

ЛИНЕЙНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ НА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ МОП ПТ ТРАНЗИСТОРАХ

Введение

Усилитель класса АВ, описанный в этой статье, использует в качестве выходного каскада пару комплементарных МОП ПТ HEXFET. Эта особенность позволяет улучшить рабочие характеристики в сравнении с эквивалентным выходным каскадом на биполярных транзисторах и позволяет упростить схемы драйвера, когда выходные приборы управляются одиночным драйвером класса А. В то время, когда проектировалась эта схема, силовые МОП ПТ HEXFET с логическим уровнем управления еще не были доступны и были использованы обычные МОП ПТ. Применение приборов с низким пороговым напряжением упростит схему и снизит рассеиваемую мощность в режиме покоя.

Описанная схема выдает эффективную мощность 60 Вт на 4-омную нагрузку, когда работает от питания ± 30 В. Ширина полосы превышает 100 кГц, но может быть подобрана под требования пользователя изменением величин компонентов.

1. Описание схемы

Электрическая схема усилителя показана на Рис.1, а список компонентов приведен в таблице 1. Использование разделенных шин питания ($\pm V_{DD}$) дает заметное снижение пульсаций источника питания и позволяет непосредственно подключить нагрузку, R_{load} . Выходные транзисторы Q_5 , Q_6 работают в конфигурации истокового повторителя. Это дает двойное преимущество; а) снижаются возможные осцилляции в мощном выходном каскаде, так как коэффициент усиления по напряжению меньше единицы и б) исключается обратная связь от теплоотвода, на котором устанавливается прибор, так как вывод стока, который электрически соединен с корпусом TO-220, находится под постоянным напряжением.

Симметричность выхода достигается управлением напряжения на затворе N-канального транзистора Q_5 с компенсационной обратной связью с выхода. Использование цепи обратной компенсационной связи, C_4 , R_8 , R_9 также позволяет запускаящему транзистору Q_4 работать при практически постоянном токе, что улучшает линейность каскада схемы управления. Диод D, работает как «подпорка» для цепи обратной компенсационной связи, ограничивая положительное напряжение на затворе Q_5 до $+V_{DD}$. Это позволяет поддерживать симметрию при нагрузке.

Транзистор Q_3 и резисторы R_{11} , R_{12} , R_{13} обеспечивают напряжение смещения для выходных приборов, R_{12} - переменный резистор, регулирующий выходной ток покоя изменением порогового напряжения МОП ПТ. Степень температурной компенсации учитывается в схеме, так как и напряжение эмиттер-база биполярного транзистора Q_3 , и пороговые напряжения двух МОП ПТ имеют температурный коэффициент равный $-0,3\%/^{\circ}\text{C}$.

Транзистор Q_4 драйвера класса А, работает при номинальном токе смещения 5 мА, определяемом резисторами R_8 , R_9 . Q_4 запускается дифференциальной входной парой, Q_1 Q_2 . Ток смещения во входном каскаде устанавливается равным 2 мА резистором R_3 . Сигнал отрицательной обратной связи подается с выхода усилителя на базу Q_2 с помощью резистора R_6 .

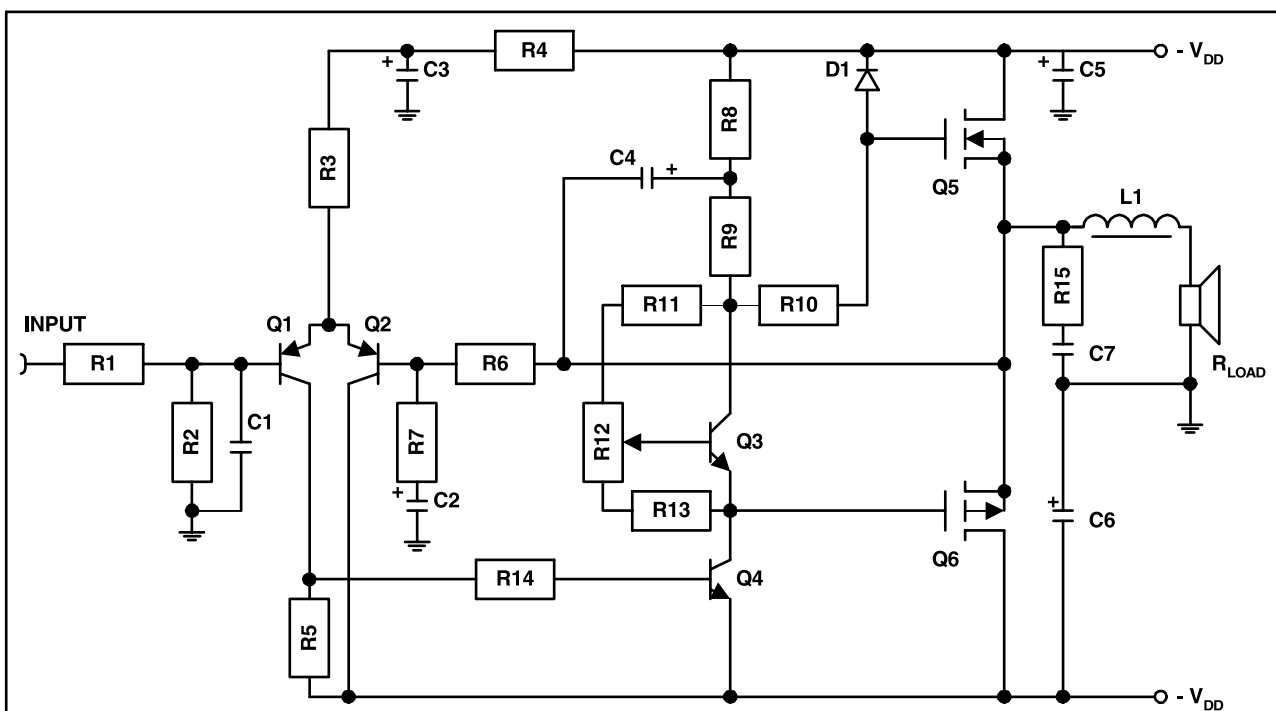


Рис. 1. Электрическая схема усилителя класса АВ

Components List							
R ₁	4.7KΩ	R ₉	2.7KΩ	C ₁	220 pF	Q ₁ , Q ₂ ,	2N4356, 2N5086
R ₂	47KΩ	R ₁₀	680Ω	C ₂	100 μF 10V		or equivalent
R ₃	15KΩ	R ₁₁	10KΩ	C ₃	47 μF 40V	Q ₃ , Q ₄ ,	2N4410, 2N5088
R ₄	1.2KΩ	R ₁₂	1KΩ Pot.	C ₄	47 μF 40V		or equivalent
R ₅	560Ω	R ₁₃	820Ω	C ₅	2200 μF 40V	Q ₅	IRF532
R ₆	47KΩ	R ₁₄	4.7KΩ	C ₆	2200 μF 40V	Q ₆	IRF9532
R ₇	4.70Ω	R ₁₅	10 Ω 1 W	C ₇	68 nF	D ₁	IN4002
R ₈	2.7KΩ	R _{load}	8/4 Ω	L ₁	3 μH aircored		

Таблица 1. Перечень комплектации

Компоненты R₇, C₂ определяют коэффициент усиления при замкнутой цепи обратной связи усилителя (R₆/R₇) и обеспечивают увеличение коэффициента усиления на низкой частоте. Дополнительные компоненты R₁₅, C₇ включенные между узловой точкой выхода и землей подавляют высокочастотный отклик выходного каскада, приводя к тому, что высокочастотные характеристики усилителя определяются входной схемой. Компоненты R₁, R₂, C, на входе усилителя определяют входной импеданс (47 кОм) и подавляют помехи.

Входной каскад усилителя требует дополнительного подавления пульсаций источника питания, которое выполняется компонентами R₄, C₃. Дополнительные компоненты схемы были добавлены, чтобы гарантировать высокочастотную стабильность всего усилителя. Установка компонентов и их величины будут, в некоторой мере, зависеть от топологии печатной платы. При разработке печатной платы нужно следовать нижеуказанным правилам:

(а) Следует применять принцип «общей земли», т.е. развязочные конденсаторы источника питания, компоненты смещения нагрузки и входного каскада - все должны располагаться в непосредственной близости к земле, устраняя воздействия тока общей точки земли. Аналогично нужно использовать «общий узел выхода», нагрузка, резистор обратной связи и высокочастотные компоненты подавления должны исходить из общей точки печатной платы,

(б) Длина соединительных выводов к затворам МОП ПТ Q₅, Q₆ должна быть минимальной, чтобы избежать генерации в мощном выходном каскаде. Для подавления генерации можно включать последовательно затвору резистор R₁₀, но слишком большая величина резистора будет ограничивать скорость нарастания выходного напряжения. Генерация в усилителе, вызываемая емкостной связью в базе запускающего транзистора, Q₄, подавляется добавлением последовательного резистора R₄.

(с) Сдвиг фазы в усилителе при работе на реактивную нагрузку может приводить к высокочастотной неустойчивости. При емкостной нагрузке добавление маленького дросселя с воздушным сердечником (3мкГ при нагрузке 8 Ом, 2 мкф) будет восстанавливать стабильность. Окончательные параметры дросселя определяются экспериментально. На рис.2 показана топология печатной платы, которая может использоваться для схемы, показанной на рис.1. Проектирование было проведено в соответствии с вышеуказанными правилами.

2. Рабочие характеристики усилителя

(а) Выходная мощность: Для достижения среднеквадратичной мощности 60 Вт на 4-х Ом нагрузке, ток в нагрузке имеет среднеквадратичное значение 3,9 А или пиковое значение 5,5 А. Эта информация получается из уравнений (1) и (2):

$$P_O = I_{rms}^2 R_{load} = \frac{V_{rms}^2}{R_{load}} \quad (1)$$

$$I_{rms} = \frac{I_{pk}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$V_{rms} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Кроме того, из уравнения (1) напряжение, развиваемое на нагрузке при выходной мощности 60 Вт, имеет среднеквадратичное значение 15,5 В или пиковое 22 В.

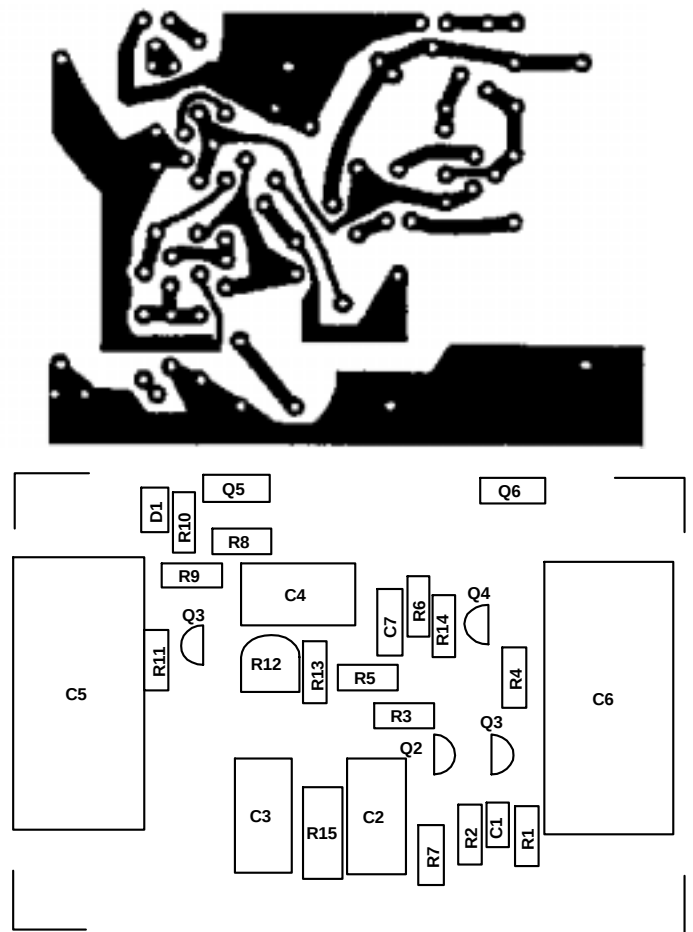


Рис.2. Топология печатной платы усилителя

Чтобы выдерживать ток истока 5,5 А, N-канальный МОП ПТ IRF532 требует напряжение затвор-исток равное 5В. Можно сделать вывод, что напряжение смещения затвора для достижения пиковой мощности в положительном направлении равно $V_{pk} + V_{gs} = 27$ в. Аналогичный расчет для отрицательной ветви при использовании Р-канального МОП ПТ IRF9532 показывает, что требуется подача отрицательного напряжения смещения затвора -28 В.

Следовательно, для 60 Вт-ного выхода будет достаточно напряжения ± 30 В, при условии, что подаваемое напряжение будет не ниже ± 28 В под нагрузкой, т.е. импеданс источника питания должен быть лучше, чем 1 Ом. Соотношения между мощностью на нагрузке, и мощностью, получаемой от источника питания, показаны на рис.3, при синусоидальном сигнале напряжения ± 30 В. Кривая, представляющая мощность на нагрузке, может быть легко построена с помощью уравнения (1) для различных величин тока нагрузки. Мощность, потребляемая от источника, определялась с помощью следующего уравнения:

$$P_S = (V_{avg})(I_{avg}) = (2V_{DC})\left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{rms}\right) \quad (4)$$

Разница между двумя значениями мощности - это мощность, рассеиваемая на МОП ПТ, и, как можно видеть из рис.3, она имеет пик, равный примерно 46 Вт. Предполагая, что максимальная температура окружающей среды равна 55°C, полное тепловое сопротивление между переходами двух МОП ПТ и окружающей средой должно быть меньше 2°C/Вт. Считая, что каждый из МОП ПТ IRF532 и IRF9532 имеет тепловое сопротивление переход-корпус равное 1,67°C/Вт, максимальная температура корпуса должна быть менее 110°C и тепловое сопротивление теплоотвод-окружающая среда должно быть меньше 1,16°C/Вт.

(б) Частотная характеристика: амплитудно-частотные характеристики усилителя при замкнутой и разомкнутой цепи обратной связи показаны на рис.4. Коэффициент усиления при разомкнутой обратной связи, измеренный при разомкнутых затворе и истоке МОП ПТ, равен 30 дБ, точки -3дБ появляются при 15 Гц и 60 кГц. Кривые при замкнутой обратной связи показаны для коэффициентов усиления усилителя 100 ($R_7 = 470$ Ом) и 20 ($R_7 = 2,2$ кОм). В обоих случаях кривые остаются плоскими в пределах +1дБ между 15 Гц и 100 кГц при нагрузке 8 Ом. Скорость изменения выходного напряжения усилителя, измеренная при меандре 2 между пиками на входе, составила 13В/мксек при нарастании и 16В/мксек при спаде. Отклонение может быть сбалансировано добавлением последовательного резистора к затвору Q_6 .

(с) Полное искажение гармоник: Верность воспроизведения усилителя показана на кривых искажения, рис.5, и она ограничивается петлевым усилением. Снижение коэффициента усиления при замкнутой петле обратной связи от 100 до 20 создает существенное улучшение рисунка искажения. Ток покоя выходного каскада был установлен на 100 мА, и он может существенно влиять на измерение искажений, если будет ниже 50 мА.

(d) Режим покоя: Зависимость тока покоя в выходном каскаде и выходного напряжения смещения от напряжения источника питания иллюстрируется в таблице 2. Ток покоя устанавливается, в первую очередь, потенциометром R_{12} на минимальное напряжение смещения - повернут до отказа против часовой стрелки, если используется топология печатной платы на рис.2 и подавая напряжение положительного питания через амперметр с максимальным значением шкалы 1 А. Затем R_{12} регулируется ток покоя, пока амперметр не покажет 100 мА при питании ± 30 В. Амперметр должен быть удален из схемы перед подачей входного сигнала на усилитель.

3. Требования к источнику питания

Простой сетевой источник питания, пригодный для усилителя класса АВ, показан на рис.6. Напряжения ± 30 В берутся от вторичной обмотки сетевого трансформатора с отводом от средней точки. Конденсаторы развязки питания C_5 и C_6 , емкостью 2200мкФ, (рис. 1), которые должны быть установлены как можно ближе к выходному каскаду усилителя, снижают пульсацию питания до 5,5 В от между пиками при полной нагрузке.

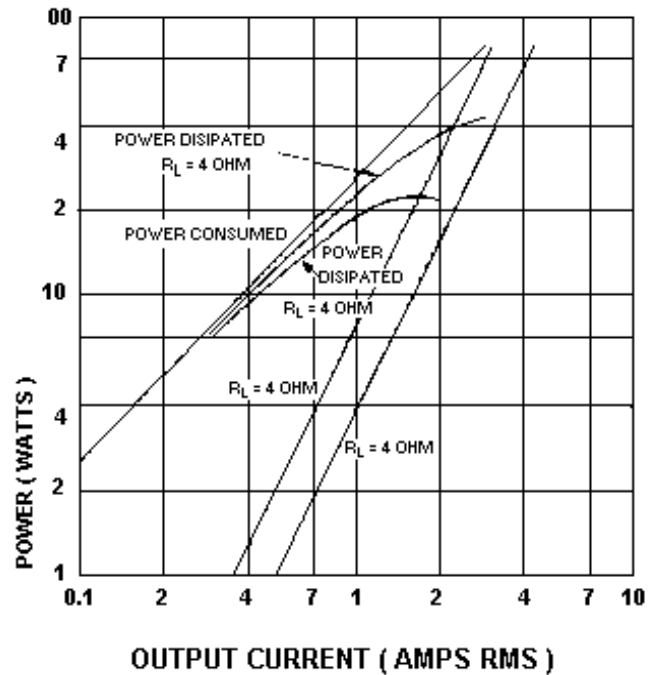


Рис. 3. График зависимости мощности от тока усилителя с нагрузкой 4 и 8 Ом при напряжении питания + 30 В

Variation in Output Offset Voltage and Output Quiescent Current with Supply Voltage		
Supply Voltage + V_{DD} V	Output Offset V_{OS} mV	Output Quiescent Current I_q mA
35	-40	135
30	-20	100
25	+4	75
20	+30	54

Таблица 2. Изменение выходного напряжения и тока при изменении напряжения питания

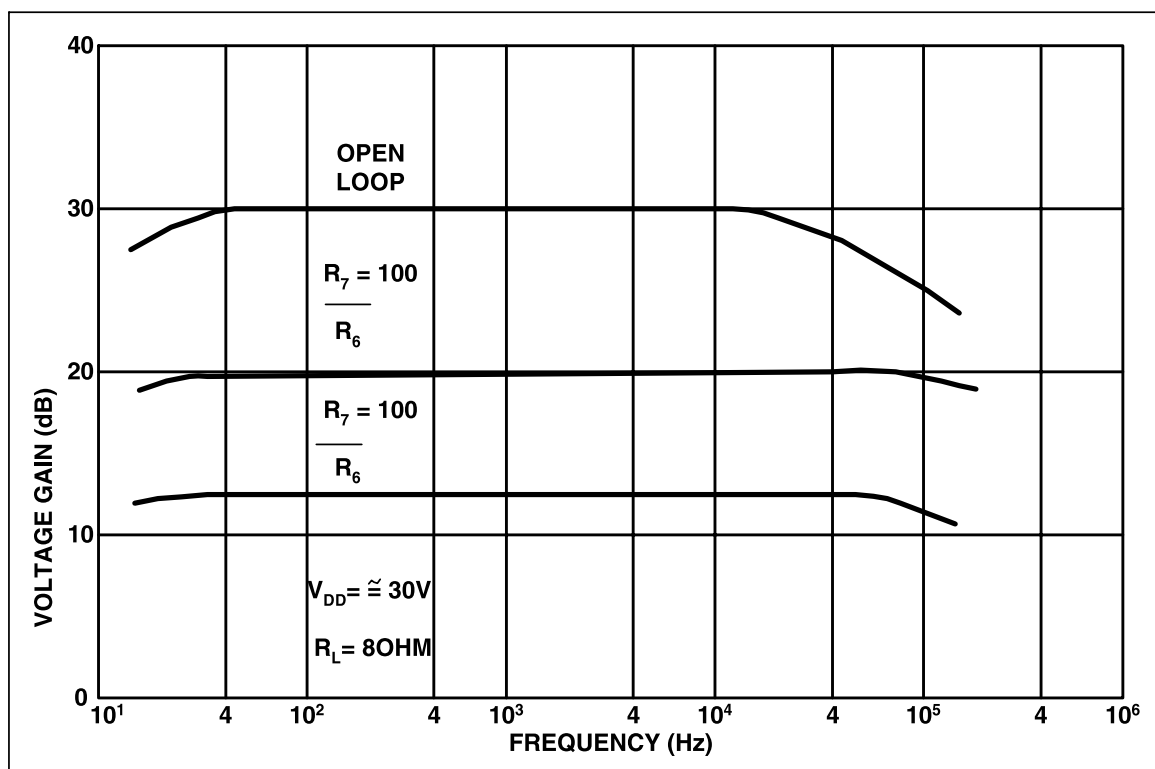


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики для замкнутой и разомкнутой петли обратной связи усилителя

4. Процедура отладки и поиск неисправностей

Маловероятно, что какой-либо опытный экспериментатор будет иметь трудности при достижении удовлетворительных результатов при построении усилителя по этой схеме. Печатная плата, показанная на рис.2, предназначена для помощи в этом плане. Главные проблемы, которые следует предусмотреть - это неправильная установка компонентов и повреждение МОП ПТ при обращении с ними или при генерации в схеме. В качестве руководства для экспериментатора предлагается следующий перечень контрольных проверок для поиска неисправностей:

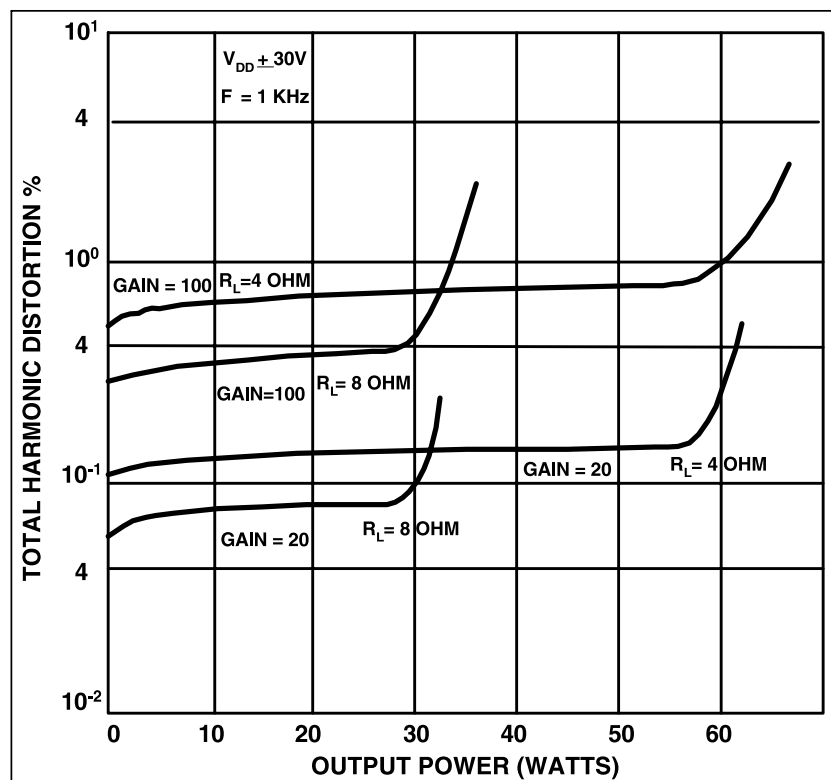


Рис. 5. График зависимости полного искажения гармоник от выходной мощности усилителя

1. При сборке печатной платы сначала установите пассивные компоненты и убедитесь в правильной полярности электролитических конденсаторов. Затем впаяйте транзисторы $Q_1 - Q_4$, проверяя правильность выводов. И наконец, установите МОП ПТ, избегая статического заряда, закорачивая одновременно выводы на землю и используя заземленный паяльник. Проверьте собранную плату на правильность установки компонентов, для этого будет полезно расположение компонентов, показанное на рис.2. Проверьте платы с печатью на отсутствие перемыкания припоем дорожек и, если они есть, удалите их. Проверьте узлы паек визуально и электрически с помощью измерителя сопротивления и переделайте, если это необходимо.

2. Теперь на усилитель может быть подано питание, и ток покоя выходного каскада устанавливается между 50 и 100 мА. Потенциометр R_{12} сначала устанавливается на минимальное смещение (до отказа против часовой стрелки на топологии платы рис.2). В положительную ветвь питания включается последовательно амперметр и устанавливается на шкале 1 А. Регулируется R_{12} , пока амперметр не будет показывать ток между 50 мА и 100 мА. Установка тока покоя может быть выполнена без подключения нагрузки. Однако, если нагрузочный динамик включен в схему, он должен быть защищен предохранителем от перегрузки по постоянному току. При установленном токе покоя достаточно иметь выходное напряжение смещения меньше 100 мВ. Излишние или беспорядочные изменения тока покоя при регулировке R_{12} указывают на генерацию в схеме или неправильное соединение. Следует придерживаться принципов, описанных в разделе «Описание схемы» (последовательные затвору резисторы, минимизация соединений х. затвору и общее заземление). Кроме того, конденсаторы развязки питания должны устанавливаться в тесной близости к выходному каскаду усилителя и точке земли нагрузки. Во избежание излишнего рассеивания мощности регулирование тока покоя должна выполняться при МОП ПТ, установленном на его теплоотвод.

3. После установления тока покоя амперметр должен быть удален из цепи положительного питания и на вход усилителя может быть подан рабочий сигнал. Требования к сигналу для получения полной номинальной мощности следующие:

коэффициент усиления = 100:

$R_L = 4 \text{ Ом}$, $V_{in} = 150 \text{ мВ}$ среднеквадратичное

$R_L = 8 \text{ Ом}$, $V_{in} = 160 \text{ мВ}$ среднеквадратичное ;

коэффициент усиления = 20:

$R_L = 4 \text{ Ом}$, $V_{in} = 770 \text{ мВ}$ среднеквадратичное

$R_L = 8 \text{ Ом}$, $V_{in} = 800 \text{ мВ}$ среднеквадратичное

«Подрезание» выходных сигналов при работе на номинальной мощности указывает на плохую стабилизацию питания и может быть исправлено снижением амплитуды входного сигнала и уменьшением номинальных характеристик усилителя. Амплитудно-частотная характеристика усилителя может быть проверена в диапазоне частот 15 Гц - 100 кГц с помощью набора для звукового тестирования или генератора с осциллографом. Искажение выходных сигналов на высоких частотах указывает на реактивную нагрузку и для восстановления формы сигнала потребуется подгонка выходного дросселя. Амплитудно-частотная характеристика на высокой частоте может быть подстроена с помощью компенсационного конденсатора, включенного параллельно с R_6 . Низкочастотная часть амплитудно-частотной характеристики управляется компонентами R_7 , C_2 .

4. Наличие фона (гудение) вероятнее всего происходит в схемах с высоким усилением. Наводка на входе с высоким импедансом минимизируется использованием экранированного кабеля, заземленного на источнике сигнала. Низкочастотные пульсации питания, попадающие с питанием во входной каскад усилителя могут быть выделены на конденсаторе C_3 . Это ослабляется коэффициентом режекции в режиме синфазного сигнала транзисторов Q_1 , Q_2 предусилителя. Однако, если это является источником фона, может быть сделана регулировка величин C_3 , R_5 для подавления амплитуды сигнала.

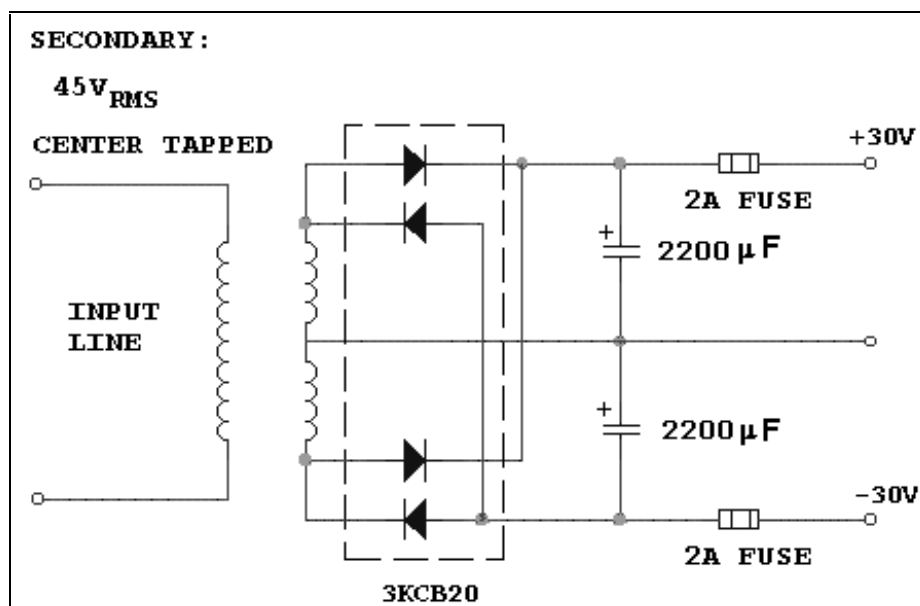


рис. 6. Простой источник питания от сети

5. В случае выхода из строя выходного каскада или из-за короткого замыкания в нагрузке, или из-за высокочастотной генерации, нужно заменить оба МОП ПТ, маловероятно, чтобы из строя вышли другие компоненты. Процедура регулировки, конечно, должна быть повторена при установке в схему новых приборов.

Выводы

Используя комплементарную пару МОП ПТ IRF532 и IRF9532 и источник питания $\pm 30\text{В}$, можно достичь следующих рабочих характеристик:

Максимальная средневладратная мощность:

60 Вт в нагрузке 4 Ом

32 Вт в нагрузке 8 Ом

Ширина полосы: “ •

от 15 Гц до 100 кГц ± 1 дБ

Общее искажение гармоник (1 кГц):

0,15% при 60 Вт и нагрузке 4 Ом

0,08% при 32 Вт и нагрузке 8 Ом

Коэффициент усиления по напряжению: Регулируемый, от $\times 100$ до $\times 20$

Входной импеданс: 47 кОм

На рис.7 показан отклик усилителя на синусоиду 1 кГц и 100 кГц, а также отклик на прямоугольные импульсы с частотой 1 кГц и 100 кГц.

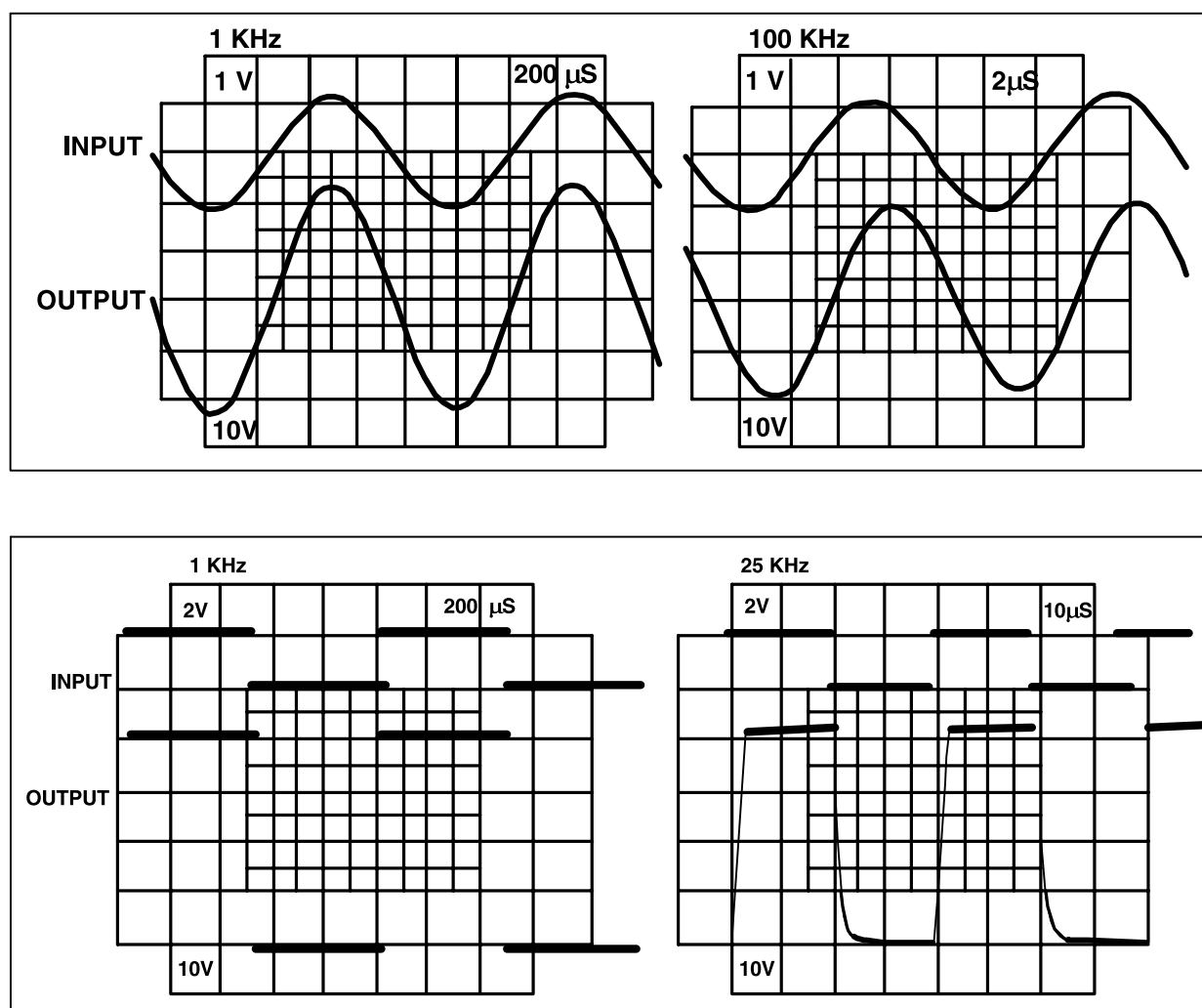


Рис. 7. Формы сигналов, иллюстрирующие амплитудно-частотную характеристику