

Содержание этой статьи я оставляю без комментариев, единственное, что я хочу сказать: перевод этой статьи доставил мне удовольствие.

Точно и четко сформулированные мысли характеризуют авторов, писавших эту статью, как профессионалов высочайшего класса.

Хочу выразить благодарность Денису Афанасьеву за предоставленный исходный материал.

Евгений Карпов

Преувеличения и Усилители

Анализ Американских Требований к Повышению Линейности и Эффективности

D. T. N. WILLIAMSON и P. J. WALKER

Перевод Евгения Карпова

Недавно изданные статьи, особенно в Соединенных Штатах, показали, что существует некоторая неопределенность понятия "высокое качество" для звуковых усилителей. Это тенденция привела к снижению требований к качеству усилителей. Использование в описании параметров усилителя терминов в превосходных степенях приводит к тому, что параметр, имеющий точное значение, в этом случае, теряет смысл. Эта статья предназначена для разъяснения сложившейся ситуации, в ней обсуждается вопрос требований к качественному усилителю, и сделана попытка разъяснить некоторые неправильные представления.

Как правило, для усилителя указывают коэффициент нелинейных или интермодуляционных искажений. Соответственно, эта тенденция привела к тому, что эти параметры стали расценивать как главное требование "высокого качества". В 1944 году в одной из публикаций было предложено считать нормой высокого уровня эксплуатационных показателей суммарный коэффициент гармоник в 0.1 процента и стремиться к этой величине при максимальной выходной мощности. Такое низкое содержание гармоник легко достижимо современными методами проектирования и, фактически, не обнаруживается в самых утонченных тестах прослушивания.

Это произвольное значение было выбрано не потому, что это допустимый максимум, а потому, что, будучи гораздо меньше абсолютно необходимого уровня, дает хороший запас для компенсации любого ухудшения качества оборудования в процессе эксплуатации.

Требования к параметрам высококачественного усилителя уже определялись в предыдущих статьях, но стоит их повторить и расширить.

Они следующие:

(1) Незначительные нелинейные искажения при максимальной нормируемой выходной мощности.

(Термин "нелинейные искажения" включает в себя как нежелательные гармоники, так и интермодуляционные составляющие сигнала.) Для выполнения этого требования динамическая характеристика выход/вход должна сохранять линейность вплоть до максимальных выходных уровней для сигнала с произвольной формой, который может поступить на вход усилителя, и содержащего частотные компоненты, лежащие как внутри, так и вне полосы звуковых частот. Также эти условия должны выполняться

при изменении импеданса нагрузки в диапазоне, который может реально встретиться на практике.

(2) Линейная частотная характеристика в пределах слышимого диапазона частот - 10-20,000 Гц.

(3) Незначительный сдвиг фазы в пределах слышимого диапазона частот.

Фазовые сдвиги между гармоническими составляющими сложного, установившегося сигнала не влияют на слышимое качество звука, но в динамике оказывают существенное влияние на натуральность воспроизведения.

(4) Хороший импульсный отклик.

Для точного воспроизведения звука в динамике, в дополнение к малым фазовым и частотным искажениям, следует исключить и другие факторы, ухудшающие импульсный отклик. Должны быть исключены изменения эффективного усиления вследствие перехода любых каскадов в режимы отсечки (как по току, так и по напряжению), особое внимание необходимо уделить конструкции элементов со стальными сердечниками и стремиться к сведению их количества к минимуму. Следует помнить, что выходные каскады, работающие в классе АВ с автоматическим смещением, существенно меняют значение эффективного усиления в течение низкочастотных переходных процессов. Это приводит к значительным искажениям, которые не наблюдаются в установившихся режимах. Переходный процесс приводит к возрастанию тока в выходном каскаде, это сопровождается изменением напряжения смещения с постоянной времени, определяемой RC-цепочкой автоматического смещения, следовательно, изменится режим работы лампы и коэффициент усиления усилителя.

(5) Низкое выходное сопротивление.

Это требование вытекает из необходимости обеспечения хорошего электрического демпфирования акустической системы и обеспечения ее хороших частотных и переходных характеристик. На ограничение перемещения диффузора электромагнитного громковорителя будет влиять акустическая нагрузка, жесткость подвески, сопротивление катушки и электромагнитное демпфирование. Эффективность нагруженного экраном громковорителя редко превышает 5-10 процентов, и акустическое демпфирование в этом случае незначительно. Поэтому электромагнитное демпфирование оказывает существенное влияние на перемещение диффузора. Эффект электромагнитного демпфирования пропорционален току, протекающему через катушку и, следовательно, пропорционален полному сопротивлению в цепи катушки громковорителя. Поэтому выходное сопротивление усилителя должно быть намного ниже, чем полное сопротивление катушки.

(6) Достаточный запас мощности.

Естественное воспроизведение оркестровой музыки в комнате средних размеров требует пиковой выходной мощности порядка 15-20 ватт, если в качестве электроакустического преобразователя используется нагруженный экраном громкоговоритель с нормальной эффективностью. Использование рупорной или другой, более эффективной, акустической системы снижает требуемую пиковую мощность до 10 ватт. В высококачественном усилителе, конечно, максимальная пиковая выходная мощность должна быть больше, чем требуемая практически. Даже в этом случае хорошая конструкция должна гарантировать, что при мгновенных перегрузках будет отсутствовать блокирование усилителя.

(7) Уровень фона и шумов должен быть, по крайней мере, не хуже -60db.

Нельзя считать, что любой усилитель, специфицированный как "high quality", соответствует этим обширным техническим требованиям. Однако при условии, что эти требования выполнены полностью, и паразитные компоненты в звуковом диапазоне (генерируемые внутри или вне этого диапазона) не превышают доли процента, любой усилитель будет звучать столь же хорошо, как любой другой, и "улучшить" усилитель мощности, в смысле улучшения качества звука, становится невозможно.

Эффективность. - С другой стороны, конечно, абсурдно утверждать, что усилители не могут быть улучшены в любом смысле. Эффективность, компактность и надежность весьма важны, и именно эти факторы можно улучшить во многих случаях. Важность каждого из этих факторов определяется назначением и заданными габаритами усилителя.

В усилителях небольшой выходной мощности (менее 20 ватт) эффективность не является определяющим параметром, и другие соображения, типа про-

сты конструкции и высокой повторяемости, могут стать главенствующими. В усилителях большой мощности эффективность становится доминирующим фактором. Иногда ограниченное значение мощности, рассеиваемое анодом лампы, не позволяет получить необходимую выходную мощность при низкой эффективности выходных каскадов.

Контроль Качества Продукции. - Основной целью проектировщика является (или должна являться) задача получения наилучшего качества звука, в конечном счете, у тех, кто воспользуется этой разработкой.

Если проектируемое устройство будет производиться без контроля со стороны проектировщика, то необходимо приложить максимальные усилия, чтобы гарантировать, что каждый изготовленный усилитель обеспечит заданные параметры без чрезмерных затрат труда на наладку и при использовании ограниченного количества измерительного оборудования.

В этом случае отказ от использования сложной "косвенной" схемотехники или технических решений с повышенной чувствительностью к отклонениям номиналов и конструкции компонентов, приводящим к существенному ухудшению качества изделия, является первостепенной задачей.

Производство оборудования под контролем проектировщика порождает совершенно другие проблемы. В этом случае имеется большая свобода выбора в применяемых решениях и, вероятно, будет использована более разнообразная и совершенная схемотехника.

Усилитель, описанный в журнале *Wireless World* за апрель - май 1947г, является примером использования первого подхода к проектированию. Показательным является то, что усилитель был успешно реализован многими людьми с различной квалификацией, и простая настройка позволяла достичь отличных качественных показателей. Выходной каскад усилителя был реализован на триодах, использовался качественный выходной трансформатор. Для повышения качества работы усилитель охвачен петлей общей отрицательной обратной связи. Единственным справедливо критикуемым недостатком этого усилителя является его эффективность. При выходной мощности приблизительно 15 Вт, мощность, потребляемая по анодным цепям, составляет 56 Вт, что соответствует эффективности только 27 процентов. При использовании в качестве выходных ламп тетродов эффективность может быть увеличена до 35-40 процентов, следовательно, при той же самой потребляемой мощности выходная мощность может составить 22 Вт, или можно снизить потребляемую мощность примерно на 20 Вт, не изменяя выходной. Стоит это делать или нет - вопрос проблематичный. С точки зрения проектировщика, дополнительный риск возникновения сложностей

при повторении конструкции людьми с низкой квалификацией перевешивает преимущество достижения более высокой выходной мощности. Следует также учесть, что в большинстве случаев даже существующий уровень выходной мощности не может быть использован полностью. Уменьшение потребляемой мощности и анодного напряжения незначительно отражается на стоимости усилителя, хотя это и приводит к более легким режимам работы конденсаторов и, соответственно, большей надежности схемы. Однако не имеется каких-либо доказательств, что эти понятия неадекватны.

Схемы с Распределенной нагрузкой. - В недавно изданных в Соединенных Штатах статьях^{2,3} утверждается превосходство так называемой "ультралинейной" выходной схемы, в которой выходные лампы используются как тетроды, охваченные нелинейной отрицательной обратной связью. Обратная связь вводится путем подключения экранирующей сетки выходных ламп к отводам на первичной обмотке выходного трансформатора. И утверждается, что это приводит к явному улучшению качества по сравнению с триодом, охваченным отрицательной обратной связью с той же глубиной.

Авторы, пишущие эти строки, не верят таким утверждениям. Подобная схемотехника, являющаяся основой американских требований к "ультралинейности" и высокой эффективности, фактически известна в Соединенных Штатах в течение нескольких лет. Была разработана методика расчета подобных схем, и они использовались в коммерчески выпускаемых высококачественных усилителях^{4,5}.

Основой этого подхода является распределение полного сопротивления нагрузки между элект-

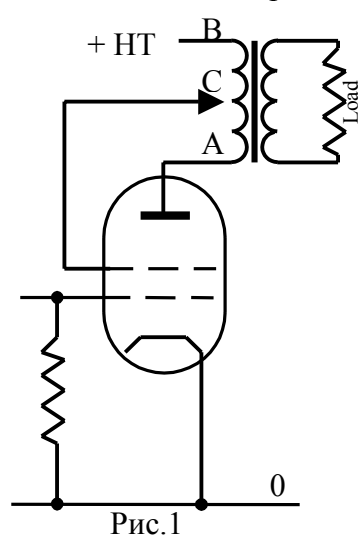
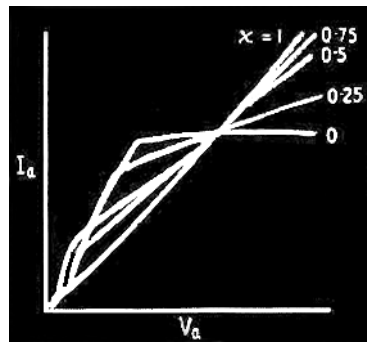


Рис. 1
Базовая схема используемая фирмой Hafler and Keroes

эффицент связи между анодом и, соответственно, обеспечить произвольное разделение приведенного сопротивления нагрузки между обоими электродами. Если отвод подключен

троды каждой выходной лампы для получения от нее оптимальных качественных показателей.

Наиболее простой вариант такой схемы показан на Рис. 1 и используется фирмой Hafler and Keroes. Схема совершенно обычна, за исключением того, что экранирующая сетка тетрода может быть соединена с отводами первичной обмотки выходного трансформатора. Таким образом, возможно задать произвольный коэффициент связи между экранирующей сеткой и



Оциллограмма показывающая изменение характера зависимости $I_a - V_a$ от тетродной к триодной при перемещении отвода С от точки В к точке А.

к точке А, то коэффициент связи равен единице, характеристики каскада соответствуют триодному включению и определяются динамическими характеристиками экранной и управляющей сеток, если отвод подключен к точке В, то коэффициент связи нулевой, и характеристики каскада соответствуют обычному тетродному включению. Если теперь перемещать точку подключения экранирующей сетки от точки В к А, будет происходить постепенное включение части нагрузки в цепь экранной сетки и постепенное изменение характеристик от тетродных в точке В к триодным в точке А.

Удобно рассматривать такой каскад, как каскад на тетроде, который охвачен отрицательной обратной связью через экранную сетку. Такой способ организации цепи обратной связи в каскаде на тетроде не является эквивалентным способу подачи напряжения обратной связи в цепь управляющей сетки. Во-первых, экранная сетка является нелинейным элементом в петле обратной связи. Во-вторых, потому что при увеличении глубины обратной связи происходит уменьшение размаха выходного напряжения вследствие отсечки анодного тока при провалах напряжения на экранной сетке, в конце концов, в пределе будут получены триодные характеристики. Соотношения, описывающие поведение такого каскада более точно, приведены в приложении.

На Рис. 2 приведены графики, иллюстрирующие влияние изменения распределения нагрузки между анодом и экранной сеткой лампы. При увеличении глубины обратной связи происходит уменьшение максимальной выходной мощности, относительного усиления и выходного сопротивления, причем, выходное сопротивление уменьшается очень быстро, потому что зависит не от относительного снижения усиления, а от его величины, которая существенно изменяется.

При постоянной выходной мощности доминирует вторая гармоника, которая медленно возрастает, пока не возникнет режим перегрузки. Так как максимальная выходная мощность прогрессивно уменьшается, то график, соответствующий уровню искажений при максимальной выходной мощности (или их процентное отношение к выходной мощности), иллюстрирует прогрессивный переход от тетродного включения к триодному.

Из Рис. 2 видно, что коэффициент гармоник немного

увеличивается, и создается впечатление нецелесообразности применения этой схемы. Похожие результаты можно получить, используя тетродные лампы и подав отрицательную обратную связь на управляющую сетку. Это приведет к аналогичному уменьшению выходного сопротивления и уменьшению коэффициента гармоник. Этот вывод совершенно справедлив для однотактного каскада.

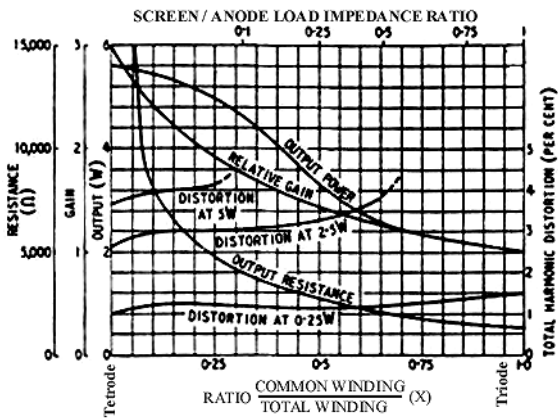


Рис. 2

Зависимости выходной мощности, относительного усиления, выходного сопротивления, и коэффициента гармоник от коэффициента распределения нагрузки для схемы показанной на Рис. 1.

Доминирующими являются вторая и четные гармоники.

На Рис. 3 показаны зависимости коэффициента гармоник при постоянной мощности от коэффициента распределения нагрузки для двухтактной схемы. Использование двухтактной схемы совершенно меняет дело за счет подавления второй гармоники. Общая форма кривых мало зависит от величины нагрузки. При увеличении числа общих витков анодной и экранной цепей примерно до 30 процентов происходит более быстрое уменьшение коэффициента гармоник, чем уменьшение усиления. Получившийся выигрыш в качестве довольно мал и может быть определен как "лучше что-то, чем ничего", однако, и он может быть потерян (возможно, даже ухудшение), если имеется заметный дисбаланс в схеме на любой частоте.

Конечно, не обязательно подключать экранную сетку непосредственно к отводу первичной обмотки выходного трансформатора, возможно подключение экранной сетки к дополнительной обмотке, сильно связанной с первичной (идеально использовать бифилярную намотку). Такое включение имеет преимущество в том, что экранное напряжение может быть не равно анодному, и лампу можно использовать в оптимальном режиме.

Схема фирмы "Acoustical". - Дальнейшее развитие ультралинейной схемы ("super-ultra-linear", возможно?) используется в модели усилителя "Q.U.A.D." (в том числе и в предыдущей модели) фирмы Acoustical. На Рис. 4 показана базовая схема этого выходного каскада, в нем часть общих витков

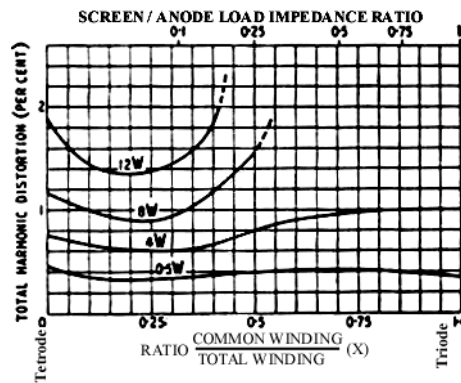


Рис. 3

Зависимости коэффициента гармоник для двухтактной схемы от коэффициента распределения нагрузки.

Доминирующими являются третья и нечетные гармоники.

анодной обмотки перенесена в цепь катода. Поскольку анодные и экранные цепи связаны между собой, эта схема аналогична показанной на Рис. 1 (активными сопротивлениями обмоток и индуктивностями рассеяния пренебрегаем). Единственным отличием схем является то, что теперь напряжение, возникающее на общих витках обмотки, вводится непосредственно в цепь управляющей сетки, как и общая отрицательная обратная связь. Это, конечно, наиболее желательный вариант реализации обратной связи по напряжению для отдельного каскада, исключая скачки усиления и не приводящий к увеличению нагрузки на предшествующий каскад.

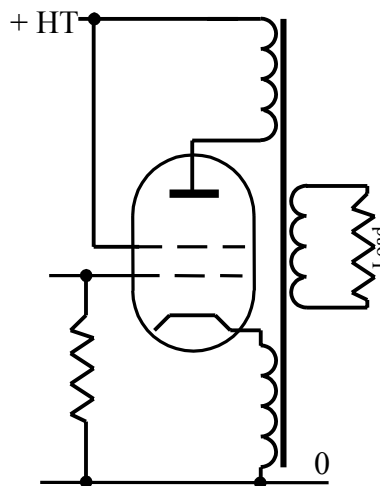


Рис. 4

Базовая схема используемая в усилителе "Q.U.A.D." фирмы Acoustical.

Так как в этом каскаде цепь экранной сетки не связана непосредственно с анодной цепью, то появляется возможность питать цепи анода и экранной сетки разными напряжениями, не применяя дополнительных обмоток на трансформаторе и исключив тем самым дополнительные паразитные параметры. Также, в этой схеме возможно выбирать оптимальный уровень пульсаций выходного напряжения источников, питающих сеточные и анодные цепи независимо. Сеточный резистор может быть в случае необходимости подключен непосредственно к катоду лампы, это приводит к повышению входного сопротивления каскада и, соответственно, к облегчению требований к предшествующему каскаду и уменьшению разделительной емкости.

Использование всех электродов лампы, таким образом, обеспечивает дополнительную гибкость при конструировании устройства. Параметры выходно-

го каскада могут быть подстроены под драйверный каскад, такой подход дает широкие возможности достичь хорошо сбалансированного уровня искажений в различных каскадах и получить оптимальный результат для всего устройства.

В выходном каскаде усилителя "Q.U.A.D." фирмы Acoustical используется две лампы типа KT66, выбранный рабочий режим обеспечивает выходную мощность 12 ватт при анодном напряжении 320 V и амплитуде возбуждающего напряжения между сетками 72 V и входное сопротивление каскада 1 мегом. Суммарное значение коэффициента нелинейных искажений выходного каскада не превышает 0.7 процента, выходное сопротивление приблизительно равно половине сопротивления нагрузки.

При одном уровне выходной мощности явно видны преимущества по сравнению с триодным включением тех же самых электронных ламп.

(1) Уровень гармоник более, чем в два раза ниже, чем при триодном включении за счет действия катодной и экранной обратных связей.

(2) Эффективность возросла с 27 до 36 процентов при меньшем примерно на 100 V анодном напряжении. Уменьшение анодного напряжения повышает надежность усилителя в целом и упрощает получение напряжения питания для предварительного усилителя, тюнера, и т.д.,

(3) Эквивалентный уровень шума достигается при большем уровне пульсаций напряжения питания.

В усилителе может быть использована общая

демпфирования считается отношение: сопротивление нагрузки/выходное сопротивление, иногда называемое коэффициентом демпфирования, масштаб которого становится фактически бессмысленным при использовании ламп с высоким выходным сопротивлением. Общей практикой является стремление получить максимально возможное значение коэффициента демпфирования, который станет равным бесконечности при нулевом выходном сопротивлении. Нулевое выходное сопротивление - условная величина, которая, в конечном счете, добавится к сопротивлению звуковой катушки.

Независимо от схемотехники выходного каскада, используя положительную обратную связь по току, можно получить любое значение выходного сопротивления, как равное нулю, так и отрицательное. Однако необходимо заметить, что оптимальное значение выходного сопротивления зависит от используемого громкоговорителя и особенно от его акустического оформления. Из этого следует, что доктрина "чем больше коэффициент демпфирования, тем лучше," отнюдь не всегда обеспечивает лучшее качество звука.

Сравнение выходных каскадов. - Для подведения итогов и удобства анализа достоинств и недостатков в Таблице 1 приведены относительные параметры различных типов выходных каскадов. Как Вы видите, отличие в качественных показателях выходного каскада на триоде и тетродного выходного каскада с распределенной нагрузкой (особенно с катодной связью) не велики, кроме эффективности, которая

Таблица 1

Параметр	Триодное включение тетродов (Класс А)	Тетроды (Класс А)	Тетродное включение с распределением нагрузки между анодом и экранной сеткой (Оптимум)	Тетродное включение с распределением нагрузки между анодом, экранной сеткой и катодом (Включение Q.U.A.D.)
Эффективность %	27	38	36	36
Относительная выходная мощность	1	1.4	1.35	1.35
Относительные искажения при отсутствии тока сетки	1	2	1.5	0.5
Сопротивление нагрузки Выходное сопротивление	2 - 4	0.05 - 0.1	0.5 - 1	2

петля отрицательной обратной связи. Чтобы получить уровень гармоник, равный достигнутому в усилителе на триодах (усилитель упомянут выше), необходимая глубина обратной связи на 8db меньше. Это обеспечивает хороший запас устойчивости и уменьшает эффект перегрузки из-за наличия общей петли обратной связи и задержек в ней.

Теперь остается рассмотреть вопрос выходного сопротивления, который имеет некоторую неоднозначность, приводящую к непониманию. Возможно, это связано с тем, что мерой эффективности

существенно выше у каскада на тетроде.

Для избежания недоразумений необходимо отметить, что подобные качественные показатели достижимы и в обычных тетродных каскадах, охваченных отрицательной обратной связью соответствующей глубины (предпочтительно, многоконтурной, для устранения проблем с устойчивостью). Преимущество каскадов с распределенной нагрузкой заключается в том, что выходной каскад уже охвачен глубокой местной отрицательной обратной связью,

и проектирование остальной части усилителя упрощается.

Также снимаются проблемы, связанные с устойчивостью усилителя, охваченного глубокой общей отрицательной обратной связью, так как можно вообще избежать ее применения.

обратной связью, так как можно вообще избежать ее применения.

Практические Трудности. - Пока мы только рассмотрели идеальный случай. Однако реальный трансформатор не обеспечивает стопроцентной магнитной связи между обмотками; наличие поля рассеяния приводит к появлению в полной схеме замещения идуктивностей рассеяния, также следует учесть собственные емкости обмоток. Влияние паразитных параметров трансформатора приводит к отклонению реальных параметров схемы от расчетных и, конечно, в худшую сторону. Паразитные параметры в области высоких частот, где они сказываются наиболее сильно, могут привести к реверсированию знака обратной связи и возникновению автогенерации.

В менее неблагоприятном случае могут возникнуть пики и провалы частотной характеристики, также может возникать "подвозбуждение" усилителя в переходных режимах.

Этих серьезных дефектов можно избежать только тщательно проектируя выходной трансформатор и осуществляя жесткий контроль за изготовлением трансформатора. Поскольку, даже трансформатор, соответствующий номинальным параметрам, может иметь широкий разброс паразитных параметров из-за незначительных изменений в качестве и толщине изоляции и (или) в расположении обмоток, что приведет к резкому ухудшению эксплуатационных показателей в области высоких частот.

Проектировщик, имеющий полный контроль на всех этапах производства, может обеспечить контроль за качеством материалов и тем, чтобы конструктор трансформатора не отступал от заданной спецификации. В случае внесения изменений, он может провести необходимые измерения и сделать соответствующую коррекцию на ранних стадиях работы. Поэтому он может использовать описанные выше схемы, не беспокоясь о том, что трансформатор изготовлен специалистами низкой квалификации или у них отсутствуют необходимые средства оценки качества продукции. В результате он получит преимущества, описанные выше.

Конструктору, имеющему ограниченные возможности, нельзя рекомендовать описанную выше схему, хотя она и безошибочна. В частности, он должен придерживаться при проектировании требований к минимальному числу магнитосвязанных цепей в выходном трансформаторе, так как сложность изготовления и возможность ошибок быстро возрастает

при увеличении числа обмоток, которые должны иметь хорошую магнитную связь.

Принимая во внимание написанное выше, ясно, что существует множество решений проблемы проектирования первоклассного усилителя, однако, нельзя сказать, что существует какое-то лучшее решение. Каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому каждый проектировщик выбирает то, которое в наибольшей степени соответствует его потребностям. Соответствие усилителя понятию "высокое качество" не определяется видом его схемы. Сама по себе схема не обладает какими-либо собственными магическими свойствами, а просто является инструментальным средством для достижения желаемого результата, и различные проектировщики, ставя перед собой цель достижения наилучшего качества, могут достигнуть идентичных результатов различными средствами.

Приложение

Если

$$\mu = \frac{E_a}{E_g} = g_m R_a, \quad m = \frac{E_x}{E_g}$$

$$\frac{\mu}{m} = \frac{E_a}{E_x}$$

x = доля выходного напряжения поступающего на экранирующую сетку.

E = выходное напряжение на нагрузке R_L , вызванное действием входного напряжения e .

Пренебрегаем током экранирующей сетки в нагрузке, так как в типичных случаях он не превышает 10% тока анода.

Ток в нагрузке вызванный действием e

$$= e \frac{\mu}{R_a + R_L}$$

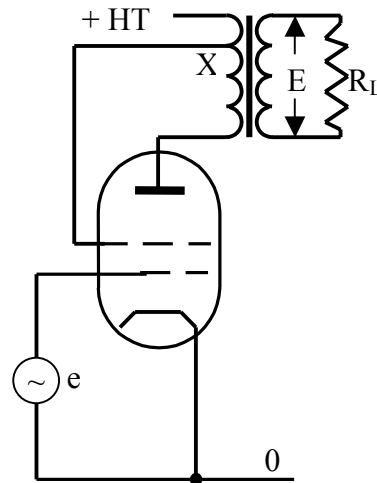
Ток в нагрузке вызванный действием $x E$

$$= -x E \frac{\mu}{m(R_a + R_L)}$$

Напряжение на нагрузке

$$E = \left\{ e \frac{\mu}{R_a + R_L} - x E \frac{\mu}{m(R_a + R_L)} \right\} R_L,$$

$$e \frac{\mu R_L}{R_a} = E \left(1 + x \frac{\mu R_L}{m R_a} \right).$$



Усиление -

$$\text{Gain} = \frac{E}{e} = \frac{\frac{\mu R_L}{R_a + R_L}}{1 + x \frac{\mu}{m} \frac{R_a}{R_a + R_L}}$$

Когда $x=0$,

$$\frac{E}{e} = \frac{\mu R_L}{R_a + R_L}$$

Когда $x=1$,

$$\frac{E}{e} = \frac{\frac{\mu R_L}{R_a + R_L}}{1 + \frac{\mu}{m} \left(\frac{R_a}{R_a + R_L} \right)}$$

Выходное сопротивление.

Если $R_L \rightarrow \infty$, тогда $\frac{R_L}{R_a + R_L} \rightarrow 1$.

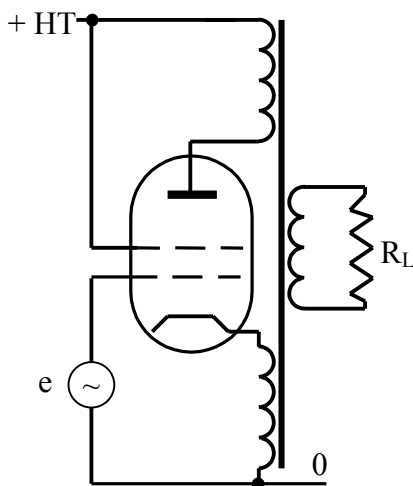
Усиление при $(x=0)=\mu$

$$\text{Gain}(x) = \frac{\mu}{1 + x \frac{\mu}{m}} = \mu'$$

Выходное сопротивление $(x=0) = \frac{\mu}{g_m}$.

Выходное сопротивление = $\frac{\mu'}{g_m} = \frac{\mu}{g_m \left(1 + x \frac{\mu}{m} \right)}$.

Схема используемая в усилителе "Q.U.A.D."



Усиление равно

$$\frac{\mu \frac{R_L}{R_a + R_L}}{1 + x \frac{\mu}{m} \frac{R_L}{R_a + R_L}} = A$$

Усиление усилителя охваченного обратной связью

$$\frac{A}{1 + xA}$$

$$\text{Gain} = \frac{\frac{\mu \frac{R_L}{R_a + R_L}}{1 + x \frac{\mu}{m} \frac{R_L}{R_a + R_L}}}{1 + x \frac{\mu \frac{R_L}{R_a + R_L}}{1 + x \frac{\mu}{m} \frac{R_L}{R_a + R_L}}}$$

Выходное сопротивление усилителя охваченного обратной связью

$$= \frac{\text{Output resistance without feedback}}{1 + x\mu}$$

Выходное сопротивление = $\frac{\frac{\mu}{g_m \left(1 + x \frac{\mu}{m} \right)}}{1 + x \frac{\mu}{1 + x \frac{\mu}{m}}}$.

Литература

- ¹ "Design for a High-Quality amplifier", By D. T. N. Williamson, Wireless Word, April-May, 1947.
- ² Hafler and Keroes: "Ultra-linear amplifier", Audio Engineering, November, 1951.
- ³ Hafler and Keroes "Ultra-linear operation of the Williamson amplifier", Audio Engineering, June 1952.
- ⁴ First introduced in 1945; see advertisement of the Acoustical Manufacturing Company, in Wireless Word, July, 1947.
- ⁵ Moir: "Review of British Amplifiers", FM-TV, October, 1951.