. Феррит высокочастотный, он обладает относительно небольшой магнитной проницаемостью (60), поэтому индуктивность одного витка также достаточно мала – 0.1 мкГн.

Диаметр отверстий – 5 мм, что позволяет пропустить провод с изоляцией до 30 кВ.

Вторичная обмотка состоит из нескольких витков тонкого провода МГТФ.

Частота несущей выбрана равной 10 МГц (период 100 нс). В связи с тем, что индуктивность первичной обмотки такого трансформатора невелика, включать трансформаторы целесообразно последовательно и использовать по обратноходовой схеме.

Обратноходовая схема включения представляет еще одну возможность: регулировать амплитуду импульса можно, управляя скважностью включения ключа. Во время, когда ключ замкнут, энергия запасается в индуктивности, когда разомкнут – передается во внешнюю цепь. Энергия, запасенная в индуктивности, пропорциональна времени включения ключа и напряжению питания. После размыкания ключа амплитуда импульса будет в основном определяться емкостью ключа. Ниже, на рисунке 6, приведена упрощенная схема усилителя.

Рассмотрим работу основных узлов схемы.

Усилитель U1 – это усилитель сигнала ошибки. В качестве усилителя используется широкополосный операционный усилитель ОР37 (полоса пропускания 64 МГц). На суммирующий вход усилителя поступает три сигнала:

- через резистор R1 – входной сигнал
- через резистор R2 – сигнал обратной связи
- через резистор R3 – напряжение смещения.

Коэффициент усиления схемы определяется резисторами R1, R2.

$K = -R2/R1$. В нашем случае он равен 5000.

Резистор R10 – это еще один вход, используется для задания постоянного смещения.

Усиленный сигнал ошибки поступает на «отрицательные» входы двух компараторов U4 и U5. На положительные входы этих компараторов поступает пилообразное напряжение несущей частоты. Для U1 – это напряжение сдвинуто в область положительных напряжений, для U5 – в область отрицательных..

Таким образом, при положительном сигнале ошибки, на выходе компаратора U4 появляются импульсы частотой 10 МГц, скважность которых зависит от амплитуды сигнала ошибки и меняется от нуля до полного периода.

Соответственно, при отрицательном сигнале ошибки, импульсы появляются на выходе компаратора U5.

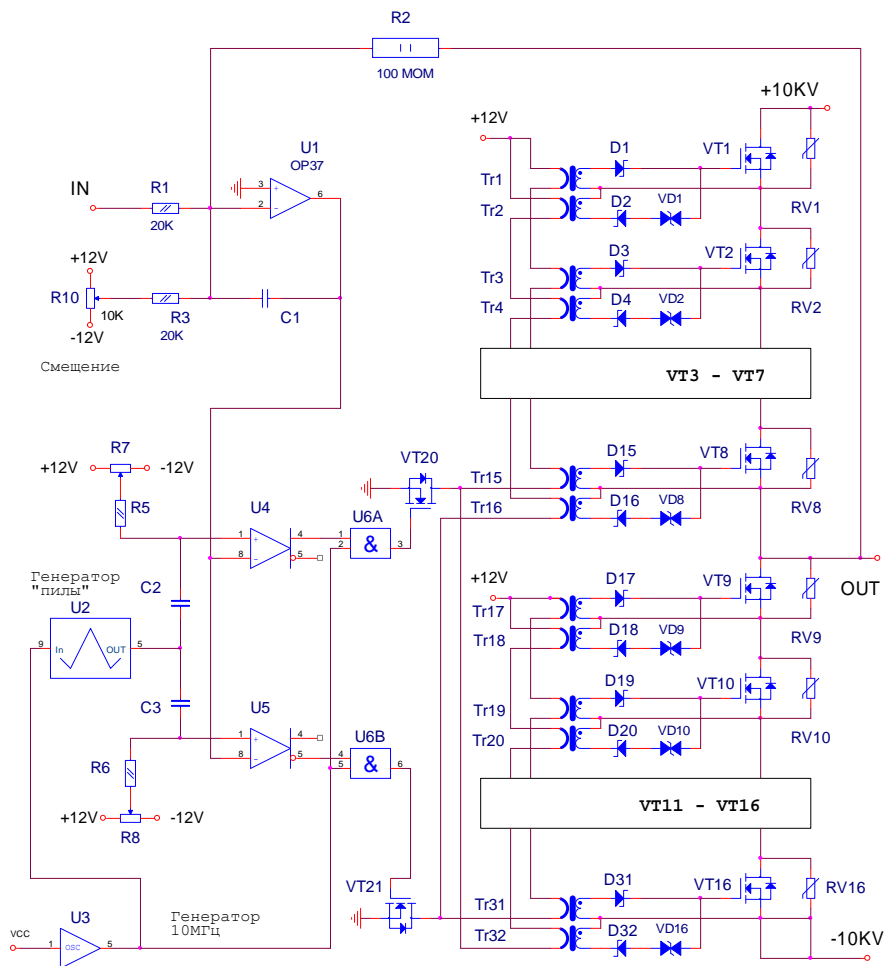


Рис. 6. Усилитель с трансформаторными драйверами полевых транзисторов.

Далее, микросхемы U6A и U6B ограничивают скважность значением $1/2$.

Таким образом, полевой транзистор VT20, будет включаться с частотой 10 МГц и со скважностью, пропорциональной положительному сигналу ошибки, соответственно, VT21, будет включаться при отрицательном сигнале ошибки.

Ниже, на рисунке, показана осциллограмма напряжения на стоке транзистора VT20.

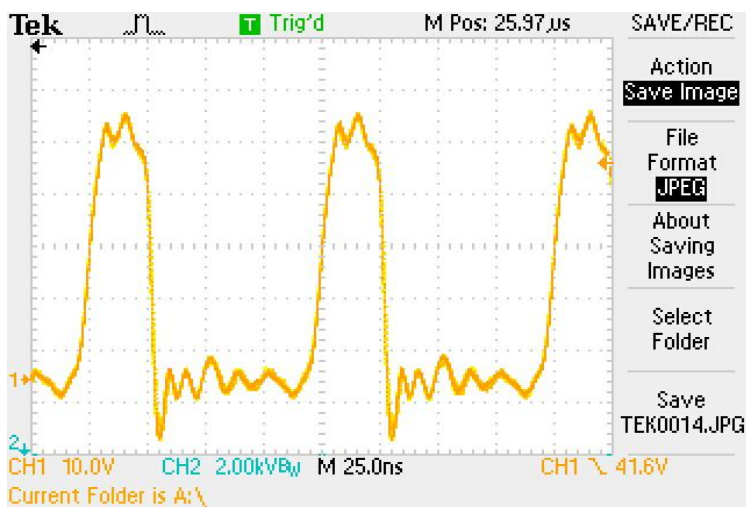


Рис. 7. Напряжение на стоке транзистора VT20 (VT21) при максимальном сигнале ошибки.

Так же как и в усилителе для сварки, выходной каскад двухтактный. Состоит из двух одинаковых плеч. Верхнее плечо собрано на транзисторах VT1 – VT8. Нижнее – на транзисторах VT9 – VT16. Максимальное напряжение, которое может быть на каждом плече, определяется защитными варисторами и составляет 9600 вольт.

Существенным отличием и особенностью данной схемы является то, что каждый транзистор управляется индивидуально. Управление каждым высоковольтным транзистором осуществляется посредством двух трансформаторов. Один из них обеспечивает быстрый заряд емкости затвора. Второй, соответственно, – разряд этой емкости.

Таким образом, отсутствуют емкости C1-C10, которые в предыдущей схеме требовались для перезарядки входных емкостей и быстродействие схемы может быть повышено на порядок (или понижена мощность, потребляемая от высоковольтного источника).

Рассмотрим подробнее работу транзистора VT1. Для отпирания данного транзистора на его затвор (относительно истока) следует подать напряжение 5 – 8 вольт. Для зарядки входной емкости транзистора служит трансформатор Tr1, он заряжает входную емкость через диод D1. Соответственно, для разряда этой емкости (для запирания транзистора) служит трансформатор Tr2. Посредством этого трансформатора входная емкость разряжается через цепочку D2, VD1. Элемент VD2 – стабилитрон KC175 – является генератором напряжения на 7.5 вольт. В данной схеме

напряжение на затворе транзистора VT1 ограничено $-0.5, +8.0$ В (это напряжение стабилизации стабилитрона плюс падение напряжения на диодах D1, D2).

Следует отметить, что в данной схеме отсутствует разрядный резистор в цепи затвора, то есть емкость затвора заряжается и разряжается посредством трансформаторов. Так обеспечивается быстрое время зарядки и разрядки емкости затвора и в то же время отсутствуют пульсации несущей частоты (10 МГц).

Как видно из схемы, восемь трансформаторов, которые обеспечивают заряд емкостей высоковольтных транзисторов (Tr1, Tr3, Tr5, Tr7, Tr15) включены последовательно в одну цепочку. Так же последовательно включены трансформаторы для разряда этих емкостей (Tr2, Tr4, Tr6, Tr8.... Tr16). Каждая цепочка трансформаторов имеет индуктивность 0.8 мкГн.

Для формирования положительного фронта на выходе усилителя, надо одновременно включать высоковольтные транзисторы верхнего плеча и выключать транзисторы нижнего плеча. При отрицательном фронте, наоборот – транзисторы верхнего плеча выключать, нижнего включать.

Для обеспечения данного режима, линейки трансформаторов коммутированы определенным образом и подключены к транзисторам VT20 и VT21.

Отметим, что выходные каскады полностью изолированы от входных цепей и по постоянному току связаны только резистором обратной связи R2. Таким образом, размах выходного напряжения усилителя может достигать 9600 В, а само это напряжение может быть смещено в отрицательную или положительную область резистором R10. Напряжение смещения определяется напряжением изоляции трансформаторов и электрической прочностью резистора R2.

Ниже, на фото показан внешний вид одного из плеч усилителя.

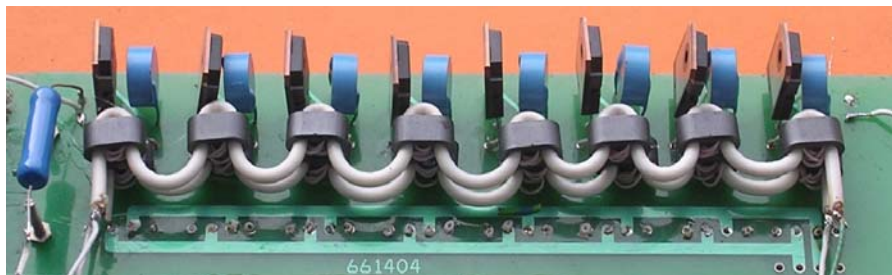


Рис. 8. Фотография одного из плеч выходного каскада на напряжение до 9600 В.

5. Полученные результаты

Ниже приведены осциллограммы, полученные при работе данного усилителя.

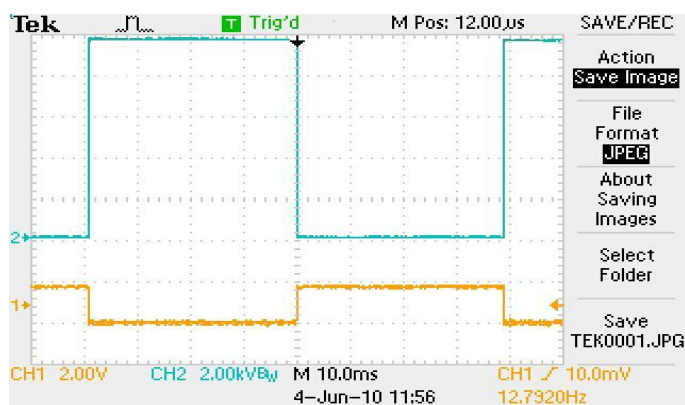


Рис. 9. Входной (желтый) и выходной (синий) сигналы усилителя. Усилитель работает в ключевом режиме.

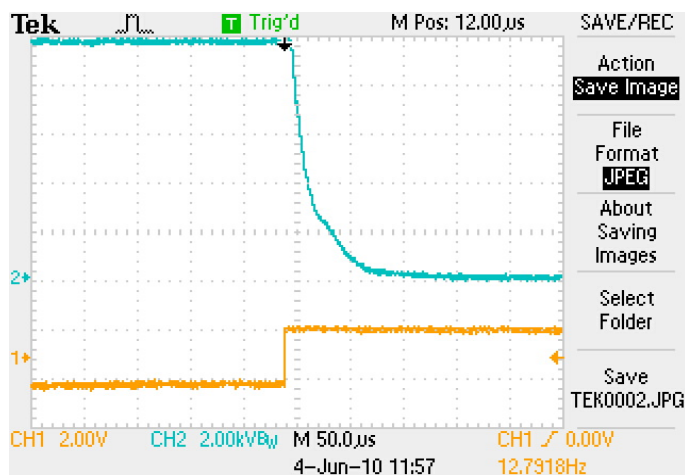


Рис. 10. Растянут отрицательный фронт сигнала.

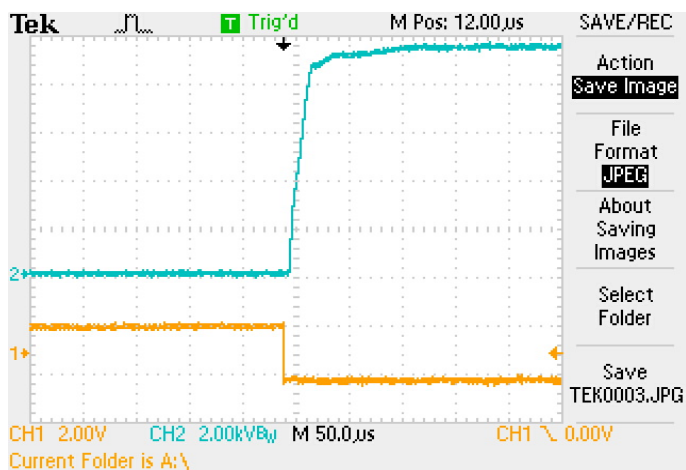


Рис. 11. Растянут положительный фронт сигнала.

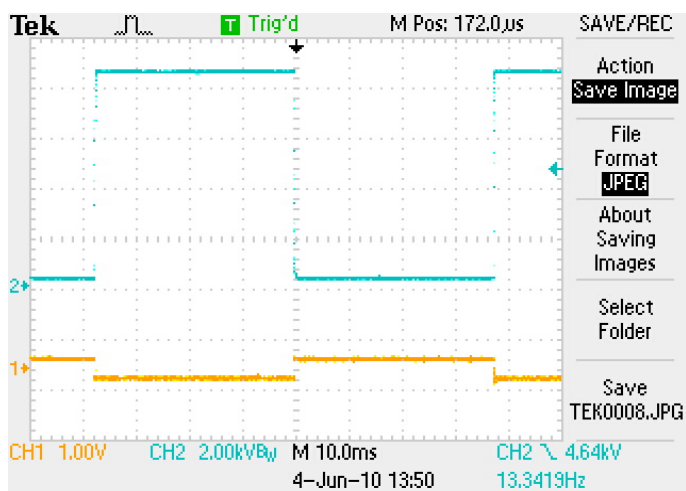


Рис. 12. Входной (желтый) и выходной (синий) сигнал усилителя. Усилитель работает в линейном режиме. Верхний уровень ниже «питания», нижний – выше «земли»

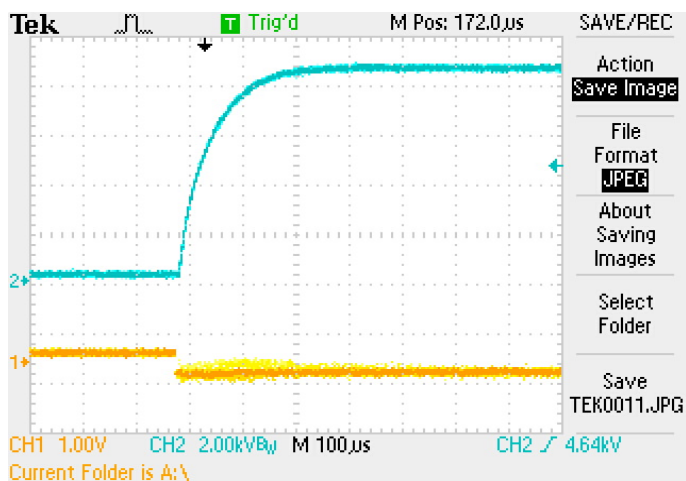


Рис. 13. Растянут положительный фронт сигнала.

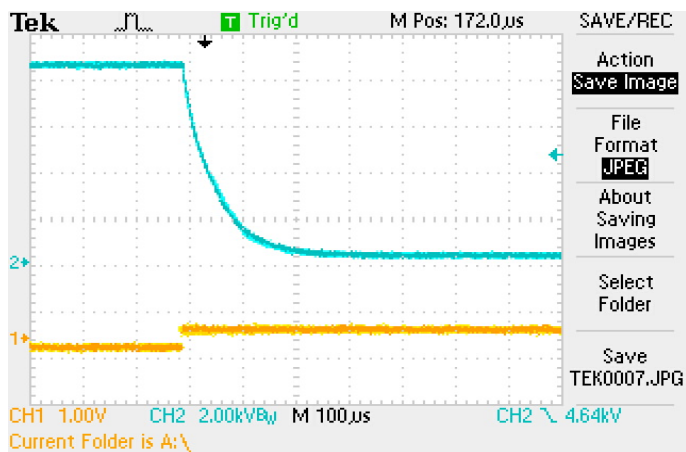


Рис. 14. Растянут отрицательный фронт сигнала.

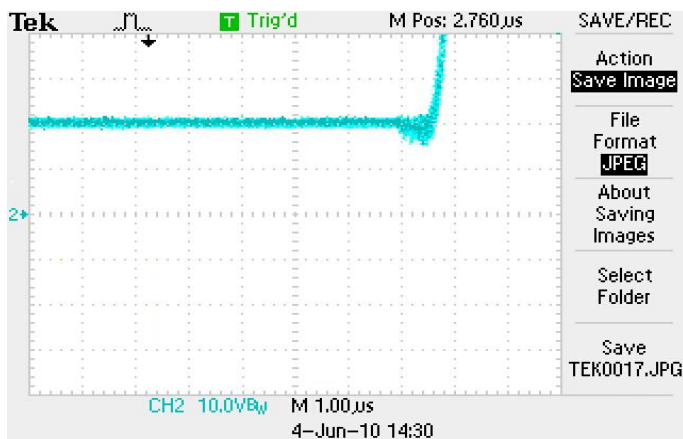


Рис. 15. Участок, предшествующий положительному фронту. Выходной сигнал был равен 20 вольтам. Усилитель в линейном режиме. Каких-либо шумов или наводок несущей частоты не наблюдается.

Из осциллограмм видно, что усилитель обладает хорошей частотной характеристикой – на фронтах отсутствуют нелинейные эффекты или выбросы. Усилитель потребляет мощность только во время фронтов. Мощность потребляется для перезарядки выходных емкостей транзисторов и защитных варисторов. Мощность (ток) которую усилитель может отдать в нагрузку, определяется максимальным током транзисторов (2А), мощностью, которую могут рассеять транзисторы и мощностью источника питания.

Заключение

В данной работе рассмотрены несколько типов высоковольтных модуляторов (усилителей), разработанные автором в разное время и для разных применений.

Результатом данной работы являются два «серийных» устройства, которые используются в электронно-лучевой сварке и в ускорителях ИЛУ.

Были проанализированы причины, ограничивающие параметры усилителей.

Был предложен вариант построения усилителей с параллельным управлением полевыми транзисторами. Предложена оригинальная схема гальванически развязанного драйвера.

Важной особенностью схемы является, то, что ее быстродействие не зависит от количества транзисторов в цепи, так как каждый транзистор управляется индивидуально и «отвечает» только за свой участок диапазона.

Трансформаторы, используемые в схеме, очень просты в изготовлении – всего три витка провода, один из которых с высоковольтной изоляцией.

Сделан линейный усилитель (охваченный обратной связью) со следующими параметрами:

1. Коэффициент усиления по напряжению – 5000.
2. Максимальный размах выходного сигнала – 9600 вольт.
3. Полоса пропускания - около 10 кГц.
4. Максимальный выходной ток (импульсный) – 2 А (ограничивается мощностью источника питания и мощностью, рассеиваемой на транзисторах).

Следует обратить внимание, что в связи с использованием несущей частоты, выходной сигнал определен по времени с точностью до фазы несущей (100 нс).

Литература

- [1] *Bryazgin A.A., Factorovich B.L., Kupe rE.A., Repkov V.V.* Modulator of electron injector of industrial accelerator ILU-10. // Proc of XX Russian Conference on Charged Particle Accelerators (RuPAC 2006), September 10-14, BIMP, Novosibirsk, Russia. - Abstracts Brochure /Ed. by M.V.Petrichenkov, T.V.Rybitskaya/. - Novosibirsk, BIMP, 2006, p.100.

В.В. Репков

Высоковольтные линейные усилители на транзисторах

V.V. Repkov

High-voltage linear transistor amplifiers

ИЯФ 2010-32

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 15.11. 2010 г.

Сдано в набор 16.11. 2010 г.

Подписано в печать 16.11. 2010 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.1 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 75 экз. Бесплатно. Заказ № 32

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11