

# ПРИНЦЕССА

*Евгений Карпов*

Часть 1

**Однотактный усилитель повышенной мощности.**

В общем, этот усилитель с аудиофильской точки зрения совершенно неправильный. Пуристы от ламповой техники придут в ужас от количества полупроводниковых элементов, а почитатели твердотельных устройств вообще удивятся присутствию вакуумных ламп. Но несмотря на пеструю смесь компонентов, отнести эту схему к гибридным, пожалуй, нельзя. Сигнал усиливается именно лампами, и небольшая модификация схемы (об этом чуть позже) позволяет исключить из тракта все полупроводниковые компоненты, да и длина звукового тракта получается не больше, чем в классическом ламповом усилителе. Толчком к проектированию этого усилителя было довольно необычное желание заменить в низкочастотном звене многополосной звуковой системы двухтактный твердотельный усилитель на ламповый и обязательно – одноктактный. Желание - желанием, а задача получается непростой. Конечно, основной проблемой является получение необходимой выходной мощности. Измерения реальной мощности, подводимой к низкочастотному звену в действующей системе, на разном типе звукового материала давало величину не менее 30 ватт. Также было желательно обеспечить достаточно низкое выходное сопротивление и, естественно, хорошие частотные характеристики в области низких частот. Но делать такой узкоспециализированный усилитель, в общем, не имело смысла, и я решил получить заветные 30 ватт в широкополосном режиме.

В качестве выходной лампы я решил использовать 6С33С. Для этого было несколько причин. Во-первых, в системе уже использовался усилитель с такой лампой, а плодить типы выходных ламп не хотелось и, во-вторых, лампа неплохо звучит, если создать ей для этого необходимые условия.

Получить нужную выходную мощность и хорошие частотные характеристики ударом в лоб, например, включив две лампы параллельно, довольно затруднительно. Параллельное включение ламп не сулит ничего хорошего: противоречие между необходимой индуктивностью намагничивания и паразитными параметрами выходного трансформатора только усугубляется. После долгих прикидок и сомнений я решил вообще отказаться от классического варианта одноктактного выходного каскада (в первую очередь потому, что это уже просто скучно, и во вторую потому, что получить желаемые параметры с одной лампой не представлялось возможным). В итоге, выходная лампа была включена как катодный повторитель с токовой ОС. Фактически, эта схема аналогична схеме повторителя на MOSFET транзисторе подробно рассмотренной в [1] и обладает теми же свойствами. Но я хочу все же напомнить читателям, что обратная связь, введенная в схему, не совсем обычная. Сигнал ОС в явном виде никак не взаимодействует с входным сигналом каскада, а воздействует на передаточную характеристику самой лампы.

Эффективность использования лампы в таком каскаде заметно выше, чем в классическом. Это позволило получить нужную выходную мощность, используя только одну лампу. А так как выходной каскад - катодный повторитель, то ясно, что он обладает низким выходным сопротивлением и хорошими частотными свойствами, а из-за особенностей построения – отличной переходной характеристикой. Но наиболее важным является другое – такой выходной каскад имеет более высокую линейность, как по сравнению с классическим трансформаторным каскадом, так и по сравнению с катодным повторителем. Удобно сравнивать этот усилитель с «Золушкой», это достаточно правомерно, так как на выходе стоит одна лампа и в схожем режиме. Объективно, характер вносимых искажений у них очень похож, но у «Принцессы» немного короче гармониковый «хвост» и заметно меньше уровни гармоник. Слушая этот усилитель, не возникает сомнения, что он одноктактный, но звучит он чище и динамичнее, как за счет значительного запаса по мощности, так и за счет высокой скорости отклика.

Я немного отойду от сложившейся традиции, и сначала будет рассмотрена схема усилителя, а во второй части статьи – приведены его объективные характеристики и результаты испытаний, рассмотрены вопросы реализации и наладки.

## Схема усилителя

Всю схему можно разбить на три достаточно независимых узла – выходной каскад, драйвер и системы питания. Каждый узел самодостаточен и может работать автономно. Сделано это было сознательно, так как значительно облегчает настройку довольно сложной схемы. Каналы усилителя независимы – каждый имеет свой набор источников питания, получающих напряжения с отдельных обмоток трансформаторов. Общими являются только сами силовые трансформаторы и стабилизатор напряжения накала. Хотя такой подход заметно усложняет конструкцию, но обеспечивает хорошую межканальную развязку и решает все проблемы с землей.

Конструктивно, один канал усилителя – это одна печатная плата, которая несет на борту все компоненты, кроме выходного трансформатора и трансформаторов питания. Это позволяет оптимально разместить компоненты самого усилителя, расположить в нужных местах источники питания и минимизировать длину соединений.

## Выходной каскад

Схема выходного каскада показана на рисунке 1.

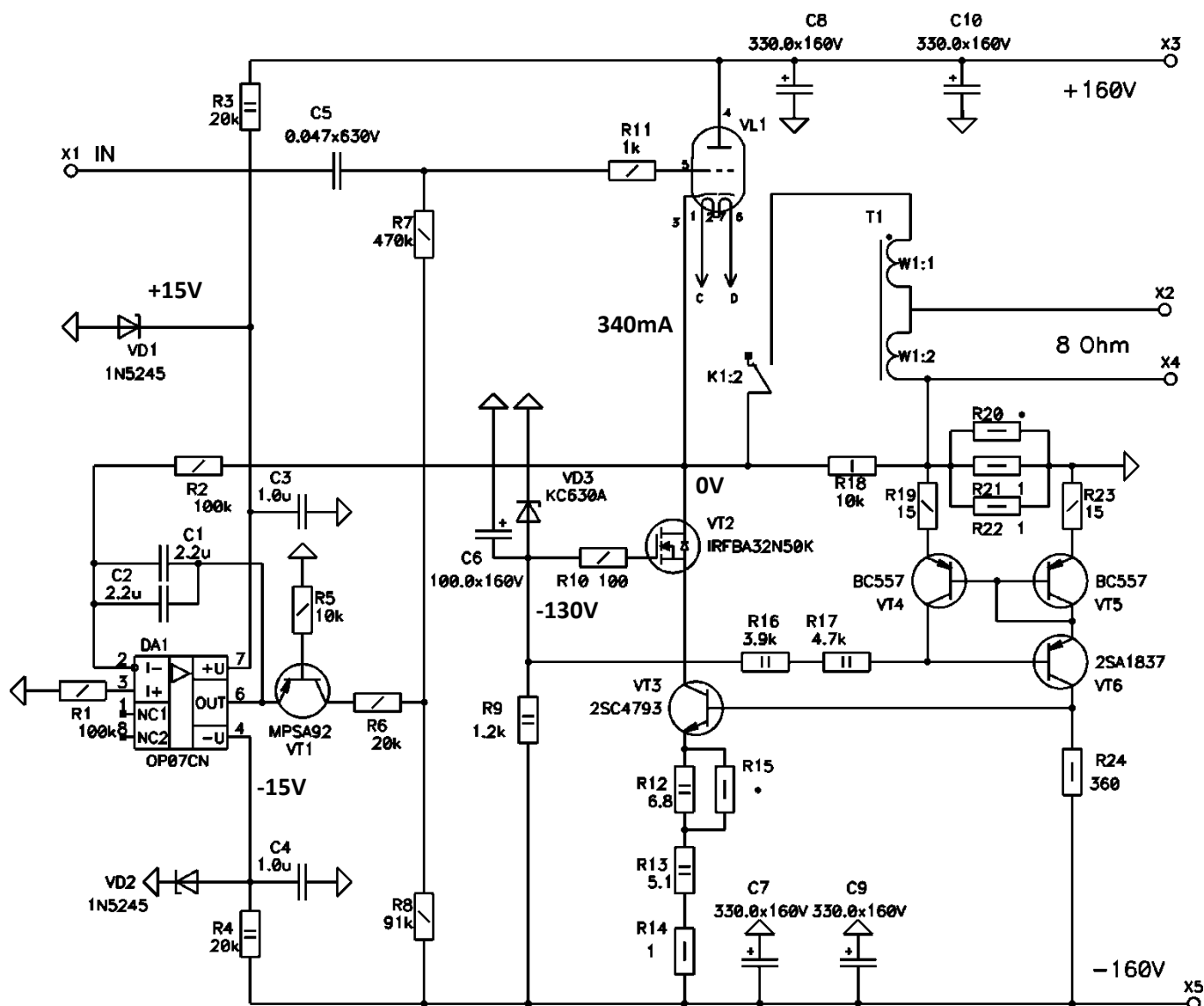


Рисунок 1

Как уже говорилось выше, выходной каскад - это катодный повторитель на лампе VL1 с управляемым источником тока в катод. Коэффициент передачи повторителя – около 0.75, выходное сопротивление - ~14 Ом, мощностная полоса (без учета выходного трансформатора) - ~800kHz.

Повторитель питается двуполярным напряжением. С помощью отдельной, очень низкочастотной петли ООС (DA1, VT1) на выходе повторителя поддерживается нулевой потенциал. Для оптимального согласования с нагрузкой используется автотрансформатор, который непосредственно подключен к выходу повторителя. Использование автотрансформатора преследовало две основные цели: максимально увеличить индуктивность намагничивания и уменьшить индуктивность рассеяния. Величина индуктивности намагничивания относительно выходного сопротивления повторителя выбрана очень большой – 3 Генри.

*(Если провести аналогию с классическим усилителем на мощном триоде с типичным внутренним сопротивлением около 1 кОм, то тогда индуктивность намагничивания его выходного трансформатора должна была бы быть около 220 Генри)* Это позволило существенно уменьшить влияние нелинейностей трансформатора на низких частотах. Низкое выходное сопротивление повторителя накладывает очень жесткие требования на величину индуктивности рассеяния автотрансформатора с одной стороны, но с другой, значительно ослабляются требования к его собственной емкости. Это позволило применить в автотрансформаторе глубокое секционирование и получить индуктивность рассеяния (приведенную ко всей обмотке) около 70 микрогенри. В результате, удалось получить завал частотной характеристики порядка 1dB на частоте 100kHz. Частотный диапазон выходного каскада снизу (частота среза около 15 Hz) сознательно ограничен за счет выбора небольшой величины проходных емкостей на входе выходного каскада и драйвера.

Приведенное сопротивление нагрузки к выходу каскада – 100Ом, это значительно больше выходного сопротивления повторителя. Поэтому выходной каскад малочувствителен к изменению сопротивления самой нагрузки и хорошо работает даже с акустикой с большими скачками импеданса.

Управляемый источник тока, фактически, представляет собой двухкаскадный транскондуктансный дифференциальный усилитель с небольшой крутизной (приблизительно 1.44) и широкой полосой пропускания (частота среза около 2 MHz). Выходное сопротивление усилителя составляет десятки мегом.

Ток нагрузки преобразуется во входной сигнал для усилителя на датчике тока (R20 – R22) и с заданным масштабом транслируется на его выход. При отсутствии тока сигнала усилитель можно рассматривать как обычный источник тока, выходной ток которого задает режим работы выходной лампы. Глобально, режим работы усилителя ОС задается током, определяемым резисторами R16, R17. В принципе, величину тока покоя можно регулировать, изменяя их величину, но регулировка тока покоя, таким образом, приводит и к изменению крутизны усилителя. Чтобы уменьшить это влияние, ток покоя устанавливается подстройкой величины резистора (R15) в цепи эмиттера VT3. Масштаб передачи тока устанавливается изменением величины датчика тока (R20).

Транзисторы VT3 и VT6 должны быть установлены на одном охладителе с площадью не менее 400 см<sup>2</sup>, транзистор VT2 должен быть установлен на охладитель с площадью не менее 1200 см<sup>2</sup>. Антипаразитный резистор R10 устанавливается рядом с транзистором, непосредственно на радиаторе. Желательно, чтобы корпуса транзисторов VT4, VT5 имели между собой тепловой контакт.

## Драйвер

Принципиальная схема драйверного каскада и предварительного усилителя показана на рисунке 2. Собственно сам драйвер выполнен на лампе VL3 на основе каскада с динамическим питанием. Такой каскад был подробно описан ранее [2], поэтому я не буду повторяться и остановлюсь на небольших отличиях между схемами. Драйвер питается повышенным анодным напряжением, и использована лампа с более высоким  $\mu$ . Немного упростился выходной истоковый повторитель, источник тока был заменен на резистор. Так как он работает практически на холостом ходу, то в звуке это ни как не отразилось. Драйвер способен обеспечить на выходе до 80 вольт (действующего значения) при уровне гармоник около 0.7%. В спектре искажений присутствует, в основном, вторая гармоника.

Коэффициента усиления драйверного каскада недостаточно для получения на выходе полной мощности при приемлемом уровне сигнала на входе. Поэтому пришлось ввести еще один каскад усиления на лампе VL1. Это обычный резистивный каскад и никаких особенностей не имеет. Между предварительным каскадом и драйвером включен катодный повторитель на лампе VL2.

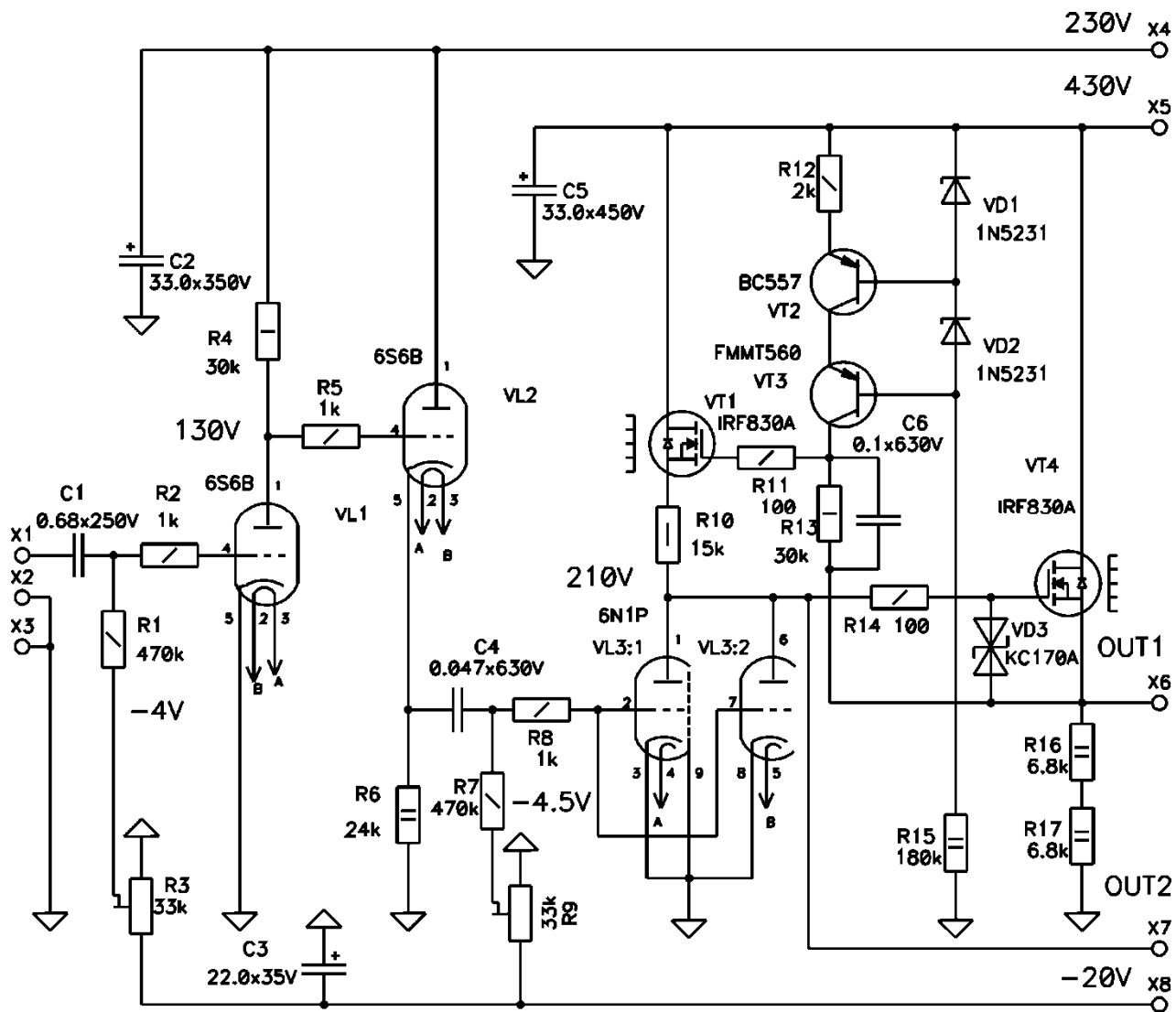


Рисунок 2

Наличие катодного повторителя (некоторые считают, что это большой звуковой грех) в данном случае и объективно и субъективно улучшает параметры усилителя. Работа первого каскада, практически на холостом ходу, заметно повышает его линейность. А отделение его выхода от довольно значительной динамической входной емкости самого драйвера обеспечивает отличные частотные и переходные характеристики.

Вернемся теперь к вопросу, к какой точке подключать выходной каскад. Скажу сразу, я послушал оба варианта и остановился на подключении к выходу "OUT1". Существуют и объективные различия. Подключение выходного каскада к выходу "OUT2" очень слабо влияет на линейность драйвера. При этом немного уменьшается четвертая гармоника и появляется небольшая пятая, уровни второй и третьей гармоники практически не меняются. Регистрируемые изменения весьма малы - на уровне  $1 \div 1.5$  dB, при уровне самих гармоник  $-70 \div -80$  dB. Значительно сильнее такое включение отражается на частотной характеристике усилителя, она ухудшается раза в полтора. Так что выбирать вам, что важнее: получение высокого качества звука или отсутствие твердотельных устройств в звуковом тракте.

Транзисторы VT1, VT4 устанавливаются на небольшие радиаторы, способные рассеять  $2 \div 3$  ватта. Транзистор VT3 снабжается небольшим полигоном.

### Система питания

Практически все усилители чувствительны к нестабильности напряжения питания, а особенно ламповые схемы без общей ООС, и еще более - однотактные. Если с пульсациями напряжения питания можно успешно бороться выбором соответствующих параметров фильтра, то от нестабильности сети может спасти только стабилизатор. Тем более что это решает и вопрос пульсаций. И в общем, не столь страшны медленные, значительные изменения, сколько кратковременная нестабильность. Если подключить к сети

регистратор и записать значения напряжения сети, допустим, за полчаса, то вы увидите, что напряжение непрерывно «дышит» на несколько вольт по случайному закону. Хотя эти изменения незначительны, но они приводят к небольшим колебаниям параметров усилителя, фактически, усилитель непрерывно находится в переходном режиме установки его параметров. Это очень отрицательно сказывается на конечном результате – звуке. Что бы этого избежать, все напряжения питания усилителя стабилизированы.

В усилителе используется два трансформатора, от одного питаются цепи накала ламп и драйвера. Второй трансформатор питает выходные каскады. Анодное напряжения питания на выходные каскады поступает с задержкой, после прогрева выходных ламп, на драйверные каскады анодное напряжение поступает одновременно с напряжением накала.

Для стабилизации напряжений накала используется групповой стабилизатор с линейным регулятором, расположенным с первичной стороны трансформатора. Схема регулятора приведена на рисунке 3, а принцип его работы подробно описан в [3].

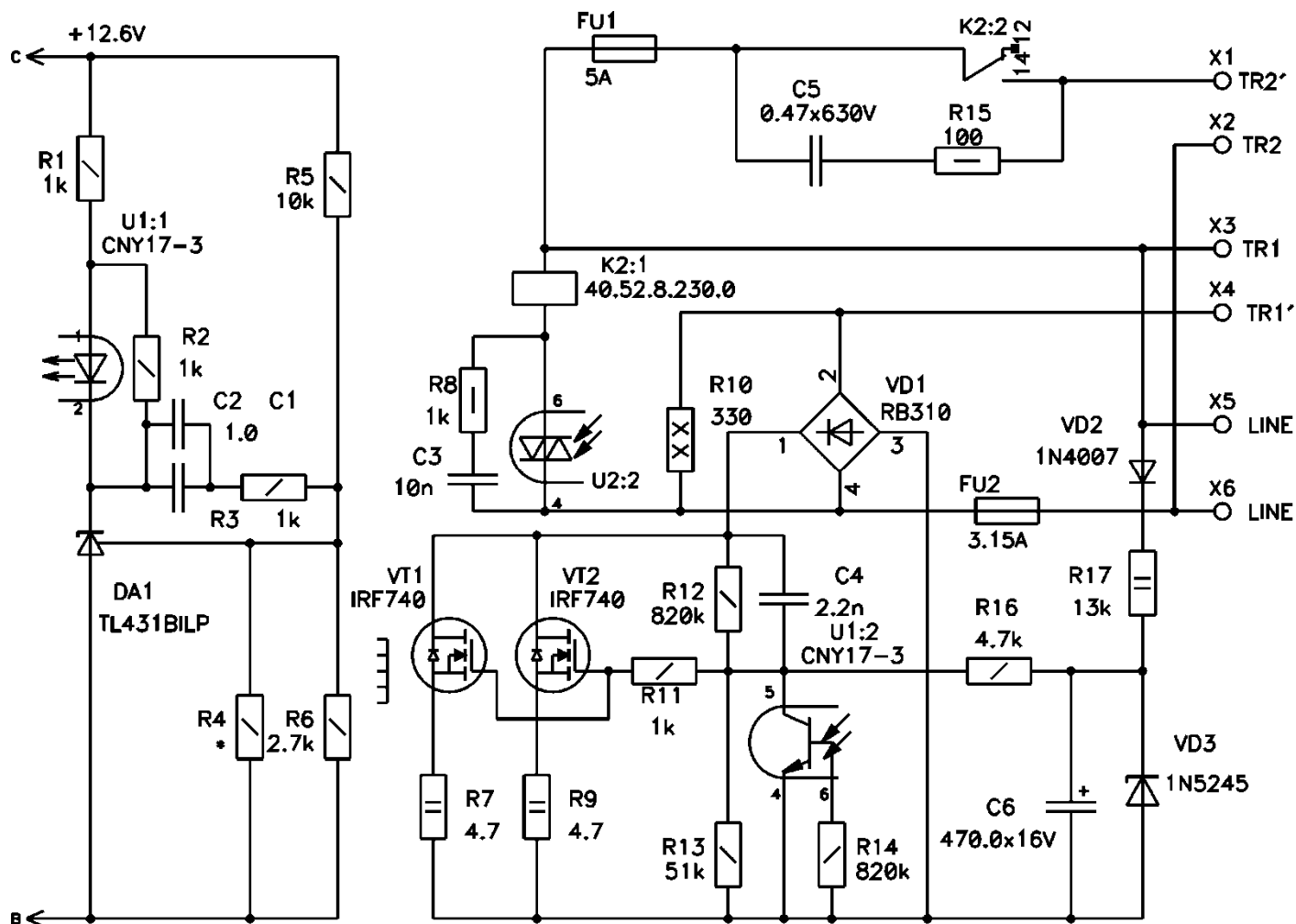


Рисунок 3

Попутно осуществляется и предварительная стабилизация анодных напряжений драйверных каскадов. Система стабилизирует напряжение накала выходной лампы одного из каналов. Напряжения на остальных выходах стабилизатора жестко связаны со стабилизируемым, и так как токи их потребления стабильны, то они также не зависят от сетевого напряжения.

Регулирующие транзисторы VT1, VT2 устанавливаются на охладитель с площадью порядка  $1000\text{см}^2$ , резисторы R7, R9, R11 расположены непосредственно на радиаторе.

Если усилитель изготавливается как моноблок, то один из регулирующих транзисторов можно исключить и уменьшить площадь охладителя.

Узел выпрямителей группового стабилизатора (для одного канала) показан на рисунке 4. Накалы ламп питаются постоянным напряжением от выпрямителей со средней точкой. Нулевая точка выпрямителей приподнята над землей на  $9\div 10$  вольт и заземлена через емкости C3, C6.

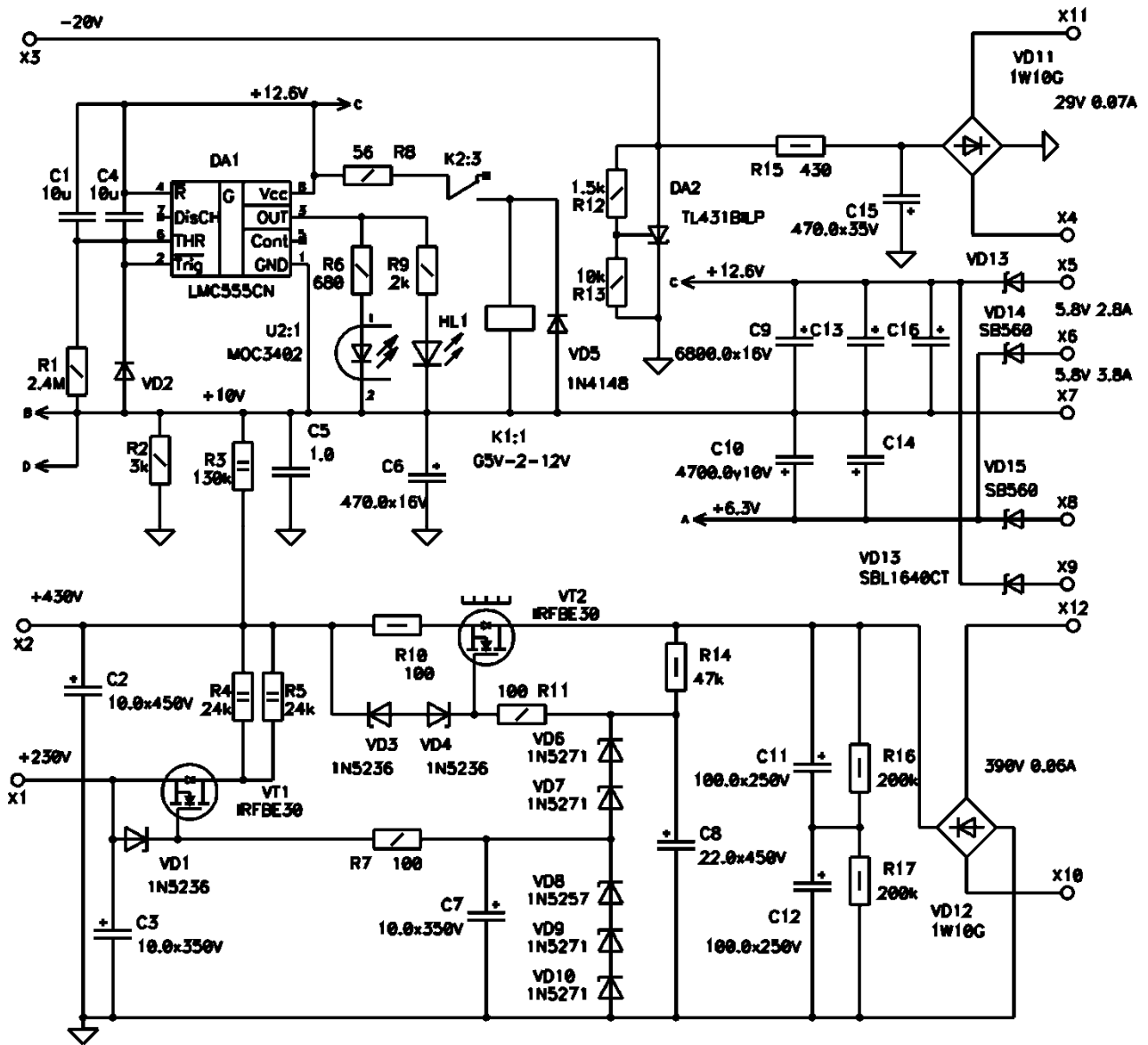


Рисунок 4

От напряжения накала питается и схема задержки включения силового питания (DA1) и реле включения выхода (K1:1).

Я использовал не совсем обычное решение, схема задержки управляет не непосредственно реле, а оптоизолятором, который в свою очередь включает реле, питающееся непосредственно от сетевого напряжением. Реле включения нагрузки управляется контактами силового реле. Сделано это для того, чтобы при отключении сетевого напряжения оба реле сразу же отключались.

Напряжение смещения дополнительно стабилизируется параллельным стабилизатором на микросхеме DA2.

Анодные напряжения драйверного и предварительного каскада дополнительно стабилизируются и фильтруются простейшим параметрическим стабилизатором на транзисторах VT1, VT2. Основная цель применения этих стабилизаторов не столько стабилизация, сколько хорошая фильтрация анодных напряжений. Использование стабилизаторов, а не активных фильтров, позволяет решить еще одну задачу – ограничить напряжения на элементах схемы при включении на холодные лампы.

Диод VD13 необходимо установить на радиатор, также на радиатор устанавливается транзистор VT2 (исходя из рассеиваемой мощности 3 вата).

Стабилизаторы питания выходного каскада (Рисунок 5) реализованы по обычной последовательной структуре и никаких особенностей не имеют. Оба стабилизатора снабжены системой защиты (R14, VD4, VD5 и R9, VT1), ограничивающей ток на уровне 0.7 ампера. С одной стороны, это защищает выходной каскад от повреждений (кратковременно), а с другой – сам стабилизатор. На схеме не показаны выходные емкости, так как они находятся непосредственно у нагрузки.



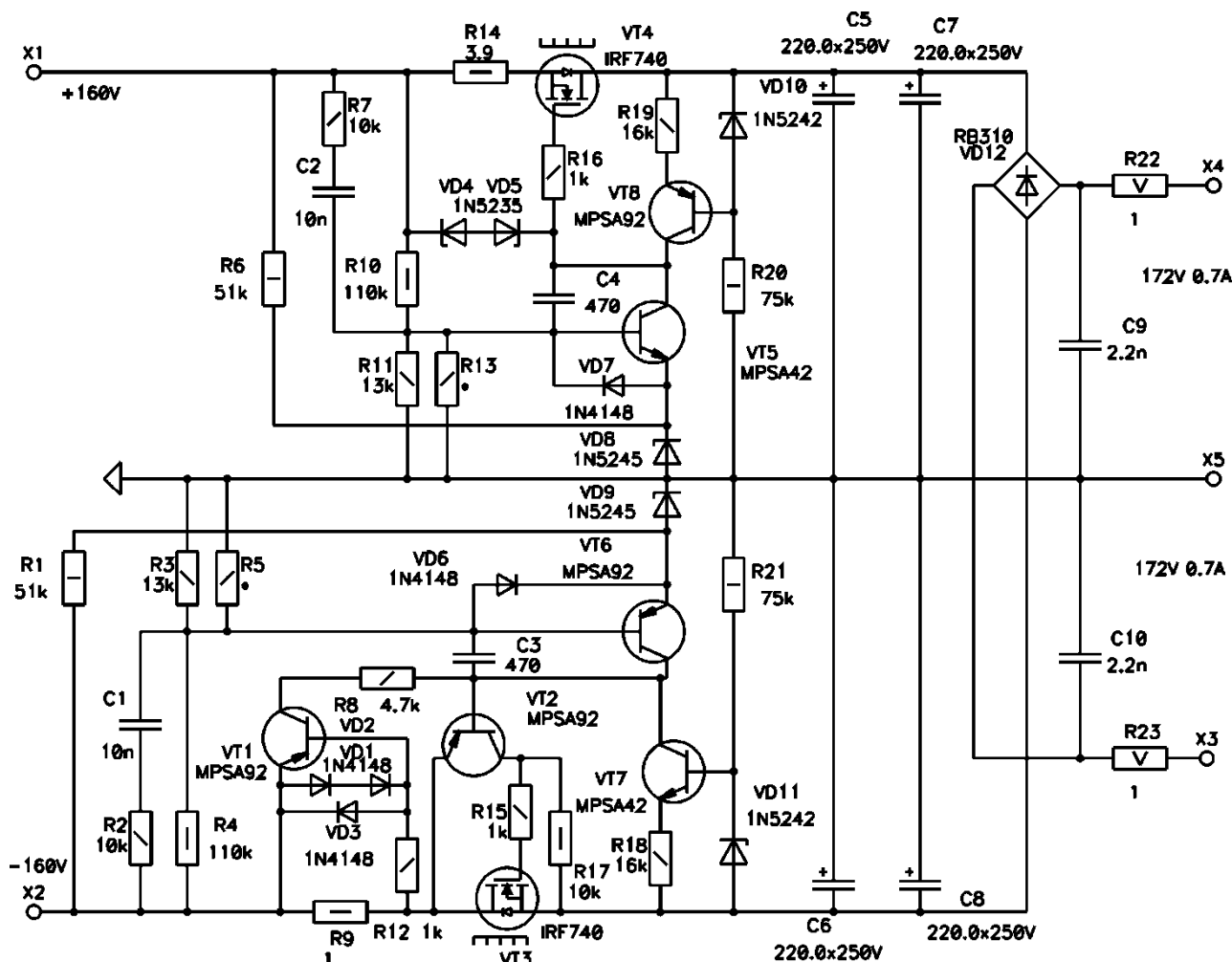


Рисунок 5

Если стабилизатор находится далеко от выходного каскада, то непосредственно у его выхода надо установить емкости, хотя бы по 47 микрофард.

Уровень пульсаций на выходе стабилизаторов не превышает десятка милливольт.

Проходные транзисторы VT3, VT4 устанавливаются на одном охлаждае с площадью не менее 1500см<sup>2</sup>, там же установлены и резисторы R15, R16. Следует обратить внимание на резисторы R22 и R23, они не должны быть проволочными. Но при пуске стабилизатора на них рассеивается большая динамическая мощность. Их лучше составить из трех – четырех двухваттных резисторов.

Все эти усилия сделали усилитель совершенно нечувствительным к изменениям и скачкам сетевого напряжения, а также очень тихим.

Как выглядит полностью собранная плата одного канала усилителя, показано на рисунке 6.

### Замена компонентов

В заключение рассмотрения принципиальной схемы, кратко коснемся вопроса замены компонентов. В общем, 98% используемых компонентов не являются проблемными. Конечно, необходимо обратить внимание на качество компонентов установленных в цепи сигнала и качество электролитических емкостей (но не стоит из этого делать фетиш). Во всех вспомогательных цепях вы можете менять компоненты достаточно произвольно. Конечно, они не должны быть хуже по предельным параметрам. Определенную осторожность следует соблюдать при замене стабилитронов. Большинство стабилитронов в схеме



Рисунок 6



работает при малых токах, и это надо учитывать при замене. Реле, коммутирующее выходной трансформатор (K1:1), должно быть обязательно сигнального типа.

Определенные затруднения могут вызвать три компонента – лампы 6С6Б, транзистор FFMT560 и транзистор IRFBA32N50K.

Применение ламп 6С6Б вызвано исключительно желанием сэкономить место. Можно попробовать использовать 6Н16Б или 6Н1П.

С транзистором FFMT560 вопрос сложный. Можно попробовать использовать ZTX758. При поиске замены следует ориентироваться на следующие требования – коллекторное напряжение -450÷-500V, граничная частота - 40÷50MHz, усиление – не менее 50 и маленькая выходная емкость – до 20pF.

Применение транзистора IRFBA32N50K вызвано особенностями конструкции его корпуса. При относительно малом размере кристалла и, соответственно, не большой выходной емкости, транзистор имеет большую рассеиваемую мощность. Если не удастся найти такой транзистор, отличным решением будет параллельное включение нескольких менее мощных транзисторов типа IRF830. Токи через транзисторы надо будет выровнять, включив в их истоки резисторы по 8÷10 Ом.

## Литература

1. Е.В. Карпов, Гибридный мир, Next-Tube, 2003
2. Е.В. Карпов, Драйверный каскад, Next-Tube, 2007
3. Е.В. Карпов, Стабилизированный источник питания лампового усилителя, Next-Tube, 2006

*Конец первой части*