Усилители класса G/класса H

© 2009 Род Эллиотт (ESP
Page Опубликовано 6 января 2009 г.
Обновлено в феврале 2021 г.)

Содержание

- Введение
- Условия испытаний и измерений
- Рассеиваемая мощность класса B
- Сравнительное рассеивание
- Топология класса G
- Рассеивание мощности Glass-G
  - Сравнение эффективности
- Рассеивание с использованием шумового сигнала
- Коммутация
- Защита
  - Зона безопасной эксплуатации
- Альтернативные усилители класса G
  - Класс-H
- Схема электрической цепи
- Класс G против класса D
- Вариации
- Ссылки

Введение

Во-первых, существуют некоторые разногласия относительно того, что представляет собой класс G по сравнению с классом H. Ниже я объяснил разницу, как я её вижу, но многие усилители, которые заявляют о принадлежности к классу H, я считаю принадлежащими к классу G. Поскольку ни один из этих классов не признан «официально» (как классы A, BC и D), этот вопрос становится спорным. В конечном итоге, это не имеет большого значения, поэтому можете смело считать эти два термина взаимозаменяемыми.

Многие, вероятно, заметили, что большинство современных профессиональных мощных усилителей относятся к классу G и, судя по всему, имеют удивительно мало радиаторов для заявленной выходной мощности. Если заглянуть внутрь, то можно обнаружить больше выходных транзисторов, чем ожидалось. Кроме того, можно заметить, что диодов гораздо больше, чем в любом «обычном» усилителе.

Всё это очень сбивает с толку, особенно учитывая крайне скудную информацию об усилителях класса G в интернете. Практически нет схем, которые бы представляли собой что-то большее, чем базовое описание принципа их работы, поэтому разобраться в их принципах непросто. Хотя на сайтах производителей можно найти несколько принципиальных схем, в большинстве случаев вокруг этих усилителей царит заговор молчания. Без полного руководства по эксплуатации вероятность найти полную схему усилителя класса G довольно мала.

Безусловно, они обсуждаются (или в некоторых случаях просто отвергаются [1]) в различных книгах по аудиоусилителям, с разными мнениями относительно их пригодности, звуковых качеств и т. д. Одно совершенно ясно — дополнительная сложность полезна только для мощных усилителей с выходной мощностью 200-300 Вт и более. Кроме того, использование класса G имеет сомнительную ценность для обычного домашнего прослушивания, где средняя мощность может составлять всего несколько ватт, но мгновенная (пиковая или переходная) мощность может достигать гораздо более высоких уровней. Хотя и наблюдается незначительный прирост эффективности, он не оправдывает дополнительную сложность.

При скромной мощности, обычно необходимой для домашнего использования (как правило, значительно ниже 200 Вт на канал), традиционный усилитель класса (A)B вполне способен обеспечить необходимый уровень шума без каких-либо проблем. Кроме того, меньшая сложность снижает вероятность появления искажений, которые (как утверждается) могут стать слышимыми в некоторых (другие могут сказать, *во всех*) схемах класса G.

Несмотря на так называемые «недостатки» класса G, эта технология сейчас используется для высокоскоростных драйверов линий ADSL [2]. Это удивительно требовательное применение, и поскольку преимущества были оценены как существенные, а очевидные ограничения (незначительное улучшение рассеивания, искажения) не вызывали особого беспокойства, некоторые люди действительно относятся к этой технологии очень серьезно. Другим преимуществом является то, что силовой трансформатор может быть физически меньше, хотя и сложнее из-за дополнительных обмоток.

В некотором смысле усилитель класса G можно сравнить с усилителем, использующим последовательное соединение выходных транзисторов. Такая схема не особенно распространена, но иногда используется для расширения безопасной рабочей области выходных транзисторов путем ограничения напряжения на каждой паре транзисторов. С точки зрения повышения эффективности, последовательное соединение не приносит никакой пользы, кроме распределения потерь мощности между большим количеством транзисторов. Если рассматривать такую схему, то логичнее добавить более низкое напряжение питания и сделать усилитель классом G, поскольку это дает ряд преимуществ.

Условия тестирования и измерений.
В данной статье рассматриваются усилители, работающие при одинаковом напряжении питания и резистивной нагрузке 4 Ом. Напряжение питания составляет 70 В (т.е. ±70 В), и, не принимая во внимание все потери, идеальный усилитель, работающий от этого напряжения, будет выдавать 625 Вт на 4 Ом. Потери *всегда* присутствуют , поэтому можно ожидать типичной выходной мощности около 550 Вт. Это остается верным независимо от топологии, при условии, что напряжение питания не падает под нагрузкой. В приведенных ниже примерах напряжение питания фиксировано на уровне ±70 В независимо от тока нагрузки. Реальные усилители не достигнут тех же результатов, за исключением коротких периодов до разряда фильтрующих конденсаторов. Непрерывная мощность обычно составляет порядка 500 Вт на 4 Ом, в зависимости от источника питания.

Использование фиксированного напряжения питания упрощает расчеты и моделирование, но несколько пессимистично. В реальном усилителе более низкое напряжение питания при высокой выходной мощности приводит к меньшему рассеиванию мощности транзистора. Однако я *не* включил в расчеты никаких тестов с реальными нагрузками от громкоговорителей, поэтому реактивная нагрузка, обычно используемая усилителем, приведет к *большему* рассеиванию мощности, чем показано. В общем случае необходимо предположить, что пиковое рассеивание мощности при реактивной нагрузке будет вдвое больше, чем при резистивной нагрузке.

Обратите внимание: это не проект, и никакие схемы не следует считать работоспособными в представленном виде. По этой причине типы транзисторов не указаны. Хотя большинство схем показывают одно выходное устройство, ни один известный транзистор не способен рассеивать уровни мощности, ожидаемые в реальных условиях при заданном напряжении питания и импедансе нагрузки. На практике всегда потребуется несколько устройств — параллельно, с эмиттерными резисторами.

Рассеиваемая мощность усилителя класса B.
Основная идея усилителя класса G заключается в том, что его конфигурация более эффективна, чем у класса B. Это означает, что в выходных транзисторах рассеивается меньше тепла, но это полностью зависит от уровня мощности. Когда мощный усилитель работает на низкой мощности, ни одна топология усилителя не является особенно эффективной — это относится и к усилителям класса D (импульсным). Например, любой усилитель мощностью 500 Вт, работающий при мощности около 1 Вт, обычно рассеивает довольно много мощности, но в целом это пренебрежимо мало. Усилитель класса B с напряжением питания 70 В рассеивает около 30 Вт, а усилитель класса G (с напряжениями, описанными здесь) — около 16 Вт. По сравнению с наихудшим случаем рассеивания это ничто, и многие усилители превысят это значение даже при холостом токе. Даже усилитель класса D может приблизиться к этому значению из-за потерь в режиме ожидания и потерь при переключении.

При более высокой мощности линейный усилитель начинает рассеивать значительную мощность в выходных устройствах, и это зависит от уровня мощности. Как наиболее распространенная из всех топологий, усилитель класса B (или класса AB, если хотите) имеет очень предсказуемое рассеивание мощности при любом заданном выходном напряжении и токе.

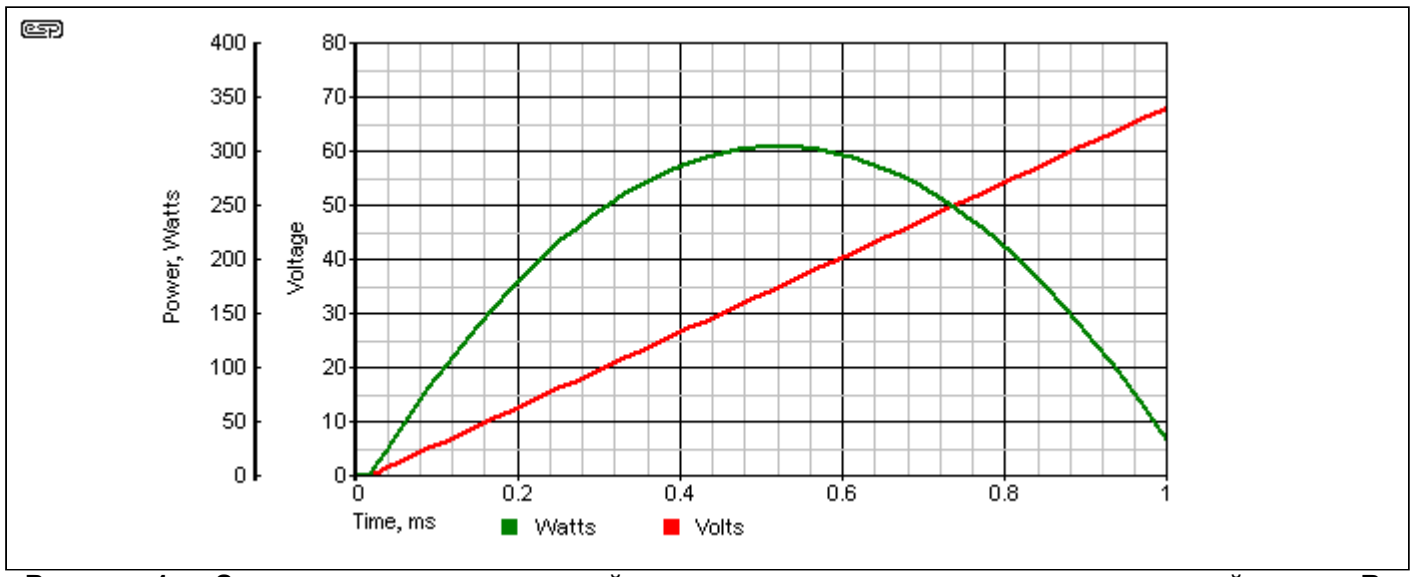


Рисунок 1 — Зависимость рассеиваемой мощности от напряжения для усилителей класса B.

На рисунке 1 показано рассеивание мощности выходных транзисторов одной стороны простого усилителя класса B при питании от источника 70 В и нагрузке 4 Ом. Видно, что рассеивание мощности увеличивается до тех пор, пока выходное напряжение не достигнет 35 В (ровно половины напряжения питания), после чего оно снова падает. Показана только одна сторона усилителя, а схема тестирования представлена на рисунке 2. Естественно, в реальном усилителе суммарное среднее рассеивание мощности при любом напряжении значительно отличается при синусоидальных или музыкальных сигналах. Это будет рассмотрено позже в статье. Средняя мощность, рассеиваемая при непрерывном пилообразном сигнале, составляет около 204 Вт.

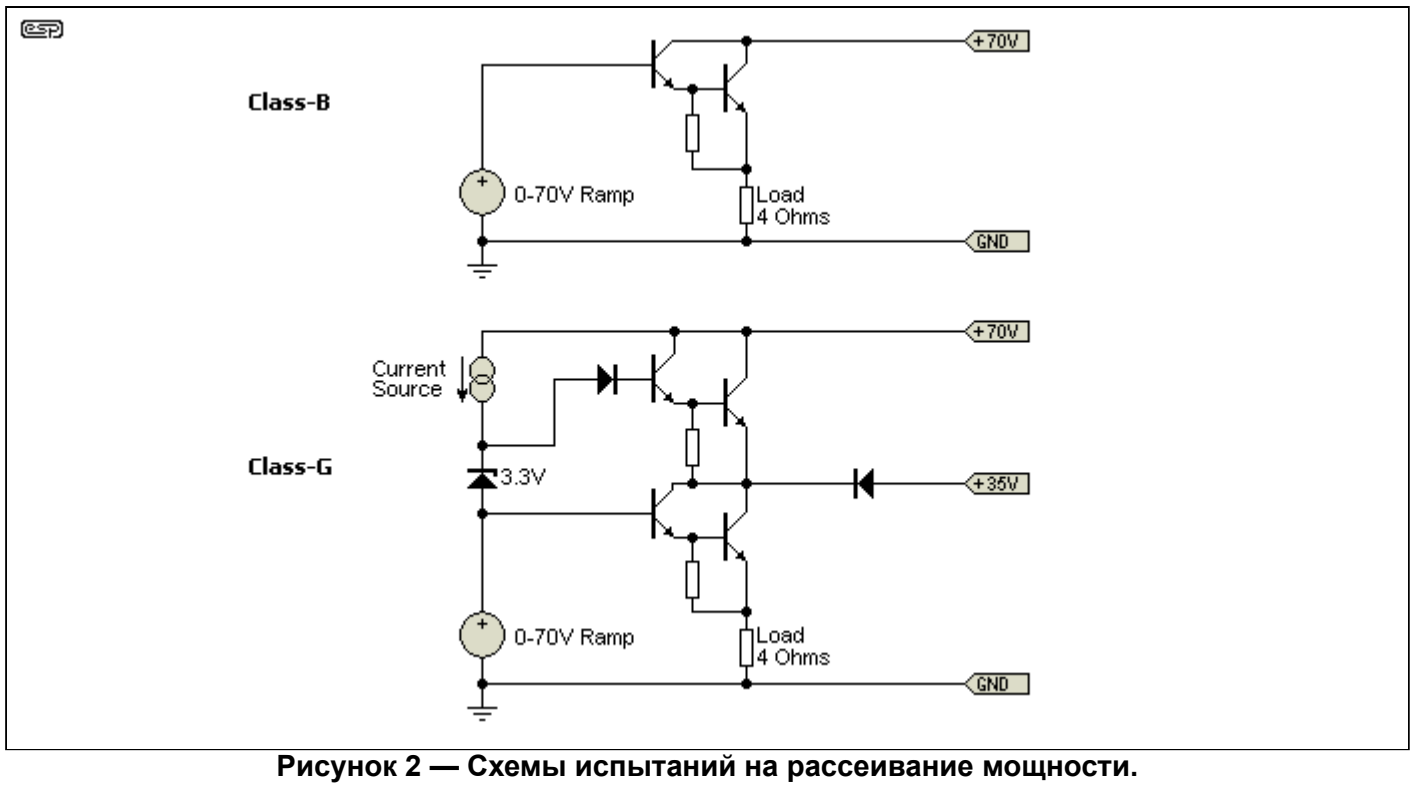


Рисунок 2 — Схемы испытаний на рассеивание мощности.

В качестве тестового сигнала использовался не синусоидальный (или, точнее, полусинусоидальный) сигнал, поскольку это делает кривую рассеиваемой мощности слишком сложной для простого анализа. Линейное увеличение напряжения очень четко показывает максимальное рассеивание, и оно происходит в точке, где напряжение на нагрузке и выходном транзисторе равно. Для тестовой схемы это происходит при 35 В. При синусоидальном сигнале наихудшее рассеивание транзистора происходит, когда среднеквадратичное выходное напряжение составляет примерно половину напряжения постоянного тока — 35 В RMS, или 306 Вт при нагрузке 4 Ом. Опять же, это относится только к резистивной нагрузке.

Показаны две схемы: класса B и класса G. Они использовались для регистрации сигналов рассеиваемой мощности и выполнения всех расчетов мощности.

Сравнительная рассеиваемая мощность.
В любом усилителе общая эффективность основана на мощности, подаваемой на усилитель от источника питания, и на том, какая часть этой мощности передается на нагрузку. Разница указывает на потери мощности в самом усилителе. В идеальном мире вся мощность от источника питания передавалась бы на нагрузку (100% эффективность), но на практике этого невозможно достичь ни с одним типом усилителя.

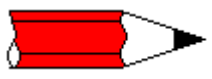
Используя тестовую схему, показанную на рисунке 2, и ту же пилообразную форму сигнала, что и для предыдущих измерений, я измерил мощность нагрузки и рассеиваемую мощность выходных транзисторов. В этом упражнении рассеиваемая мощность транзистора драйвера была проигнорирована, поскольку я намеренно «подкорректировал» параметры моделирования, чтобы поддерживать ее на очень низком уровне (обычно менее 1 Вт). Также было смоделировано 3-канальное каскадное устройство класса G, но оно не показано. Игнорируя потери, при 3 источниках питания, каждый по 23,33 В, внутренние транзисторы, естественно, получают 23,33 В, средний транзистор получает 44,66 В, а внешние — 70 В (достаточно близко). Средняя рассеиваемая мощность — это сумма рассеиваемых мощностей всех силовых транзисторов (1, 2 или 3). Входная мощность — это сумма выходной мощности и рассеиваемой мощности всех выходных транзисторов, а также с резистивной нагрузкой (это дает несколько завышенный результат). Результаты приведены в таблице ниже…

Измерение	**Класс-Б**	**Двухрельсовый класс G**	**Трехрельсовый класс G**	**Стрелочный рельс класса G**
Средняя мощность нагрузки	381W	381W	381W	381W
Среднее рассеивание	204 Вт	151W	133W	143W
Пиковое рассеивание	304W	268W	220 Вт	297W
Входная мощность	585 Вт	532W	514W	524W
Эффективность	65%	72%	74%	72%

Таблица 1 - Рассеиваемая мощность при пилообразном сигнале 0-70 В

Приведенные значения пикового рассеиваемого напряжения соответствуют максимальной мгновенной мощности, которую может выдержать устройство (устройства). Для усилителей класса G это ***всегда*** самые внешние устройства, независимо от количества линий питания. Как легко заметить, увеличение сложности до использования трех линий питания дает незначительное повышение эффективности. Также следует помнить, что на общую эффективность любого усилителя класса G влияют динамический диапазон воспроизводимого материала и общий уровень громкости. Приведенные выше данные показывают рассеиваемое напряжение и эффективность при подаче пилообразного сигнала 0-70 В, но в реальных условиях такая форма сигнала крайне маловероятна. Также следует отметить, что это только половина усилителя и используется только в пояснительных целях.

Фактические результаты могут сильно различаться в зависимости от использования усилителя. Очевидно одно: трехканальная система обеспечивает минимальное улучшение по сравнению с двухканальной. Вариант с переключаемыми шинами рассматривается ниже , но был включен сюда для упорядочивания данных и облегчения сравнения.



Следует понимать, что приведенные выше показатели эффективности отличаются от общепринятых значений. Это связано с тем, что использовалась пилообразная форма сигнала, а не синусоида. Тестирование с использованием полусинусоидального сигнала изменит значения, но соотношения останутся достаточно схожими. В примере с классом B мощность нагрузки составляет 287 Вт, рассеиваемая мощность транзистора — 90 Вт, а КПД — 76%. В классе G эти показатели лучше: рассеиваемая мощность — 71 Вт, а КПД — 80%. Эти цифры приведены для полной мощности и не отражают ожидаемых характеристик при работе с музыкальными сигналами.

Топология класса G.
Очень распространенная схема, используемая во многих коммерческих усилителях класса G, заключается в последовательном соединении силовых транзисторов, как показано на рисунке 2 (обратите внимание, что на рисунке показана только одна полярность и схема сильно упрощена). На рисунке 3 показана аналогично упрощенная схема усилителя класса G, но с использованием обеих полярностей. Два набора транзисторов будут называться *внутренней парой* — те, которые подключены непосредственно к выходу и питаются через диоды от низковольтного источника питания, и *внешней парой* — те, которые подключены к высоковольтным шинам.

Такая компоновка популярна, потому что её относительно легко реализовать, и при правильном выполнении она даёт очень хорошие результаты. Остальная часть этой статьи будет посвящена именно этой топологии, хотя существуют и другие, которые также можно использовать. Они будут рассмотрены позже, но не очень подробно.

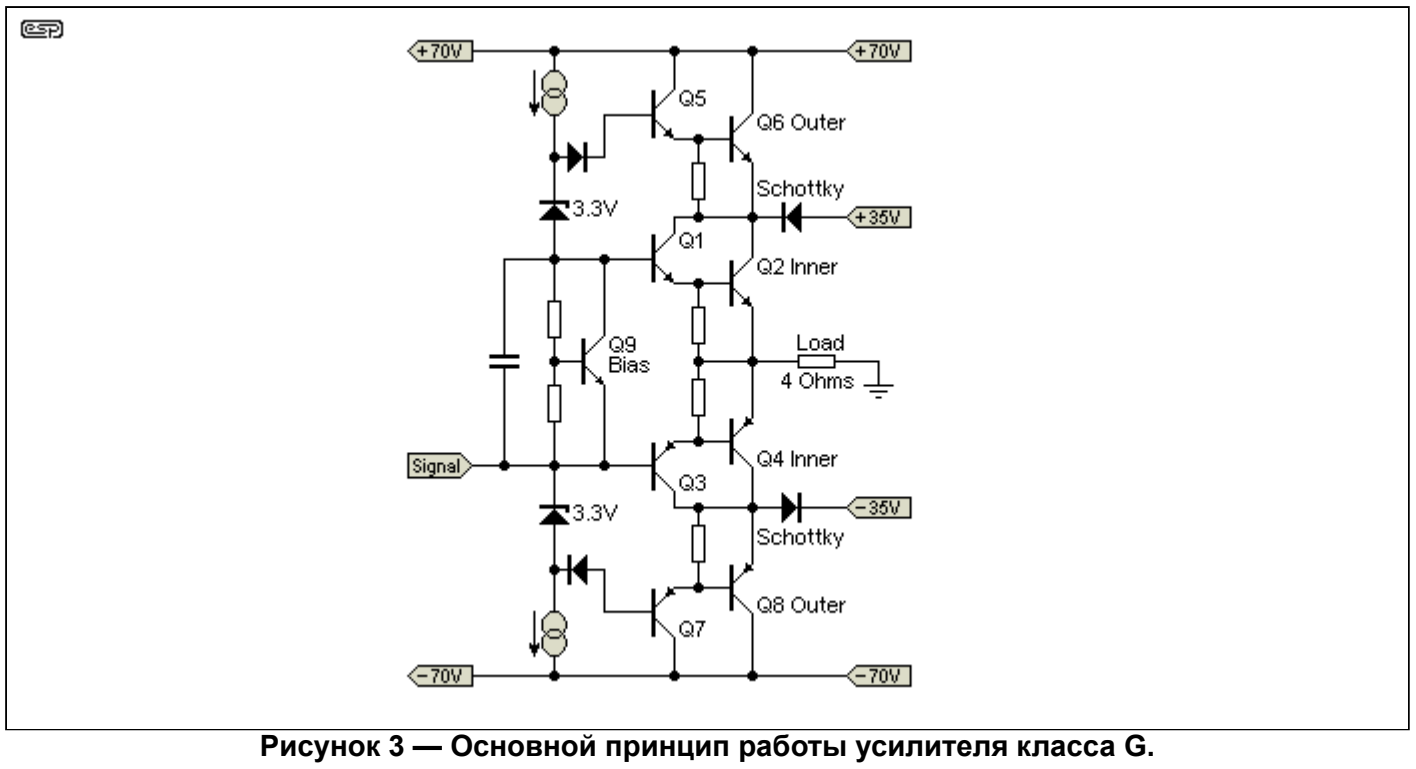


Рисунок 3 — Основной принцип работы усилителя класса G.

Представленная выше схема выходного каскада будет использоваться для дальнейшего анализа выходного каскада класса G. Входной каскад и каскад усиления напряжения (КАН) практически идентичны любому обычному усилителю класса B. КАН обычно используется вместо одного из показанных источников тока. Представленная выше схема удобна для анализа, поскольку она достаточно проста.

Поскольку внутренние транзисторы (Q2 и Q5) питаются напряжением ±35 В, как внутренние выходные транзисторы, так и драйверы должны быть рассчитаны как минимум на напряжение пробоя 105 В. Напряжение на каждом из них будет изменяться на величину полного напряжения питания внутреннего транзистора плюс разница между внутренним и внешним напряжениями питания каждой полярности. Поскольку выходное напряжение колеблется между положительным и отрицательным значениями, внутренние транзисторы будут получать максимальное напряжение 70 + 35 = 105 В, однако, с осторожностью, предпочтительнее более высокое значение, и в идеале следует использовать транзисторы, рассчитанные на полное напряжение питания. Как только сигнал требует напряжения, превышающего 35 В любой полярности, внешние транзисторы (Q6 и Q8) повышают напряжение питания в нужном направлении, позволяя выходному напряжению колебаться почти на все ±70 В. Даже небольшая ошибка в расчетах (в проектировании или реализации) может привести к тому, что из дорогостоящих устройств потечет много дыма, и будет произнесено множество грубых слов.

Напряжение на внешних транзисторах (теоретически) никогда не может превышать 35 В, поэтому можно использовать низковольтные, но мощные транзисторы. Если используются высоковольтные устройства, их безопасная рабочая область (SOA) должна быть очень хорошей — конечно, в зависимости от выбранных устройств. Хорошая SOA необходима, потому что к моменту включения Q6 (например) ожидается, что он будет выдавать 8,75 А при полном напряжении 35 В. Это мгновенная мощность 306 Вт, намного больше, чем может выдержать любой отдельный транзистор без выхода из строя. В момент включения Q6, Q2 (внутренний транзистор) полностью включен и остается в таком состоянии до тех пор, пока Q6 снова не выключится. Следовательно, рассеиваемая мощность в Q2 и Q4 будет оставаться довольно низкой всякий раз, когда выходное напряжение превышает 35 В в любом направлении.

При указанных напряжениях питания диоды, обеспечивающие напряжение ±35 В, должны быть рассчитаны на непрерывный средний ток не менее 5 А, предпочтительно больше. Номинальное напряжение не является проблемой, поскольку максимальное обратное напряжение при указанных напряжениях питания составляет 35 В.

Усилители класса G с рассеиваемой мощностью
используют две или более линий питания каждой полярности. Существует столько же мнений относительно оптимальных напряжений для каждой линии, сколько людей, комментирующих или проектирующих усилители класса G в целом. Простая истина заключается в том, что это зависит от нескольких факторов.

Основные факторы влияния...

- В музыке определенного типа, сильно сжатом, динамический диапазон ограничен, поэтому средняя и пиковая мощность часто отличаются всего на несколько децибел. Другие материалы (например, оркестровая музыка с усилением) могут иметь очень широкий динамический диапазон, при этом пиковая мощность превышает среднюю на 10-20 дБ и более.
- Фактический уровень мощности — если усилители мощностью 500 Вт работают только на низкой мощности (менее 200 Вт), чтобы компенсировать динамические пики, то баланс напряжения питания должен существенно отличаться от баланса напряжения усилителя, работающего практически на полной мощности постоянно.
- Применение усилителей — усилители, используемые в Hi-Fi системах, выполняют совершенно иную функцию, чем усилители, используемые в профессиональных акустических системах. Следовательно, требования к ним также совершенно другие, и, как правило, предпочтительнее использовать источник питания с более низким напряжением.
- Акустическая система — усилитель, работающий с широкополосной акустической системой со встроенными пассивными кроссоверами, — ведет себя совершенно иначе, чем группа усилителей, подключенных к выходам

электронного кроссовера. При использовании электронных кроссоверов динамический диапазон каждого усилителя часто значительно отличается от диапазона широкополосного сигнала.

Рассеиваемая мощность (с использованием того же сигнала, что и на рисунке 1, и схемы класса G, показанной на рисунке 2) показана ниже. Хотя схема более сложная из-за двух наборов транзисторов, на первый взгляд существенной разницы не наблюдается.

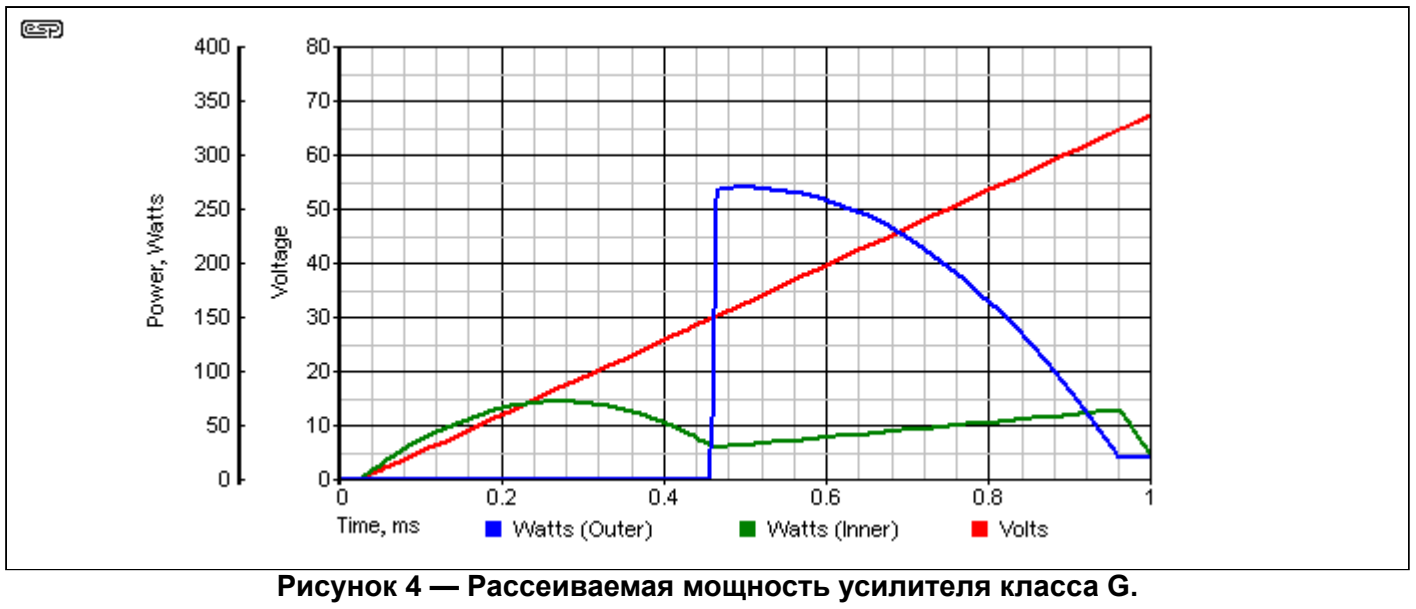


Рисунок 4 — Рассеиваемая мощность усилителя класса G.

Чтобы оценить эффект, необходимо взглянуть на область под кривыми и определить среднюю мощность. Внешние источники питания остаются на уровне ±70 В во всех случаях. Для внутренних транзисторов с напряжением питания 35 В средняя мощность — используя точно ту же форму сигнала, что и на рисунке 1 (и рассматривая только положительный сигнал) — составляет около 40 Вт, а для внешних транзисторов (Q6 и Q8) — 100 Вт. Таким образом, общая мощность составляет 140 Вт против 203 Вт для класса B, что является значительным снижением. Соотношения будут меняться в зависимости от распределения напряжения питания. Общая мощность возрастет до 158 Вт, если напряжение внутренних источников питания будет снижено до 30 В. И наоборот, если напряжение внутренних источников питания будет повышено до 40 В, общая средняя мощность немного снизится до 136 Вт, а при напряжении внутренних источников питания 45 В общая средняя мощность упадет еще больше до 129 Вт.

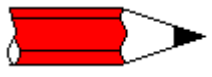
Казалось бы, логично предположить, что внутреннее напряжение должно составлять около 70% от общего, и действительно, это обеспечит наименьшее общее рассеивание — но *только* для непрерывных сигналов на полной мощности. В реальных условиях все совсем иначе, и усилители обычно не работают на полной мощности с непрерывным сигналом. Они используются для воспроизведения музыки, и, как обсуждалось выше, существует множество факторов, влияющих на оптимальное внутреннее напряжение.

В большинстве профессиональных усилителей мощности, использующих двухдиапазонное напряжение питания, низковольтное напряжение составляет от 40% до 50% от основного (высоковольтного) напряжения, но возможны значительные отклонения. При использовании в Hi-Fi-системах низковольтное напряжение может составлять всего 30% от высоковольтного, поскольку усилитель обычно проводит более 90% времени без включения внешних транзисторов. У разных разработчиков могут быть разные мнения, но конечный результат, как правило, устраивает большинство целей. Суть в том, что оптимального процента не существует — слишком много переменных.

Существует несколько мощных схем, использующих более 4 источников питания (т.е. два положительных и два отрицательных напряжения). Есть и такие, которые имеют по три источника питания каждой полярности, а четыре — не редкость. Как всегда, действует закон убывающей отдачи, и разработчик должен сбалансировать сложность и стоимость с преимуществами. В большинстве случаев это приведет к двух- или трехкаскадной выходной схеме (всего 2 или 3 источника питания каждой полярности). Процесс добавления дополнительных источников питания идентичен тому, который необходим для простого двухкаскадного каскада класса G, и многокаскадные схемы далее рассматриваться не будут.

Как упоминал Дуглас Селф [3], существует дополнительная топология, которую он называет «параллельной» топологией класса G. Она не слишком редка в некоторых коммерческих усилителях, но здесь не рассматривается. Основное различие между последовательной и параллельной (или параллельной) топологиями заключается в том, что последняя требует, чтобы вторичные выходные устройства были способны выдерживать полное напряжение от высоковольтных источников питания.

Последовательное соединение требует лишь того, чтобы внешние транзисторы могли выдерживать разность напряжений между двумя источниками питания. Это упрощает выбор устройств, поскольку требуется только высокая мощность, а не комбинация высокой мощности *и* высокого напряжения. Более низкое напряжение также повышает безопасность рабочей зоны.



Хотя следующая информация обычно не публикуется, следует учитывать, что некоторые тестовые сигналы (в частности) могут создавать проблемы для многих усилителей класса G. Рассеивание энергии при определенных уровнях некоторых сигналов может привести к значительному перегреву усилителя. Вряд ли это будет проблемой для обычных музыкальных сигналов, но это все же может произойти!

Например, рассмотрим сигнал, поступающий на усилитель, который обрезан (возможно, из-за неправильной установки уровней на микшере или кроссовере) и случайно доводит напряжение усилителя до уровня чуть выше точки коммутации (скажем, пиковое значение 36 В для наших примеров). *Это примерно эквивалентно прямоугольному сигналу* .

В этих условиях выходной каскад усилителя (рис. 3) будет фактически работать с прямоугольным сигналом напряжением 36 В. Мощность на нагрузке составляет около 147 Вт. Усилитель класса B будет рассеивать около 150 Вт, что немного меньше, чем можно было бы ожидать. Усилитель класса G будет рассеивать ту же мощность (150 Вт), что и при работе на полной мощности — в этих условиях класс G вообще не снижает рассеиваемую мощность *!*

Сравнение эффективности.
Поскольку эффективность при различных мощностях и формах сигнала сложно количественно оценить, следующий

график, надеюсь, сделает это немного понятнее. Как вы можете видеть, усилитель класса G обладает более высокой эффективностью (что означает меньшие потери и меньшее тепловыделение) во всем рабочем диапазоне. Оба типа усилителей имеют одинаковую максимальную теоретическую эффективность на полной мощности. Следует отметить, что эффективность усилителей класса B и класса G может приближаться к 100%, если они работают в режиме жесткого ограничения сигнала, но на практике их не следует (и не нужно) использовать таким образом.

Данные основаны на синусоидальном сигнале и резистивной нагрузке 4 Ом. Коррекция на падение напряжения питания под нагрузкой не предусмотрена — это лишь теоретические кривые, включенные для наглядности различий. Схема, использованная для графиков, основана на схемах на рисунке 2, но модифицирована для биполярного режима работы. Была учтена коррекция на искажения, возникающие при переходе через полярность, поскольку схемы на рисунке 2 не предусматривают смещения транзисторов.

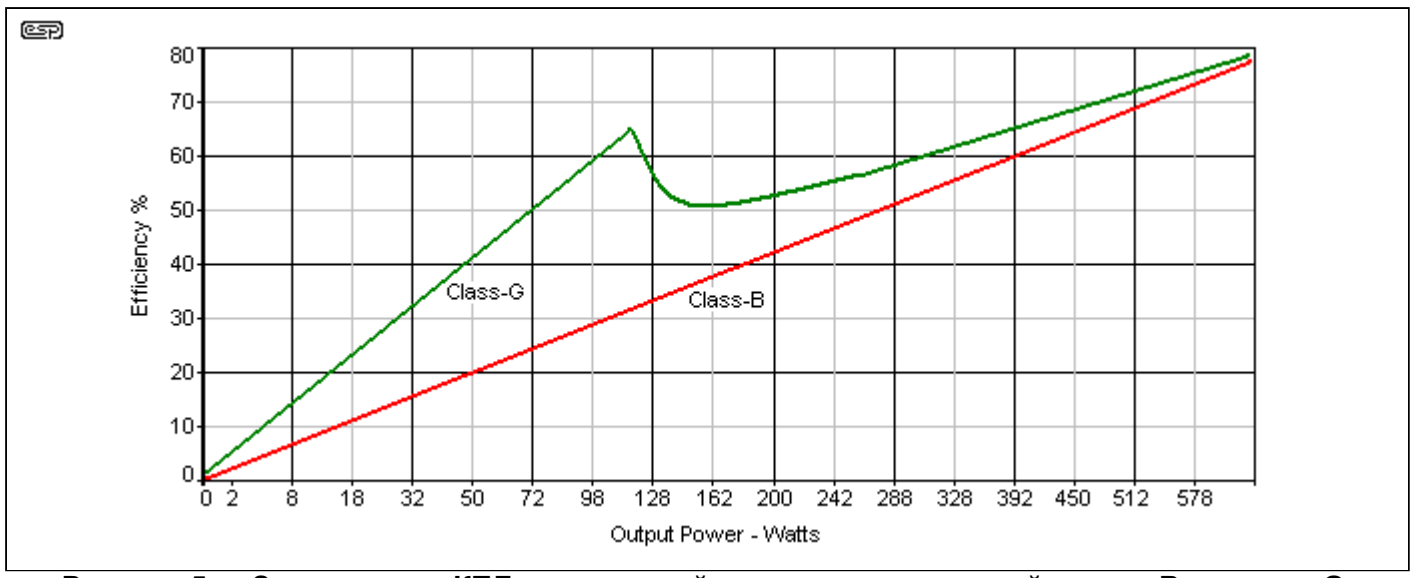


Рисунок 5 — Зависимость КПД от выходной мощности усилителей класса B и класса G.

График для усилителя класса G выглядит довольно странно, но это реальные данные. При выходной мощности около 100 Вт усилитель класса G достигает пика, а затем снова падает по мере дальнейшего увеличения мощности. Минимальная эффективность после пика достигается при ~160 Вт, после чего она снова возрастает. График был построен путем анализа средней мощности, подаваемой на нагрузку и от источника питания (или источников питания), при этом пиковое выходное напряжение увеличивалось с шагом в 1 В. Падение после 100 Вт — это точка, где внешние транзисторы начинают проводить ток — см. рисунок 4 и сравните эффекты объединения двух наборов данных по рассеиваемой мощности.

Причина, по которой график для класса B представляет собой прямую линию, заключается в том, что шкала мощности основана на равных приращениях напряжения, поэтому она нелинейна. Изменение масштаба, конечно, не меняет данные, но это был самый простой способ получить график, обеспечивающий достаточное количество точек данных для получения точного результата. Важно отметить, что класс G более эффективен во всем нормальном рабочем диапазоне усилителя, и особенно для материалов с достаточно широким динамическим диапазоном.

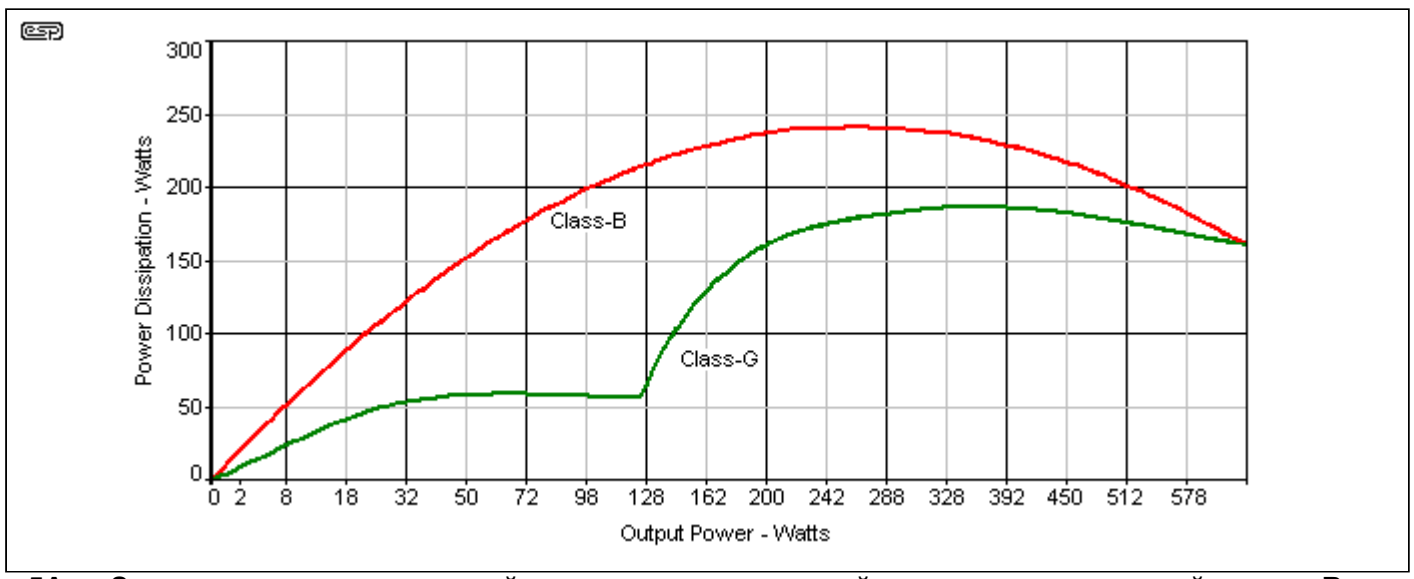


Рисунок 5A — Зависимость рассеиваемой мощности от выходной мощности усилителей класса B и класса G.

На рисунке 5A представлены, по сути, те же данные, что и на рисунке 5, но с другим применением. На этом графике рассеяние (через транзисторы и радиатор) показано в зависимости от выходной мощности. Это дает альтернативный способ увидеть разницу в выделении тепла между классами B и G. Как видно, выделение тепла значительно снижается при использовании класса G. Общая форма кривой аналогична сумме двух кривых рассеяния на рисунке 4, но изменена из-за синусоидального сигнала вместо линейно нарастающего напряжения.

Рассеивание с использованием шумового сигнала.
В качестве дополнительного теста, который может лучше продемонстрировать преимущества по сравнению с синусоидальным сигналом, я также провел моделирование схем, показанных на рисунке 2, используя отфильтрованный источник шума. Это оказалось очень показательным и демонстрирует, что преимущества в эффективности работы устройств класса G вполне реальны.

Простые каскады класса B и класса G показали непрерывную среднюю мощность, потребляемую нагрузкой, в 196 Вт. Это неудивительно, поскольку в обоих случаях использовался один и тот же сигнал. В каскаде класса B рассеиваемая мощность транзистора составила 245 Вт — это очень много тепла, которое нужно отвести! Для сравнения, в каскаде класса G рассеиваемая мощность внешнего транзистора составила 87 Вт, а внутреннего — 48 Вт, что в сумме составляет 135 Вт. Это чуть более половины рассеиваемой мощности — значительное снижение.

Пиковое рассеивание также значительно улучшено. В каскаде класса B пиковое рассеивание составляло 306 Вт. Это означает, что даже 4 транзистора по 200 Вт могут работать на пределе своих возможностей с каждой стороны усилителя (положительной и отрицательной, а не левой и правой) — помните о кривых SOA, снижении мощности при высоких температурах и рассеивании при реактивных нагрузках.

Для сравнения, каскад класса G показал пиковую мощность 269 Вт (внешний) и 72 Вт (внутренний). Хотя очевидно, что для внешних секций потребуется как минимум 3 транзистора по 200 Вт, следует помнить, что они не обязательно должны быть высоковольтными. Это снижает финансовую нагрузку. Для внутренних транзисторов можно использовать один транзистор мощностью 200 Вт, что будет вполне в пределах его номинальных характеристик даже при повышенной температуре и реактивной нагрузке. Для удобства сравнения эти данные приведены в таблице ниже. Все данные приведены для резистивной нагрузки 4 Ом. Результаты для реактивных нагрузок (например, громкоговорителей) будут значительно отличаться и их слишком сложно предсказать. Я провел несколько измерений, но все средние значения основаны на приблизительных оценках.

Ожидается, что пиковое рассеивание удвоится при наихудшем случае с фазовым сдвигом в 45°, создаваемом реактивной нагрузкой громкоговорителя. Это ничем не отличается от усилителя класса B, за исключением того, что в классе G экономия значительно больше. Все выходные устройства *должны* выдерживать наихудшее пиковое рассеивание, оставаясь при этом в пределах безопасной рабочей зоны при нормальной рабочей температуре, а не при 25°C. Новички часто упускают это из виду, и большинство из них (часто серьезно) переоценивают мощность, которую они могут получить от любого полупроводникового устройства.

Состояние	**Класс-Б**	**Класс-G**
Средняя мощность нагрузки	196W	196W
Пиковое рассеяние (внешнее)	-	269W
Максимальное рассеивание (внутреннее)	306 Вт	72W
Среднее рассеяние (внешнее)	-	87W
Среднее рассеивание (внутреннее)	245	48 Вт
Среднее рассеивание (общее)	245 Вт	135 Вт
Среднее рассеивание энергии (общее, реактивное)	320 Вт	180 Вт

Таблица 2 - Рассеиваемая мощность при наличии шумового сигнала

Поскольку усилитель класса B не имеет двух наборов компонентов, показатели класса B включены во внутренние категории. Как видно из таблицы, разница весьма существенна. Возможность использования радиатора, размер которого составляет менее половины стандартного, с недорогим вентилятором позволяет легко разместить очень мощный усилитель в корпусе высотой 2U (89 мм или 3,5 дюйма). Благодаря меньшим потерям это также означает, что можно использовать трансформаторы меньшего размера.

Поскольку одноканальный усилитель класса B тратит 245 Вт (из нагрузки), подавая при этом 196 Вт на нагрузку, трансформатор и блок питания должны выдавать 441 Вт, чтобы усилитель мог выполнять свою работу. Усилителю класса G требуется 331 Вт для выполнения той же работы на нагрузке — общая экономия составляет 110 Вт.

Экономия будет больше, если учесть рассеивание реактивной нагрузки, которое, как отмечалось выше, примерно вдвое больше, чем у резистивной нагрузки. Как видно из таблицы, для класса B это будет (обычно) около 320 Вт (или 490 Вт для одночастотного режима, фазовый сдвиг 45°), но для класса G это вполне приемлемо — 180 Вт. Попытка рассчитать реальный вклад реактивных нагрузок очень сложна, поскольку сигнал будет меняться от емкостного к индуктивному (оба являются реактивными) и к резистивному в зависимости от частот, присутствующих в любой момент времени. Что касается *среднего* вклада реактивного сопротивления, то вполне разумно предположить, что оно добавит где-то от 10 до 30% к рассеиванию резистивной нагрузки. Опять же, это будет варьироваться в зависимости от использования, конструкции акустической системы, типа музыки и т. д. Для таблицы я использовал 30%.

Как уже обсуждалось ранее, невозможно предсказать оптимальное напряжение для внутренней шины, поскольку сигнал, по сути, случаен. Это также означает, что каждый показатель эффективности может быть получен только для определенного набора условий. Я постарался предоставить достаточно информации, чтобы читатель мог понять задействованные процессы, но никто не может предсказать, как будет работать любой усилитель класса G в приложении конечного пользователя, если только это приложение не включает сигнал, который можно точно воспроизвести (во всех отношениях!). Слишком много переменных.

Коммутация

Фактически, переключения с внутренней пары транзисторов на внешнюю не происходит, вместо этого внутренние шины можно считать повышающими, поскольку выходное напряжение стремится превысить более низкое значение. Теоретически, внутренние транзисторы постоянно контролируют сигнал, однако на практике этот момент не имеет значения. На рисунке 5 показан выходной сигнал и напряжение на внутренних шинах — повышенное напряжение.



Рисунок 6 - Эффект повышения напряжения на шине питания

Как видите, напряжение на шине питания поддерживается на уровне на пару вольт выше выходного напряжения. Внешние транзисторы, по сути, являются просто повышающими преобразователями напряжения питания и предназначены для включения непосредственно перед тем, как выходное напряжение обрезается при напряжении внутренней шины питания. Естественно, как только будет достигнуто напряжение внешней шины питания, выходное

напряжение обрежется, поскольку оно не может продолжаться дальше. Процесс переключения обычно называют коммутацией, поскольку он не сильно отличается от работы щеточного коммутатора в электродвигателе.

Коммутация (или повышение напряжения на шине) осуществляется с помощью диодов и внешних транзисторов. Как и в любой функции, связанной с переключением, могут возникать искажения, которые станут частью выходного сигнала, снижая качество звука. В этом отношении это похоже на кроссоверные искажения, возникающие, когда усилитель не обеспечивает линейного изменения полярности выходного сигнала.

К счастью, искажения возникают при относительно высоком уровне выходного сигнала, и, скорее всего, любые искажения будут совершенно неслышны. Это частично объясняется низким уровнем искажений по сравнению с уровнем выходного сигнала, а частично — маскировкой, когда звуки становятся неслышимыми в присутствии других звуков аналогичной частоты, но более высокого уровня. Это явление используется, например, во всех аудиофайлах, закодированных в формате MP3. Хотя вполне возможно, что искажения могут быть слышны при синусоидальном входном сигнале, по мере увеличения сложности музыки слышимость искажений снижается. Настоятельно рекомендуется использовать диоды Шоттки для внутренних напряжений питания, поскольку они выключаются гораздо быстрее из-за гораздо меньшего накопленного заряда и, следовательно, менее склонны к возникновению слышимых артефактов.

Стабилитроны, показанные на рисунках 2 и 3, имеют важное значение. Они обеспечивают начало проводимости внешних транзисторов непосредственно перед насыщением внутренних транзисторов. В этот момент усилитель обычно начинает ограничивать сигнал, но внешние транзисторы теперь повышают напряжение питания ровно до той степени, которая необходима для предотвращения ограничения. Как отмечалось ранее, как только выходной сигнал пытается превысить ***внешнее*** напряжение питания (любой полярности), усилитель (должен) ограничивать сигнал в любом случае. Если стабилитроны отсутствуют, в точках коммутации будет возникать значительное искажение. Хотя отрицательная обратная связь в некоторой степени уменьшит его, оно все равно будет присутствовать, измеримо и, возможно, слышимо.

Если напряжение стабилитрона слишком высокое, внешние транзисторы включатся слишком рано, что увеличит рассеиваемую мощность внутренних транзисторов. Если же оно слишком низкое, внешние транзисторы не будут проводить ток достаточно рано, и на выходе возникнут искажения в точке коммутации, поскольку внутренние транзисторы перестанут управлять схемой. В идеале напряжение стабилитрона должно быть немного выше падения напряжения на цепях внутренних транзисторов, включая эмиттерные резисторы и потери в питающем напряжении и диодах на базе внешних транзисторов.

Как и во многих других областях электроники, здесь необходимо соблюдать баланс (или компромисс). В целом, напряжение стабилитрона от 3,3 В до 4,7 В кажется разумным для большинства применений, хотя для некоторых схем потребуется большее напряжение, для других — меньшее.

Защита.
Усилитель класса G уникален тем, что при коротком замыкании или другой серьезной перегрузке защита требуется только внутренним транзисторам. Поскольку выходной сигнал не может отклоняться более чем на несколько вольт при типичном низкоомном повреждении, внешние транзисторы даже не пытаются включиться. Поэтому, если внутренние транзисторы оснащены защитой по нагрузочной линии (также известной как SOA — безопасная рабочая область), этого достаточно для защиты усилителя.

Поскольку внутренние транзисторы работают при относительно низких напряжениях, обеспечить отличную защиту от перегрузки гораздо проще, чем в случае высоковольтного усилителя класса B. Нет необходимости в защитной схеме с несколькими точками разрыва (что крайне важно для высоковольтных схем класса B), поскольку внутренние устройства обычно легко укладываются в свою безопасную рабочую зону с помощью относительно простой схемы.

Схема защиты упрощена исключительно за счет низкого рабочего напряжения внутренних транзисторов, и ни одна другая топология усилителя не обеспечивает этого существенного преимущества. В случае усилителей класса G, использующих три или более источников питания каждой полярности, внутренние транзисторы нуждаются в защите только для самых низковольтных шин.

В качестве примера я привел данные SOA из технического описания ON-Semi [5] для транзисторов MJL21193/4. Они рассчитаны на 200 Вт, 250 В и 16 А непрерывного тока. Это надежные устройства, хорошо подходящие для усилителей высокой мощности. **Общая тенденция** практически идентична для всех биполярных транзисторов, хотя значения будут меняться в соответствии с номинальными характеристиками устройств.

Как видите, напряжение при максимальном токе довольно ограничено, но, что удивительно, оно немного превышает предел в 12,5 В, установленный номинальной мощностью 200 Вт. Тем не менее, оно значительно ниже предела в 35 В для внешних транзисторов, описанных здесь — при 35 В коллекторный ток ограничен примерно 7 А. Следует помнить, что это при температуре корпуса 25 °C. При более высоких температурах мощность транзистора необходимо снизить на 1,43 Вт/°C. Например, при температуре корпуса всего 60 °C мощность транзистора необходимо снизить на 50 Вт, уменьшив максимальную рассеиваемую мощность до 150 Вт.

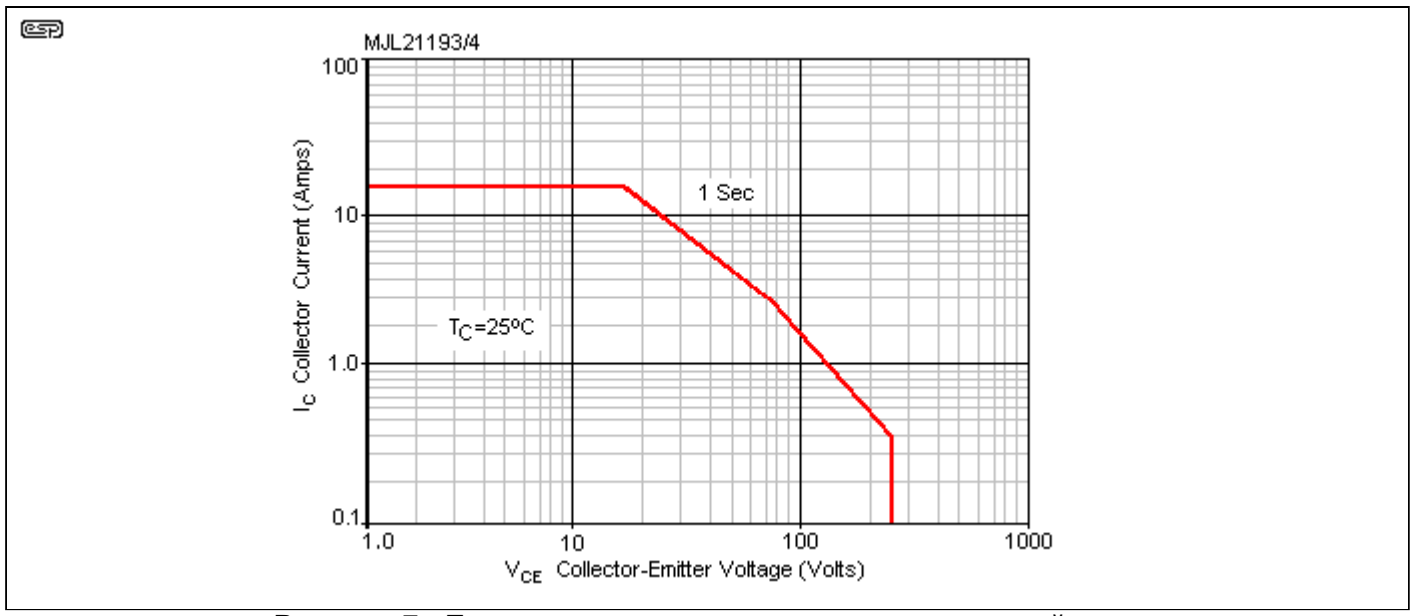


Рисунок 7 - Безопасная зона эксплуатации в активной зоне

Цитата из технической документации... Существует два ограничения на допустимую мощность транзистора: средняя температура перехода и вторичный пробой. Кривые безопасной рабочей области указывают пределы I C – V CE транзистора, которые необходимо соблюдать для надежной работы; то есть транзистор не должен подвергаться большей рассеиваемой мощности, чем указано на кривых. Данные на рисунке 7 основаны на T J (пиковое значение) = 200°C. T C является переменной величиной в зависимости от условий. При высоких температурах корпуса тепловые ограничения снизят допустимую мощность до значений меньше, чем ограничения, накладываемые вторичным пробоем.

Для получения более подробной информации о рассеиваемой мощности транзисторов, втором пробое и других ограничениях, пожалуйста, ознакомьтесь со статьей SOA .

Альтернативные усилители класса G

Одна из топологий, используемая по крайней мере одним производителем [4], — это параллельный или параллельный режим, при котором внешние транзисторы фактически *берут* на себя управление, когда внутренние устройства теряют напряжение. Насколько это выгодно, спорно, но в тех конструкциях, которые я видел, это было сделано для очень специфической цели. Способ конфигурации этих усилителей позволяет устанавливать коллекторы транзисторов непосредственно на заземленный радиатор. Это минимизирует тепловое сопротивление между корпусом транзистора и радиатором, обеспечивая наилучшее возможное рассеивание тепла устройством.

На мой взгляд, это, вероятно, самый сложный способ проектирования схемы класса G, и я бы не рекомендовал даже пытаться его использовать. Хотя производителю удаётся создавать очень надёжные усилители, используя этот метод, мне сообщили (от человека, который их ремонтировал), что многие компоненты крайне критичны — использование транзистора, даже немного отличающегося от оригинального, приведёт к паразитным колебаниям в усилителе. Для большинства полупроводниковых компонентов на схеме указано, что их *необходимо* приобретать у производителя... никаких замен, даже на компоненты той же марки.

Мне удалось раздобыть несколько схем для коммерческих разработок, и описанная здесь последовательная конфигурация по-прежнему остается одной из самых популярных. Как и во многих областях электроники, альтернатив будет столько же, сколько и разработчиков. В конечном итоге, это не имеет значения, при условии, что в схеме достаточно выходных элементов, чтобы безопасно выдерживать самые экстремальные нагрузки, которым может подвергаться усилитель. Для профессионального аудио это может иметь огромное значение.

Ещё один вариант — использование импульсного высоковольтного источника питания. Высоковольтный источник включается и выключается, а не включается линейно для поддержания запаса по напряжению 2-3 В относительно сигнала. Как только достигается пороговое значение (обычно половина напряжения основного источника), на выходные транзисторы подаётся полное напряжение питания, изменяя напряжение питания, например, с 35 В до 70 В за один шаг. Полное напряжение остаётся на выходных транзисторах до тех пор, пока выходное напряжение не упадёт ниже порогового значения, после чего высоковольтный источник питания снова отключается. Затем выходные транзисторы возвращаются к источнику питания 35 В. Общее рассеивание мощности потенциально немного ниже, чем при последовательном соединении, показанном выше, но шум коммутации практически гарантирован, если скорость переключения не будет замедлена до достаточно медленного уровня.

При такой конфигурации внутренние транзисторы должны компенсировать все рассеиваемые мощности усилителя. Хотя средняя мощность снижается по сравнению с усилителями класса B, *пиковое* рассеивание остается (более или менее) тем же — просто оно длится меньше для любой заданной частоты. Наибольшее преимущество заключается в том, что для коммутации можно использовать переключающие MOSFET-транзисторы, и нет необходимости использовать сравнительно дорогие аудиосиловые транзисторы. Напряжение питания показано на рисунке 8, поскольку простого описания недостаточно для полного понимания рассматриваемого процесса.

Несомненно, существуют и другие варианты класса G, которые я не видел, и в них могут использоваться другие технологии.

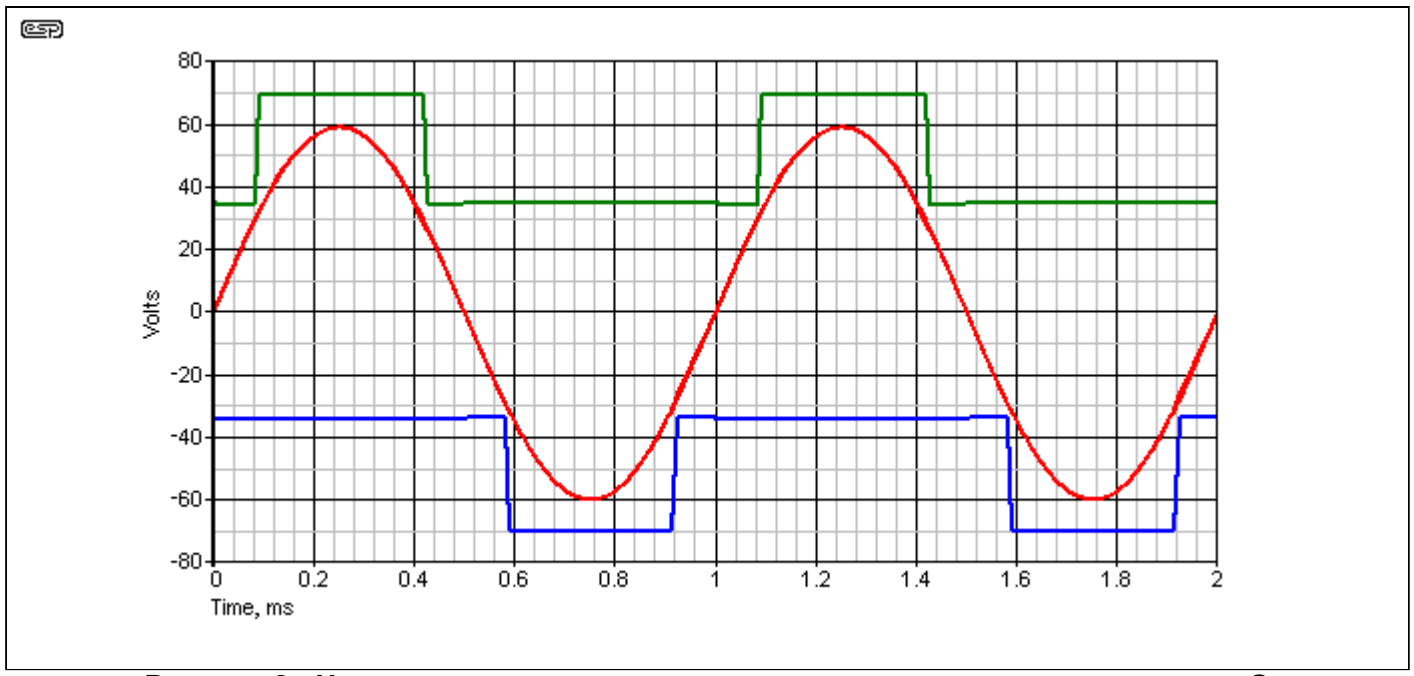


Рисунок 8 - Напряжение питания импульсного рельсового привода класса G

Как отмечалось выше в разделе об общей эффективности, эта схема имеет эффективность, эквивалентную эффективности обычного двухканального (каждая полярность) усилителя класса G. Ее преимущество заключается во внешних транзисторах, которые теперь являются переключающимися, а не линейными. Следовательно, потери во внешних транзисторах очень малы, но пиковое рассеяние внутренних транзисторов значительно возрастает.

Поскольку все усилители должны быть спроектированы таким образом, чтобы не превышать безопасную рабочую зону выходного транзистора из-за реактивных нагрузок или высокой рабочей температуры, номинальная мощность внутренних транзисторов должна быть такой же, как и для каскада класса B. Благодаря более низкому среднему рассеиванию мощности, температура снижается, что может дать небольшое преимущество. Как и во всех схемах класса G, силовой трансформатор также может быть немного меньше из-за меньших общих потерь.

Класс-H

Аналогичная (по крайней мере, в некоторых отношениях) схема называется усилителем класса H, и бывает сложно точно определить, к какому классу относятся те или иные усилители. В усилителях класса H часто используется «бутстрепный» конденсатор, который по мере необходимости повышает напряжение на шинах, но не может поддерживать его на полном уровне более нескольких циклов. Через короткий промежуток времени конденсатор разряжается, и высоковольтное питание обрывается. Первоначально они использовались в автомобильной аудиотехнике и позволяли получать гораздо большую мощность, чем обычно ожидается (около 18 Вт для усилителя с мостовой нагрузкой (BTL), работающего от постоянного тока 13,8 В). Будучи намного дешевле, чем импульсный источник питания, это удобный способ получить дополнительную мощность с минимальными затратами. Для этой цели был/выпускается ряд специализированных микросхем.

Поскольку разница довольно размыта, усилители класса G могут описываться как усилители класса H и наоборот. Я предпочитаю терминологию, согласно которой усилители, использующие схему самоподдерживающейся подсветки или внешне модулированный источник питания, являются «настоящими» усилителями класса H. Если источник питания импульсный или повышается с помощью отдельного источника высокого напряжения, то наиболее подходящим описанием их топологии является класс G.

Обычно считается, что Hitachi создала первый усилитель класса G, но, судя по описаниям, которые я видел, на самом деле это был усилитель класса H. Пиковая мощность в 400 Вт на 8 Ом была доступна не постоянно, а только в течение относительно коротких периодов времени. Это означает, что высоковольтное напряжение создавалось за счет самоподпитки конденсатора, а не с помощью переключаемой схемы. По моему определению выше, это делает его усилителем класса H, хотя Hitachi в то время (1978 год) описывала его как усилитель класса G.

Такая путаница так и не исчезла, в основном потому, что «официально» признаются только классы A, B, C и D. Как было отмечено во введении, вы можете использовать любой термин по своему усмотрению, поскольку единого стандарта не существует.

Схема электрической цепи

Приведённая ниже схема *не* является проектом и предназначена лишь для демонстрации общей конфигурации усилителя класса G. Как внутренние, так и внешние транзисторы используют отдельные драйверы. Это одна из множества использованных конфигураций, и в этом отношении её можно считать такой же «типичной», как и любую другую.

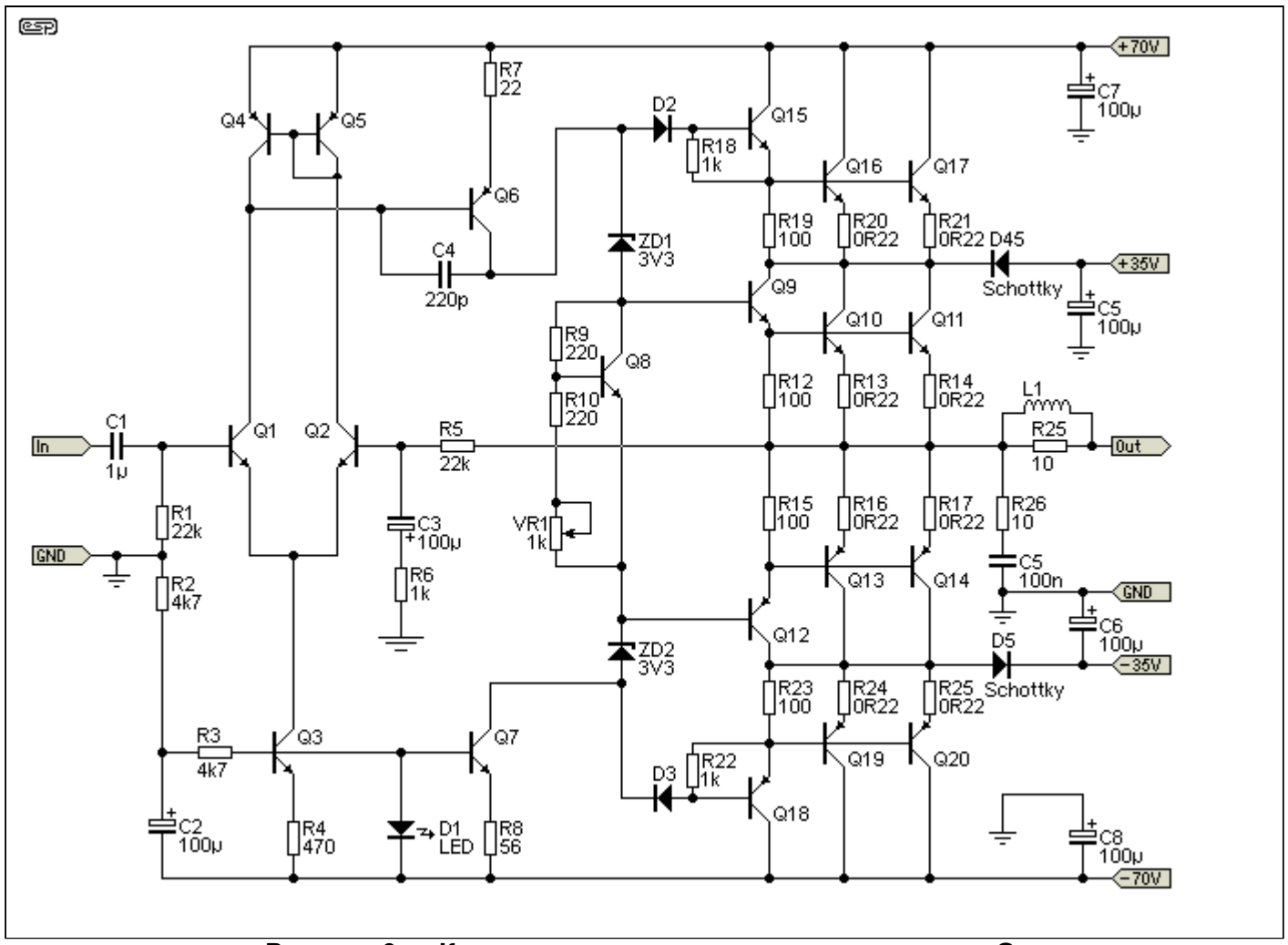


Рисунок 9 — Концептуальная схема усилителя класса G.

Входная часть усилителя довольно стандартная и использует пару транзисторов с длинным хвостом (Q1, Q2), соединенных с токовым зеркалом (Q4, Q5). Токовое зеркало питается от источника тока через транзистор Q3. Это управляет каскадом усиления напряжения (Q6), который стабилизируется с помощью конденсатора Миллера. Каскад усиления напряжения также питается от источника тока Q7. Сервопривод смещения (Q8) должен быть установлен на основном радиаторе выходных транзисторов. Транзисторы драйвера соединены в конфигурации Дарлингтона, поскольку она менее подвержена паразитным колебаниям, чем составная пара, которую я обычно использую. Для мощных усилителей одним из важнейших факторов является надежность и стабильность.

Выходные транзисторы показаны в виде параллельной пары, как для внутренних, так и для внешних выходных транзисторов. Как ни странно, внешние транзисторы требуют большей рассеиваемой мощности, чем внутренние, в основном из-за пиковых нагрузок. Средняя рассеиваемая мощность также будет выше для некоторых программируемых материалов и ниже для других. Это отражено в выборе двух параллельно соединенных транзисторов как для внутренних, так и для внешних выходных транзисторов, но на практике может потребоваться три.

Приведенные значения сопротивлений носят справочный характер и типичны для тех, которые могут использоваться в работающем усилителе. Хотя приведенная выше схема была смоделирована практически точно так, как показано, она не была собрана и протестирована. Это эталонная схема, позволяющая читателю получить представление о полной конструкции. При наличии достаточного интереса может быть разработан проект усилителя класса G, пригодного для работы при указанных напряжениях или, возможно, немного более высоких.

Как должно быть совершенно очевидно, это нетривиальная задача, и собрать такой усилитель будет непросто. Дальнейшая сложность возникнет, если усилитель будет устанавливаться в стойку, поскольку как минимум необходимо добавить защиту от короткого замыкания. Как и в большинстве коммерческих усилителей класса G, для каждого радиатора необходим вентилятор, если только не используются радиаторы увеличенного размера. Вентилятор(ы) предпочтительно устанавливать таким образом, чтобы обеспечивать охлаждение как силовых трансформаторов, так и радиаторов. Все транзисторы от Q8 до Q20 должны быть установлены на радиаторе. Для Q6 и Q7 необходимо использовать отдельные радиаторы меньшего размера.

Усилители класса G — не для слабонервных, как станет ясно из вышесказанного. Из-за относительно высоких напряжений и значительной сложности даже незначительная ошибка при сборке может легко привести к каскаду взрывов (дорогих) компонентов. Теперь вы все понимаете, почему я избегал предлагать платы для чего-либо более мощного или сложного, чем усилитель для сабвуфера P68 — он уже более чем способен обеспечить ту же мощность, что и показанный усилитель класса G. Тепловыделение выше, поэтому для непрерывной работы требуется больший радиатор — разумный компромисс, поскольку в своей базовой комплектации он не предназначен для непрерывной работы.

Класс G против класса D

На первый взгляд может показаться, что усилители класса G не могут конкурировать с усилителями класса D (усилителями с широтно-импульсной модуляцией). КПД последних обычно составляет около 85-90%, и даже лучшие усилители класса G не могут с этим сравниться. Однако усилители класса D значительно сложнее, и из-за высокочастотного переключения компоновка печатной платы имеет решающее значение. Кроме того, даже с лучшими доступными фильтрующими схемами будет присутствовать некоторый радиочастотный шум. Большинство усилителей класса D также имеют частотную характеристику, которая остается плоской только для одного сопротивления нагрузки. Поскольку динамики не являются резистивными, высокочастотная характеристика может быть непредсказуемой.

Из-за потенциальных проблем, связанных с радиочастотными помехами, многие пользователи могут избегать усилителей класса D. Несомненно, усилители класса D обеспечивают превосходное качество звука и очень мало нагреваются даже при высоких уровнях мощности, но это не означает, что они повсеместно признаны идеальными усилителями мощности там, где требуется высокая мощность и практически бесконечная надежность. Организаторам музыкальных туров также необходимо учитывать срок службы оборудования, и нередки случаи, когда усилители, которым уже 20 лет, находятся в ежедневной эксплуатации. Благодаря (в основном) обычным компонентам для монтажа в отверстия, минимальному или полному отсутствию компонентов для поверхностного монтажа и отсутствию высокоспециализированных микросхем, линейные усилители можно ремонтировать даже после 30 лет эксплуатации.

Усилители класса D почти все используют компоненты поверхностного монтажа (SMD), и для большинства конструкций для достижения удовлетворительных характеристик необходимы специализированные интегральные схемы. Когда эти компоненты устаревают, усилитель приходится выбрасывать — его больше нельзя отремонтировать, если выйдут из строя «редкие» компоненты. Могут существовать заменители, но они почти наверняка будут иметь другую распиновку и, возможно, другой тип корпуса SMD. Это становится серьезной проблемой для многих потребительских товаров — они все чаще становятся неремонтопригодными из-за использования SMD-компонентов и короткого срока службы многих специализированных интегральных схем.

В профессиональной продукции следует по возможности избегать деталей с коротким сроком службы, поскольку существует огромная разница между ожиданиями розничных потребителей, туроператоров и других пользователей профессионального аудиооборудования. Создание профессионального продукта с ожидаемым сроком службы менее 10 лет чревато проблемами. Это касается и возможности обслуживания оборудования, которое уже давно вышло бы из строя, когда обычный домашний потребитель предпочел бы приобрести последнюю модель.

Вариации

За прошедшие годы появилось множество альтернативных схем, возможно, самой известной из которых является «усилитель магнитного поля» Карвера [6]. В большинстве случаев это название было неверным, но в нем использовалась схема фазового среза на основе ТРИАКа перед силовым трансформатором, который был намного меньше, чем был бы в противном случае. По мере увеличения потребляемой мощности ТРИАК включался раньше, увеличивая доступное напряжение и ток. Схема на основе ТРИАКа представляла собой (в буквальном смысле) диммер для ламп на стероидах, поскольку базовая схема запуска на основе ТРИАКа использовала тот же принцип, что и бытовой диммер для ламп. Усилитель мощности использовал три шины питания: ±25 В, ±50 В и ±75 В.

Несомненно, усилитель был инновационным, выдавал огромную мощность и требовал минимального охлаждения для обычного использования в системах Hi-Fi. Однако непрерывная работа на полной мощности приводила к довольно быстрому перегреву и *задымлению* трансформатора . Усилитель никогда не был рассчитан на непрерывную работу на полной мощности, поэтому те, кто рассчитывал использовать его для мощных систем звукоусиления, быстро обнаружили его ограничения. Хотя это и не указано, усилитель Carver не увеличивал напряжение питания под нагрузкой, а регулировал его с помощью тиристора (TRIAC). Трансформатор почти наверняка был намотан с меньшим количеством витков, чем необходимо, поэтому при полностью включенном тиристоре ток намагничивания был бы намного больше обычного. Это происходило только при высоком выходном токе для компенсации переходных процессов или коротких, но громких музыкальных фрагментов.

Аналогичные подходы (по-видимому) применялись с использованием импульсных источников питания, но у меня нет дополнительной информации. Потенциальным ограничением является то, что переходный процесс может длиться недостаточно долго для повышения напряжения питания и может привести к искажению сигнала. Хотя существуют способы преодоления этой проблемы, насколько мне известно, они пока не используются.

Ссылки

1. Руководство по сборке мощного аудиоусилителя - Г. Рэнди Слоун
2. Драйверы класса G с нулевым избыточным энергопотреблением повышают энергоэффективность линейных карт ADSL — Джон Уилсон, Texas Instruments
3. Справочник по проектированию усилителей мощности звука, третье издание - Дуглас Селф, магистр искусств, магистр наук.
4. Веб- сайт QSC Audio Products
5. Техническое описание микросхемы MJL21194/4 от ON Semiconductor - ON Semiconductor
6. Руководство по обслуживанию Carver M-400



