

**Русский перевод оригинальной статьи
Джона Линсли Худа
"Простой усилитель класса А"
(Simple Class A Amplifier by J. L. Linsley Hood)
из журнала "Wireless World", апрель 1969.**

Ссылка на скачивание полной оригинальной версии журнала:

<https://www.worldradiohistory.com/UK/Wireless-World/60s/Wireless-World-1969-04.pdf>

Размер файла: 22,2 МБ (23 351 343 байт).

Оригинальные страницы журнала: 148 - 153.

Страницы PDF версии: 78 - 83.

*Перевод выполнен с помощью ChatGPT
с сохранением оригинальной структуры текста
и с учётом терминологической специфики материала.*

Простой усилитель класса А

Конструкция мощностью 10 Вт, дающая субъективно лучшие результаты, чем транзисторные усилители класса В.

Дж. Л. Линсли-Худ, М.И.Е.Е.

За последние несколько лет было опубликовано множество превосходных конструкций бытовых аудиоусилителей. Однако некоторые из этих разработок уже устарели вследствие изменения доступности компонентов, тогда как другие рассчитаны на уровни выходной мощности, значительно превышающие потребности обычной жилой комнаты. Кроме того, большинство схем имеет довольно сложную конструкцию.

В этих обстоятельствах представлялось целесообразным исследовать, насколько простой может быть конструкция усилителя, обеспечивающего достаточную выходную мощность при характеристиках, не вызывающих никаких нареканий; результатом этого исследования и стала настоящая схема.

Выходная мощность и искажения.

Учитывая огромную популярность лампового усилителя Mullard 5-10, можно предположить, что выходной мощности 10 Вт вполне достаточно для обычного применения; более того, при использовании двух таких усилителей в стереопаре общий уровень звукового давления на полной мощности может оказаться весьма впечатляющим при использовании достаточно чувствительных акустических систем.

Первоначальные стандарты гармонических искажений для аудиоусилителей были сформулированы D. T. N. Williamson в серии статей, опубликованных в журнале *Wireless World* в 1947 и 1949 годах; предложенный им стандарт — менее 0,1% суммарных гармонических искажений при полной номинальной выходной мощности — стал общепринятой целевой величиной для высококачественных усилителей мощности звуковой частоты. Поскольку основная проблема при разработке ламповых аудиоусилителей связана с трудностью получения достаточно высоких характеристик выходного трансформатора, а современные методы построения транзисторных схем позволяют создавать усилители мощности без выходных трансформаторов, представлялось возможным поставить более высокую цель — 0,05% суммарных гармонических искажений при полной выходной мощности в диапазоне 30 Гц — 20 кГц. Это также подразумевает, что выходная мощность будет оставаться постоянной во всём этом диапазоне частот.

Разработка схемы.

Первой схемой усилителя, известной автору, в которой бестрансформаторная транзисторная конструкция обеспечивала уровень характеристик, приближающийся к усилителю Williamson, была схема, опубликованная в журнале *Wireless World* в 1961 году авторами Tobey and Dinsdale. В ней использовался выходной каскад класса В с последовательным включением транзисторов в квазикомплементарной симметрии. Последующие высококачественные транзисторные усилители мощности в значительной степени следовали принципам проектирования, изложенным в этой статье.

Главное преимущество усилителей такого типа заключается в том, что мощность рассеяния в режиме покоя очень мала, а общий КПД преобразования энергии высок. К сожалению, существуют и некоторые присущие им недостатки, обусловленные внутренним различием характеристик двух

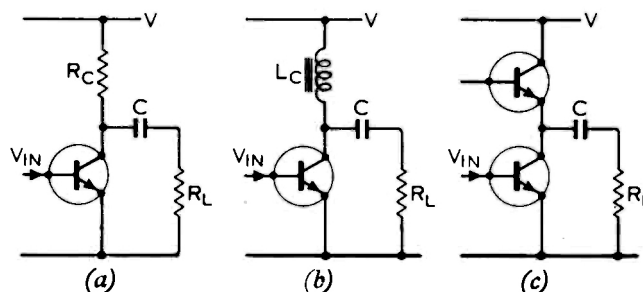


Рис. 1. Базовые схемы усилителей класса А с использованием:
 (а) нагрузочного резистора R , обеспечивающего КПД около 12%;
 (б) низкочастотного дросселя, дающего более высокий КПД, но являющегося громоздким и дорогим;
 (в) второго транзистора в качестве коллекторной нагрузки.

половин push-pull пары (если используются комплементарные транзисторы в несимметричной схемной конфигурации), а также переходными искажениями вследствие нелинейности характеристик I_C/V_B при малых токах. Для минимизации последнего эффекта было сделано многое, особенно A. R. Bailey.

Дополнительной особенностью выходного каскада класса В является то, что потребляемый выходными транзисторами ток возрастает вместе с уровнем выходного сигнала, что может приводить к снижению выходного напряжения и ухудшению сглаживания блока питания, если последний недостаточно хорошо спроектирован. Кроме того, вследствие роста тока при увеличении выходной мощности кратковременная перегрузка может привести выходные транзисторы в состояние теплового пробоя, особенно при реактивной нагрузке, если не применены соответствующие защитные схемы. Совокупность этих требований привела к усложнению схемотехники, и хорошо спроектированный низкоискажённый усилитель мощности класса В уже нельзя считать простой или недорогой конструкцией.

Альтернативный подход к разработке транзисторного усилителя мощности, сочетающего хорошие характеристики с простотой конструкции, заключается в использовании выходных транзисторов в режиме класса А. Это позволяет избежать проблем асимметрии квазикомплементарных схем, теплового пробоя при кратковременных перегрузках, переходных искажений и зависимости потребляемого от источника питания тока от уровня сигнала. Однако такой усилитель менее эффективен по сравнению со схемой класса В, а выходные транзисторы требуют установки на крупные радиаторы охлаждения.

Базовая схема усилителя класса А состоит из одного транзистора с соответствующей коллекторной нагрузкой. Использование резистора, как показано на рис. 1(а), было бы практичным решением, однако максимальный КПД преобразования энергии составил бы лишь около 12%. НЧ-дроссель, показанный на рис. 1(б), обеспечивал бы значительно лучший КПД, однако правильно рассчитанный

компонент оказался бы громоздким и дорогим, сводя на нет многие преимущества бестрансформаторной конструкции. Использование второго аналогичного транзистора в качестве коллекторной нагрузки, как показано на рис. 1(с), значительно удобнее с точки зрения размеров и стоимости и позволяет эффективно работать с нагрузкой в push-pull режиме, если сигналы на входах двух транзисторов имеют соответствующую амплитуду и противоположную фазу. Это условие выполняется, если драйверный транзистор подключён так, как показано на рис. 2.

Такой способ включения также удовлетворяет одному из важнейших требований к усилителю с малыми искажениями — хорошей собственной линейности усилителя даже при отсутствии обратной связи. Этому способствует несколько факторов. Во-первых, имеется тенденция к взаимной компенсации нелинейности характеристик I_c/V_b выходных транзисторов, поскольку в ту часть периода, когда один транзистор приближается к отсечке, другой полностью открыт. Во-вторых, существует определённая внутренняя обратная связь в контуре $Tr1-Tr2-Tr3$ вследствие влияния характеристик входного сопротивления базы $Tr1$ на выходной ток $Tr3$. Кроме того, драйверный транзистор $Tr3$, которому необходимо обеспечивать большое напряжение раскачки, работает в условиях, благоприятствующих низкому уровню гармонических искажений — при низком сопротивлении нагрузки по выходу и высоком входном сопротивлении.

Практическая схема усилителя мощности с использованием такого выходного каскада показана на рис. 3.

Разомкнутый коэффициент усиления схемы составляет приблизительно 600 при использовании типичных транзисторов. Замкнутый коэффициент усиления определяется (на частотах, достаточно высоких, чтобы сопротивление $C3$ было мало по сравнению с $R4$) отношением $(R3 + R4) / R4$. При указанных на рис. 3 значениях это равно 13. Это обеспечивает глубину отрицательной обратной связи около 34 дБ и выходное сопротивление порядка 160 мОм.

Поскольку схема имеет единичное усиление по постоянному току благодаря включению $C1$ в цепь обратной связи, выходное напряжение V_e удерживается на том же потенциале, что и база $Tr1$, плюс напряжение база-эмиттер транзистора $Tr1$, а также небольшое падение напряжения на $R3$, обусловленное эмиттерным током этого транзистора. Так как выходной транзистор $Tr1$ будет проводить столько тока, сколько необходимо для того, чтобы «опустить» V_e до этого уровня, резистор $R2$, который вместе с $R1$ определяет коллекторный ток $Tr2$, может использоваться для задания статического тока выходных каскадов усилителя. Также очевидно, что V_e можно установить на любое требуемое значение небольшими изменениями $R5$ или $R6$. Оптимальный режим работы достигается, когда это напряжение равно половине напряжения питания. (Отклонение примерно на полвольта в ту или другую сторону даёт лишь незначительное изменение максимальной выходной мощности и других характеристик усилителя, поэтому высокая точность в этом не требуется.)

Во всей схеме используются кремниевые планарные транзисторы, что обеспечивает хорошую температурную стабильность и низкий уровень шума. Кроме того, поскольку нет необходимости в комплементарной симметрии, все выходные каскады могут быть выполнены на $p-n-p$ транзисторах, которые в кремниевой технологии обеспечивают наилучшие параметры при наименьшей стоимости. Общая характеристика усилителя при выходной мощности 10 Вт или на любом более низком уровне полностью соответствует требованиям, сформулированным Уильямсоном. Графики зависимости выходной мощности и усиления от частоты показаны на рис. 4–6, а зависимость полной гармонической искажённости от выходной мощности — на рис. 7. Поскольку усилитель представляет собой простую схему класса А, искажения линейно уменьшаются с уменьшением выходного напряжения. (В системе класса В это не обязательно имело бы место, если бы присутствовал заметный уровень искажений перехода через ноль.) Анализ компонент искажений на уровне порядка 0,05% затруднён, однако, по-видимому, остаточные искажения ниже уровня начала ограничения (клиппинга) в основном представляют собой вторую гармонику.

Стабильность, выходная мощность и нагрузочное сопротивление.

Кремниевые планарные $p-n-p$ транзисторы, как правило, обладают отличными высокочастотными характеристиками, и это в значительной степени способствует очень хорошей устойчивости усилителя при работе на реактивные нагрузки. Автору пока не удалось обнаружить такую комбинацию L и C , которая вызывала бы неустойчивость системы, хотя усилитель легко может перейти в режим генерации при индуктивной нагрузке, если $R3$ зашунтирован небольшим конденсатором, вызывающим спад усиления на высоких частотах.

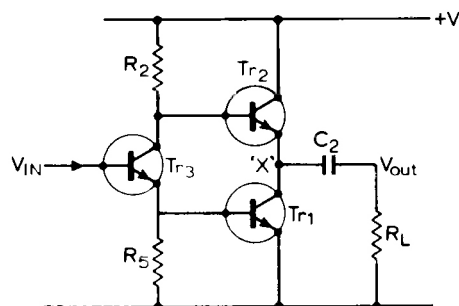


Рис. 2. Схема двухтактного возбуждения каскада класса А.

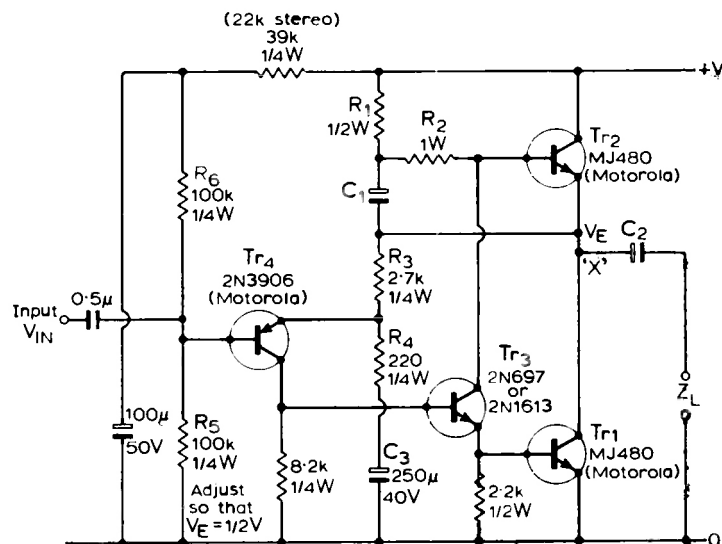


Рис. 3. Практическая схема усилителя мощности.

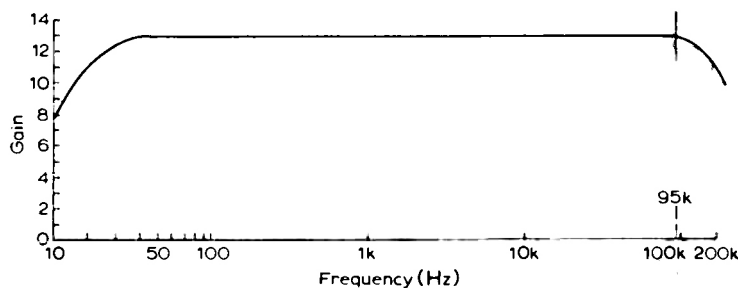


Рис. 4. График зависимости коэффициента усиления усилителя от частоты.

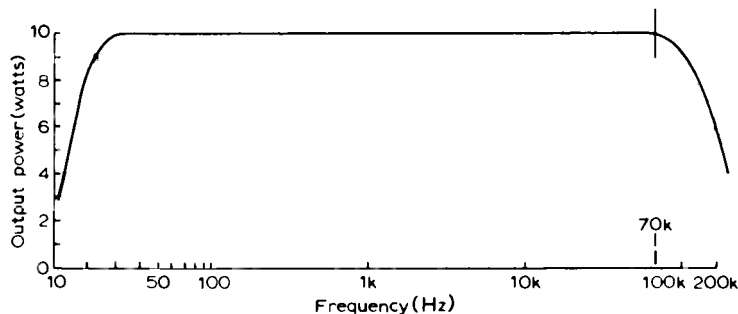


Рис. 5. График зависимости выходной мощности усилителя от частоты.

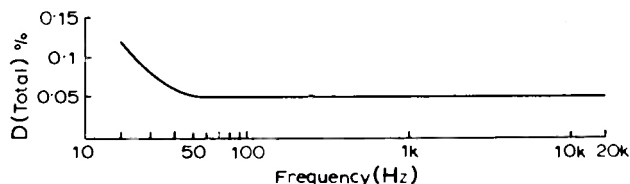


Рис. 6. График зависимости искажений от частоты при мощности 9 Вт.

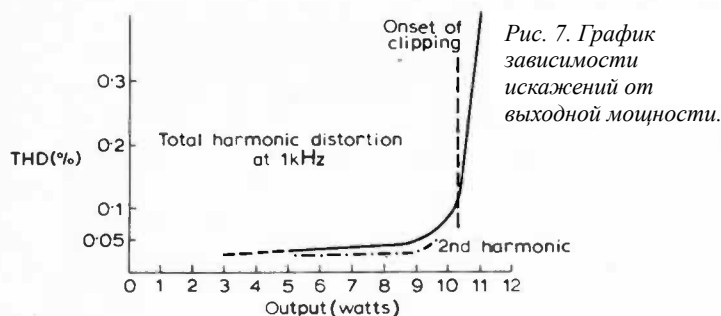


Рис. 7. График зависимости искажений от выходной мощности.

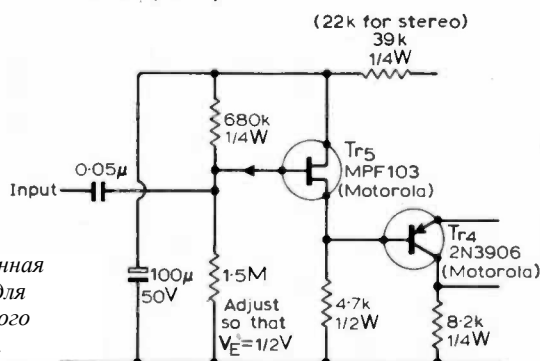


Рис. 8. Модифицированная входная схема для высокого входного сопротивления.

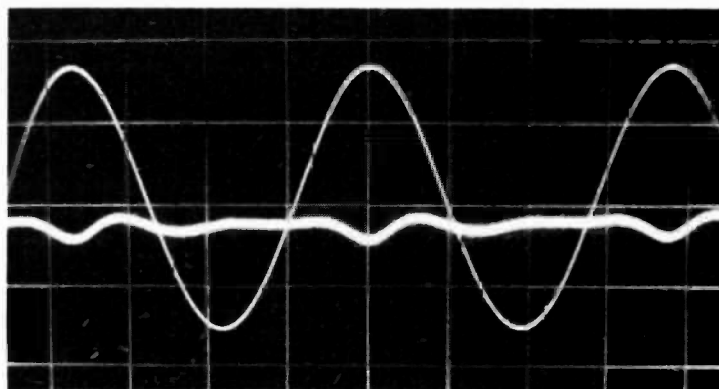
Схема, показанная на рис. 3, может с очень небольшими изменениями номиналов компонентов использоваться для работы на нагрузочные сопротивления в диапазоне 3–15 Ом. Однако выбранная выходная мощность в каждом случае соответствует различному соотношению тока и напряжения, и поэтому ток через выходные транзисторы и амплитуда выходного напряжения также будут различаться. Пиковый размах напряжения и средний выходной ток можно достаточно просто вычислить с помощью хорошо известных соотношений $W = I^2 R$ и $V = IR$, где символы имеют своё обычное значение. (Следует, однако, помнить, что расчёт выходной мощности основан на действующих (r.m.s.) значениях тока и напряжения; что для получения пиковых значений их необходимо умножить на 1,414; и что измеряемый размах напряжения является пиковым значением «от пика до пика», которое вдвое больше пикового значения.)

После выполнения этих расчётов оказывается, что пиковый размах выходного напряжения для мощности 10 Вт на нагрузке 15 Ом составляет 34,8 В. Поскольку каждый из двух выходных транзисторов «упирается» в насыщение примерно при 0,6 В, источник питания должен обеспечивать не менее 36 В, чтобы получить такой выходной сигнал без ограничения. Для нагрузок 8 Ом и 3 Ом минимальное напряжение высоковольтной (h.t.) линии питания должно составлять соответственно 27 В и 17 В. Необходимые минимальные токи при этом равны 0,9 А, 1,2 А и 2,0 А. Рекомендуемые значения компонентов для работы с этими нагрузочными сопротивлениями приведены в таблице 1. Конденсаторы C3 и C1 совместно влияют на спад напряжения и выходной мощности на низких звуковых частотах. Их номиналы могут быть увеличены, если требуется лучшая низкочастотная характеристика, чем показано на рис. 4–6.

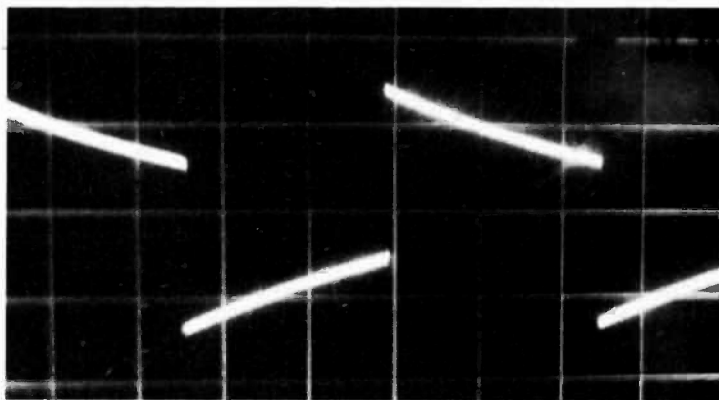
Поскольку используемые напряжения питания и выходные токи приводят к рассеиваемой мощности порядка 17 Вт на каждом выходном транзисторе, и поскольку для долговечности компонентов нежелательно допускать высокие рабочие температуры, для каждого транзистора необходимо обеспечить достаточную площадь радиатора. Рекомендуется использовать пару отдельно установленных ребристых радиаторов размером примерно 4×4 дюйма с ребрами (finned heat sinks). Это, к сожалению, та плата, которую приходится платить за работу в классе А. При напряжении питания выше 30 В транзисторы Tr1 и Tr2 должны быть MJ481, а Tr3 — 2N1613.

Таблица 1. Значения номиналов компонентов для различных сопротивлений нагрузки.

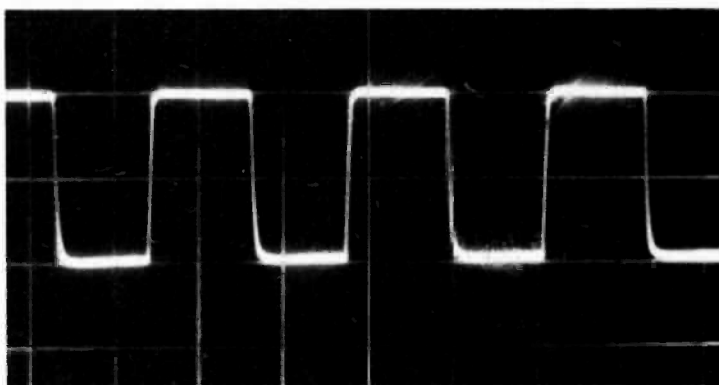
Z_L	V	I	R_1	R_2	C_1	C_2	V_{IN} (r.m.s.)
3Ω	17V	2A	47Ω	180Ω	500μ	25V	0.41V
8Ω	27V	1.2A	100Ω	560Ω	250μ	40V	0.66V
15Ω	36V	0.9	150Ω	1.2kΩ	250μ	40V	0.9V



Характеристики при синусоидальном сигнале на частоте 1 кГц. Мощность 9 Вт, резистивная нагрузка 15 Ом. Основная гармоника — масштаб 10 В/см. Компоненты искажений — масштаб 50 мВ/см при действующем значении 0,05%.



Реакция на прямоугольный сигнал при 50 кГц.



Реакция на прямоугольный сигнал. Масштаб 10 В/см. Частота 50 кГц. Резистивная нагрузка 15 Ом.

Если выходное сопротивление предусилителя превышает несколько тысяч ом, входной каскад усилителя следует модифицировать, включив простой истоковый повторитель на полевом транзисторе (FET), как показано на рис. 8. Это увеличивает гармонические искажения примерно до 0,12%, и поэтому (теоретически) является менее предпочтительным решением по сравнению с использованием более качественного предусилителя.

Завал (спад) на высоких частотах можно затем, при необходимости, получить, подключив небольшой конденсатор между затвором полевого транзистора и отрицательной (заземлённой) шиной.

Подходящие транзисторы.

Были проведены некоторые эксперименты для определения того, насколько характеристики схемы зависят от типа и коэффициента усиления по току используемых транзисторов. Как и ожидалось, наилучшие результаты были получены при использовании транзисторов с высоким коэффициентом усиления, а также при использовании согласованной пары в выходном каскаде.

Адекватной замены транзисторам типа 2N697/2N1613, используемым в драйверном каскаде, не известно, однако образцы этого типа от трёх различных производителей были испытаны и дали, по-видимому, идентичные результаты. Аналогично, применение альтернативных типов входных транзисторов не привело к заметным изменениям характеристик, и транзистор Texas Instruments 2N4058 полностью взаимозаменяем с Motorola 2N3906, использованным в прототипе.

Наиболее заметные изменения характеристик были обнаружены в коэффициенте усиления по току выходной пары транзисторов, и для получения минимально возможных искажений при использовании любой пары транзисторов напряжение в точке, от которой питается громкоговоритель, следует отрегулировать так, чтобы оно находилось в пределах 0,25 В от половины напряжения питающей шины. Остальные результаты сведены в таблицу 2.

В этих экспериментах использовались транзисторы Motorola MJ480/481, за исключением случая (6), в котором применялись приборы Texas 2S034. Основной вывод, который можно сделать из этого, заключается в том, что тип используемого транзистора может быть не слишком критичен, однако если существуют различия в коэффициентах усиления по току выходных транзисторов, то транзистор с более высоким коэффициентом усиления должен быть установлен в позицию Tr1.

Когда были обнаружены составляющие искажений до момента начала ограничения формы сигнала (клиппинга), они почти полностью были обусловлены наличием второй гармоники.

Конструктивные замечания.

Усилитель. Компоненты, необходимые для стереопары усилителя мощностью 10 + 10 Вт, удобно разместить на стандартной монтажной плате «Lektrokit» из SRBP (бакелит на бумажной основе) размером 4×4¾ дюйма, как показано на фотографиях, при этом четыре выходных транзистора устанавливаются на внешние радиаторы. За исключением специально оговорённых случаев, номиналы компонентов не являются особенно критичными, и резисторы с допуском 10% могут быть использованы без какого-либо ухудшения характеристик. Однако минимальный уровень шума достигается при использовании компонентов хорошего качества, в частности резисторов с углеродной плёнкой или металлооксидных резисторов.

Блок питания. Рекомендуемая схема блока питания показана на рис. 9(а). Поскольку потребляемый усилителем ток является практически постоянным, можно использовать сглаживающую схему с последовательным транзистором, в которой выходное напряжение источника питания может регулироваться за счёт выбора входного

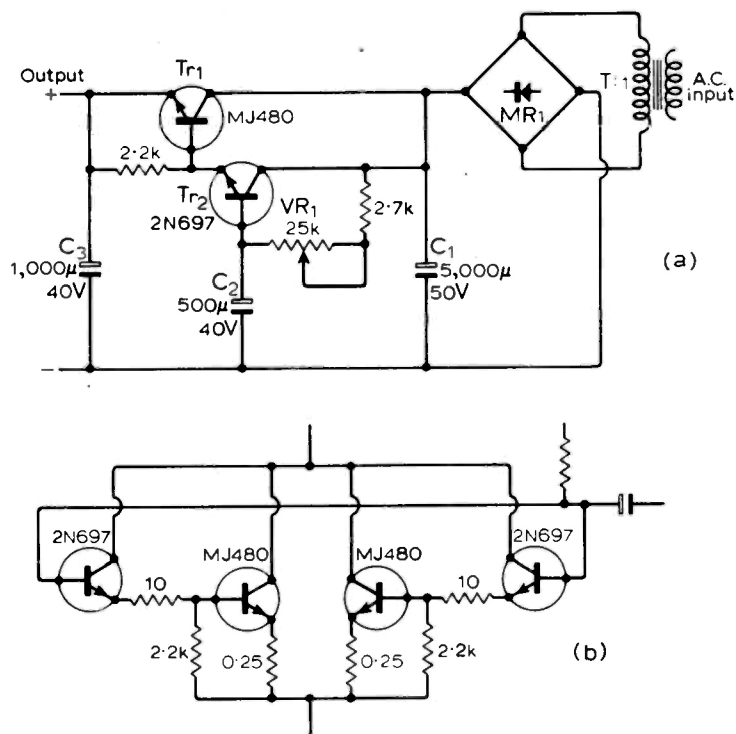


Рис. 9. (а) Блок питания;

(b) параллельное включение транзисторов для больших токов.

базового тока, задаваемого эмиттерным повторителем Tr1 и потенциометром VR1. При значениях ёмкостей сглаживающих (накопительных) конденсаторов, указанных в таблице 3, уровень пульсаций будет менее 10 мВ при номинальном выходном токе, при условии, что коэффициент усиления по току (hFE) последовательных транзисторов превышает 40. Для выходных токов до 2,5 А указанные последовательные транзисторы будут достаточны, при условии их установки на радиаторы, соответствующие уровню рассеиваемой мощности.

Однако при уровнях тока, необходимых для работы версии усилителя на 3 Ом в стереофоническом режиме, одного транзистора MJ480 уже будет недостаточно, и следует либо использовать более подходящий последовательный транзистор, например Mullard BDY20, с, например, 2N1711 в качестве Tr1, либо применить параллельное включение, как показано на рис. 9(б).

Общее сопротивление в «первичной» цепи выпрямителя, включая вторичную обмотку трансформатора, не должно быть меньше 0,25 Ом. Если блок питания, с усилителем или без него, используется совместно с ВЧ усилителем-тunerом, может потребоваться подключить конденсатор 0,25 мкФ (160 В рабочее) параллельно вторичной обмотке T1 для предотвращения излучения переходных помех. Указанные выпрямительные диоды представляют собой герметизированные мостовые сборки компании International Rectifier.

Схема защиты транзисторов.

Ток, протекающий в цепи выходных транзисторов (Tr...Tr1), определяется потенциалом на Tr1, значениями R1 и R2, а также коэффициентом усиления по току и током коллектор–база утечки транзистора Tr1. Поскольку обе эти характеристики транзистора зависят от температуры, выходной ток последовательного каскада будет несколько возрастать с повышением температуры Tr2. Если усилитель предполагается эксплуатировать при высокой температуре окружающей среды, либо если по какой-либо причине невозможно обеспечить достаточную площадь радиатора для выходных транзисторов, желательно предусмотреть альтернативный способ стабилизации тока выходного каскада. Это можно сделать с помощью схемы, показанной на рис. 10. В ней часть постоянного тока смещения Tr1 шунтируется на отрицательную шину через Tr6, когда общий протекающий ток вызывает увеличение потенциала на базе Tr6 выше порога открывания (около 0,5 В). Это позволяет обеспечить очень точное управление током выходного каскада без влияния на выходную мощность или уровень искажений. Более простая схема, в которой

Таблица 2. Зависимость уровня искажений от согласования коэффициентов усиления в выходном каскаде.

	Current gain (Tr ₁)	Current gain (Tr ₂)	Distortion (at 9 watts)
1.	135	135	0.06%
2.	40	120	0.4%
3.	120	40	0.12% (pair 2 reversed in position)
4.	120	100	0.09%
5.	100	120	0.18% (pair 5 reversed)
6.	50	40	0.1%

Таблица 3. Компоненты блока питания.

AMPZ _L	I _{OUT}	V _{OUT}	C ₁	Tr _{1/2}	MR1	T ₁
15Ω	1A	37V	1000µ 50V	MJ480 2N697	5805	40V 1A
2x 15Ω	2A	37V	5000µ 50V	MJ480 2N697	5805	40V 2A
8Ω	1.25A	27V	2000µ 40V	MJ480 2N697	5805	30V 1.25A
2x 8Ω	2.5A	27V	5000µ 40V	MJ480 2N697	5805	30V 2.5A
3Ω	1.9A	18V	5000µ 30V	MJ480 2N697	5805	20V 2A
2x 3Ω	3.8A	18V	10,000µ 30V	MJ480 2x2N697	7805T	20V 4A

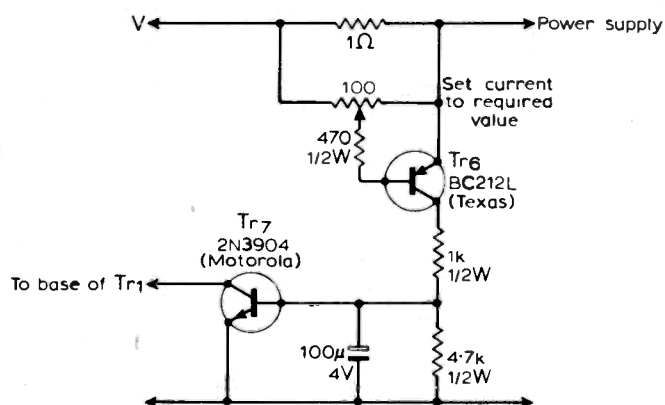


Рис. 10. Схема стабилизации тока усилителя.

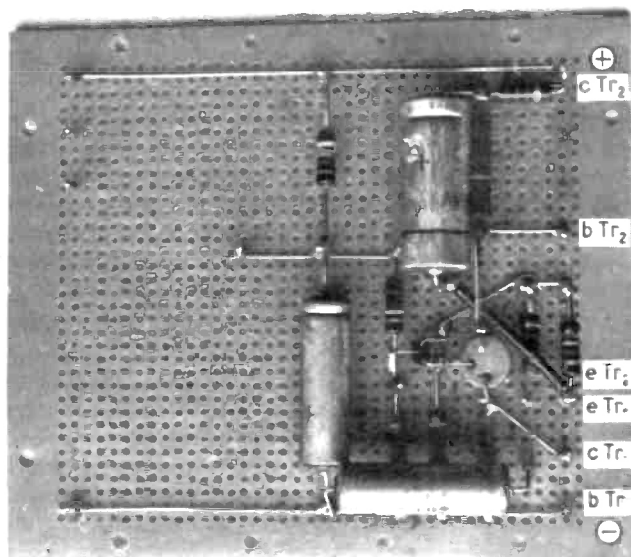
управляющий потенциал для Tr1 берётся с последовательного резистора в эмиттерной цепи Tr2, к сожалению, приводит к ухудшению характеристик искажений примерно до 0,15% при 8 Вт и до примерно 0,3% при начале перегрузки.

Работа в условиях прослушивания.

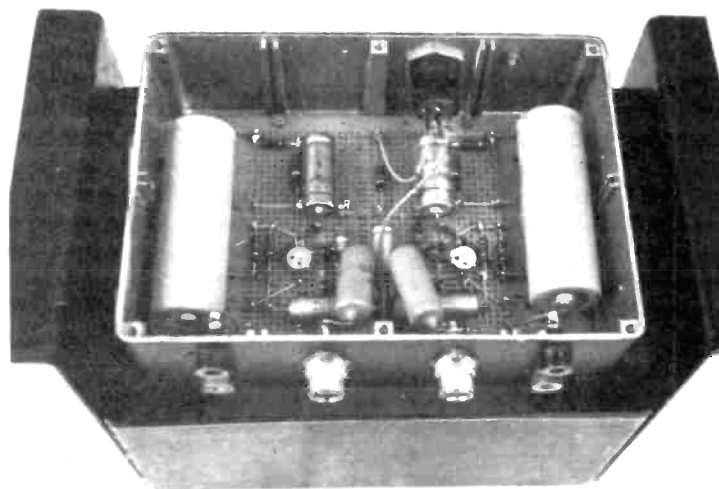
Было бы удобно, если бы характеристики аудиоусилителя (или громкоговорителя, или любого другого аналогичного аудиооборудования) можно было бы полностью описать с помощью частотной характеристики и параметров гармонических искажений. К сожалению, в лабораторных условиях невозможно полностью смоделировать сложные нагрузки или сложные формы сигналов, которые возникают при использовании акустической системы для воспроизведения повседневных звуков речи и музыки. Поэтому, хотя генераторы прямоугольных и низкискажённых синусоидальных сигналов, осциллограф и анализатор гармонических искажений являются ценными инструментами при разработке аудиосхем, окончательной проверкой любого законченного устройства должен быть критический слуховой контроль слушателя в максимально тщательно подобранных условиях, которые позволяют его оборудование и окружающая среда.

Наличие хорошего эталонного образца является большой помощью при сравнительных испытаниях такого рода, и автору посчастливилось на протяжении многих лет располагать тщательно и дорого изготовленным усилителем «Williamson», чьи характеристики в ходе прослушиваний оказались равными или превосходящими — в большей или меньшей степени — характеристики любого другого аудиоусилителя, с которым автору доводилось проводить сравнения.

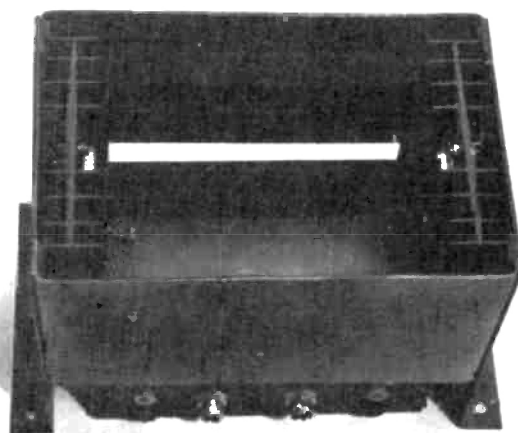
Однако в прошлом, когда подобные испытания проводились из личного интереса и между подключением входных и выходных цепей одного усилителя и другого проходило несколько минут, сравнительные характеристики некоторых схем оказывались настолько близкими, что вывод сводился к тому, что между ними действительно очень мало различий. Некоторые из недавних транзисторных усилителей мощности показывали характеристики, которые, по памяти, казались полностью сопоставимыми с усилителем «Williamson», по крайней мере в той мере, насколько это можно было оценить в промежутке между испытаниями. Однако было понятно, что такой метод не обеспечивает достаточно хороших условий для корректной оценки более тонких различий в характеристиках уже высококачественных конструкций. Поэтому был организован переключатель, позволяющий мгновенно переключать входы и выходы между любой выбранной парой усилителей. Всего было собрано шесть усилительных блоков, включая «Williamson», ещё один популярный ламповый усилитель, три транзисторных усилителя класса В (в том числе один промышленного производства), а также описанный выше усилитель класса А. Частотная характеристика и суммарные гармонические искажения четырёх транзисторных усилителей были измерены в лаборатории до проведения сравнительных прослушиваний. Все они показали ровную частотную



Монтаж одного канала усилителя 10 + 10 Вт на стандартной штыревой плате Lektrokit из s.r.b.p. размером $4\frac{1}{2} \times 4\frac{3}{4}$ дюйма.



Вид снизу собранного усилителя со снятой нижней крышкой, показывающий внешний коробчатый радиатор охлаждения.



Вид сверху на собранный усилитель.

характеристику в пределах всего рабочего звукового диапазона в сочетании с низким уровнем гармонических искажений (наихудший случай составил 0,15%).

С учётом проведённых ранее измерений не ожидалось, что между транзисторными схемами или между ними и ламповыми усилителями будут какие-либо заметные различия в звучании. Поэтому было неожиданно обнаружить, что на практике различимые различия между ламповыми усилителями и тремя транзисторными усилителями класса В всё же существуют. Фактически два ламповых усилителя и транзисторная схема класса А, с одной стороны, и три усилителя класса В, с другой, образовали две тонально различающиеся группы, внутри каждой из которых характеристики были очень близкими. «Williamson» и описываемая схема класса А оказались лучше, чем второй ламповый усилитель, и по качеству звучания настолько близкими друг к другу, что было почти невозможно определить, какой из них в данный момент работает, не глядя на положение переключателя. В верхней области высоких частот транзисторный усилитель, возможно, имеет небольшое преимущество.

Однако различия в характеристиках между группой класса А и группой класса В были значительно более выраженными. Системы класса А не только полностью лишены лёгкой «резкости», которая наблюдалась на некоторых высоких нотах струнных инструментов у всех усилителей класса В, но и, по-видимому, обеспечивают более насыщенное, «округлое» звучание, привлекательность которого для автора значительно перевешивает сопутствующие неудобства, связанные с необходимостью более мощного блока питания и более массивных радиаторов.

Некоторые размышления, проведённые в обсуждениях с заинтересованными коллегами, были посвящены возможным последствиям этого неожиданного открытия, и была выдвинута предварительная теория, которая предлагается лишь как гипотеза. Предполагается, что подобные различия в тембральном характере возникают из-за того, что обычный динамический громкоговоритель с подвижной катушкой в своём акустическом оформлении может представлять собой весьма сложную реактивную нагрузку на частотах, связанных со структурными резонансами. Это, в свою очередь, может вызывать переходные выбросы (overshoot) при работе с усилителем класса В, когда точка излома в форме входного сигнала случайно совпадает с моментом перехода через область переключения транзисторов. В этой области, из-за резкого изменения входных параметров выходных транзисторов, запас устойчивости по петле обратной связи и демпфирование на выходе оказываются менее благоприятными. В таких условиях основная функция выходного каскада усилителя — подавление неравномерностей отклика диффузора громкоговорителя — может выполняться хуже именно в тех участках частотной характеристики громкоговорителя, где демпфирование наиболее необходимо.

Следует подчеркнуть, что наблюдаемые в этих экспериментах различия невелики и вряд ли будут замечены без прямого сравнительного прослушивания «бок о бок». Тем не менее перфекционист может предпочесть класс А классу В в транзисторных схемах, если он способен получить достаточную выходную мощность, соответствующую его требованиям, именно таким способом.

Утомляемость слушателя.

По опыту автора, характеристики большинства хорошо спроектированных аудиоусилителей мощности действительно очень высоки, и различия между различными конструкциями, вероятно, значительно меньше, чем различия между альтернативными акустическими системами, например. Среди рассмотренных транзисторных конструкций ни одна не могла быть признана неприятной для слуха. Однако с ростом применения твердотельных (полупроводниковых) усилителей мощности среди знатоков стали появляться довольно загадочные рассказы о так называемой «усталости слушателя» — явлении, которое, якобы, вызывается почти всеми транзисторными усилителями, за исключением самых дорогих, в отличие от хороших ламповых усилителей. Это показалось заслуживающим исследования, чтобы выяснить, существует ли у этого утверждения какая-либо реальная основа.

На практике было обнаружено, что усилитель с безупречными «бумажными» характеристиками может при определённых условиях звучать весьма утомительно. По-видимому, это явление возникает и особенно связано с транзисторными усилителями мощности, поскольку большинство из них легко способны отдавать значительные уровни мощности на сверхзвуковых (ультразвуковых) частотах, которые акустические системы высококачественного тракта будут

пытаться воспроизвести в виде нагрузки для усилителя и, в конечном счёте, для слушателя. В этом контексте следует помнить, что в усилителе с равномерной полосой мощности от 30 Гц до 180 кГц около 90% этой полосы приходится на область выше слышимого диапазона.

Это нежелательное выходное излучение может возникать двумя путями. Оно может быть связано с широкополосным «белым шумом» от предусилителя, содержащего значительный уровень шипения (hiss). Это может происходить, если ламповый предусилитель согласован с входным сопротивлением транзисторного усилителя мощности, составляющим всего несколько тысяч ом, что является плохим согласованием. В этом случае также наблюдается неестественное ослабление басового диапазона в системе. Подобные проблемы могут возникать и при наличии переходной неустойчивости или высокочастотного «звонения» (ringing), например, при работе на реактивную нагрузку в усилителе класса В с недостаточной стабильностью в области точки перехода (кроссовера).

Список литературы.

Bailey, A. R., «Высококачественный транзисторный усилитель», Wireless World, ноябрь 1966; «30-ваттный усилитель высокой верности», май 1968; и «Защита выходных транзисторов в НЧ усилителях», июнь 1968.