

Гибридный усилитель мощности MuGen

Надеемся, что ваша домашняя аудиосистема пополнилась качественным [предварительным усилителем](#) из наших последних публикаций. Теперь пришло время задуматься об усилителе мощности. Сегодня мы предлагаем вам описание конструкции одного очень интересного **гибридного усилителя**. Автор **Уим дэ Хэн** назвал своё творение «MuGen». По-японски это означает бесконечность, ну а с технической точки зрения усилитель объединил в себе усилитель напряжения — Му и усилитель тока — Gen, что и отражено в названии.

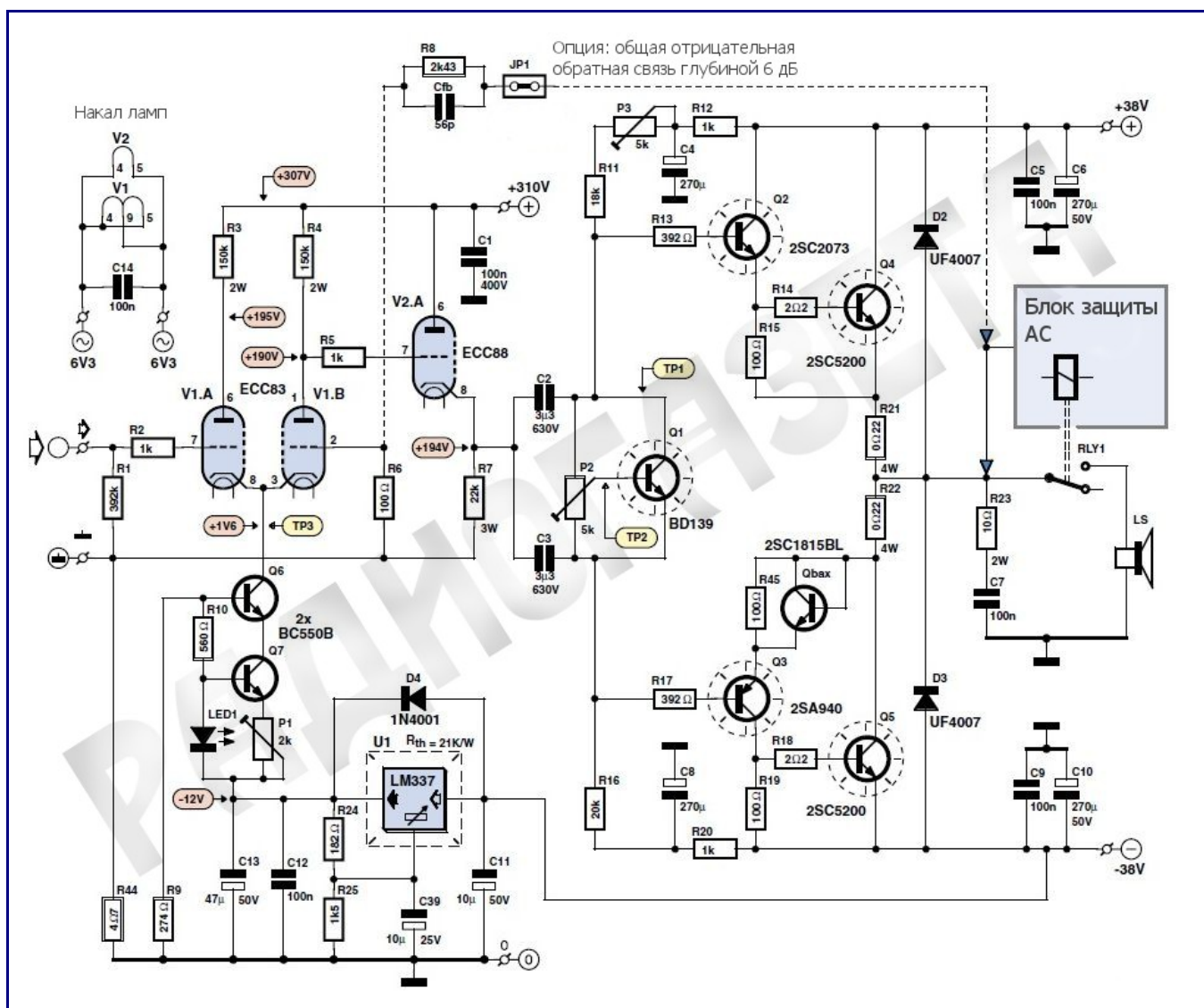
Сегодня **ламповые усилители** претерпевают второе рождение — появилось довольно большое количество как коммерческих, так и самодельных конструкций. К сожалению, наиболее достойные их образцы отличаются весьма нескромной ценой, которая обусловлена в частности необходимостью высокого напряжения для работы усилителя и наличием **выходного трансформатора**. Довольно высокое внутреннее сопротивление ламп не позволяет подключать к ним акустические системы непосредственно. А дешёвый выходной трансформатор посредственного качества сведет «на нет» все усилия по сборке усилителя, какими бы дорогими и качественными не были остальные комплектующие, как бы ни была хорошо проработана схема.

В гибридных усилителях выходной трансформатор заменяется **транзисторным каскадом**, который имеет низкое выходное сопротивление, что позволяет подключать нагрузку к выходу усилителя без каких либо ухищрений. Современные электронные приборы при этом позволяют получить весьма высокие характеристики и низкие искажения.

Параметры и схема усилителя MuGen:

- Входная чувствительность: 825 мВ (8 Ом) и 770 мВ (4Ом)
- Входное сопротивление: 300 kОм
- Усиление: 29 дБ (23 дБ с общей отрицательной обратной связью)
- Выходная мощность (при 1% THD):
 - 70 Вт на нагрузке 8 Ом,
 - 110 Вт на нагрузке 4Ом
- Коэффициент гармоник (THD) + шум:
 - при выходной мощности 1 Вт / 8 Ом : <0,1%
 - при выходной мощности 10 Вт / 8 Ом : <0,15%
- Коэффициент демпфирования: 20 (на 8 Ом нагрузки)

[Схема усилителя](#) представлена на рисунке:



Входной каскад.

Для получения заданной выходной мощности входной каскад должен обеспечить усиление входного сигнала до амплитуды в 25В. Кроме того, из-за отсутствия общей отрицательной обратной связи этот каскад должен обладать минимальными искажениями при работе на нагрузку в 10кОм (входное сопротивление выходного драйвера).

Основываясь на своём опыте работы с лампами, автор выбрал для входной части усилителя дифференциальный каскад, что кроме всего прочего позволяет использовать его в качестве фазоинвертора и достаточно просто ввести в усилитель общую отрицательную обратную связь, если возникнет такая необходимость или желание поэкспериментировать. При этом сигнал ООС подается отдельно от входного сигнала на сетку правого триода.

Так как катоды ламп первого каскада по переменному току соединены последовательно, это порождает местную обратную связь глубиной около 6 дБ, что снижает искажения каскада, но и снижает его усиление. Поэтому здесь необходима лампа с высоким коэффициентом усиления. Автор выбрал лампу ECC83 (аналог 6Н2П).

Источник тока в катодной цепи сделан активным, на транзисторах, что также существенно улучшает параметры каскада и позволяет простыми методами реализовать регулировку тока диф. каскада. Итоговое усиление первого каскада составляет 29 дБ.

Для включения в усилителе общей ООС необходимо замкнуть переключку JP1. При этом общее усиление снизится до 23 дБ, но этого всё равно достаточно для получения заданной выходной мощности.

Напомню, что глубокая общая ООС улучшает параметры усилителя, но как показывают тесты, ухудшает его субъективное звучание. Глубина обратной связи в -6дБ является в этом случае хорошим компромиссом.

Недостатком использования ламп ЕСС83 во входном каскаде является их высокое выходное сопротивление — порядка 50кОм. Согласование с низкоомной транзисторной частью обеспечивает катодный повторитель на лампе ЕСС89 (аналог 6Н23П) с выходным сопротивлением около 500Ом.

После долгих экспериментов автор выбрал режим, обеспечивающий наименьшее искажение и позволивший согласовать оба ламповых каскада непосредственно, без разделительного конденсатора. Кроме того, это обеспечивает плавный рост напряжения (от 0 до 194 В) на катодном резисторе R7 при включении усилителя, благодаря чему конденсаторы С2 и С3 плавно заряжаются, что устраняет щелчки и негативное воздействие на транзисторную часть.

Разделительные конденсаторы.

Каскад усиления напряжения (ламповая часть) и каскад усиления тока (транзисторная часть) связаны между собой через разделительные конденсаторы. Без этого в схеме не обойтись, ведь напряжение на катоде лампы ЕСС88 около 194 В. К сожалению, эти конденсаторы существенно влияют на звучание усилителя.

Проведя тесты по прослушиванию данного усилителя, автор остановил свой выбор на конденсаторах **ClarityCap** серии SA, которые имеют очень хорошее соотношение цена/качество. Благодаря высокому рабочему напряжению (600 В), серия SA очень хорошо подходит для использования в ламповых схемах.



Топология печатной платы позволяет применить в конструкции качественные конденсаторы других производителей, в том числе **Wima** и **Solen**. Значение 3,3 мкФ выбрано для обеспечения спада АЧХ ниже 10Гц. Разделительный конденсатор совместно с входным сопротивлением транзисторного каскада составляют фильтр, частоту среза которого можно определить по формуле:

$$1 / (2\pi * 3.3 \mu F * 10 k\Omega)$$

Рабочее напряжение разделительных конденсаторов должно быть не менее 400В.

Выходной каскад.

Выходная ступень усилителя построена на **биполярных транзисторах**. Конечно, можно было бы использовать и полевые МОП транзисторы типа BUZ900P или 2SK1058, но автор намеренно их отсеял. Выбранные транзисторы довольно часто используются в звуковых усилителях и при очень хороших характеристиках для аудио-применения они имеют весьма скромную цену и высокую надёжность.

Выходной каскад является квази-комплементарным, т.е. построен на транзисторах одинаковой проводимости в обоих плечах. Подобная конфигурация имела широкое распространение в 70-80-х годах из-за отсутствия доступных р-п-р комплементарных транзисторов. И, в общем-то... заслужила плохую репутацию. Но! Автор считает, что полностью комплементарных транзисторов не бывает в принципе, а потому, используя однотипные транзисторы можно добиться большей реальной **симметрии плеч** каскада. Известная фирма Naim использует в своих усилителях только такую конфигурацию выходного каскада.

Значение питающего напряжения составляет 38 В, что является оптимальным для этого выходного каскада и позволяет для 4— ом или 8— ом нагрузки эксплуатировать усилитель без проблем.

Подробнее об элементах схемы.

Резистор R1 является сеточным резистором лампы V1a. Его значение не критично, но наличие обязательно! Резистор R2 совместно с входной ёмкостью лампы образует фильтр низких частот для защиты входа усилителя от помех. Аналогичную роль выполняет резистор R5 для катодного повторителя.

Номиналы резисторов R3 и R4 выбраны для получения на анодах ламп напряжения чуть больше 190В. При этом ток через каждую лампу составляет 0,8мА. Источник тока для диф. каскада построен на транзисторах Q6, Q7 для увеличения его внутреннего сопротивления. Светодиод задаёт опорное напряжение, а триммером P1 можно удобно и с высокой точностью установить требуемый ток источника. Для питания генератора тока используется стабилизатор на микросхеме LM337.

При желании в схему можно ввести общую отрицательную обратную связь. Её глубина зависит от номиналов резисторов R6 и R8. При указанных на схеме значениях глубина ООС составляет 6 дБ. Для повышения устойчивости параллельно R8 можно подключить конденсатор небольшой ёмкости (56пкФ). Если Вы не любите эксперименты или ярый противник отрицательной обратной связи, то элементы R6, R8, JP1, Cfb можно не устанавливать. Даже без общей ООС этот усилитель имеет очень низкие искажения.

Ток покоя лампы катодного повторителя выбран около 9 мА. Для снижения искажений и выходного сопротивления каскада этот ток желательно задавать побольше, но это может негативно сказаться на сроке службы лампы. Автор принял компромиссное решение.

Транзистор Q1 задаёт **ток покоя** транзисторного выходного каскада. Для обеспечения термостабилизации он должен быть закреплён как можно ближе к выходным транзисторам на общем радиаторе. Резистор P2 должен быть многооборотный и с надёжным контактом движка.

Резисторы R11, R16, P3 определяют входное сопротивление транзисторной части усилителя (при указанных номиналах оно составляет порядка 10 кОм). При использовании **полевых транзисторов** номиналы этих резисторов могут быть существенно увеличены. Триммер P3 служит для настройки «0» на выходе усилителя. Автор намеренно не использовал интегратор для этих целей, так как считает, что он негативно влияет на звучание.

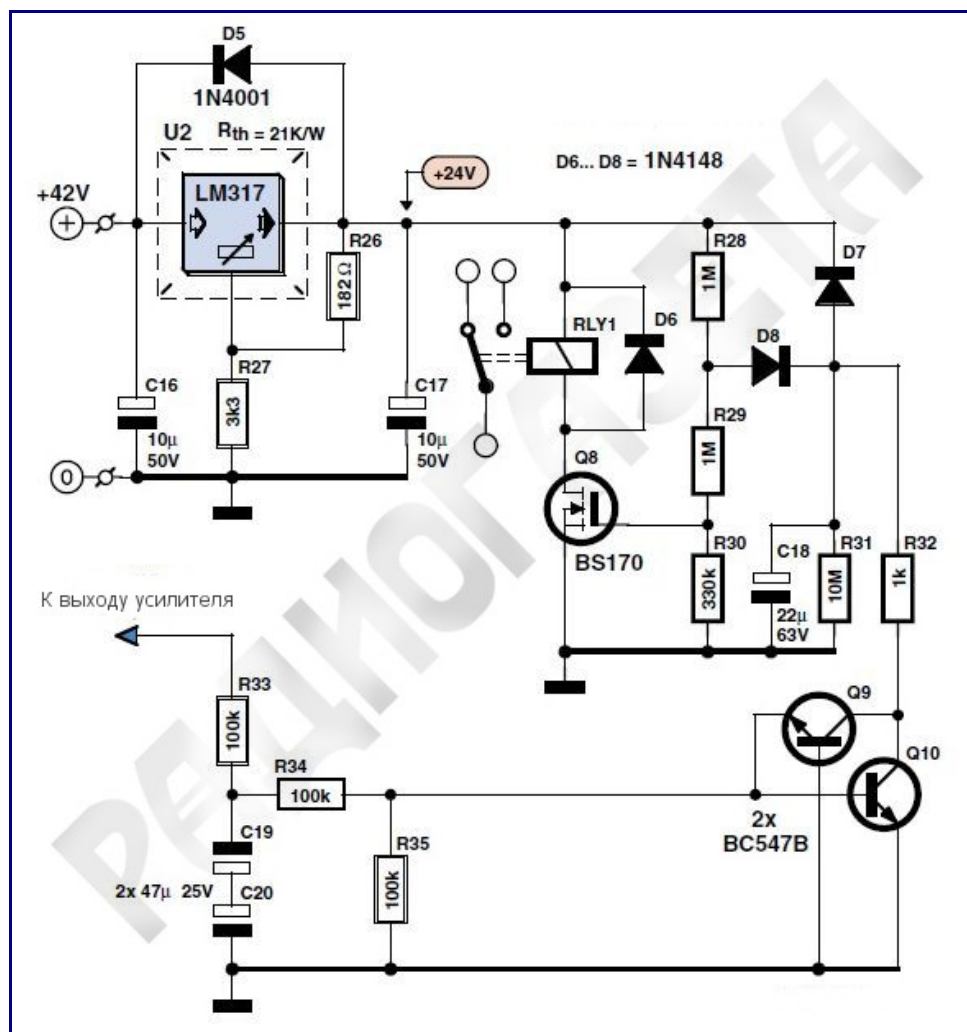
Элементы R12/C4 и R20/C8 являются дополнительными фильтрами питания, и исключать их из схемы крайне не рекомендуется. Ёмкости конденсаторов C4 и C8 могут быть в пределах 220мкФ-330мкФ.

Транзисторы Q2 и Q4 образуют классический составной **транзистор Дарлингтона**, который даёт необходимое усиление по току. Транзисторы Q3 и Q5 образуют составной **транзистор Шиклаи**, имитируя комплементарный PNP транзистор. Так как Q4 и Q5 являются однотипными, то по мнению автора и комплементарность здесь достигается более полная. Для снижения искажений каскада Шиклаи обычно в него добавляют диод Баксандалла. Автор заменил его транзистором в диодном включении (на схеме обозначен Q_{baх}), что позволило ещё больше снизить искажения выходного каскада. Измеренные искажения при 1 Вт выходной мощности с диодом составили 0,22%, а с транзистором 2SC1815, включенным диодом, всего 0,08%. При больших уровнях выходной мощности разница между диодом и транзистором уменьшается. Печатная плата позволяет установить транзисторы типов 2SC1815 или 2SC2073 или просто диод 1N4007.

Благодаря наличию местных отрицательных обратных связей, выходной каскад имеет низкие искажения и хорошую термостабильность. Резисторы R21 и R22 должны быть безындукционными и возможно меньших габаритов.

Элементы R23 и C7 формируют цепь Цобеля для обеспечения стабильности усилителя на частотах выше 100 кГц. Базовые резисторы R13, R17, R14, и R18 также предотвращают возможные возбуждения на высоких частотах. При ёмкостной нагрузке данного усилителя для повышения его устойчивости можно последовательно с выходом подключить индуктивность (как это часто делается). Катушка содержит 16 витков медного провода диаметром 0,75-мм, намотанных на оправке диаметром 6.3-мм или на резисторе 15 Ом мощностью 2 Вт.

Схема устройства защиты и задержки включения акустических систем показана на рисунке:



Увеличение по клику

Она обеспечивает задержку подключения АС через 30 секунд после включения усилителя и отключения их при появлении на выходе опасного постоянного напряжения. Для минимизации влияния на звук реле для этого блока необходимо выбрать с надёжными и качественными контактами.

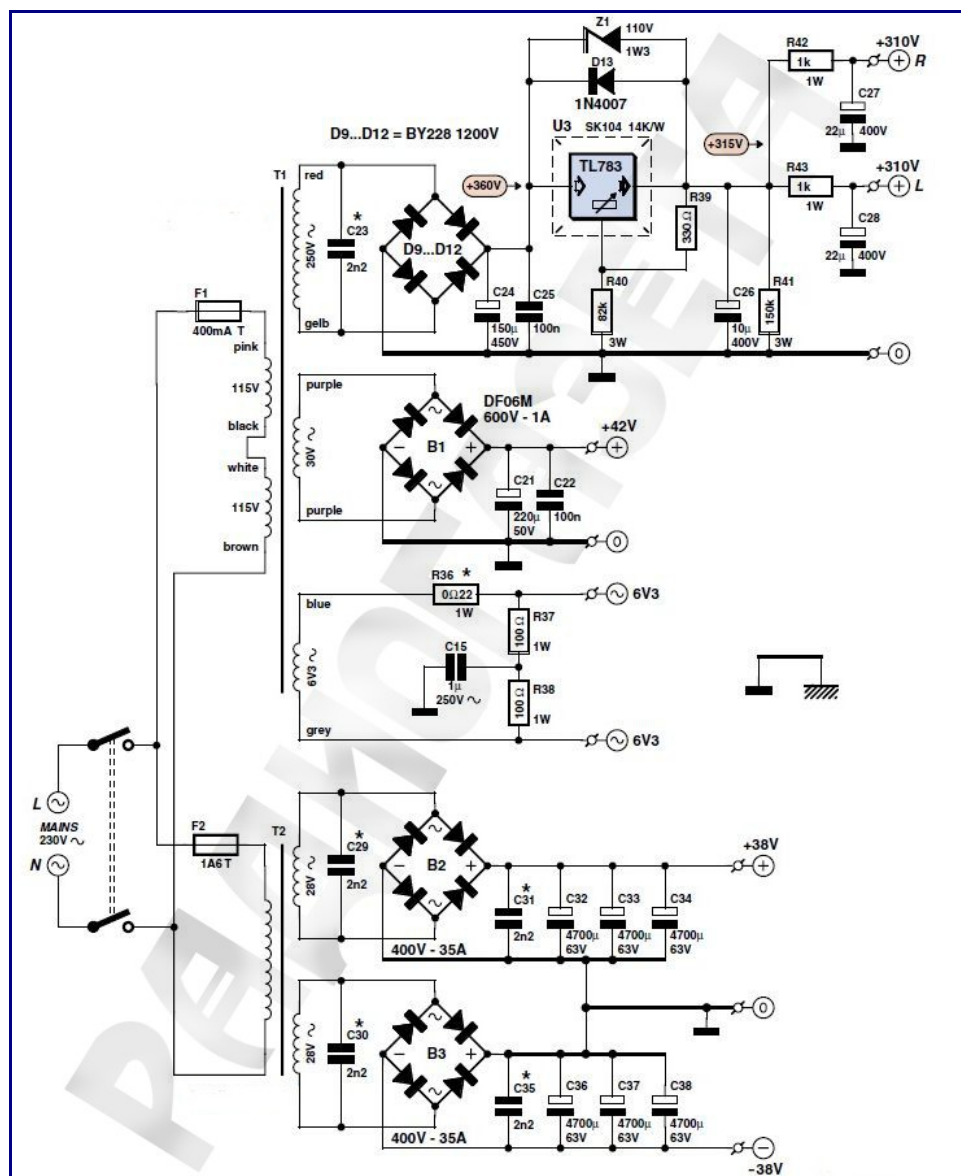
Блок питания

Высоковольтная часть схемы питается от стабилизатора, построенного на микросхеме TL783. Входное напряжение должно составлять порядка 360В. Микросхема установлена на небольшом радиаторе и надёжно изолирована от корпуса. Выходное напряжение 315В устанавливается резисторами делителя R39/R40. Резистор R41 служит для разряда конденсаторов после выключения усилителя.

R42 / C27 и R43 / C28 являются дополнительными фильтрами для левого и правого каналов. После них выходное напряжение блока питания составляет 310В.

Если вы не сможете найти для C23 конденсатор типа **Wima FKP1** (см. спецификацию) то лучше

его исключите из схемы!



Увеличение по клику

Вторичная обмотка трансформатора T1 с напряжением 30В используется для питания устройства защиты АС (не стабилизировано).

Напряжение накала соединяется с общим проводом (для уменьшения фона) через **конденсатор**. Оно не может быть непосредственно соединено с «землей» так как на катоде лампы ECC88 напряжение составляет 194В, что больше предельно допустимого напряжение катод-сетка. Конденсатор легко решает эту проблему. Резистор R36 подбирается экспериментально, чтобы напряжение накала составляло ~6.3В.

Выходной каскад усилителя питается нестабилизированным напряжением 38В. Все трансформаторы в конструкции автора — тороидальные.

Конструкция.

Все блоки усилителя собраны на печатных платах. Каждый канал усилителя собирается на отдельной плате, так что для стерео-варианта их понадобится две штуки.

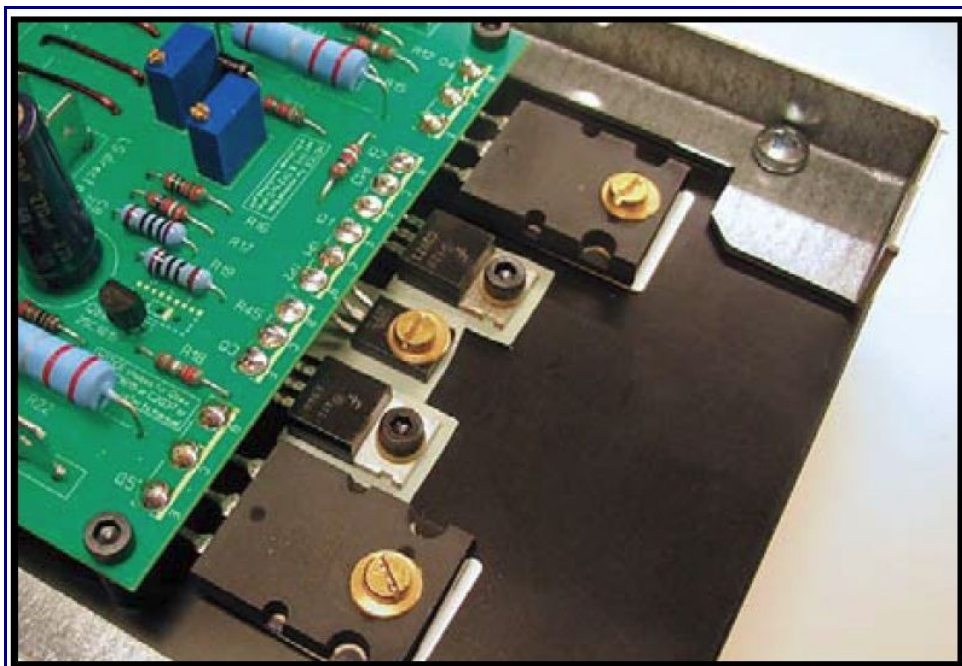
Автор гарантирует, что вы получите наилучшие результаты, если будете использовать именно те элементы, которые указаны в перечне (см. ниже). Между тем, ничто не мешает заменить их на другие аналогичные - имеющиеся в наличии или в плане эксперимента.

Сборку рекомендуется начинать с блока питания:



Увеличение по клику

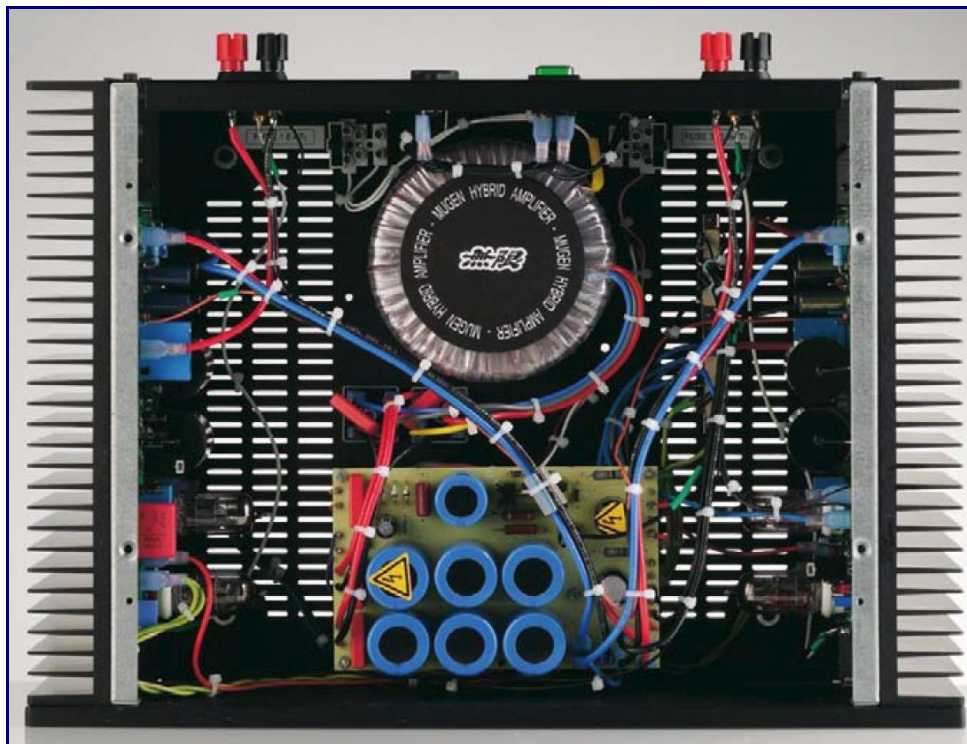
На фото показан вариант крепления выходных транзисторов и транзистора термостабилизации:



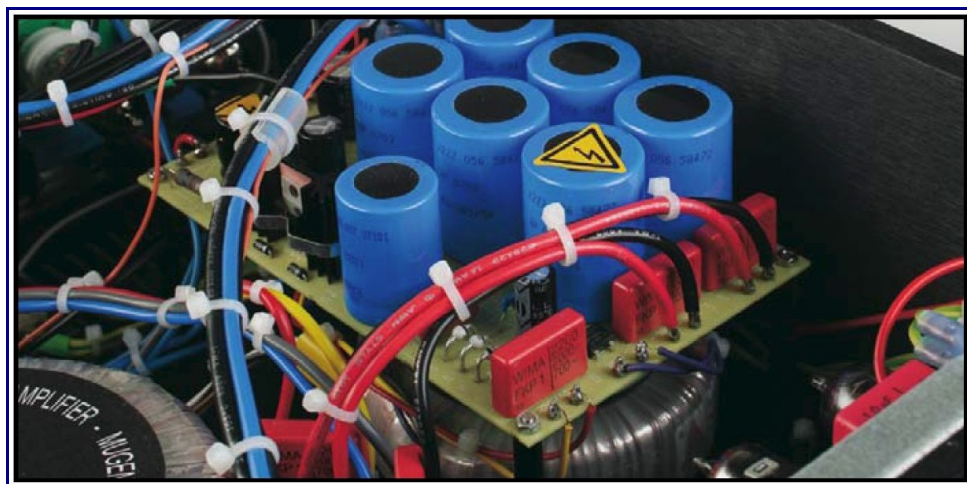
Увеличение по клику

Обратите внимание, что все транзисторы изолированы от корпуса/радиатора. Для достижения наилучших результатов автор советует сначала закрепить транзисторы на радиаторы, затем согнуть их выводы под прямым углом, после чего вставить выводы в отверстия платы и закрепить её. Пропаивать выводы следует в самую последнюю очередь, когда транзисторы и плата будут окончательно спозиционированы относительно друг друга и закреплены.

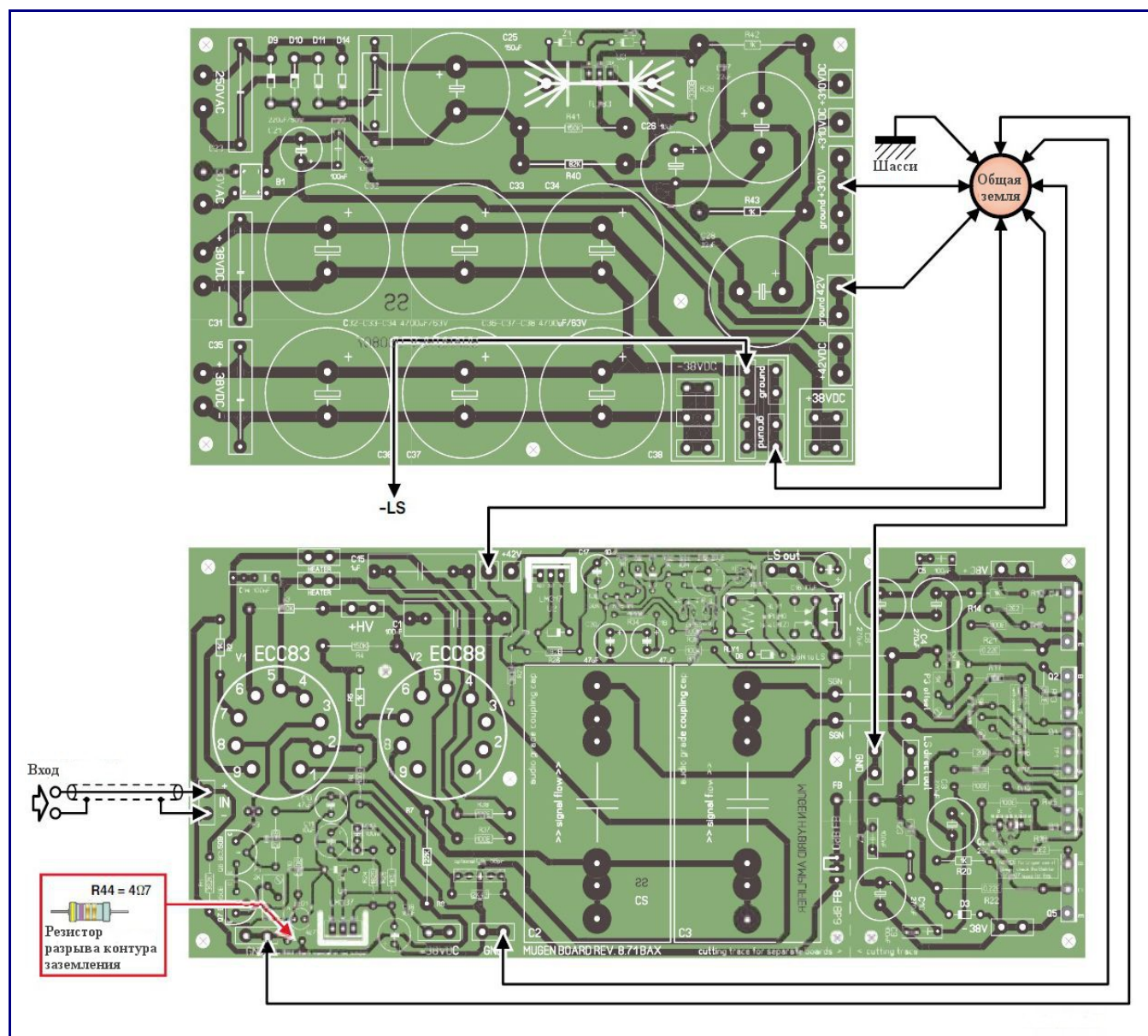
В конструкции автора два больших радиатора используются как боковые стенки корпуса усилителя, на которых закреплены печатные платы каждого канала. В центральной части расположены тороидальные трансформаторы питания, плата блока питания и плата защиты АС:



Для экономии места плата блока питания закреплена над трансформаторами:



Для снижения уровня фона и помех все «общие» провода должны соединяться в одной точке, как показано на схеме:



Налаживание усилителя.

Перед включением убедитесь, что транзисторы надёжно изолированы от радиатора/корпуса и друг от друга, полярность электролитических конденсаторов не перепутана, а лампы стоят на своих местах (они не взаимозаменяемы!)

Как отмечалось выше, усилитель имеет три органа регулировки:

- P1 устанавливает рабочий ток лампы ECC83.
- P2 контролирует ток покоя выходных транзисторов.
- P3 регулирует уровень постоянного напряжения на выходе усилителя.

Перед включением движок P2 необходимо поставить в верхнее по схеме положение (замкнуть на коллектор Q1). Этим мы обеспечим минимальный ток покоя транзисторов после включения.

Триммер P1 нужно выставить примерно на 800 Ом (выставляется перед запайкой в плату).

После включения усилителя без подачи входного сигнала и без подключения нагрузки, отрегулируйте триммером P1 напряжение в контрольной точке TP3, которое должно составлять 1,6В. При этом напряжение на катode V2a должно быть 195 V ($\pm 5\%$). Эти напряжения взаимосвязаны. Если какое-то напряжение сильно отличается от указанных, какую-то из ламп придётся заменить.

Затем триммером P3 установите нулевое напряжение на выходе усилителя. Оно может

находиться в пределах от -50мВ до +50 мВ. Это нормально. После этого триммером Р2 установите ток покоя усилителя в районе 100-150 мА. Для этого можно контролировать напряжения на резисторах R21 или R22, которые должны лежать в диапазоне 22 мВ-33 мВ.

После прогрева усилителя в течение получаса проверьте установленные значения и если нужно откорректируйте их.

В усилителе используется высокое рабочее напряжение. Помните о технике безопасности при работе с электричеством!!!

Заключение.

Несмотря на отсутствие общей отрицательной обратной связи, усилитель обеспечивает низкие искажения сигнала на малых уровнях мощности и хороший коэффициент демпфирования, что обычно является проблемой для усилителей без общей ООС.

Усилитель обладает великолепным звучанием с хорошей динамикой и высокой детальностью. Особенно бережно он обращается с микродетальями (сигналами малого уровня). При этом в звучании отсутствует ярковыраженный ламповый окрас.

MuGen воплотил в себе лучшее из двух миров — транзисторную динамику и ламповую теплоту звука (в пределах разумного, без транзисторной жёсткости).

Надо заметить, что этот усилитель эксплуатируется автором аж с **2007 года и пока ни один другой усилитель не превзошёл его по музыкальности!**



Увеличение по клику

Перечень элементов.

Усилитель и [блок питания](#)

(Для стерео-вариант все детали надо взять в двойном количестве)

Резисторы

(1% металлоплёночные, мощностью 0,5Вт, если не указано особо)

R1 = 392 kОм

R2,R5,R12,R20,R32 = 1 kОм

R3,R4 = 150 kОм 2W (BC PR02 series)

R6,R15,R19,R45 = 100 Ом

R7 = 22 kОм 3W (BCPR03 series)

R8 = 2,43 kОм

R9 = 274 Ом

R10 = 560 Ом

R11 = 18 kОм
R13,R17 = 392 Ом
R14,R18 = 2,2 Ом
R16 = 20 kОм
R21,R22 = 0,22 Ом 4W (Intertechnik MOX)
R23 = 10 Ом 2W
R24,R26 = 182 Ом
R25 = 1,5 kОм
R27 = 3,3 kОм
R28,R29 = 1 MОм
R30 = 330 kОм
R31 = 10 MОм
R33, R34, R35 = 100 kОм
R36 = подбирается (примерно 0.22 Ом)
R37,R38 = 100 Ом 1W
R39 = 330 Ом
R40 = 82 kОм 3W
R41 = 150 kОм 3W
R42,R43 = 1 kОм 1W
R44 = 4,7 Ом
P1 = 2 kОм, многооборотный
P2,P3 = 5 kОм, многооборотный

Конденсаторы:

C1 = 100nF 400VDC
C2,C3 = 3.3мкФ 400VDC (ClarityCap SA 630V аудиофильского качества)
C4,C6,C8,C10 = 270 мкФ 50V (Panasonic FC)
C5,C9,C12,C14,C22 = 100nF 50V
C7 = 100nF (Vishay MKP-1834)
C11,C16,C17 = 10мкФ 50V
C13 = 47мкФ 50V
C15 = 1мкФ 250V (типа Wima)
C18 = 22мкФ 63V
C19,C20 = 47мкФ 25V
C21 = 220мкФ 50V
C23 = 2n2 (Wima FKP-1/700 VAC)
C29,C30,C31,C35 = 2n2 (Wima FKP-1/700 VAC)
C24 = 150мкФ 450V
C25 = 100n 450 VDC
C26 = 10мкФ 400V
C27,C28 = 22мкФ 400V
C32,C33,C34,C36,C37,C38 = 4700 мкФ63V (BC056, 30×40 mm, Conrad Electronics)
C39 = 10мкФ 25V
Cfb = 56pF (optional)

Активные элементы:

D2,D3 = UF4007 (при отсутствии можно поставить — 1N4007)
D4,D5 = 1N4001
D6,D7,D8 = 1N4148
D9,D10,D11,D12 = BY228
D13 = 1N4007
LED1 = LED, 5mm, красный светодиод
Z1 = стабилитрон 110V 1.3W
Q1 = BD139
Q2 = 2SC2073
Q3 = 2SA940
Q4,Q5 = 2SC5200
Q6,Q7 = BC550B

Q8 = BS170
Q9,Q10 = BC547B
Qbax = 2SC1815BL
U1 = LM337
U2 = LM317
U3 = TL783

Лампы:

V1 = ECC83 (pref. JJ Electronics), 6H2П
V2 = ECC88 (pref. JJ Electronics), 6H23П

Разное:

B1 = мостовой выпрямитель 600 V, 1A (DF06M)
B2,B3 = мостовой выпрямитель 400V, 35A
T1 = трансформатор с вторичными напряжениями: 30V + 250V + 6.3V (Amplimo type 3N604)
T2 = трансформатор со вторичными напряжениями: 2×28 VAC, 300VA (Amplimo type 78057)
RLY1 = реле 24V (например Amplimo type LR)
Радиаторы U3 Fischer SK104 25,4 STC-220 14K/W
Радиаторы U1 и U2, FischerFK137 SA 220, 21K/W
Радиаторы для Q4 и Q5, с тепловым сопротивлением 0.7K/W или лучше.
9-контактная панель для ламп - 2шт.

Чертежи печатных плат (оригинал в **формате pdf**) качаем [здесь](#). (rar-архив, 186 kb)

Чертежи печатных плат в **формате Sprint-Layout** от наших читателей (редакцией «[РадиоГазеты](#)» НЕ ПРОВЕРЯЛИСЬ!) качаем [здесь](#) (rar-архив 117 kb).

Статья подготовлена по материалам журнала «Электрон».

Вольный перевод — главный редактор «[РадиоГазеты](#)».

Удачного творчества!

Источник: http://radiopages.ru/audio/power-amplifier/hybrid_m.html#ixzz4G6cAPIdR

http://radiopages.ru/audio/power-amplifier/best_lin.html

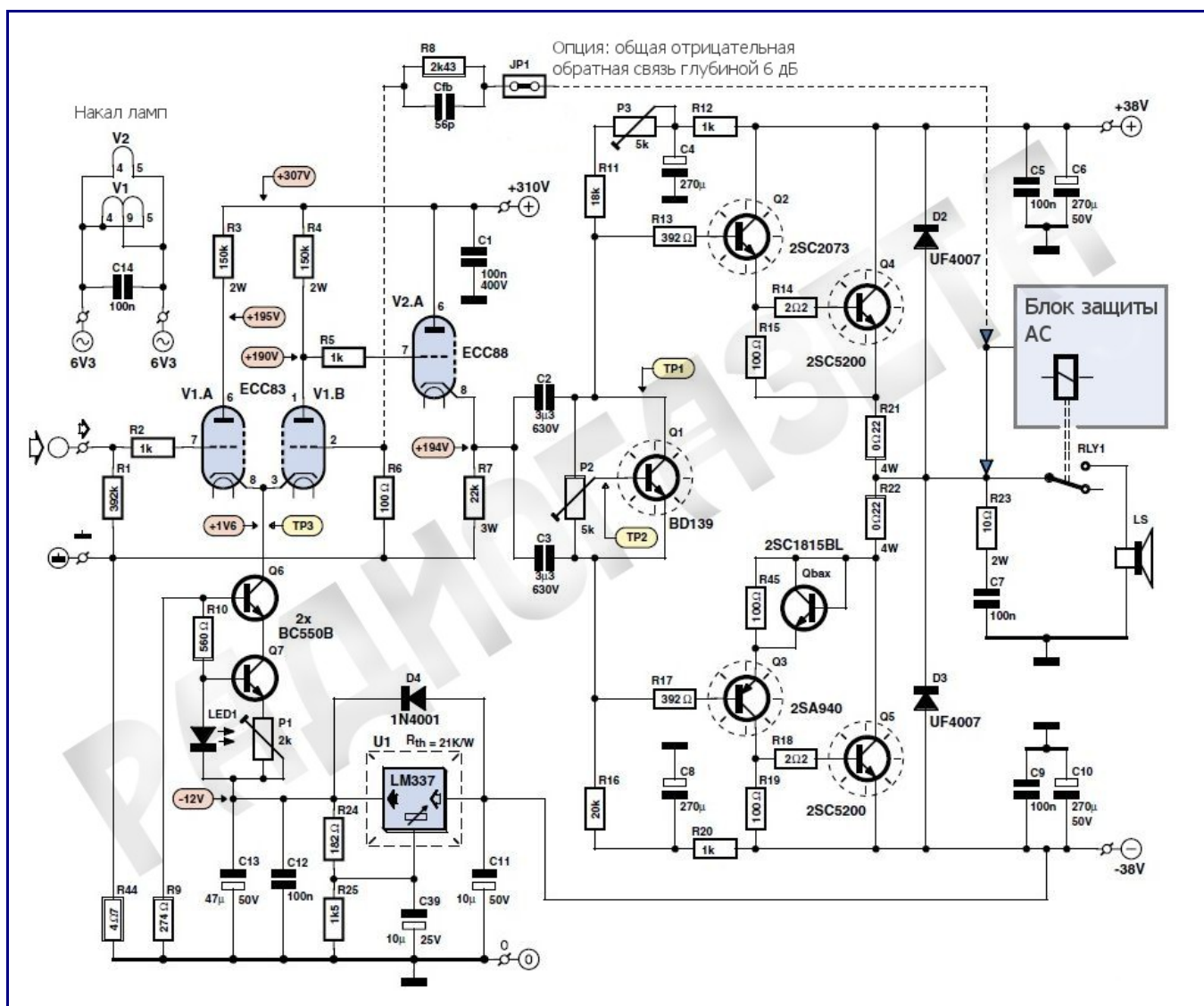
Повышение линейности усилителя MuGen

В предыдущей нашей публикации мы познакомили вас с конструкцией [гибридного усилителя мощности MuGen](#). Вобрав в себя всё самое лучшее из «двух миров» — ламповой и транзисторной схемотехники, этот усилитель обладает отличной линейностью и прекрасным звучанием. И всё это при полном отсутствии **общей отрицательной обратной связи**! По соотношению цена/качество конкурентов ему найти будет проблематично.

У самого автора этот усилитель эксплуатируется с 2007 года и успел посоревноваться в музыкальности со многими самодельными и промышленными аппаратами весьма именитых фирм. Пока замены ему найдено не было. Между тем автор, Уим дэ Хэн, не прекращал работы по улучшению своего творения в стремлении сделать хорошее лучшим.

С результатами его исследований и вариантами доработок усилителя MuGen мы и познакомим вас в этой статье.

Для начала напомним оригинальную схему усилителя:



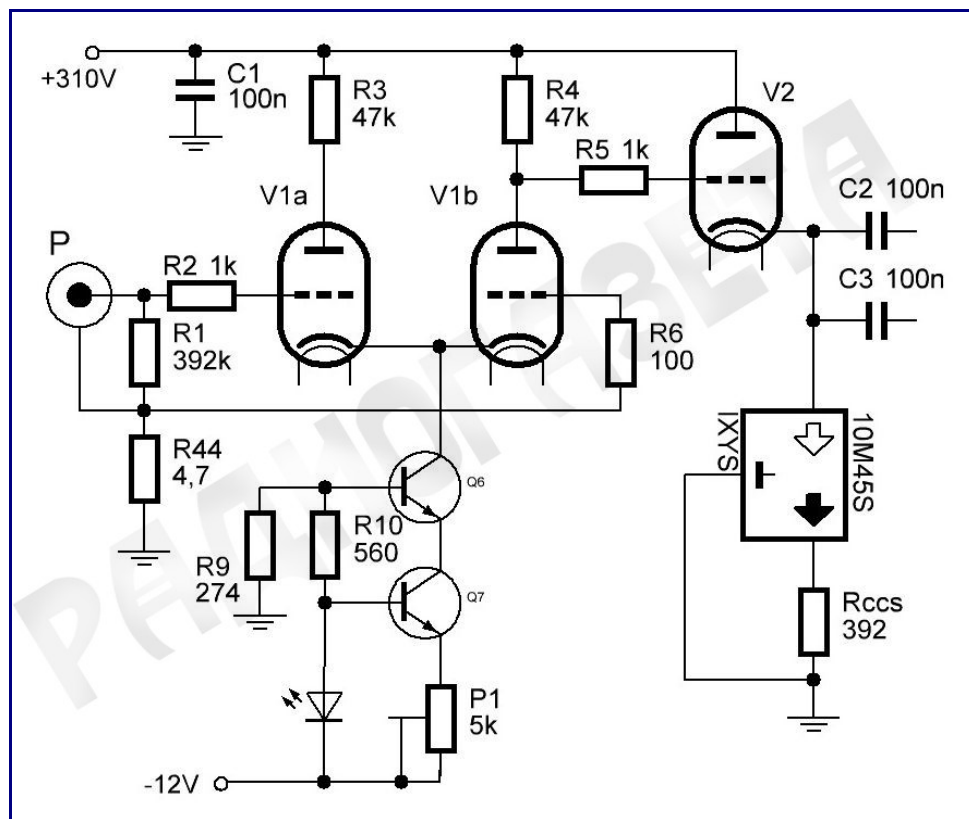
В первую очередь автор экспериментировал с разными типами ламп для первой ступени (каскады усиления напряжения) своего усилителя. Перебрав различные варианты, в конце концов, в первом каскаде на смену ECC83 была утверждена лампа 5965. Она обладает вчетверо большей крутизной, меньшим внутренним сопротивлением и искажениями. Из-за чего от общей ООС автор решил отказаться совсем, то есть цепочка R8, Cfb и джампер JP1 были полностью исключены из схемы.

Цоколёвка новой лампы полностью совпадает с предшественницей, так что переделка печатных плат не потребовалась. Для изменений режимов работы дифференциального каскада необходимо лишь заменить анодные резисторы R3 и R4 на резисторы с номиналом 47kOm, а триммером P1 установить напряжение в контрольной точке TP3 равное 3В. Токи ламп при этом составляют 3,5мА.

Для катодного повторителя в качестве лампы V2 были испробованы 6Н1П, 6ВQ7А, 6СG7. Победила 6ВQ7А, так как показала наименьшие искажения. Результаты измерений представлены в таблице:

выходное напряжение (в)	выходная мощность (вт)	искажения с лампой 6н1п (%)	искажения с лампой 6ВQ7а (%)	искажения с лампой 6СG7/6FQ7 (%)
2,3	1	0,072	0,065	0,052
5	5	0,074	0,055	0,058
10	20	0,045	0,075	0,152
15	45	0,08	0,17	0,26
20	80	0,28	0,36	0,45
22,3	100	0,64	0,55	0,65

Переработанная схема ламповой части усилителя представлена на рисунке:



Результаты измерений для разного типа ламп в катодном повторителе (с источником тока в катодe) приведены в таблице:

выходное напряжение (в)	выходная мощность (вт)	искажения с лампой 6н1п (%)	искажения с лампой 6BQ7a (%)	искажения с лампой 6CG7/6FQ7 (%)
2,3	1	0,08	0,08	0,07
5	5	0,1	0,085	0,075
10	20	0,09	0,065	0,06
15	45	0,082	0,05	0,04
20	80	0,13	0,09	0,08
22,3	100	0,3	0,22	0,26

Удачного творчества!

Дополнение от А.Петрова

Автор Уим дэ Хэн удачно выбрал ДК на лампах для УН. В отличие от транзисторов у которых выходные характеристики практически горизонтальны в лампах имеется сильная взаимозависимость тока анода и напряжения на нем.

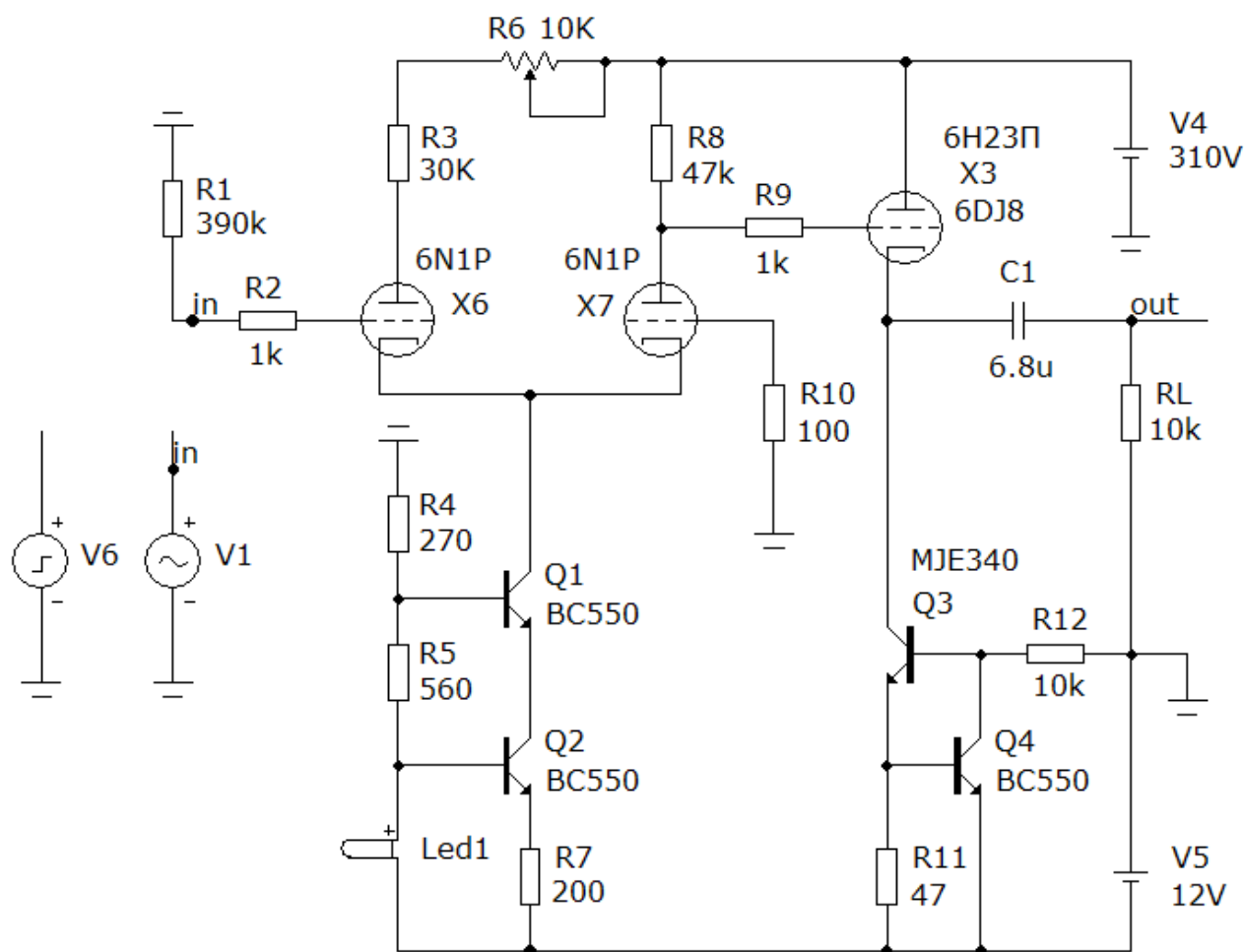
Автор выбрал одинаковые резисторы в анодах, что гарантирует одинаковые режимы как по току, так и по напряжению на анодах. Такой режим при работе на холостом ходу или на высокое сопротивление нагрузки обеспечивает максимальное подавление гармоник на выходе (анод правой лампы). При этом спектр гармоник получается очень коротким, по сути 2-я и 3-я гармоники. Для обеспечения высокого сопротивления нагрузки автор применил катодный повторитель с высоким входным сопротивлением. Однако сам катодный повторитель также вносит искажения.

Дальнейшее улучшение автора было направлено на уменьшение искажений вносимых катодным повторителем. Для этой цели автор заменил катодный резистор 22 кОм на генератор тока. Однако и эта мера не позволяет полностью реализовать возможности схемотехнического решения.

Добавление подстроечного резистора в анод левой лампы позволяет в небольших пределах менять режимы ламп и тем самым оптимизировать параметры УН по минимуму гармоник. Если при одинаковых резисторах в анодах на выходе правой лампы ДК присутствуют только вторая и третья гармоники небольшого уровня, но не оптимизируется катодный повторитель, то с помощью подстроечного резистора можно оптимизировать весь УН, правда при этом появляется небольшой уровень 4-й гармоники.

Варианты УН на лампах 6Н1П и 6Н2П

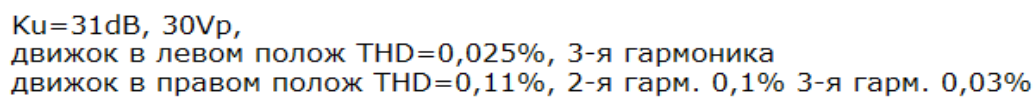
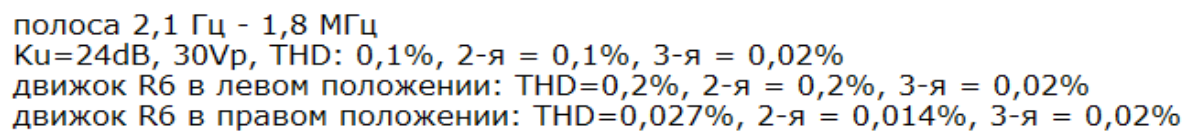
Примечание: Варианты ГСТ со светодиодом предложены IDDQD

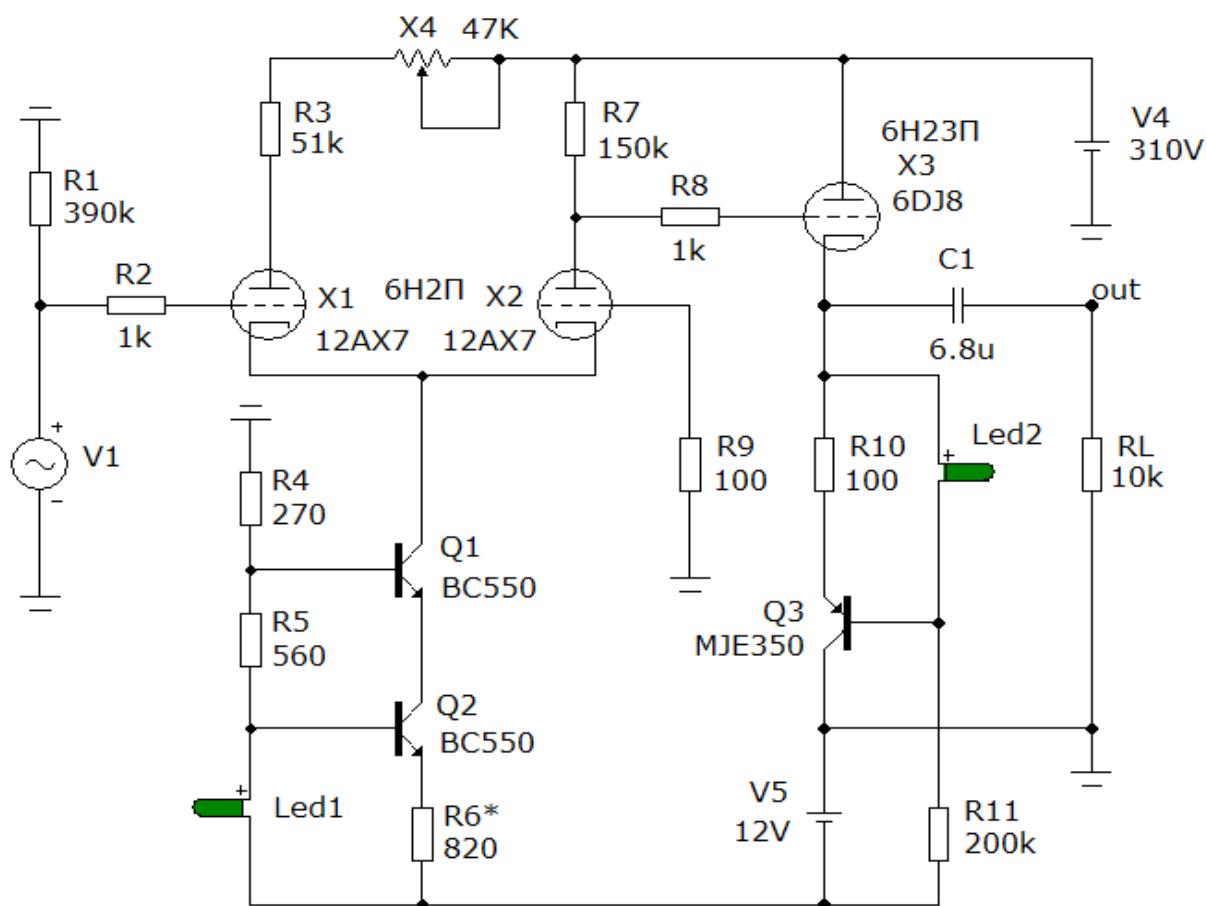


$K_u=24\text{dB}$, 30Vp , THD: 0,03%, 2-я = 0,01%, 3-я = 0,027%

движок R6 в левом положении: THD=0,11%, 2-я = 0,1%, 3-я = 0,027%

движок R6 в правом положении: THD=0,076%, 2-я = 0,07%, 3-я = 0,027%





$K_u=32\text{dB}$, 30Vp,
 движок в левом полож THD=0,03%, 3-я гармоника
 движок в правом полож THD=0,11%, 2-я гарм. 0,1% 3-я гарм. 0,03%