

Inverse Complementary Distortion Cancellation

www.tubecad.com Copyright © 2001 GlassWare All Rights Reserved

Инверсное комплиментарное уничтожение искажений

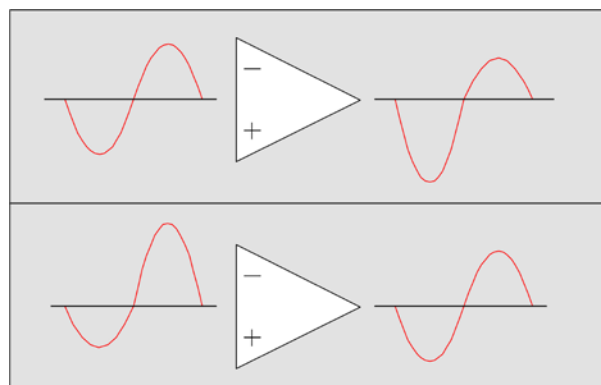
Перевод С.А.Сухорукова

Добавление искажений для компенсации искажений кажется такой же противоречивой попыткой, как предотвращение войны подготовкой к ней. До сих пор аудио-практика изобилует кажущимися противоречиями, например, обратная связь, делающая звук менее чистым и улучшающая воспроизведение баса за счет более глубокого демпфирования. Хотя эти примеры являются спорными, метод суммирования инверсных искажений с искажениями для их компенсации имеет мало сторонников. Фактически многие не знают, что эта технология может предложить. Итак, после прочтения статьи Грэхема Дика (Graham Dicker) в июльском выпуске *audioXpress*, который спрашивает, почему в усилителях с четным числом каскадов не наблюдаются меньшие искажения, и увеличение искажений из-за нечетного числа каскадов не отмечалось ранее, я решил, что к теме уничтожения искажений комплиментарным инверсным предискажением имеет смысл вернуться. (Июльская заметка побудила меня вернуться к теме.)

Эта тема серьезно обсуждалась в последний раз полстолетия назад, и две статьи являются хорошим поводом для экскурсии в библиотеку: "Нелинейные искажения", *Wireless Engineer*, January 1956, "Уменьшение нелинейных искажений комплиментарным искажением", *IRE Transactions on Audio*, Sept-Oct 1959. Это увлекательно – читать сердитые отклики на последнюю статью, но гнев часто выдает недостаток понимания. (Даже был вовлечен в ссору Пол Клипш (Paul Klipsh) и на неправильной стороне, если я правильно помню.) Аргументация против более низких искажений при использовании предискажений шла по следующим линиям: усилитель, который искажает, просто исказит сигнал предискажений, не давая никаких преимуществ, результатом будут искаженные

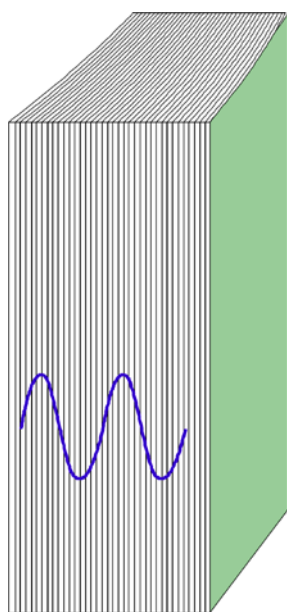
предискажения; или, несмотря на то, что этой технологией можно уничтожить гармонику 2-го порядка, невозможно уничтожить гармоники более высокого порядка. На самом деле странные аргументы; эквивалентен ли искаженный сигнал предискажений отсутствию искажений? И почему только 2 гармонику?

Если обозначить прохождение сигнала через усилитель как "функция X", тогда, запитывая усилитель обратной функцией, получим единицу: $X(1/X)$. Например, если усилитель дает только усиление, его функция будет "30 раз", скажем. Таким образом, если на вход подать сигнал, который является отношением 1:30, инверсия от 30 раз, результатом является единица. Инверсная кривая RIAA коррекции, реализуемая фонокорректором, является примером инверсной функции по отношению к функции, дающей плоский отклик. Достаточно просто, почему же отказываться прилагать этот принцип к аудио усилителям?



Ответ лежит не в физике работы усилителя, а в навязчивой идее частоты и синусоидальных волн. За примечательным исключением позднего Ричарда Хейсера (Richard Heyser), немногие из нас, работая с аудиосхемой, чувствовали себя комфортно с чем-нибудь иным, кроме синусоидальных волн.

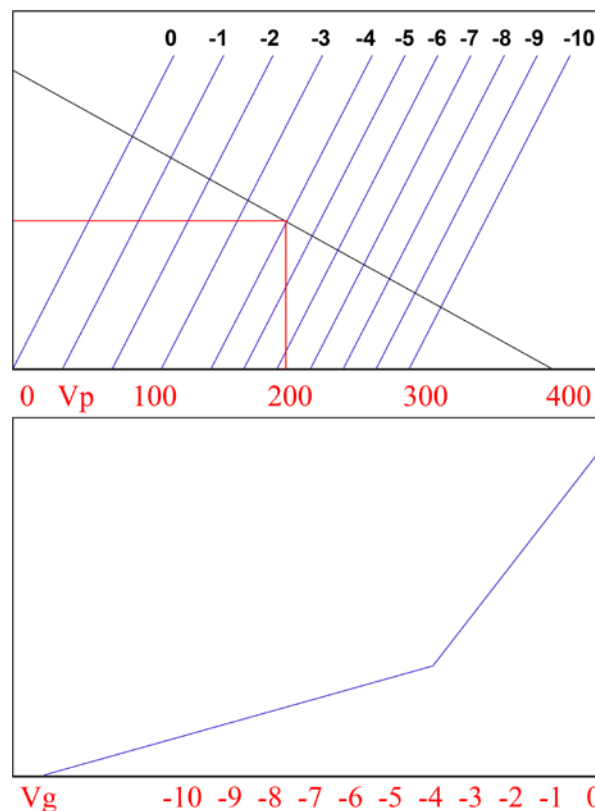
Может быть, это из-за того, что импульсный отклик анодного напряжения не представляется таким же важным, как частотный отклик или гармонические искажения. Или, может быть, неспособность осциллографа отобразить импульсное напряжение так же, как он может отобразить синусоидальное напряжение, заставляет нас мыслить исключительно в терминах частоты и синусоидальных волн. Кроме того, в любой заданный момент времени анодное напряжение лампы может иметь только одно значение, так же как конус громкоговорителя может находиться только в одной совершенно конкретной позиции или резистор в каждый заданный момент пропускает вполне определенный ток. Только по истечении времени эти дискретные значения анодного напряжения, позиции конуса, тока через резистор складываются, давая в результате основные тоны и обертоны, которые мы и слышим.



Чтобы почувствовать, что такое мгновенное напряжение, возьмите толстую телефонную книгу и проведите синусоидальную волну по наружному краю. Каждая страница будет содержать только одну небольшую чернильную точку, почти так же как один временной срез вмещает одно значение анодного напряжения. (Цифровые рекордеры просто берут мгновенное значение напряжения для какого-либо заданного момента времени и преобразуют его в двоичный код.)

Следующим шагом к пониманию того, как инверсное предискажение может снизить искажение, является образ триода, который проявляет свойство нечетности: у него есть два четко определенных коэффициента усиления. При напряжении на сетке от 0 до -4 В μ равно 40, однако при напряжениях ниже -4 В μ равно 20. И за исключением этого скачка μ этот триод совершенно линеен.

Если рабочая точка соответствует смещению на сетке -2 В или -6 В, нам никогда не понять, что триод имеет сильный излом

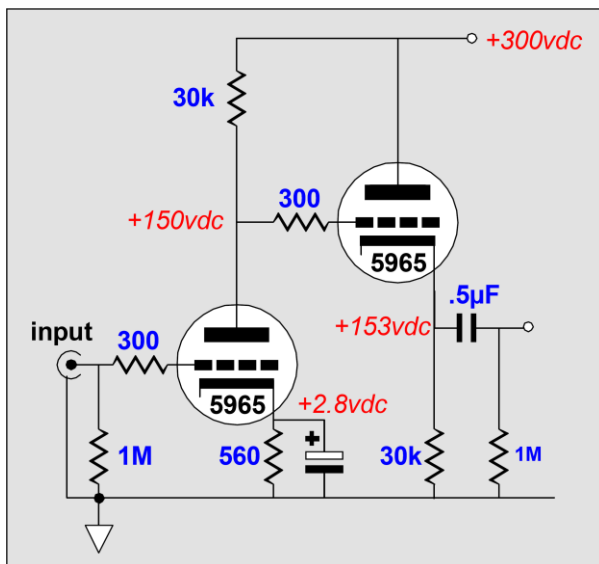


линейности. Другими словами, если мы остаемся внутри окна от 0 до -4 В, линейность лампы безупречна, это же утверждение же сохраняет справедливость и в диапазоне от -4 до -8 В. Но в рабочей точке -4 В легко различим излом линейности, так как триод дает большее усиление для положительных входных сигналов, чем для отрицательных сигналов. Действительно, легко могут быть вычислены гармонические искажения 2-го порядка величиной 16,7% по следующей формуле:

$$K_{\epsilon 2} = \frac{0,5(U_{\max} + U_{\min}) - U_0}{U_{\max} - U_{\min}}$$

(В известной мере все триоды имеют сходство с этим воображаемым триодом по той причине, что их коэффициент усиления не остается постоянным, уменьшаясь при высоком анодном напряжении и низком значении анодного тока.).

Теперь давайте представим себе два таких воображаемых дуальных по значению μ триода, используемых в линейном усилителе. Первый триод используется в стандартной конфигурации с заземленным катодом, второй – в конфигурации катодного повторителя. Оба триода имеют смещение -4 В и оба находятся под одним и тем же напряжением анод-катод и с одним и тем же током анода. Первый триод непосредственно связан со вторым триодом. Насколько велики будут искажения схемы?



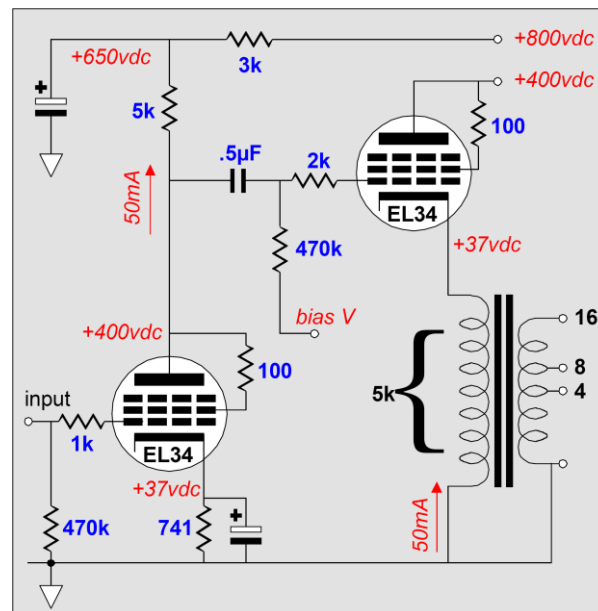
Усилитель с гальванической связью

Если катодный повторитель задействует такой же триод и такое же сопротивление нагрузки, анодное напряжение и ток покоя, что и каскад с общим катодом, который ему предшествует, катодный повторитель устраняет большинство искажений первого каскада.

Это происходит потому, что катодный повторитель следует по траектории, которую выписывает усилитель с общим катодом. Когда напряжение на аноде первого каскада медленно возрастает, напряжение анод-катод этого триода увеличивается, проводимость уменьшается; так как катод катодного повторителя становится более положительным, его напряжение анод-катод энергично падает, и его проводимость возрастает. Наоборот, когда анод первого каскада энергично становится более отрицательным, напряжение анод-катод катодного повторителя медленно возрастает, и его проводимость уменьшается.

Важно то, что эта схема использует инверсное предискажение, давая меньшее искажение, чем каждая подсхема, использованная независимо. Если этот подход кажется слишком оптимистичным, рассмотрим многокаскадный линейный усилитель с обратной связью; предоконечный усиливающий каскад подает на оконечный каскад инверсный сигнал предискажений, который устраняет искажения, которые возникли бы в отсутствие обратной связи. Обратная связь создает этот инверсный сигнал предискажений в точности для выходного прибора, который является выходным устройством, завершающим петлю обратной связи. Но обратная связь не является единственным способом создания инверсного сигнала предискажений.

Как нам использовать эту хитрость, чтобы сделать усилитель мощности? Прежде всего, мы должны использовать тот же тип триода, как для драйверной лампы, так и для выходной лампы. Во-вторых, мы должны использовать одинаковые напряжения анод-катод, импедансы нагрузки и токи покоя для обоих триодов. В-третьих, каскад с общим катодом должен работать на катодный повторитель.



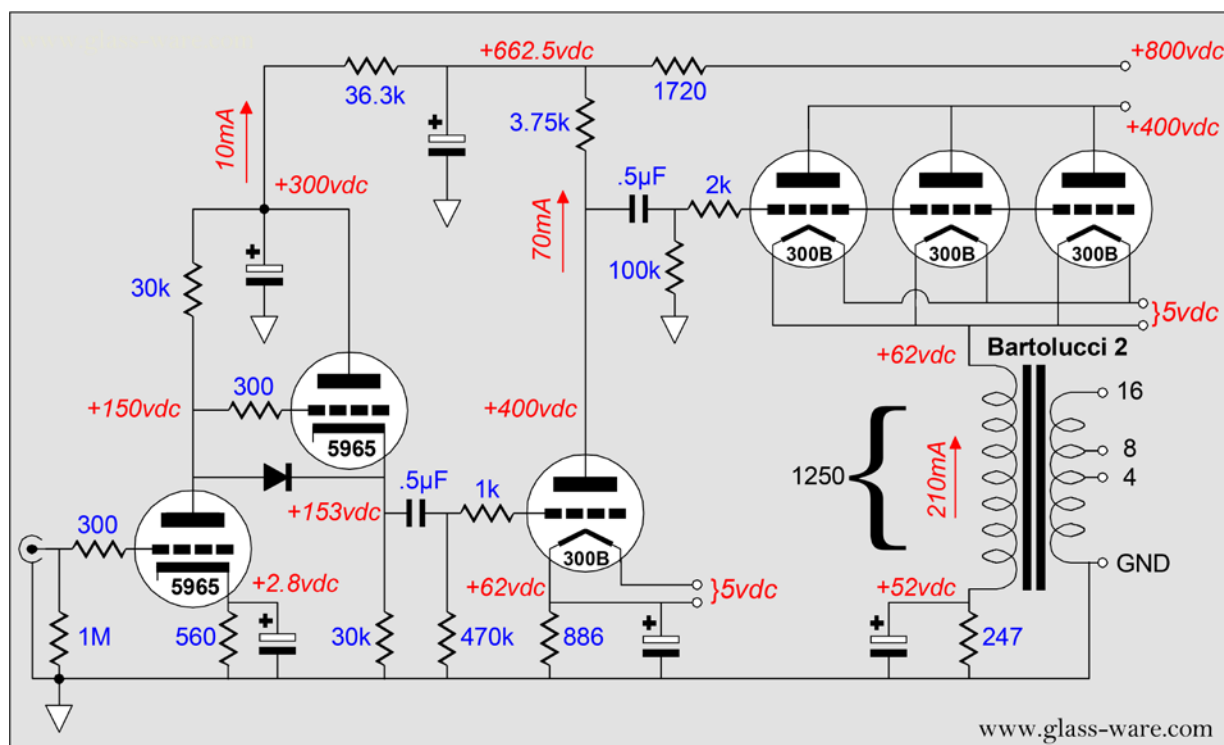
Усилитель мощности с гальванической связью

На первый взгляд, кажется, что мы потеряем половину выходной мощности, чтобы уменьшить искажения комплиментарным способом, поскольку первый каскад будет работать на ту же нагрузку, что и выходной каскад. Например, если одна выходная лампа 2A3 видит нагрузку 2500 Ом, тогда драйверная лампа 2A3 также должна работать на нагрузку 2500 Ом; поскольку обе лампы работают с одним и тем же размахом напряжения и тока, обе лампы разовьют на своей нагрузке одну и ту же мощность. Однако только одна из этих нагрузок создает звук, половина потенциальной эффективности теряется. Учитывая, что в среднем SE-усилитель на триоде имеет эффективность около 20%, у нас нет запаса эффективности, чтобы ею разбрасываться.

Но если мы увеличиваем количество выходных устройств, использованных в параллели, мы заметно увеличим эффективность. Например, если мы разрабатываем однокатный усилитель на 300В, который использует три выходных лампы 300В в параллельном включении, тогда для обеспече-

ния комплиментарного инверсного предсказания нужно использовать только одну мощную лампу 300В. Итак, мы теряем только

четверть наших потенциальных ватт, а не половину. (Конечно, чем больше выходных ламп в параллели, тем лучше эффективность.)

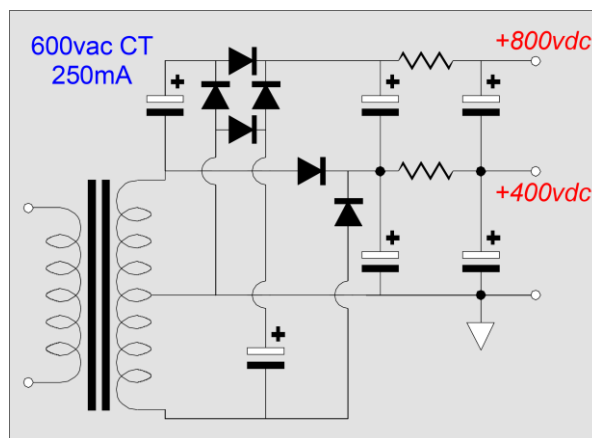


На приведенной выше схеме вы видите выходной каскад на катодном повторителе на 300В, который раскачивается усилителем с общим катодом на 300В, анодный резистор которого (3750 Ом) в три раза больше, чем приведенный к первичной обмотке импеданс выходного трансформатора (1250 Ом; сопротивление резистора смещения 1250 Ом должно быть прибавлено к импедансу первичной обмотки, если этот резистор не зашунтирован). Ключевым признаком является то, что напряжение анод-катод и ток покоя усилителя с общим катодом равны соответствующим параметрам каждой выходной лампы.

Дополнительное напряжение питания поступает от удвоителя напряжения. Если кого-то из компании всезнаек по ламповой электронике (удивительно небольшая по численности, она выворачивается наизнанку, но не способна на большее, чем заполнять малочисленные статьи аудиофильской прессы и перебирать экзотические выпрямительные лампы) беспокоит непристойное использование твердотельных диодов, для питающего напряжения 400В легко может быть применен ламповый выпрямитель, а с некоторой доработкой ламповый выпрямитель может быть использован и для 800-вольтового питания.

Драйверная лампа 300В должна обеспечивать размах напряжения, достаточный для

раскачки параллельных катодных повторителей на полной выходной мощности. Так как



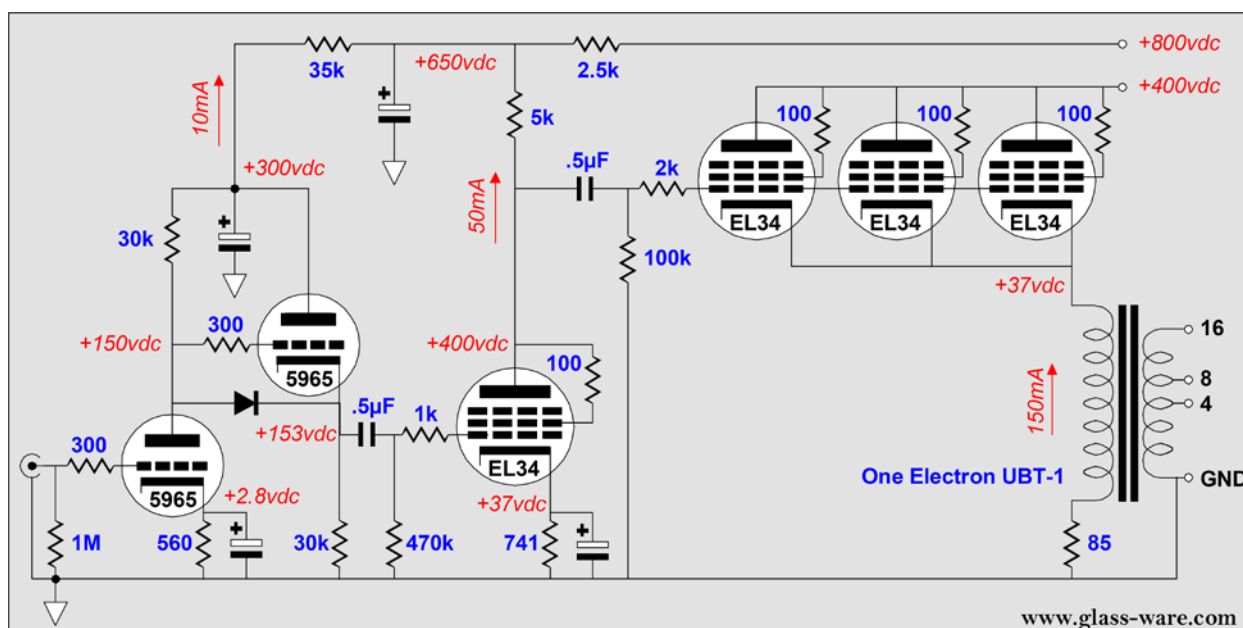
необходимый размах является несимметричным, потенциальный размах также не должен быть симметричным. Драйверный каскад может потенциально качнуть вниз больше, чем вверх, что и требуется выходному каскаду.

Это является результатом того, что триоду для запираания требуется большее напряжение, чем для увеличения его проводимости.

Так, когда драйверная лампа видит на входе размах +62/-62В, на её аноде будет размах -221/+195 В, который в свою очередь противостоит разбалансу, который будет давать выходная лампа, поскольку он является инверсным к разбалансу выходной лампы.

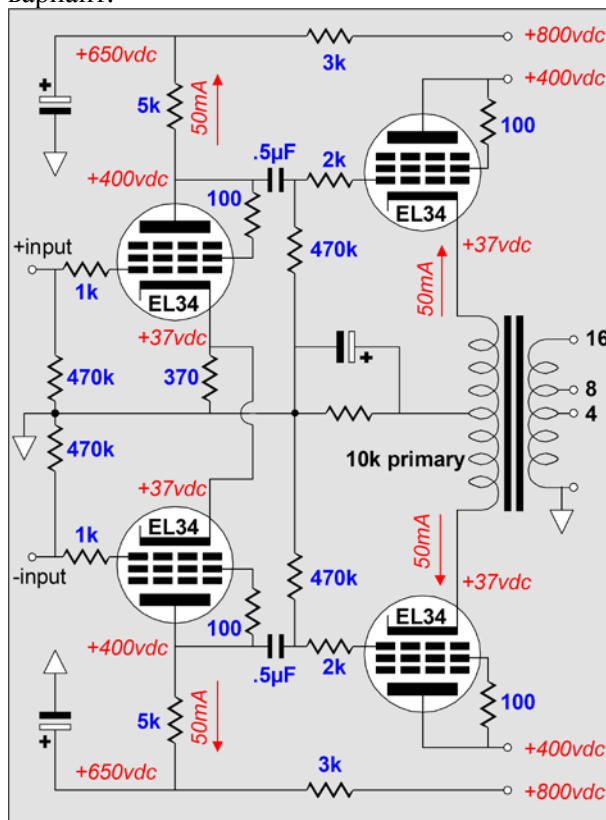
Конечным результатом всех этих приемов является усилитель с низким выходным

сопротивлением, низкими искажениями и широким диапазоном частот, усилитель, который не использует обратную связь (по крайней мере, не общую петлю обратной связи). Выходной каскад на катодном повторителе заслуживает некоторых комментариев. Эта схема использует 100%-ю катодную обратную связь для сохранения пропорциональности выходного сигнала входному. Если катод не успевает отслеживать положительное изменение потенциала на сетке, сетка становится эффективно более положительной, и проводимость лампы возрастает, делая катод более положительным. Наоборот, катод не поспевает за отрицательным скачком на сетке, сетка становится эффективно более отрицательной, и проводимость лампы падает, приводя к падению напряжения на катоде. Другими словами, выходной каскад на катодном повторителе полностью использует крутизну лампы, заставляя выход следовать за входным сигналом. Этот короткий, быстрый механизм обратной связи к тому же снижает выходное полное сопротивление и расширяет полосу частот. Это также приводит к снижению вклада в искажения трансформатора, так как выходные трансформаторы меньше искажают с низкоомным источником сигнала. Это является важным преимуществом данного выходного каскада, так как трансформатор не включен в петлю обратной связи, уменьшающую искажения.



Двухтактник?

Удваивая SE-схему и добавляя фазорасщепитель на входе усилителя, как показано на схеме ниже, легко сделать двухтактный вариант.



Если сделана двухтактная версия, она должна работать в строгом режиме А, чтобы гарантировать, что инверсное уничтожение искажений сохранится. Обратим внимание на общий, нешунтированный катодный резистор, который имитирует перекрестную связь выходной лампы в выходном трансформаторе. (На самом деле, эта схема, вероятно, будет лучше работать с межкаскадным трансформатором.)

Реализация полной мощности

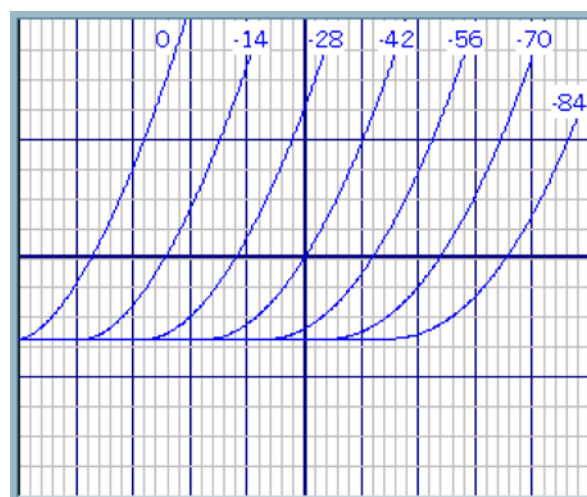
Налицо проблема в том, что для полной реализации возможной выходной мощности однотактной или двухтактной топологии выходной каскад требует сигнал раскачки, превышающий тот, который можно получить от драйверного каскада. Одним из путей решения этой проблемы является использование несколько более высокого значения сопротивления анодного резистора драйверного каскада, которое должно увеличить потенциальную выходную мощность за счет немного более высокого уровня искажений. Насколько больше должно быть сопротивление этого резистора? Математически достаточно:

$$R_a' = R_a + R_k$$

В ранее приведенном примере анодный резистор должен быть повышен до 5741 Ом. Эта величина нагрузки будет добавлять к пиковому размаху выходного напряжения драйвера абсолютное значение напряжения смещения, компенсируя потери выходного каскада.

Ликвидация искажений двухтактного каскада в чистом классе А

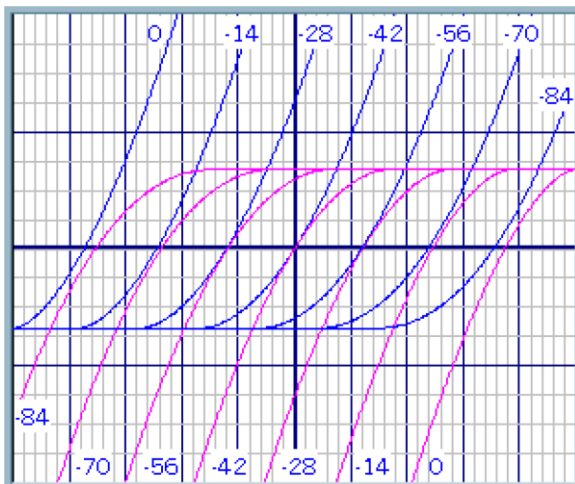
Тем, кто задавался вопросом необходимости комплиментарных предыскажений для снижения искажений двухтактного выходного каскада, интуиция говорит, что метод инверсных предыскажений определенно лучше подходит для однотактного каскада. Выходной двухтактный каскад класса А уже внутри себя сильно уменьшает нелинейность выходных приборов. Двухтактный выходной каскад (работающий в чистом классе А) эффективно складывает две нелинейные выходные характеристики в одну гладкую передающую функцию.



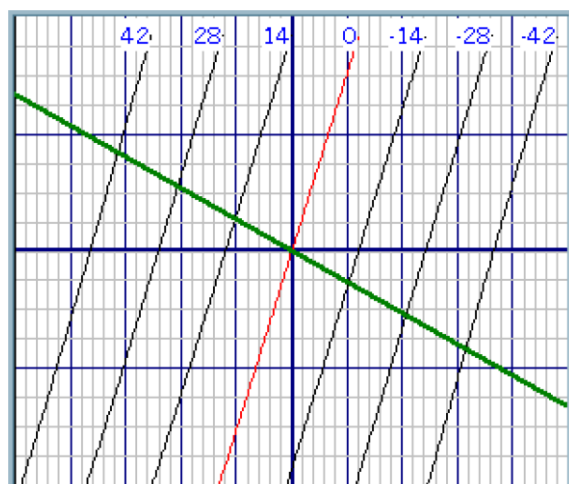
Однотактная 2A3 с напряжением анодного источника 250°В и током покоя 51 мА

Композитная кривая получена вычитанием выходной характеристики второй выходной лампы из первой. На холостом ходу, когда токи покоя ламп равны, два тока равны и взаимно уничтожаются, точка покоя располагается в центре композитной кривой при нулевом сеточном напряжении и нулевом токе в нагрузке. Поскольку выходной каскад возбуждается инвертированным сигналом драйвера, нелинейности передаточной кривой усредняются. Так как большая проводимость одной лампы накладывается на меньшую проводимость другой лампы, тем самым формируется прямая композитная выходная

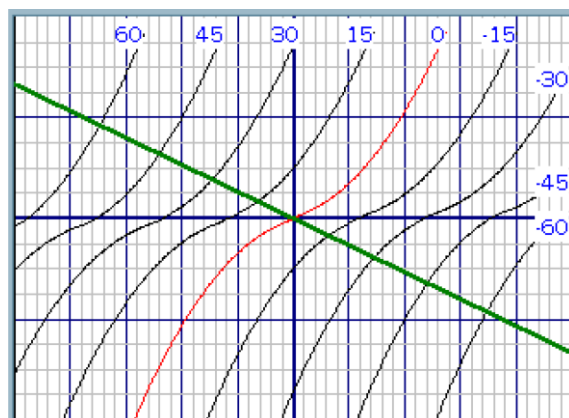
характеристика двух ламп, работающих в чистом классе А, и формируется вихляющая характеристика на тех же лампах в режиме АВ.



Две 2А3, включенные пушпулом, с напряжением анодного источника 250°V и током покоя 51 мА



Композитные кривые двух 2А3, работающих в классе А с напряжением анодного источника 250°V и током покоя 51 мА



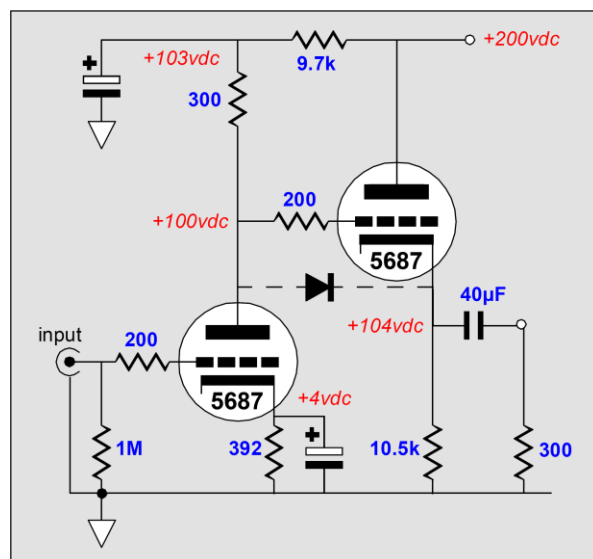
Композитные кривые двух 2А3, работающих в классе АВ с напряжением анодного источника 250°V и током покоя 2 мА

Ламповый усилитель для наушников

Меньшим по масштабу использованием этого приема уничтожения искажений могло быть проектированием усилителя наушника. Принцип остается тот же, но выходная мощность существенно уменьшена.

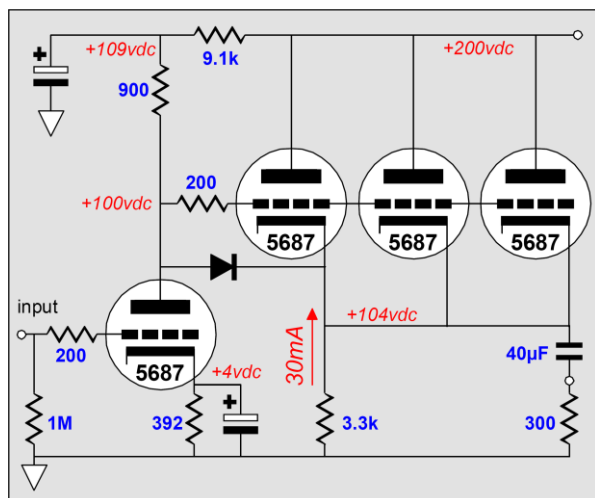
Две самых популярных лидирующих марки наушников – "Sennheiser" и "Grado". Обе эти компании делают превосходные наушники в диапазоне цен от \$100 до \$600. Я обладаю парой наушников Sennheiser®HD-580, и я могу свидетельствовать об их чистом, мягком, "ламповом" звуке. HD-580 был заменен на HD-600, у которого звук даже ещё лучше. Оба "Сенхайзера" имеют сопротивление 300 Ом. Хотя этот импеданс на порядок больше, чем у "Grado", он все же является серьезной нагрузкой для вакуумной лампы. Если использовать анодный резистор величиной 300 Ом, от усилителя с общим катодом на 6DJ8 получают усиление всего 2,75 и искаженный выход. Та же лампа и импеданс нагрузки в катодном повторителе дают усиление 0,73 и все ещё искаженный выход. Как нам управлять нагрузкой в 300 Ом, не используя трансформатор?

Приведенная ниже схема показывает усилитель для наушников с компенсацией искажений комплиментарным инверсным предыскажением. Этот усилитель для наушников имеет немного выше, чем единичное, усиление и довольно низкие искажения на выходе. Однако простор для совершенствования есть.



Усилитель для наушников с компенсацией искажений инверсными комплиментарными предыскажениями

Увеличение числа выходных триодов до трех увеличивает усиление и снижает выходной импеданс и искажения.



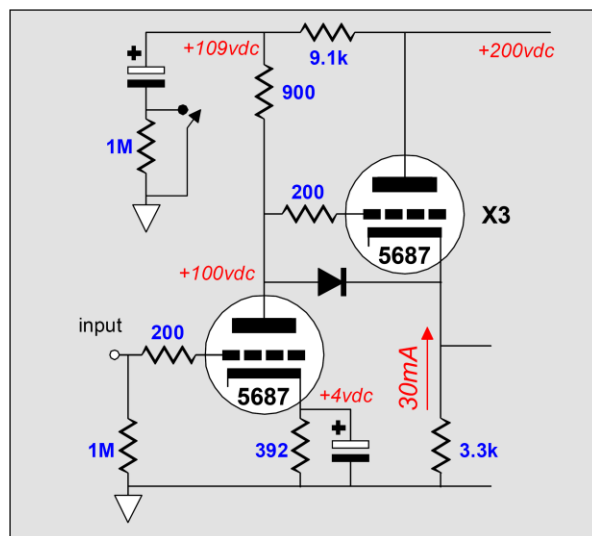
Усилитель для наушников с компенсацией искажений инверсными комплиментарными предскажениями

Использование трех выходных ламп эффективно увеличивает 300-омную нагрузку для каждой выходной лампы втрое, что в свою очередь требует использования 900-омного анодного резистора для входного каскада.

Усиление этого модифицированного лампового телефонного усилителя составляет 3,6, выходное сопротивление 42 Ом, максимальный размах выходного напряжения $\pm 8,5$ В. В целом, весьма "накаченный" усилитель, но насколько он хорош как линейный усилитель?

Проблема технологии инверсных предскажений в том, что схема оптимизирована только для одного специфического сопротивления нагрузки, ограничивая, тем самым, её универсальность. В отличие от обычных линейных усилителей, чьи искажения уменьшаются с разгрузкой, разгрузка схемы несколько парадоксально увеличивает ее искажения. Одно из решений заключается в подключении 300-омной нагрузки, когда наушники удалены. Это будет легко осуществить, если доступен разъём со встроенными ключами. Альтернативный подход заключается в отключении шунтирующего конденсатора в стыке нагрузочного резистора и гасящего резистора 9,1к. Резисторы на 900 Ом и на 9,1к в комбинации формируют резистор на 10к, который втрое превышает величину резистора нагрузки катодного повторителя (3,3к). Другими словами, мы имеем линейный каскад с более высоким усилением и более низкими искажениями. Включение и выключение

шунтирующего конденсатора приводит к щелчкам, так как конденсатор должен быть заряжен и разряжен. Размещение резистора на 1М последовательно с конденсатором и землёй держит конденсатор постоянно заряженным.



Усилитель для наушников, который переключает анодные резисторы для подстройки в соответствие с требованиями задачи

Раскачка наушников "Grado"

В отношении наушников "Grado", имеющих зверски низкое сопротивление (около 30 Ом), можно придерживаться той же методики, что и с наушниками "Sennheiser". Там, где 300-омная нагрузка требовала величины резистора анодной нагрузки 900 Ом, 30-омная нагрузка требует 90-омной нагрузки. Но с 90-омным резистором анодной нагрузки и входной лампой 5687 общее усиление составит всего 0,2 – вряд ли достаточно. Увеличение усиления может быть достигнуто добавлением дополнительного усилительного каскада или большим числом выходных ламп, однако лучшим выбором с этой схемой мог бы быть выходной трансформатор. Тем не менее, достойной целью является бестрансформаторный выходной каскад. Увеличение числа выходных ламп до семи увеличит сопротивление анодного резистора в семь раз по сравнению с номинальной величиной 30 Ом (210 Ом). Эта величина анодного резистора дает общее усиление 0,7, которое гораздо более приемлемо. Дополнительным бонусом является соответствующее снижение выходного сопротивления до 18 Ом. Наконец, лампы 5687 настолько дешевы и надежны, что вряд ли кто испугается стоимости замены ламп каждые 5 лет. Однако восемь ламп 5687 потребуют настоящему мощному блоку питания, так как

Двухтактный усилитель для наушников с компенсацией искажений инверсными предискажениями

Кроме того, когда первый каскад "видит" снижение анодного тока на 5 мА, фазоин-

[illegible]

Приведенная выше схема включает выходной двухтактный каскад, работающий в режиме А. Обе выходные лампы функционируют как катодные повторители, в то время как конденсатор, соединяющий фазоинвертор и выход служит для полного возврата усиленного сигнала нижнего триода обратно на его сетку. Выходного каскада имеет ток холостого хода 20 мА, и таким образом может вдвое превышает ток через нагрузку импедансом 300 или 20 Ом. (Следует помнить, что 30-омная нагрузка требует емкости выходного конденсатора связи в 265 мкФ.)

Выше показан полный ламповый усилитель для наушников. Усилитель обеспечивает чистый выходной сигнал и низкое выходное сопротивление без общей петли обратной связи. И да, заменой могут быть триоды 6Н30. И нет, я не предоставляю величину катодного резистора для лампы 6Н30, хотя на сайте www.glass-ware.com можно свободно загрузить программу Live Curves для этой лампы, и определение величины резистора является превосходным домашним заданием.

Заключение

Хотя мы только "поскребли поверхность", должны же мы с чего-то начать. Что было пропущено, так это аудио предусилители и усилители с прямым приводом электростатики. (Мы могли бы попытаться создать инверсный сигнал предуслажений, нагружая драйверный каскад индуктивностью, последовательно соединенной с анодным резистором, в то время как выходной каскад был бы нагружен емкостью с параллельно подключенным резистором.)

Как всегда, если вы создаете какую-либо из этих схем, пожалуйста, поделитесь вашими результатами.