

Single Ended против Push Pull: Бой века

Эдди Вон

Если вы знакомы с ламповыми усилителями, вы знаете, что существует два основных метода работы силового каскада: несимметричный (SE) и двухтактный (PP). Как и во многих других вещах в жизни, большинство людей очень самоуверенны, когда дело доходит до этих двух вариантов. Хотя любое противостояние между двумя лагерями с меньшей вероятностью закончится пролитием крови на полу, чем, скажем, винил против цифрового или ламповый против твердотельного (сторонники SE и PP, в конце концов, все еще «братья по трубкам»), их столкновения тем не менее, иногда может немного нагреваться. Реальная опасность здесь существует для той бедной, благонамеренной души, которая вступает в дискуссию и пытается играть роль миротворца, превознося достоинства каждого метода и провозглашая их равными, что является «обнаженным нервом» для обоих лагерей. Когда это произойдет, вы обычно увидите, как Лагерь SE и Лагерь PP встанут в унисон, избивают его, как наемного мула, и отбрасывают его безжизненное тело в сторону на корм стервятникам, а затем возобновляют обычные военные действия между собой.

Да, даже среди братии «Братства Огненной Бутылки» немало расколов. Бумага в масляных колпачках по сравнению с колпачками из пластиковой пленки. Винтажные резисторы из углеродного состава против модной металлической фольги и металлических пленок. Винтажные конструкции усилителей и современные конструкции усилителей. Смещение сетки по сравнению с катодным смещением. А еще есть различные, весьма непреклонные «отколовшиеся группы». Здесь вы найдете ветвь Братства «Торговцы властью». Power Mongers управляют своими гигантскими динамиками с помощью гигантских устройств, которые излучают инфракрасную тепловую сигнатуру, обнаруживаемую спутниками, и больше напоминают ядерные реакторы мощностью 800 мегаватт, чем ламповые усилители. Никаких «девчачьих» усилителей для них! К сожалению, многие властители попадают в тюрьму после того, как их наконец арестовали за рэкёт и контрабанду, которые они совершали, чтобы оплатить счета за электричество.

А еще есть Old Timers, эти спокойные, непринужденные ребята, которые любят наслаждаться музыкой под «теплые и нечеткие» звуки ушедшей Золотой Эры Hi-Fi. Old Timer – это не возраст, это образ мышления. Это довольно молодые Старожилы, которых обычно принимали в Братство под крыло старожилов постарше. Столь же преданные своему делу, как и другие отколовшиеся группы, «Олд Таймерс» предпочли бы иметь свой Eico HF-87, чем бесплатное пожизненное членство в клубе «Феррари месяца» и свидание с Норой Джонс. Жизнь хороша.

Наконец, есть самая хардкорная секта всего Братства, The Triode Junkies, которая далее делится на Transmitter Triode Vikings, DHT Dandys, Sweep Tube Ninjas и фракционно-ваттные Spudmeisters.

Transmitter Triode Vikings — это те агрессивные люди, которые хотят довести его до уровня звукового давления, вызывающего кровотечение из носа, но хотят сделать это с классом и изяществом. Их путь – железный кулак в бархатной перчатке. Они отличаются от сторонников власти тем, что испытывают ярую неприязнь к толчкам. Фактически, некоторые викинги Transmitter Triode начинали свою жизнь как Power Mongers, но были соблазнены соблазнительными звуками SET и стали триодными наркоманами. Однако они все еще сохраняют некоторые из своих старых методов Power Monger, и 2 Вт им просто не подойдут. Их стремление к совершенству одностороннего сваривания и достаточной мощности для дуговой сварки часто доводит их до грани безумия. Их совершенно не волнует тот факт, что между ними и напряжением 1500 вольт стоит не что иное, как тонкий керамический колпачок, а также их не беспокоит уровень излучаемого тепла, который заставил бы даже энергетиков потянуться за асбестовым костюмом.

DHT Dandys — это команда с утонченным вкусом, которая наслаждается прекрасными вещами в жизни. Они соединяют свои «Авангарды» со своими моноблоками стоимостью 35 000 долларов с помощью акустических кабелей, стоимость которых превышает годовой валовой внутренний продукт большинства развивающихся стран. Если вас пригласят к ним домой послушать их систему, вы обнаружите, что большинство из них очень гостеприимные и вежливые джентльмены со всеми чопорными и приличными манерами британского дворцового. Увы, время от времени встречаются денди из DHT, которые могут быть немного снобистскими по поводу того факта, что они потратили на свою стереосистему больше, чем вы на свой дом, но большинство из них — настоящие джентльмены, которые просто любят музыку. Однако ситуация может очень быстро ухудшиться, если вы упомянете, что ваш любимый усилитель не оснащен лампой DHT, из-за чего вас будут сопровождать из помещения очень устрашающего вида телохранители с большими выпуклостями под торсами своих костюмов. Поэтому, пожалуйста, держите свое мнение при себе, поспешите похвалить их систему, и даже если вам не нравятся икра и трюфели, которые они вам предлагают, все равно притворитесь, что они вам нравятся.

Sweep Tube Ninjas — «триодные наркоманы мыслящих людей». Хитрые и хитрые, с миллионом уловок в рукаве, они верны своему тезке. Будучи мыслителями и деятелями, они могут по памяти вспомнить распиновку каждой существующей телевизионной лампы вертикального усилителя и получить удовольствие от создания дешевого на вид усилителя менее чем за 250 долларов (включая лампы за 6 долларов), который поразит и смутит DHT Dandys. на нем висят их моноблоки за 35 000 долларов.

The Spudmeisters — относительно молодая группа, небольшая и уникальная, как и их усилители. Их общая связь — окучивание (один клубень) усилителя. Один резистор, одна лампа и один выходной трансформатор на пути прохождения сигнала на канал, больше ничего. Еще немного, и Spud-

Мейстер упадет на пол в конвульсиях с заткнутыми ушами при мысли о том, чтобы поставить что-нибудь лишнее на путь прохождения сигнала, чтобы испортить сигнал! Соединительные конденсаторы — это настоящее кошунство по отношению к Spudmeister. Хотя у них есть только один скудный ватт, они, похоже, не возражают. Все дело в качестве, а не количестве.

Различные люди в рядах Триодных Наркоманов принадлежат к темной, жестокой и призрачной подсекте, Триодным Зомби, которые являются бездумно преданными Темными Повелителями Трубы Трех Элементов. Люди, которые слушают пентоды или ультралинейные усилители, им не друзья, и им не рады в их доме. Достаточно сказано.

Если серьезно, то все эти секты делятся на две большие категории, независимо от того, являетесь ли вы Старожилом или Спадмайстером. Эти две категории — односторонние и двухтактные. О том, как работает каждый из них, написано много, но об их свойствах очень мало. *прямое сравнение*. Итак, в этой статье я попытаюсь выявить достоинства и недостатки как одностороннего, так и двухтактного режима, расположить их рядом и попытаться избежать раздражения как в режиме Camp Push Pull, так и в режиме Camp Single Ended. по пути. Наслаждаться. :^)

Как работает SE

Односторонний означает именно это. С точки зрения непрофессионала, всю работу выполняет одна силовая лампа. На самом деле, усилители SE могут иметь более одной силовой лампы на канал (параллельные несимметричные, или «PSE»), но каждая из параллельных силовых ламп функционирует одинаково и обрабатывает всю синусоидальную форму музыкального сигнала переменного тока вместе в унисон. Другими словами, они вместе функционируют как одна трубка. Поскольку выходной каскад SE должен обрабатывать всю форму сигнала, он работает в рабочем классе класса А. Это означает, что он смещен так, что проводит анодный ток на протяжении всех 360° цикла сигнала переменного тока и постоянно поддерживает лампу в строго линейной области ее работы.

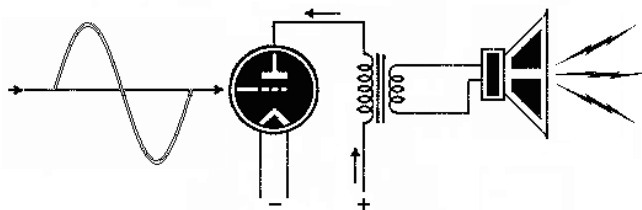


Рисунок 1 Несимметричный выходной каскад

На рис. 1 выше показан типичный несимметричный выходной каскад. На этой принципиальной диаграмме 1940-х годов изображен триод с прямым нагревом, его выходной трансформатор и громкоговори́тель. Вы будете

обратить внимание, что одно выходное устройство обрабатывает весь сигнал. В качестве примечания: некоторые люди были шокированы (без каламбура), узнав, что музыкальный сигнал в их системе представляет собой не что иное, как напряжение переменного тока, точно так же, как напряжение сети переменного тока в вашем доме! В зависимости от того, где вы живете, ваше настенное напряжение переменного тока имеет частоту 50 или 60 Гц, то есть один музыкальный тон. Единственная разница между ним и музыкальным сигналом состоит в том, что музыкальный сигнал, конечно, состоит из множества одновременных частот.

Вернёмся к нашему выходному каскаду SE. Причина, по которой он должен быть так сильно смещен, заключается в том, что отрицательный полупериод музыкального сигнала переменного тока оказывает на саму лампу. Любая ламповая ступень должна иметь рабочую точку, или «смещение», установленное путем установки на управляющей сетке некоторого отрицательного значения напряжения по сравнению с напряжением на катоде. Это устанавливает точку холостого хода трубки, иначе она широко раскроется и быстро сгорит. Отрицательный полупериод сигнала переменного тока увеличивает существующее отрицательное напряжение смещения, что уменьшает ток, как если бы вы увеличили отрицательное напряжение смещения. Вы можете думать об этом как о волнах в воде. У каждой волны есть гребень и впадина. Мы можем сравнить гребень с нашим положительным полупериодом переменного тока, а впадину — с отрицательным полупериодом переменного тока. Впадина — это депрессия, и когда она добавляется к другой депрессии, в сумме получается еще более глубокая депрессия! В режиме работы класса А трубка оказывается достаточно горячей, чтобы не прекращать проводить ток на пике отрицательного полупериода. Если бы это было так, он не смог бы усилить эту часть сигнала. Он не только должен быть достаточно горячим, чтобы просто проводить ток в пике отрицательного полупериода, но и еще должен проводить ток *достаточно* ток в этой точке, чтобы не допустить попадания трубки в высокочастотную (высокие искажения) область вблизи границы ее проводимости (нулевой ток пластины). Это очень неэффективно, а более низкие искажения и приятный звук класса А достигаются за счет низкой мощности, сильного нагрева и более быстрого износа ламп.

Как работает ПП

В двухтактном режиме две трубки работают вместе, как и в PSE, но они делают это *альтернативный* циклов входного сигнала вместо *такой же* цикл. Каждая трубка двухтактной пары несет, так сказать, половину работы, вместо SE, где все без исключения силовые лампы несут нагрузку. *всеработа*. Для выполнения двухтактной операции на трубки двухтактной пары должны подаваться сигналы, находящиеся в противоположной фазе друг другу, но в остальном идентичные во всех отношениях. Этим занимается «фазоинвертор». Существует несколько различных геометрических форм трубчатых фазоинверторов, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Каждый из них работает путем разделения сигнала на копию оригинала, синфазную, и копию оригинала, сдвинутую по фазе на 180°. Два выхода фазоинвертора одновременно подаются на соответствующие силовые лампы. Этот

означает, что выходные сигналы ламп, конечно, не совпадают по фазе друг с другом. Они суммируются в ОРТ как сигнал, который приводит в действие динамики. Рисунок 2 ниже иллюстрирует это.

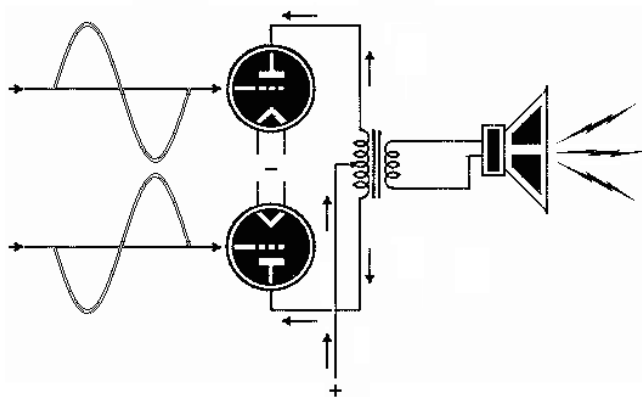


Рис.2 Двухтактный выходной каскад

Обратите внимание, что входной сигнал, идущий на каждую лампу двухтактной пары, является дубликатом другого, сдвинутым по фазе всего на 180°, или «инвертированной фазой». Вы можете видеть, как когда одна трубка находится на пике проводимости во время пика положительного полупериода, его брат через проход расслабляется и отдыхает, поскольку его одновременно кормят в пик отрицательного полупериода. Затем цикл переключается. Не вдаваясь в длинные технические объяснения того, что именно происходит в выходном каскаде PP, достаточно сказать, что он делает именно это: одна трубка толкает, а другая тянет, и вперед и назад. Это можно сравнить с тем, как работает SE, с помощью очень простой аналогии.

Представьте себе ПП как двух мужчин в маленькой лодке, по одному гребцу с каждой стороны. Один гребет, а другой достает весло из воды и перемещает его вперед, чтобы снова грести. Это движение повторяется взад и вперед в чередующихся циклах. Хотя один из них гребет по правому борту, а другой — по левому, сумма их гребных действий представляет собой прямолинейное движение. Каждый из них расходует лишь половину энергии, необходимой для движения лодки с заданной скоростью. Вы можете сравнить SE только с одним человеком в одной лодке. Он один не только должен собрать ту же энергию гребли, что и двое мужчин вместе, но он должен использовать много своей энергии для поворота туловища из стороны в сторону, когда он гребет с каждой стороны лодки, чтобы заставить ее идти прямо. Потраченная впустую энергия, которая не приводит к перемещению лодки. Это расточительно и неэффективно по сравнению с тем, как двое мужчин гребут вместе, и один человек просто не способен расходовать тот же уровень энергии, на который способны двое мужчин вместе взятые.

Эффективность и рабочий класс

Здесь мы видим основную причину использования ПП – высокую эффективность по сравнению с SE. Фактически, если топология PP работает в той же рабочей точке класса А с высоким током, что и усилитель SE («высокий» или «жесткий» режим работы класса А), он будет производить ту же мощность, что и параллельный несимметричный усилитель. При использовании топологии PP мощность по сравнению с PSE не увеличивается, если она работает в высоком классе А, поскольку высокий класс А очень неэффективен (обычно около 10%). Чтобы максимально использовать потенциал мощности эффекта PP, Hi-Fi устройства обычно работают в классе А при более низком токе и более высоком напряжении, чем SE, где лампы *едва* проводят все 360° цикла входного переменного тока. Необходимость проводить значительный анодный ток на все 360° сводится к нулю эффектом PP, поскольку каждая трубка пары PP в любом случае должна обрабатывать только половину формы сигнала (180°), а не всю форму сигнала на 360°, как в режиме SE. Этот режим «низкого класса А» несколько более эффективен и тратит меньше энергии в виде тепла, сохраняя при этом низкий уровень искажений. На рисунке 3 показаны входные сигналы противоположной фазы, а также то, что лампы проводят ток на протяжении всех 360° сигналов.

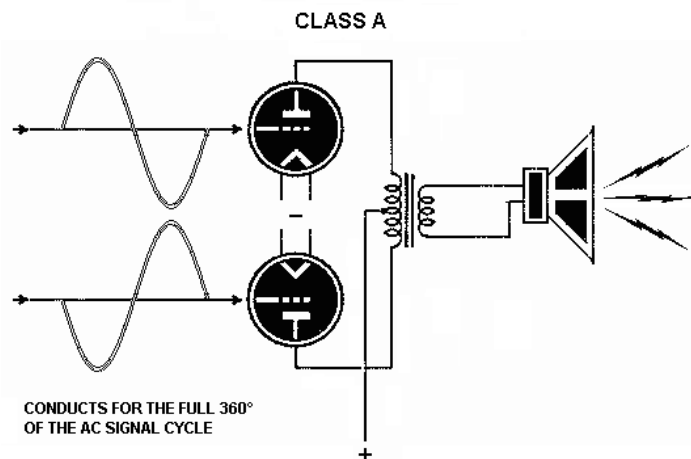


Рис. 3 Проводимость силовой трубки типичного полипропилена класса А выходной каскад

Но если требуется еще большая мощность, PP работает в рабочем классе класса АВ для дальнейшего повышения эффективности. Класс АВ смещает лампы так, что они проводят ток менее 360° цикла музыкального сигнала переменного тока, но все же больше, чем необходимые 180°, чтобы не допустить их попадания в область очень высоких искажений вблизи точки отсечки. Поскольку в режиме холостого хода обычно рассеивается не более 70% от максимального значения и проводит полный ток только при громких пиках при большой громкости, срок службы лампы обычно больше, чем при работе в классе А. На рисунке 4 показаны входные сигналы каждой мощной лампы двухтактного усилителя в режиме работы класса АВ.

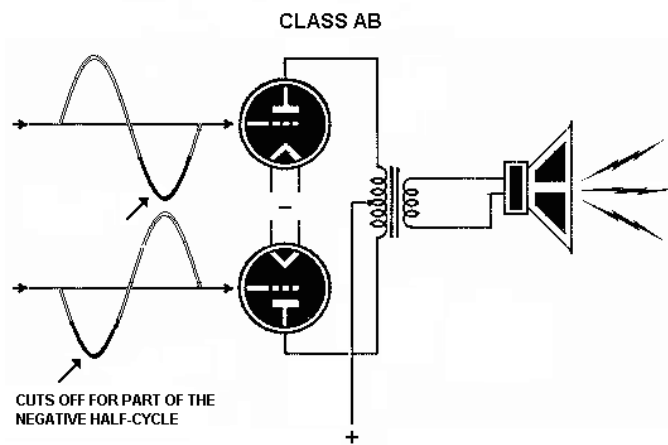


Рис. 4. Проводимость силовой трубки типичного ПП класса AB
выходной каскад

Обратите внимание, что в двухтактном усилителе класса A на рисунке 3 обе лампы проводят ток на протяжении всего 360° цикла синусоидальной волны переменного тока. В операционном усилителе класса AB на рис. 4 лампы смещены «холоднее» и проводят ток менее 360°, но все же существенно больше 180°. Заштрихованная черным область синусоидальной волны входного сигнала показывает место обрыва ламп на пике отрицательного полупериода. Поскольку лампы в классе AB тратят меньше потенциальной энергии в виде тепла, чем в классе A, выходная мощность существенно увеличивается. Однако из-за более низкого тока пластины они работают в менее линейной области, когда положительный полупериод приближается к нулевой (центральной) линии, чем в классе A. Это увеличивает искажения и дает другой звук. Это загадка рабочего класса. Когда вы пытаетесь увеличить мощность, вы получаете увеличенные искажения. Когда вы пытаетесь снизить искажения, вы теряете мощность.

Существуют еще другие рабочие классы, но их нельзя использовать для звука из-за высоких искажений. Работа класса B осуществляется ровно в течение половины периода сигнала переменного тока (180°) и имеет чрезвычайно высокие искажения вблизи центральной нулевой линии синусоидальной волны переменного тока. Класс C фактически проводит ток менее 180°. Классы B и C используются только в радиочастотных приложениях, где высокие искажения не имеют значения. Класс AB назван так потому, что по функциям он занимает промежуточное положение между классом A и классом B и ведет себя примерно так же (но не идентично) классу A при низкой выходной мощности. Распространенный городской миф заключается в том, что «усилители класса AB относятся к классу A при низкой мощности». Это настолько далеко от истины, насколько это возможно. Усилитель класса AB работает в том же классе на холостом ходу, как и на полной мощности, и наоборот. Как уже говорилось, они ведут себя таким образом *похожий* класс A при низкой мощности, но они по-прежнему работают в рабочей точке класса AB.

Методы смещения, используемые в SE и PP

Мы упомянули смещение в нашем базовом руководстве по теории усилителей SE. Смещение — это просто создание управляющей сетки лампы.

(куда подается сигнал) более отрицательным, чем катод (где испускаются электроны), чтобы установить рабочую точку трубки. Без него ток через пластину не был бы ограничен, а внутренние детали трубки расплавились бы в считанные секунды, если бы напряжение питания цепи вообще было очень высоким. Само собой разумеется, это не самое радостное событие. Рисунок 5 иллюстрирует два основных метода смещения, используемых в ламповых усилителях: сеточное смещение и катодное смещение.

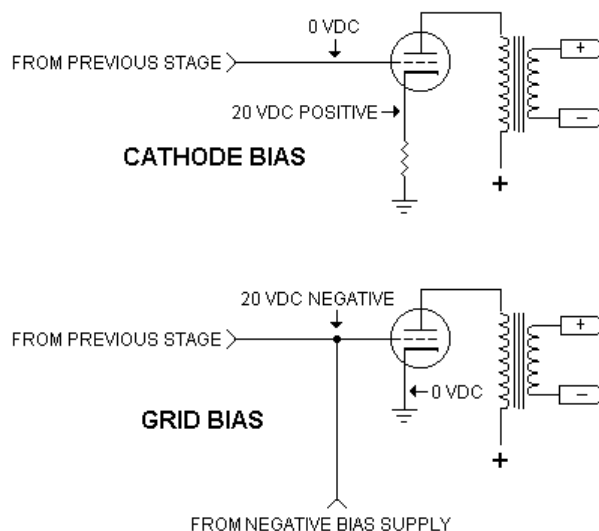


Рис 5 Методы смещения каскада лампового усилителя

СМЕЩЕНИЕ СЕТКИ—Смещение сетки (также называемое фиксированным или регулируемым смещением) достигается путем подачи желаемого отрицательного напряжения на управляющую сетку от специального источника питания смещения. Катод испускает электроны, имеющие отрицательный заряд. Если сетка «более отрицательная», чем катод, она будет отталкивать некоторые электроны (как отталкиваются заряды, помните школьный урок естествознания?), не давая им покинуть катод. Чем выше отрицательное напряжение управляющей сетки, тем меньше электронов будет пропущено к положительно заряженной пластине, независимо от сильного электростатического притяжения пластины к высоким напряжением. На рисунке 4 мы подали отрицательное напряжение 20 В на управляющую сетку, а катод заземлен. Катод имеет потенциал земли (ноль вольт), а напряжение сетки на 20 вольт более отрицательное, чем ноль вольт катода, поэтому мы имеем смещение 20 вольт.

Смещение сетки легко регулируется путем изменения приложенного отрицательного напряжения, поэтому его часто называют «регулируемым смещением». Так как же его можно регулировать и фиксировать одновременно? Это звучит как противоречие, но на самом деле это не так. Его также называют фиксированным смещением, поскольку оно привязано к определенному значению напряжения и не меняется независимо от работы лампы или чего-либо еще в усилителе. Это не значит, что его нельзя варьировать при желании.

КАТОДНОЕ СМЕЩЕНИЕ–Катодное смещение (также называемое «самосмещением») — это метод, сильно отличающийся от сеточного смещения, но он обеспечивает то же самое. Ну, типа... Смещение сетки делает управляющую сетку более отрицательной, чем катод. Смещение катода делает катод более положительным, чем управляющая сетка, что то же самое. Сетка все же более отрицательна, чем катод, просто мы этого добились другим способом. Помните, что в ламповой цепи напряжения относятся к *друг друга* не заземлять. На рисунке 5 вы можете видеть, что катод имеет положительное напряжение 20 В по отношению к сетке (которая имеет нулевое напряжение), поэтому в итоге мы получаем смещение 20 В.

Катодное смещение также отличается тем, что для подачи положительного напряжения на катод не используется отдельный источник питания, подобно тому, как сеточное смещение использует источник питания для подачи отрицательного напряжения. Катод соединен с землей резистором соответствующего номинала, через который протекает ток. Согласно закону Ома, положительное напряжение смещения будет создано, когда ток лампы проходит через катодный резистор. Вот и все, наше положительное напряжение смещения создается из воздуха, как по волшебству, а? Более того, положительное напряжение смещения будет регулироваться само, в отличие от смещения сетки, которое требует регулировки. Если вы вставите новую лампу, которая потребляет немного больший ток, чем нормальный, увеличение тока, проходящего через резистор, создаст более высокое напряжение смещения, немного уменьшая потребление тока лампой и заставляя ее «остыть». Аналогично, лампа с меньшим потреблением тока будет создавать меньшее напряжение смещения и позволит затвору немного больше открыться в качестве компенсации.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ СМЕЩЕНИЯ–Мы видим, что свойство саморегулирования катодного смещения имеет тенденцию предотвращать или, по крайней мере, смягчать «убегание смещения», состояние, при котором трубка теряет смещение, проводит широко открытый ток и плавится. Чем больший ток пытается потреблять лампа, тем выше создаваемое напряжение смещения, чтобы остановить ее. С другой стороны, смещение сетки может дать сбой и привести к немыслимому. Сбой смещения сетки вызван неисправностью источника питания отрицательного смещения или связанных с ним компонентов, которые подают напряжение смещения на трубку, или потерей надлежащего контакта между гнездом трубки и штырем управляющей сетки трубки из-за коррозии, ослабления контактов и т. д. .

Вы, вероятно, спрашиваете себя: «Зачем кому-то использовать смещение сети, если оно требует отдельного источника питания и может выйти из строя, что приведет к катастрофическому огненному термоядерному холокосту?» Ответ пятикратный.

(1) Смещение сети дает больше мощности. Все ваши двухтактные усилители большей мощности используют сеточное смещение (см. ниже), хотя его также можно использовать и для работы класса А, и часто это так и есть. Катодное смещение менее эффективно и приводит к потере некоторой мощности из-за рассеивания тепла в катодном резисторе.

(2) При смещении сетки фактическое напряжение на пластине трубки представляет собой измеренное напряжение между пластиной и землей.

При катодном смещении это разница напряжений между пластиной и *катод*. Поскольку катодное смещение прикладывает к катоду положительное напряжение, фактическое напряжение на пластине представляет собой измеренное напряжение положительной пластины. *минус*положительное напряжение катодного смещения. Это означает, что во многих случаях смещение сетки позволяет использовать основной источник питания с более низким напряжением, чем то, которое необходимо при катодном смещении.

(3) Смещение сетки *должно* использоваться для работы класса АВ. В отличие от режима класса А, который потребляет одинаковый ток независимо от уровня сигнала, режим класса АВ пропорционально потребляет гораздо больший ток по мере увеличения уровня сигнала. Саморегулирующееся свойство катодного смещения борется с этим увеличением тока. Смещение сетки работает совершенно независимо от всего остального в усилителе. По этой причине оно называется «фиксированным» напряжением, помните? В любом случае это оказывается к лучшему, поскольку вся причина использования класса АВ заключается в более высокой мощности, и, как мы только что прочитали, смещение сетки в любом случае дает больше мощности, чем катодное смещение.

(4) Сеточное смещение вызывает меньшие искажения, чем катодное смещение.

(5) Смещение сетки позволяет легко экспериментировать с различными токами пластин. Вы можете увеличить или уменьшить ток пластины и найти золотую середину, которая звучит лучше всего для вас, обычно с легкостью поворачивая подстроечный потенциометр.

Что ж, теперь ваш вопрос, вероятно, был развернут в противоположном направлении, и вы спрашиваете себя: «С какой стати кому-то нужно использовать катодное смещение, если оно тратит энергию, создает больше тепла, не имеет возможности регулировки, имеет более высокие искажения и иногда требуется источник питания с более высоким напряжением? Какая разница, если он самонастраивающийся? Это слишком большой компромисс, чтобы не получить ничего, кроме саморегулировки». Причина проста. Звук. Звуки катодного смещения *очень* отличаются от смещения сетки. Поклонники сеточного смещения утверждают, что их метод звучит чисто, нейтрально, неокрашено и твердо, в то время как катодное смещение звучит мягко, мягко и безнадежно окрашено. Поклонники катодного смещения утверждают, что их метод звучит приятно, тепло, музыкально и естественно, в то время как сеточное смещение звучит резко, стерильно и искусственно.

Как мы видели, смещение сетки всегда используется в PP-усилителях класса АВ (по необходимости), а также в большом проценте PP-усилителей класса А. Он даже используется в некоторых усилителях SE, но лишь в некоторых. Большинство усилителей SE используют катодное смещение, которое является важным компонентом звука SET. Большинство людей, предпочитающих пентодный звук PP, также предпочитают смещение сетки, поскольку оно ужесточает и очищает звук. Как бы то ни было, автор предпочитает катодное смещение в своих Hi-Fi устройствах (как SE, так и PP) и сеточное смещение в своих усилителях Geetar. :^)

Отмена этапа PP OPT

Помимо более высокой выходной мощности, PP имеет еще одно огромное преимущество перед SE, а именно фазовое подавление некоторых артефактов. Вот аналогия: если вы бросите два камня в пруд точно в нужное время и на расстоянии друг от друга так, чтобы гребень одного волнового фронта точно встретился с впадиной другого, они нейтрализовали бы друг друга. Общий результат гребня и впадины вместе равен нулю. Другими словами, две волны встретились на 180° со сдвигом по фазе друг друга и нейтрализовали друг друга. Из-за противоположных направлений протекания тока в ПП OPT происходит фазовая компенсация любых «инородных тел», таких как гул и шум источника питания. Частота шума от источника питания поступает в центральные отводы первичной обмотки PP OPT, течет в противоположных направлениях к каждой трубке двухтактной пары и гасится противофазой. Рисунок 2 демонстрирует поток тока от центрального крана наружу. В усилителе SE все это проходит напрямую и передается на динамик. Таким образом, усилителям PP требуется гораздо меньшая фильтрация источника питания для предотвращения шума, чем их аналогам SE. Еще одним преимуществом PP является то, что искажения второго порядка, возникающие на выходном каскаде PP, компенсируются в OPT, что подводит нас к следующей теме:

Серия гармонических искажений SE и PP

Усилители SE и PP, естественно, производят разные серии гармонических искажений. Различные серии искажений звучат для уха совершенно по-разному. В общем, чем выше приказ, тем оскорбительнее для слуха, и соответственно в меньших количествах с прогрессивно возрастающими приказами. Кроме того, гармоники нечетного порядка становятся более оскорбительными до определенного момента в сериале, где все это звучит ужасно ужасно в очень небольших количествах, независимо от того, нечетного или четного порядка. Например, целых 3% второй гармоники большинство людей не замечает, а 0,3% (в десять раз меньше) пятого порядка очень заметно для большинства людей. Второй порядок проявляется ровно на одну октаву выше основного тона и, следовательно, не является диссонансным. В небольших количествах он воспринимается большинством ушей как придающий звуку «сладость» или «жидкость». Третий порядок — это музыкальная кварта выше основного тона, которая также не очень гармонична, но и не слишком диссонансна, если удерживать ее на достаточно низких уровнях. Четвертый порядок на две октавы выше основного и не слишком диссонансен, но размывает фокус. Пятый порядок и выше звучит очень диссонансно и противно, и точка.

Основным продуктом искажений усилителя SET (несимметричный триод) является вторая гармоника, которая относительно безвредна для уха. Несимметричные каскады драйвера усилителя PP производят преимущественно искажения второго порядка, но сам выходной каскад PP производит в основном искажения высокого/нечетного порядка. Помните, что вторая гармоника, созданная на выходном каскаде, подавляется, но любые искажения (будь то

вторая гармоника или нет), произведенная на более ранних стадиях, передается дальше.

Причина, по которой выходные каскады PP и SE производят разные серии искажений, заключается в том, что они по-разному клиппируют. Это «ограничение» происходит, когда лампа достигает максимально достижимой выходной мощности в рабочей точке, выбранной разработчиком схемы. Вершины синусоидальной формы не могут подниматься выше (более высокая амплитуда), поскольку трубка находится на максимуме и не может усиливаться дальше. Тем не менее, на экране осциллографа амплитуда сигнала пытается увеличиться в ответ на увеличение входного сигнала. Поскольку это невозможно, в верхней части синусоидального сигнала в точке «максимального максимума» появляется плоская линия, создавая впечатление, что они были обрезаны ножницами, отсюда и название «обрезка». Усилитель PP зажимает симметрично, что означает, что противоположные стороны синусоидального зажима одинаково и одновременно. Это приводит к образованию продуктов искажений высокого/нечетного порядка, которые более неприятны для уха, чем второго порядка. Усилитель SE обычно ограничивает асимметрично (больше на одной стороне синусоиды), что создает преимущественно второй порядок искажений, поскольку это основной артефакт гармонических искажений. Эти разные серии искажений являются одной из основных причин того, почему PP и SE звучат так сильно по-разному.

Демпфирующие коэффициенты SE и PP

Коэффициент демпфирования является функцией выходного сопротивления усилителя и того, как он влияет на управление громкоговорителем, особенно на низких частотах. Он выражается как коэффициент, рассчитываемый путем деления импеданса нагрузки на выходное сопротивление усилителя (Z). Например, если выходное сопротивление усилителя Z равно 2 Ом, а нагрузка равна 8 Ом, это дает DF, равный 4. Этот метод можно использовать для оценки DF, но он не отличается высокой точностью. В реальной жизни кривая импеданса динамика не является плоской, поэтому фактическая DF более или менее находится на определенных частотах. Другими словами, DF отслеживает кривую импеданса динамика. При расчете DF необходимо не только определить выходную мощность Z выходного каскада усилителя, но также учитывать сопротивления вторичной обмотки выходного трансформатора и кабелей динамиков.

Так что же делает DF и как он применяется в моей системе? В общем, чем выше DF, тем сильнее «хватка» усилителя на низкочастотном динамике. Низкая DF создает мягкий, мягкий бас с медленным, рыхлым и гулким затуханием нот. Высокая DF обеспечивает лучший контроль над низкочастотным динамиком и дает более плотные, сухие и быстрые басы без чрезмерного звона и небрежного затухания нот. Типичный усилитель SE, использующий триоды с прямым нагревом, может иметь DF в лучшем случае 4 или 5. Усилитель SE, использующий триодные тетроды или пентоды, будет иметь еще меньшую DF, в зависимости от типа используемой лампы. Некоторые имеют DF ниже 2. Винтажный PP-усилитель 60-х годов может иметь DF примерно 10 или 12.

Типичный твердотельный усилитель может иметь DF от примерно 100 до более 1000.

МУ, ПРОВОДИМОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИН

– Так какое отношение электрические характеристики лампы имеют к DF? Мы доберемся до этого. В разделе «КАК РАБОТАЕТ SE» мы видели, как ток и напряжение на пластине лампы колеблются вверх и вниз, вперед и назад в возвратно-поступательном режиме в выходном каскаде. Сами лампы не усиливают, они манипулируют источником питания с помощью этого колебания напряжения/тока, чтобы создать копию своего входного сигнала с более высокой амплитудой на своей нагрузке. Лучшим термином для усилителя будет «модулированный источник питания», а для каскада усилителя — «модулятор источника питания». Если на пластине трубки нет нагрузки, усиления не будет. Опять же, это *нет* сама трубка, которая усиливает! Вернемся к перепаду напряжения/тока, о котором я только что упомянул. Качание напряжения/тока пластины происходит упорядоченным образом в ответ на входной сигнал переменного тока. Как мы читали в разделе «КАК РАБОТАЕТ SE», в отрицательном полупериоде входного сигнала переменного тока напряжение на анодах колеблется высоко, а ток на анодах — низком. В положительном полупериоде напряжение на пластине колеблется низко, а ток на пластине высокий. Ширина этого колебания напряжения определяет степень усиления, а симметрия колебания определяет порядок присутствующих гармонических искажений. Это также создает разницу в DF усилителей SE и PP, которую мы вскоре увидим.

Давайте посмотрим, как это колебание напряжения/тока пластины в ответ на напряжение сигнала управляющей сети работает для определения коэффициента затухания. Для этого нам сначала нужно рассмотреть три основные электрические характеристики, которые делают данный тип лампы таким, какой он есть, а именно: *му*, *крутизна* и *сопротивление пластины*. Они взаимосвязаны и неразрывно связаны. Если известны два из них, то неизвестный третий можно легко вычислить.

Му представляет собой отношение изменения напряжения на пластине к изменению напряжения управляющей сетки в противоположном направлении и обычно называется коэффициентом усиления лампы. Это символ μ .

крутизна (представлено его символом G_m) определяется как отношение изменения тока пластины к изменению напряжения управляющей сетки. Термин «крутизна» происходит от «переносной проводимости» и измеряется в сименсах (С), где один сименс равен одному амперу изменения тока пластины на один вольт изменения напряжения управляющей сетки. Его также обычно выражают как $m\mu$, что эквивалентно микросименсу (1/1000 сименса). $m\mu$ — это ом, написанный наоборот, и это очень подходящий термин, поскольку проводимость и сопротивление являются противоположностями. *Аусилитель крутизны* — усилитель, в котором изменение входного напряжения вызывает линейное изменение выходного тока. Ламповые усилители попадают в эту категорию. Другой основной тип усилителя известен как *транзитный*

педансный усилитель, где изменение входного тока вызывает линейное изменение выходного напряжения, что прямо противоположно тому, как это происходит в крутильном усилителе.

Сопротивление пластины определяется как изменение напряжения пластины, деленное на изменение тока пластины, которое оно производит в результате. Сопротивление пластины выражается в Омах, как и любое другое сопротивление. Сопротивление пластины обозначается *рупи*.

ТОК ПЛАСТИНЫ И КОЭФФИЦИЕНТ ДЕМПФИРОВАНИЯ—Мы видим, как эти три параметра связаны и взаимодействуют. Свойство их взаимосвязи, которое нас здесь больше всего интересует, заключается в том, как ток пластины влияет на сопротивление пластины. Сопротивление пластины падает с увеличением тока пластины, при условии, что другие переменные остаются постоянными. Чтобы увидеть, как это связано с коэффициентом демпфирования, давайте построим теоретический усилитель SE и теоретический усилитель PP, чтобы наблюдать, как унаследованный от каждой топологии способ работы влияет на ее выходное сопротивление. Давайте используем одни и те же триодные лампы в обоих усилителях и запустим оба усилителя в жестком режиме класса А при одинаковом напряжении и токе холостого хода. Оба усилителя используют сеточное смещение, и оба их OPT имеют одинаковое сопротивление вторичной обмотки.

Давайте сначала включим наш усилитель SE и подадим на него сигнал. Помните, мы только что прочитали, как сопротивление пластины падает с увеличением тока пластины, при условии, что другие переменные остаются постоянными. В положительном полупериоде входного переменного тока анодный ток сильно колеблется, и, следовательно, сопротивление пластины ниже в положительном полупериоде, чем в отрицательном полупериоде, когда анодный ток падает. Таким образом, мы видим, что сопротивление пластины увеличивается и уменьшается синхронно с изменением полярности входного сигнала переменного тока. Чем выше сопротивление пластины, тем выше выходной сигнал Z и тем ниже DF. Здесь мы начинаем понимать основные причины того, почему большинство усилителей PP имеют более четкие басы, чем усилители SE. Триггеры DF перемещаются вверх и вниз с каждым циклом входного переменного тока на 360°. Это имеет тенденцию придавать усилителям SE странные характеристики басов. DF отличается от движения диффузора динамика «наружу» от движения «внутри»!

Давайте попробуем тот же эксперимент на нашем усилителе PP. Каждая трубка пары PP воспринимает сигнал, противоположный по фазе другой. Другими словами, когда один сигнал находится на пике положительного полупериода, другой — на пике отрицательного полупериода. В результате ток анодной пластины одной силовой лампы возрастает, а ток анодной другой падает, так что в среднем они всегда дают один и тот же средний суммарный ток анодной лампы. Чтобы лучше это проиллюстрировать, мы будем использовать целые числа и скажем, что в режиме ожидания обе лампы находятся на нуле. На пиках цикла сигнала одна трубка будет иметь значение, скажем, +10, а другая - -10, что в среднем равно нулю. В середине цикла одна трубка будет иметь значение +5, а другая - -5, что в среднем все равно равно нулю. В результате, в то время как R_p одной лампы падает по мере увеличения тока, R_p другой увеличивается по мере падения тока.

Их R_p усредняется до медианного значения, и, следовательно, выпуск Z также усредняется до медианного значения. Это означает (как вы уже догадались!), что DF также является постоянной, в отличие от нашего усилителя SE, где DF менялась с каждым полупериодом входного сигнала. Именно это дает PP преимущество в области басов перед SE, при этом все остальное остается прежним.

Однако мы использовали триоды в нашем тестовом усилителе PP и тестировали их в жестком классе A. Триоды (особенно триоды с низким мю-триодом) имеют гораздо меньшее R_p , чем тетроды и пентоды, и поэтому, естественно, дают более высокую DF . Но в большинстве усилителей PP вместо триодов используются тетроды или пентоды, что означает очень высокую выходную мощность Z , очень плохую DF и почти полное отсутствие басов. Почему же тогда большинство усилителей PP имеют как минимум в два раза большую DF , чем усилители SE? В следующем разделе все это объясняется.

Негативный отзыв

Чтобы еще больше расширить звуковой разрыв между SE и PP, учтите, что большинство усилителей PP используют отрицательную обратную связь (NFB), а *очень* настоящее время лишь немногие усилители SE используют NFB. «Хорошо, это здорово», — скажете вы, — «а теперь, что является NFB?»

Отрицательная обратная связь — это образец сигнала, взятый с выхода каскада усилителя и повторно подаваемый в переднюю часть того же каскада (локальный NFB) или в более ранний каскад (глобальный NFB), где он сдвинут по фазе на 180° с сигналом, присутствующим в точке повторного впрыска. Другими словами, «обратная связь». Довольно хитро, да? Схема, содержащаяся между двумя точками, называется «петлей обратной связи». Обычно глобальная петля обратной связи в усилителе Hi-Fi PP проходит от разъема динамика обратно к входному каскаду усилителя, охватывая тем самым всю схему усилителя. На рисунке 6 показана глобальная петля обратной связи типичной схемы двухтактного усилителя ярко-красным цветом.

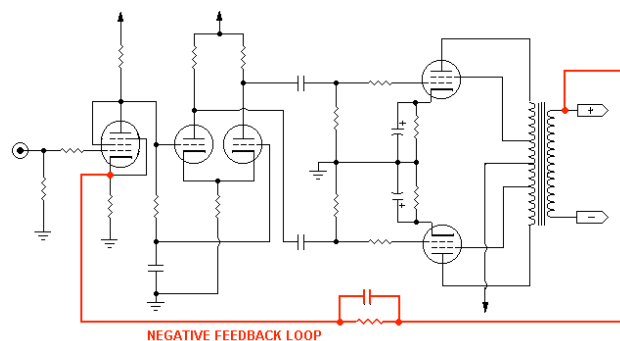


Рис. 6 Глобальная петля отрицательной обратной связи

Ваш следующий вопрос, вероятно, будет: «Хорошо, теперь я знаю, что это такое. Что оно делает?» Хороший вопрос. Ну, это делает много хорошего.

(1) NFB уменьшает искажения и шум на каскадах, содержащихся внутри контура обратной связи. Он подавляет искажения таким же образом, как ранее наш PP OPT подавлял гул источника питания и гармоники второго порядка.

(2) NFB снижает выходное сопротивление. Это подтягивает и расширяет бас.

(3) NFB выравнивает и расширяет общую частотную характеристику.

Большинство людей в этот момент подумают: «Круто! Дайте отрицательный отзыв!» Не так быстро. NFB также делает некоторые плохие вещи.

(1) NFB убивает пространство и воздух между инструментами, партиями и голосами, делая музыку скучной и неинтересной.

(2) NFB снижает стабильность схемы усилителя.

(3) NFB снижает усиление.

Да ладно..... Ничто не идеально, включая NFB. *Особенно* NFB. Это сначала подводит нас к зарождению телефонной связи, когда линии телефонной связи на большие расстояния питались от ламповых усилителей. Из-за паразитных потерь на длинных трассах по пересеченной местности приходилось время от времени использовать усилители-ретрансляторы. Совокупные искажения некоторых из этих усилителей-ретрансляторов были ужасными, и в результате телефонную связь было трудно понять. NFB была изобретена в Bell Labs для уменьшения этих искажений, и она действительно работала очень хорошо. Без NFB первая междугородная телефонная связь между целыми странами и континентами была бы невозможна.

Перенесемся в золотую эру Hi-Fi, которая была периодом расцвета лампового звука еще в 1950-х и 60-х годах, еще до того, как появилось массовое твердотельное аудиооборудование. Как и в современном мире массовой потребительской аудиотехники, в «большом магазине» тогда спецификации на бумаге значили все. Самое низкое искажение при самой высокой мощности продавалось больше всего. Ко всему применялось множество NFB, часто даже в нескольких циклах обратной связи. Это было сделано потому, что NFB снижает искажения, а для неосведомленных масс наименьшее искажение означает лучший звук. «Меньше искажений *имеет* чтобы звучать лучше, не так ли? Я имею в виду, что искажение — это отклонение от исходного музыкального сигнала, поэтому наименьшее искажение означает самый «идеальный» звук, верно?» Нет, это определенно *не* делает. Мы видели это в последнем разделе «РЯДЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ PP И SE». Усилитель с наименьшими искажениями не обязательно будет иметь лучшее звучание. Это в большей степени зависит от *какой* присутствуют порядки гармонических искажений, в большей степени, чем *сколько*?. Человеческий мозг часто не согласен с бумажными требованиями относительно того, что звучит лучше всего! Поскольку NFB берется из самой задней части усилителя и подается обратно в переднюю часть, возникает частотный диапазон.

В зависимости от времени возникает возникающий эффект размазывания, к которому ухо чрезвычайно чувствительно. Это размывает фокус и гомогенизирует звук. Чрезмерное количество NFB, которое использовалось для получения наилучших характеристик искажений на бумаге, было причиной того, что многие из этих усилителей прошлого звучали безжизненно и неинтересно для прослушивания, и является основной причиной того, почему сегодняшняя электроника из крупных магазинов звучит так плохо. Оба могут иметь смехотворно низкие искажения, однако есть усилители с искажениями буквально в сто раз больше, которые звучат лучше. Человеческая психоакустика делает неточень часто подчиняйтесь законам науки!

Так почему же большинство усилителей PP используют NFB, а большинство усилителей SE — нет? Основные причины — искажения и выходное сопротивление. Силовые триоды и силовые тетроды/пентоды с триодной проводкой не очень широко использовались в золотую эпоху Hi-Fi, фактически почти никогда. Триоды производят сравнительно меньшую мощность, чем тетроды/пентоды, и помните, что спецификации на бумаге были всем, поэтому наибольшая мощность выиграла день (или, по крайней мере, продажу!) Практически 99,9% усилителей использовали тетроды мощности луча или пентоды мощности. Как мы видели в последнем разделе, оба типа ламп имеют очень высокое сопротивление пластины и, следовательно, высокий выходной импеданс. Ни один из них не является таким линейным, как триоды; оба типа имеют гораздо более высокие искажения. Усилитель с нулевой обратной связью, построенный с использованием этих типов, имеет высокие искажения, большая часть которых относится к типу высокого/нечетного порядка, плюс очень высокий выходной импеданс означает, что бас будет слабым и дряблым. Звучит ярко, резко и тонко, и буквально не слышится. Таким образом, NFB был неизбежным злом для усилителей, использующих эти лампы, как для снижения искажений, так и для достижения приемлемого коэффициента демпфирования.

Что еще хуже, многие из этих усилителей PP имели очень сложные многокаскадные пути прохождения сигнала, что улучшало их характеристики на бумаге. Это создало больше искажений, для исправления которых, конечно, потребовалось больше NFB! NFB снижает усиление, поэтому для возмещения потерянного усиления потребовались ступени драйвера с более высоким усилением. Более высокий коэффициент усиления также означает, что создается больше искажений, чем в сценарии с более низким коэффициентом усиления, а это означает (как вы уже догадались) для снижения искажений требуется больше NFB! Это похоже на собаку, гонящуюся за своим хвостом: порочный круг, которому нет конца, и из него никогда не выйдет ничего хорошего. Кроме того, огромная сложность таких усилителей также ухудшала звук из-за огромного объема компонентов, паяных соединений и перемычек, через которые должен был проходить сигнал. Ваша музыка прошла через огромную сеть компонентов, ухудшающих звучание, и звучала именно так.

Что еще печальнее, так это то, что большинство современных PP-усилителей, выпускаемых серийно, по-прежнему представляют собой не что иное, как переделанные копии тех же самых старинных схем! Факт в том, что многие (большинство?) сегодняшних компаний, производящих эти PP-усилители, все еще попали в эту колею «спецификации на бумаге» и, похоже, не могут из нее выбраться. У меня есть такая причудливая поговорка по этому поводу: «У испытательного оборудования нет ушей».

осциллограф его не будет слушать. Анализатор гармонических искажений не будет его слушать. Так кто? Люди! У нас есть уши и мозги, а не экраны и дисплеи. Как я уже говорил ранее, психоакустика обычно не подчиняется цифрам, записанным на листе бумаги.

Теперь, когда мы до смерти забили ПП-лошадь с высокой обратной связью, давайте вернемся к триодам и несимметричному режиму работы. Триоды звучат менее ярко, тонко и резко, если не использовать NFB, имеют более низкий выходной импеданс и меньшие искажения. Усилитель SE с одним высоколинейным драйверным каскадом и силовой триодной лампой с низким сопротивлением пластины обычно может обойтись без NFB, что означает, что средний усилитель SET обычно более открытый, воздушный и чистый по звучанию, чем идентичный в остальном SEP (несимметричный). пентодный) усилитель, использующий NFB для устранения проблем высоких искажений и выходного импеданса.

В итоге

Мы видели, что несимметричные и двухтактные усилители имеют как преимущества, так и недостатки. Трудно сделать общие утверждения о каждом из них, поскольку в каждой широкой категории существует множество вариантов схем и качества, поэтому имейте в виду, что эти утверждения являются обобщениями. Там *являются* исключения из правил

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ SE

- ☒ Меньшее ухудшение сигнала из-за меньшего количества компонентов тракта прохождения сигнала
- ☒ Лучшая детализация и последовательность, особенно при небольших объемах
- ☒ Более открытый и воздушный звук

НЕДОСТАТКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЭ

- ☐ Низкая эффективность, низкая мощность и высокое тепловыделение.
- ☐ Практически отсутствует подавление шума и шума источника питания, что требует дополнительной фильтрации источника питания.
- ☐ Нет подавления гармонических искажений второго порядка (некоторые не считают это недостатком)
- ☐ (Обычно) более короткий срок службы силовой лампы
- ☐ Имеет проблемы с совместимостью динамиков, менее терпим к широкому кривым импеданса и сложным кроссоверам.
- ☐ Плохой коэффициент демпфирования

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПП

- ☒ Больше силы
- ☒ (Обычно) более авторитетное и мощное звучание.
- ☒ Лучшее звучание басов.
- ☒ Меньше проблем с совместимостью динамиков.
- ☒ Меньше искажений.

НЕДОСТАТКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПП

- ☐ Гомогенизированный, неинтересный звук
- ☐ Большее ухудшение сигнала из-за большей сложности пути прохождения сигнала
- ☐ Увеличение интермодуляции питания между каскадами усилителя и другие аномалии питания.
- ☐ Плохая детализация и динамика на низком уровне.

Опять же, обратите внимание, что это обобщения. Есть несколько усилителей SE с ужасным звучанием, а также усилители PP с очень открытым и музыкальным звучанием. Все зависит от дизайна. Если мы применим концепции проектирования SET к полипропилену, используя инженерные методы, направленные на достижение наилучшего звука, а не лучших характеристик на бумаге, результаты могут быть удивительно хорошими. Усилитель PP, использующий триодные лампы с низким Rp, такие как 2A3 или 300B, может обойтись с небольшим NFB или вообще без него. Во-первых, триоды сами по себе являются преимуществом как с точки зрения линейности, так и с точки зрения выходного импеданса. Во-вторых, каскады входного усилителя напряжения и фазоинвертора могут быть спроектированы с гораздо меньшим коэффициентом усиления, если отсутствует NFB, снижающий доступный коэффициент усиления. Меньшее усиление означает меньшие искажения и меньший выходной сигнал Z, поэтому для достижения этих желаемых свойств NFB не требуется. В итоге вы получаете гораздо более линейный усилитель, который имеет более простую схему с меньшим количеством деталей и, следовательно, меньшим ухудшением сигнала, а также большим количеством воздуха, дыхания и вибрации. Посмотрите, насколько лучше все становится, когда вы начинаете проектировать это с самого начала, а не пытаетесь исправить это с помощью NFB?

Вы, вероятно, думаете: «Должен быть подвох». Ну, есть. Мощность такого усилителя очень мала по сравнению с усилителями PP с высокой обратной связью, использующими большие пентоды. Но что бы вы предпочли? 15 Вт, которые звучат пугающе хорошо и заставляют вас хотеть еще того же, или 70 Вт, которые утомляют вас до смерти и утомляют? Кроме того, в свете огромного количества высокоэффективных и великолепно звучащих динамиков на современном рынке, мощность усилителя является спорным вопросом. Ловушка, которую следует избегать, — это не столько SE или PP, сколько *Высокая мощность*. Используя очень эффективные динамики с минималистичными кроссоверами или без них, мы можем обойти всю проблему мощности и в конечном итоге получить гораздо лучший звук, обычно при меньших затратах.

Высокая эффективность и низкое энергопотребление *топнуть*, по мнению автора. Я вырос в доме, полном винтажного лампового оборудования, и у меня были ламповые и полупроводниковые устройства как высокой, так и малой мощности. За свою жизнь я слышал много оборудования, и, честно говоря, большую часть из него даже не стоит запоминать. Большая часть того, что выдается, имеет мощность менее 10 Вт. Ничто из того, что я когда-либо слышал, не может сравниться с хорошим ламповым усилителем малой мощности с высокоэффективными динамиками. СЭ или ПП? Назовите свой яд. Оба имеют свое место, и оба могут быть потрясающими. *если* правильно спроектирован и реализован. Мы можем резюмировать все это такими мудрыми словами одного из величайших разработчиков ламповых усилителей-трансформаторов, которых когда-либо знал мир, голландского инженера-электрика Менно ван дер Вин:

«На самом деле, измерения — это хорошо, и они могут вам помочь. Но у нас есть лучшие измерительные устройства, доступные по обе стороны нашей головы: наши УШИ, и разве они не фантастические? Что ж, используйте их и полагайтесь на них».

Эдди Вон

Авторские права © 2006 Эдди Вон

Данная статья не может быть воспроизведена полностью или частично или использована в коммерческих целях или целях получения прибыли, за исключением случаев, когда

прямое письменное согласие автора.