

Рылся в старых дисках и наткнулся на папку с файлами 10-15-летней давности.

Как-то сразу вспомнилось, насколько по-другому тогда все было: своих знаний - около нуля, из литературы – старые журналы да читальный зал библиотеки, симулятор - "воркбенч 5.xx" с офонарными моделями, интернет - редкое удовольствие, разве что датациты на детали скачать. Народ рассказывают про "страшную обратную связь" и "ужасные ОУ", причем эти опасения вполне можно понять, когда видишь массу любительских конструкций на К157УД2 и усилители, отлично ловящие КВ станции. В распоряжении - старые советские динамики да новые полубракованные детали, импорт появился, но цены..

Вот примерно тогда я и нарисовал предлагаемую схемку. Сейчас довольно прикольно смотрится тогдашняя наивная самонадеянность, но все мы когда-то были менее опытными.

Тогда я довольно серьезно относился к предлагаемой конструкции, закупил все детали, разработал плату, но жизнь распорядилась иначе.. Надеялся, что схемку доделает кто из приятелей, даже набросал описание (в приведенном тексте я удалил большую часть), но не сложилось.

В данной схемке есть пара особенностей, на которые я так и не наткнулся в других конструкциях. Возможно, они могут показаться кому-то любопытными.

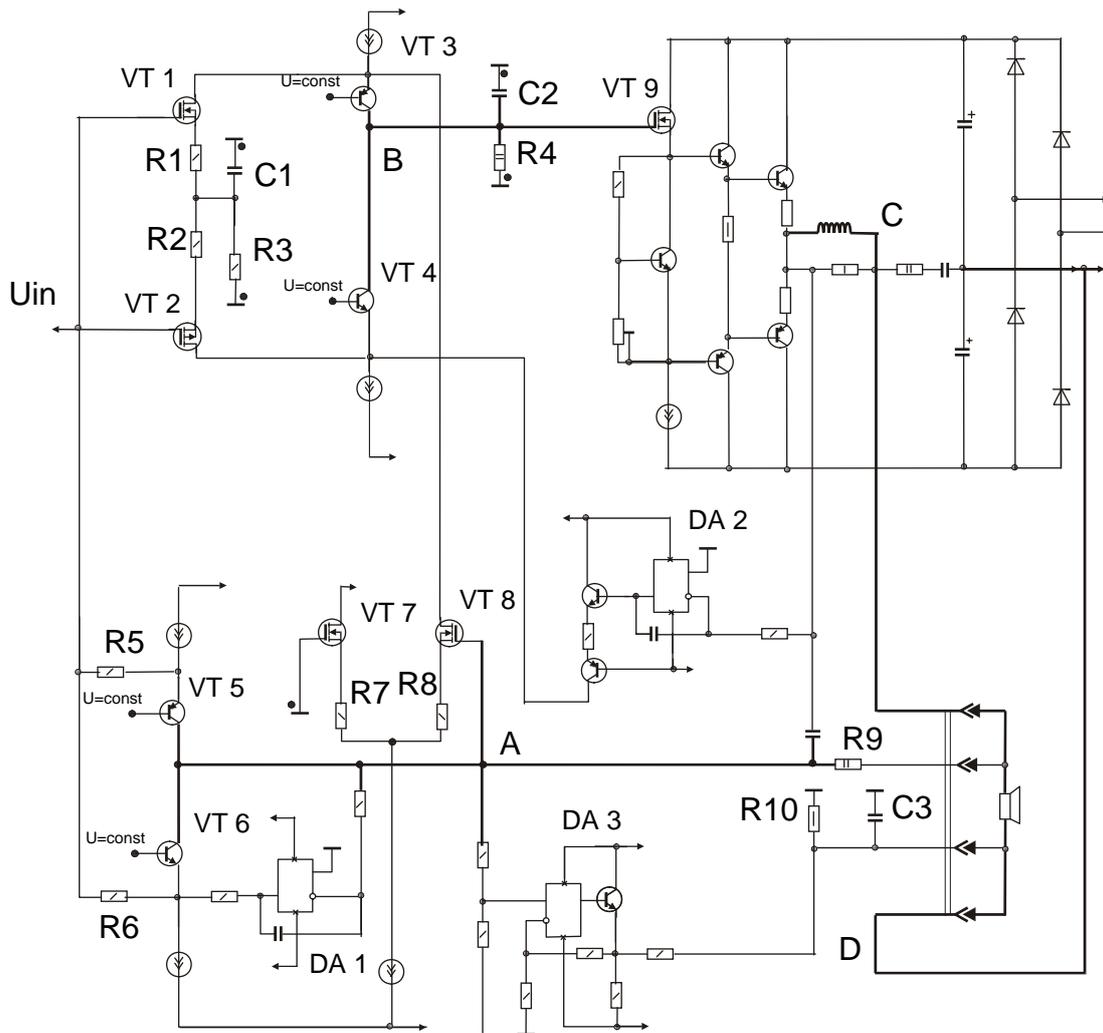
Совсем коротко, это безоосный усилитель охваченный неглубокой ООС через селектор искажений.

Опционно, помимо обратной связи, схема может быть дополнена еще и прямой связью, для которой источник питания оказывается "плавающим".

В соответствии с принятой концепцией, сведено к минимуму использование ОУ и биполярных транзисторов там, где они могли-бы нагадить. Максимально снижены усиления всех каскадов (с разомкнутой ООС усиление по основному входу -27, по ООСному - 100), петлевое усиление постоянно в полосе рабочих частот.

Претензии, вопросы по выбору деталей, замечания об откровенной лажевости там или тут - не принимаются :), это все равно, что детсадовские рисунки на предмет искаженной перспективы стебать :). Но возможно, тут и помимо этого будет, что обсудить. Если нет - ну считайте, что я просто воспоминаниями поделился.

Принцип работы усилителя иллюстрирует упрощенная схема:



Основной усилитель, путь сигнала.

Проследим путь входного сигнала. Попадая на затворы полевиков VT1 и VT2, входное напряжение повторяется на резисторах R1, R2, R3, и вызывает в их цепи переменный ток $I = U_{in}/(R1 \parallel R2 + R3)$, который после VT3, VT4 наводит на R4 переменное напряжение большой амплитуды. Коэффициент усиления на НЧ $K = R4/(R1 \parallel R2 + R3)$. Конденсатор C2 нужен, с одной стороны, чтобы нейтрализовать колебания коллекторной емкости VT3, VT4 и входной емкости VT9, с другой стороны, вместе с R4 он формирует нужную для ООС АЧХ – падение усиления с 30кГц. Можно отметить, что для минимизации фазового сдвига в звуковом диапазоне нужна более широкая полоса, скажем 200 кГц. Для поднятия усиления на этих частотах и поставлен C1. Для равномерного усиления в широкой полосе постоянные времени R3C1 и R4C2 должны быть равны. Конечно, чтоб получить нужную амплитуду на R4, достаточно было бы эмитеры VT3 и VT4 просто подключить через резисторы к источнику сигнала. Назначение транзисторов VT1 и VT2 - переворачивать фазу сигнала, это требуется для работы ООС. VT9 и следующие за ним транзисторы – усилитель тока. Его особенности – высокое входное сопротивление и очень небольшая (десяток pF) входная емкость, которая «теряется» на фоне конденсатора C2 в 100 pF. Выходное сопротивление повторителя VT9 при выбранном токе покоя составляет ~ 2 Ома, что намного меньше входного сопротивления эмиттерного повторителя (~ 8 кОм), таким образом, с запасом выполняется условие минимизации искажений вызванных колебаниями входного сопротивления выходных каскадов (от нестабильности их усиления). Но главное, малость выходного

сопротивления каскада на VT9 требуется для быстрой перезарядки коллекторных емкостей выходных транзисторов, благодаря чему такой усилитель тока имеет широкую полосу пропускания и может обеспечить высокую скорость нарастания выходного напряжения. Транзисторы усилителя тока (кроме выходных) работают в режиме класса А (ток покоя выбран с учетом как номинального тока в нагрузке, так и потребностей на реактивность потребителя и на быстрый перезаряд емкостей транзисторов).

Данная часть по сути представляет собой самостоятельный усилитель мощности с довольно приличными характеристиками.

Полоса частот до 200 kHz;

Искажения (определяются в основном выходным каскадом) можно оценить как $\sim 0.5\%$;

Выходное сопротивление 0.05 Ом определяется эмиттерными резисторами выходников.

За исключением коэффициента искажений, все остальное довольно сносно.

Линеаризация основного усилителя с помощью ООС

Такой усилитель можно линеаризовывать, например общей обратной связью. Тут есть несколько тонкостей.

1) Входной каскад. Рассмотрим усилитель с $K = 1000$. Чтоб обеспечить на выходе 25V на входе должно действовать 25 mV. Искажения входного каскада ничем не сглаживаются, а обеспечить его приемлемую линейность (например $\sim 0.0001\%$) и одновременно высокое усиление даже при таком размахе (25 mV) весьма проблематично. Пусть усилитель построен так (коэффициент усиления задан обратной связью), что его нормальное выходное напряжение при входном 1 V составляет 25 V. Теперь представим себе, что на вход усилителя подан 1 V, а на выходе независимым образом (какими-то другими цепями) создано 24 V. При таких условиях все, что остается на долю усилителя - скомпенсировать $25 - 24 = 1$ V напряжения ошибки. Для этого ему достаточно 1 mV входе. Нужно ли говорить о том, что искажения входного каскада при 1 mV много меньше, чем при 25 mV.

Именно такое включение (как селектор искажений) применено в данной схеме. Верхняя часть (основной усилитель) создает на выходе – в точке С – противофазное напряжение в $K=27$ раз больше чем на входе.

Теперь рассмотрим точку А. К ней с стороны входа через резисторы R5, R6 и транзисторы VT5, VT6 приходит токовый входной сигнал, а через резистор R9 противофазный сигнал с выхода. Если отношение $R9/(R5 \parallel R6)$ равно $K=27$, то напряжение в точке А всегда будет равно нулю.

К этой точке подключены полевые транзисторы дифференциального каскада VT7, VT8. В реальности коэффициенты передачи основного усилителя и цепей обратной связи могут различаться, скажем на 10% - реальная величина. Дополнительно, в точке А действуют искажения с выхода усилителя, ради компенсации которых все это, собственно, и затевается. Обратная связь будет стремиться уменьшить сигнал в этой точке. Глубина ООС на звуковых частотах выбрана равной 100, так что все ослабляется примерно в 100 раз. За счет того, что напряжение ошибки существенно меньше, чем напряжение которое обычно необходимо для раскачки усилителя, дифференциальный каскад работает в сравнительно легком режиме, требования к нему облегчаются, поэтому здесь применены полевые транзисторы, от которых можно ожидать короткого быстрозатухающего спектра искажений.

2) Избыточное усиление. Как уже говорилось, коэффициент ослабления помех при замкнутой ООС определяется избыточным (петлевым) усилением. Так для ослабления искажений в 100 раз этот усилитель должен был бы иметь усиление $27 * 100 = 2700$. В реальных усилителях подавления искажений в 100 раз обычно недостаточно, и коэффициент усиления приходится делать даже еще больше. В этой схеме на пути сигнала стоят транзисторы VT5 и VT6. Такой ОБ каскад имеет весьма высокое выходное сопротивление. Как это работает: сигнал со входа усилителя приходит в точку А

беспрепятственно, для него этих транзисторов как бы не существует, коэффициент усиления определяется, как и обычно, отношением сопротивлений выходного и входного резисторов – $R9/(R5 \parallel R6)$. Но сигнал помех не проходит дальше транзисторов VT5 и VT6 и имеет в точке А такую же величину, как и на выходе усилителя, в точке С. То есть цепь ООС не ослабляет сигнал искажений, усилитель охвачен 100%-ной ООС. В таком случае общее усиление схемы со входа дифкаскада и является петлевым усилением, равным 100, примерно во столько же раз подавляются и искажения. Такой небольшой коэффициент усиления несложно получить - дифференциальный усилитель нагружен прямо на усилитель напряжения. Малое число каскадов позволяет легко получить широкую полосу пропускания, а малое усиление – ничтожные искажения. Кроме того, малое усиление обуславливает малую чувствительность к наводкам, снижает требования к развязке каскадов по питанию, паразитным связям и экранировке.

От усилителя с подключенной цепью ООС уже вполне можно ожидать искажений на уровне тысячных процента. Попутно обеспечивется стабильный коэффициент усиления.

Линеаризация с помощью прямой связи

В принципе, этим можно было бы этим и ограничиться, но придумалось как можно попытаться уменьшить искажения минимум раз в 10.

Точка А содержит все искажения, которые есть на выходе. Уменьшенные обратной связью до тысячных процента, они, тем не менее, все там. Если сигнал ошибки, взятый из этой точки, вычесть из выходного сигнала на нагрузке (прямая связь), то можно добиться взаимокompенсации искажений. Вопрос только возможно ли это реализовать не слишком сложными средствами, и если да, то как именно.

Теперь немного внимания. Всегда считается, что выходное напряжение – это напряжение в точке С, именно с этой точки снимается сигнал обратной связи, именно здесь – обычно относительно «земли» - минимизируются искажения. А обязательно ли подключать нагрузку к «земле»? Из схемы видно, что выходные каскады (усилитель тока) напрямую связаны с землей только в одном месте – через резистор R10. Обычно нагрузку заземляют напрямую, но меняет ли чтонибудь ненулевая величина резистора R10? Рассмотрим падение напряжения на нем (пока без учета DA3) - оно определяется проходящим через него током, а этот ток практически равен нулю! В самом деле, через этот резистор течет только ток затвора VT9, у которого отлична от нуля только емкостная составляющая (на частотах выше сотен кГц), чтоб выключить эту составляющую, ее можно заземлить через конденсатор С3. Возможны еще токи через R9, но в силу того, что второй вывод R9 цепью ООС поддерживается при потенциале близком к нулевому, они не играют существенной роли. То есть в нормальной ситуации напряжение на R10 – ноль, а если его сделать чуть отличным от нуля, это ничего не изменит в работе усилителя. Но выходное напряжение усилителя – это напряжение в точке С минус напряжение на R10 - в точке D. То есть, если в точку D подавать напряжение, оно будет вычитаться из выходного. Мощность для такого управления нужна ничтожная, а эффект может оказаться существенным. Поскольку амплитуда напряжения в этой точке небольшая ~ несколько десятков милливольт, вполне можно применить обычный ОУ. Сигнал для ОУ отвязывается от точки А делителем напряжения, чтобы исключить влияние входных цепей ОУ на точку А. Далее сигнал ошибки усиливается и через еще один делитель подает на R10. Делители зашунтированы конденсаторами.

Предполагается, что в звуковой полосе вполне реально добиться коэффициента передачи искажений от точки А к D на уровне +/-5 %, что означает 20 кратное подавление сигнала ошибки на нагрузке. Таким образом, суммарные искажения усилителя мощности могут составить величину менее тысячной процента.

Входной повторитель

Важно доставить входной сигнал в точку А без искажений, Каскад на VT5, VT6 (с дополнительными элементами) по оценкам должен иметь искажения менее тысячной процента, не сильно ухудшая параметры схемы. К сожалению, такой каскад имеет малое входное сопротивление (1 кОм) и требует применения буфера на входе. Ставить нелюбимые многими ОУ не очень хотелось. Поэтому буфер сделан на полевых транзисторах. Это простой повторитель, но за счет выбора транзисторов и режима работы, искажения должны быть меньше тысячной процента, состоя преимущественно из второй-третьей гармоник. Для разгрузки транзисторов применено параллельное включение двух приборов; а за счет их разного типа проводимости должна дополнительно ослабится вторая гармоника.

Итоговые искажения

Подытаживая, можно сказать, что без измерений оценить искажения усилителя довольно сложно, но ориентироваться можно на величины около тысячной процента, что можно считать сносным параметром. Но основное, по моему мнению, не это, а «стабильность» искажений, таковыми они должны быть на верхней рабочей частоте при максимальной мощности. Причем малое усиление, малочувствительность к помехам, запас по фазе в цепи ООС минимум в 90 °, невозможность режимов ограничения (дополнительный ограничитель на входе), и т.д. исключают ситуацию, когда усилитель с 0.01% на синусоидальном сигнале, на реальном музыкальном выдает 20%. Обращаю внимание, референсная точка А имеет потенциал стремящийся к нулю, и этот потенциал есть не что иное, как разность между выходным и входным сигналом, то есть упомянутая величина это не коэффициент гармоник, а разница между выходным и входным сигналом. Фактически, выходной сигнал с точностью до тысячной процента – это усиленная копия входного, а не нечто, что имеет с ним определенную степень корреляции.

Некоторые детали конструкции

Среди особенностей можно отметить отсутствие токов звуковой частоты через земляной провод (только локальные контура), что существенно облегчает разводку земель, поскольку усилитель можно сделать нечувствительным к помехам и наводкам на длинные участки данного провода.

На итоговой схеме также показан индикатор нелинейных искажений, срабатывающий при сигнале искажений более 0.7 V, что соответствует примерно 2 % искажений. При нормальной эксплуатации этот светодиод не должен загораться никогда, но кто знает.. Также этот светодиод должен индицировать неправильное подключение АС. Кроме того, если отключить предварительное ограничение пиков сигнала, по миганию светодиода можно будет установить допустимую мощность в нагрузке для конкретной фонограммы. Еще можно упомянуть операционные усилители поддержания нулевого потенциала на выходе усилителя и в точке А, тут особенностей нет.

Маленькое замечание. Поскольку питание выходных каскадо не связано напрямую с «землей», приобретает некоторое значение емкость между «землей» и вторичными обмотками и вообще всеми цепями силовых токов, эта емкость параллельна С43 и желательно, чтоб она была поменьше. Поэтому стоит между вторичными обмотками и другими проводящими частями силового трансформатора сделать некоторый зазор, больше обычного, например намотать на 1 мм бумаги. Также нужно удалить на некоторое расстояние от шасси конденсаторы фильтра и радиаторы выходных транзисторов.