

## БезОСный УМЗЧ

На протяжении всего времени развития схемотехники усилителей звуковой частоты (УЗЧ) создано много направлений, порой противоположных друг другу: УЗЧ с отрицательным выходным сопротивлением с помощью ПОС по току выхода, ИТУН с бесконечно высоким выходным сопротивлением; безОСные усилители, усилители с глубокими общими отрицательными обратными связями (ОООС); усилители переменного тока, усилители постоянного тока (УПТ) и многое другое. Под каждое из направлений подведены теории согласно которым именно это направление единственно правильное. В том числе и утверждение, что местные ОС неэффективны и основной упор надо делать на ОООС. Каждое из направлений находит как поклонников так и противников. До недавнего времени я тоже был уверен что УМЗЧ должен строиться как УПТ.

Для объяснения «феномена» транзисторного звучания в каком только углу не искали «черную кошку»: и в тепловых искажениях; и в искажениях типа «ступенька» (но давно уже никто не делает усилители в чистом классе В, а в ламповых усилителях они тоже есть из-за петли гистерезиса трансформаторов), и в жестком клипировании (но запас по питанию «выше крыши» и никакого клипирования нет и в помине, и звука тоже), и в росте искажений с ростом частоты, и в отсутствии роста искажений с ростом выходного напряжения вплоть до клипирования (в ламповых же усилителях происходит плавное нарастание искажений). Очередной миф. Можно подумать что приращение искажений делает громкую музыку лучше. Просто в ламповой схемотехнике с этим характером искажений невозможно эффективно бороться.

Меня постоянно беспокоил вопрос, почему глубокоОСные транзисторные усилители с прекрасными техническими характеристиками звучат более «мертво», более отстраненно, чем ламповые усилители с более скромными характеристиками. Даже простые однотактные транзисторные усилители с неглубокой ООС звучат намного интересней чем глубокоОСные. Этой разнице я поразился когда мой сын будучи в шестом классе собрал усилитель [1].

Так что же на самом деле требуется от УМЗЧ?, достаточно ли того чтобы он сверхлинейно точно усиливал сигнал со входа до выходных клемм? Оказывается что этого недостаточно, отсюда и разочарование поджидающее многих разработчиков.

В пору моей молодости одним из направлений улучшения звука монофонических ламповых усилителей было использование разного рода ревербераторов. И действительно с помощью таких устройств можно было добиться достаточно привлекательного объемного звучания. Надо сказать что многие лампы наряду с микрофонным эффектом сами по себе в силу конструктивных особенностей создают небольшой эффект реверберации, что тоже делает звучание усилителей на таких лампах более интересным.

Несмотря на то что частота основных гармоник человеческого голоса и музыкальных инструментов едва превышает 4 кГц, спектр их гармоник лежит далеко за пределами звукового диапазона. При записи они неизбежно теряются. В результате как бы точно не воспроизводил электрический сигнал глубокоОСный транзисторный УМЗЧ звучание получается непривлекательным, по выражению бывшего звукорежиссера Песняров, Верасов Андрея Медведко звук получается «бестелесным». Очевидно ламповые усилители, хотя и вносят сравнительно большие искажения, обладая благоприятным спектром гармоник и в некоторой степени эффектом реверберации в большей степени приближают «консервированную» музыку к первоначальному виду. Известно что низшие гармоники (до пятой) отвечают за ламповую окраску звука: вторая гармоника придает звуку «бархатность» и «теплоту», третья - «прозрачность», «воздушность» и «яркость», а нечетные гармоники начиная с седьмой и выше являются диссонирующими - неприятны для слуха. Не удивительно, что транзисторный усилитель [2] с вносимыми искажениями более 3-х процентов (преимущественно 3-я гармоника) также нашел восторженных поклонников. Однако красота звука и естественность звучания совершенно разные понятия между которыми часто пытаются поставить знак равенства.

Что же касается усилителей с токовым выходом а также с регулируемым выходным

сопротивлением, то исследования [3] показали, что такие усилители очень капризны к АС, на ряде АС увеличение выходного сопротивления УМЗЧ никак не проявляется, а на ряде АС вместо улучшения качества звучания приводит к характерному «бубнению». А улучшение в ряде случаев можно рассматривать как благоприятное изменение (исправление) АЧХ для конкретной АС. К такому же результату приводит и аналогичное исправление АЧХ с помощью многополосного эквалайзера. На самом деле комплексное сопротивление АС формируется целым букетом свойств громкоговорителей (как механических так и электрических), акустического оформления, разделительных фильтров, акустических проводов и т. д., которое в области НЧ может просаживаться в 5-7 раз, а по некоторым данным даже до отрицательного значения, особенно на записях с глубокой компрессией, где НЧ сигналы представляют собой практически меандр и таким усилителям не по зубам справляться с его капризами. Из-за высокого выходного сопротивления такие усилители не могут противостоять противоЭДС. А так как выходное сопротивление формируется с помощью ОС по току выхода, который существенно сдвинут по фазе по отношению к входному сигналу, то им свойственны повышенные интермодуляционные искажения, особенно на частотах ниже 1 кГц.

Более того ИТУН вообще не работоспособен на частоте резонанса НЧ-головки где ее сопротивление может составлять от 20...30 Ом до 150 Ом и более. Но даже для 30 Ом 100 Ватный усилитель должен иметь питание не менее  $\pm 220$  В ( $7A \times 30 \text{ Ом} + 10 \text{ В} = 220 \text{ В}$ ) для усиления без клипирования, что нереально реализовать. Где 7А — пиковое значение тока на нагрузке 4 Ома при выходной мощности 100 Вт, 10 В - запас по напряжению питания. Это один из многих мифов в звукотехнике, созданный Хауксфордом около 25-ти лет назад и регулярно подогреваемый в нашей печати. Кто следит за публикациями — тот знает.

О взаимодействии УМЗЧ и акустики вопрос периодически всплывает в печати, но оставляет после себя больше вопросов чем ответов.

Мощные сигналы противоЭДС за счет падения напряжения на акустических проводах образуют очень большие искажения. С этим явлением столкнулся при разработке УМЗЧ ВВ [4] Н.Сухов и был вынужден использовать компенсатор сопротивления проводов [5]. Аналогичное решение под названием “Sigma drive system” использует и японская фирма “Kenwood” в профессиональных мониторах, а также многие другие фирмы. Однако это решение не годится для безОСных УМЗЧ.

Чувствительности ВК к воздействию напряжения со стороны выхода (читай противоЭДС) посвящена работа [6], в которой показан один из способов исследования ВК предложенный около 30-ти лет назад в Японии (University of Musashi, Tokyo). Более подробно о многоликих искажениях возникающих при взаимодействии усилителя с реальными АС описано в работе [7].

Меня давно интересовал феномен «транзисторного звучания», который я связывал с глубокой ООС и влиянием на нее противоЭДС. Первые попытки отказа от ООС я предпринимал еще более 20-ти лет назад, но тогда у меня не было ни АС высокого разрешения, ни соответствующих фонограмм, чтобы в полной мере оценить преимущества такого решения.

Один из разработчиков Hi-End аппаратуры В.Хименко по поводу ООС высказался так: «Без ОС звук начинает быть живым, динамичным..., начинает дышать через вашу систему, ... с самого начала наши транзисторные и ламповые усилители имеют ноль обратной связи. ...обратной связи просто не должно быть. Почему? Потому что начинается регенерация сигнала», [8].

На протяжении последних пяти лет я занимался исследованиями свойств отдельных узлов УМЗЧ с целью максимально эффективного их использования в безОСных УМЗЧ. Результаты этих работ опубликованы в Радиомире за 2011, 2012 годы. На базе этих исследований был предложен ряд безОСных драйверов и выходных каскадов пригодных для безОСных УМЗЧ, [9]-[11]. В процессе исследований корректора Хауксфорда я обнаружил, что при отклонении от точной настройки выходное сопротивление ВК может быть как положительным, так и отрицательным. При точной же настройке корректора ВК имеет практически нулевое выходное сопротивление и ничтожно малые искажения.

Но это всего лишь разрозненные фрагменты мозаичной картины. Как оказалось чтобы получить картину в целом недостаточно просто «сложить вместе» драйвер и ВК как это сделано в [12], [13]. Чтобы довести начатую работу до конца мне не хватало акустики соответствующего разрешения, времени и определенного опыта.

Так случилось, что во второй половине прошлого года я познакомился через интернет с Андреем Валерьевичем Медведко. Оказалось что он тоже активный радиолюбитель и к тому же меломан. До нашего знакомства он прошел большой путь от ламповых до транзисторных усилителей. Из транзисторных усилителей смакетировал и отслушал практически все что было доступно в печати, в том числе патенты Алешина, схемы Нельсона Пэсса, разные виды ЭМОС и многое другое, всего не перечесать. Однако патенты не дали обещанного результата, ни одно из решений его не «зацепило». В результате на последнем этапе он остановился на гибридных усилителях, в которых по его мнению соединено лучшее от ламповой и транзисторной схемотехники. На работу он «зол», чрезвычайно требователен к себе и к тому что делает, в том числе и к людям с которыми работает (прочувствовал на себе).

В разговоре выяснилось что он тщетно пытается найти альтернативу ламповому драйверу, так как с капризами ламп надоело возиться. Не долго думая я предложил ему двухтактный ломаный каскод. Не прошло и суток как получаю от него сообщение: *«Александр, привет! Собрал один канал твоего драйвера, из статьи по домашнему кинотеатру [14], без дополнительного каскода, самый простой вариант. Промерил. Искажения не обнаружены, т.е. только генератора ГЗ-118, Кз на 1 кГц в районе 0.005%, на 20кГц повторил гармоники генератора!...Можно сказать СУПЕР! Завтра соберу второй канал, отслушаю с моим ВК на 2SK1530, 2SJ201 и напишу о результате. Вначале был, откровенно говоря, скептически настроен... Сомневался, что он будет так работать, ведь всего два транзистора в плече.., а как здорово. В общем буду слушать».*

На следующий день он уже активно работал со звуком. Однако на первых порах, несмотря на ничтожно малые искажения, звук его разочаровал. Тогда он увеличил эмиттерные резисторы и уменьшил глубину ООС подобрав резистор ОС так чтобы сохранить коэффициент передачи 30 дБ. И звук неузнаваемо преобразился. Вот впечатления: *«Отслушал! Просто СССРулер!!!! 10 баллов по пятибалльной системе! Теперь всё буду причёсывать... Все твои пожелания учту. Просто слов нет! Многие статьи, которые ты мне прислал, я читал и как-то не обратил должного внимания... Держался за лампы только из-за УН. Теперь точка! Самый острый вопрос для меня закрыт. Только на твёрдых элементах. Верю, можно достичь должного звука. Вот нам живой пример, гармоник нет, а появилась глубина, звук свободный, не напряжённый. Хотя и с ламповым драйвером не напряжённый звук, но с твоим глубина больше и звук чище. Мне урок будет. Ещё раз тебе спасибо и низкий поклон».*

Как потом выяснилось УМЗЧ с этим драйвером переиграл ламповые и гибридные усилители которые были у Андрея в качестве эталонов, а также известные усилители Ульянова и Никитина, которые приносили для сравнения друзья.

Что же касается лампового драйвера для УМЗЧ, то Е.Карпов в работе «Спектры II» (можно найти в интернете) показал в своих исследованиях, что только использование каскодного **транзисторного** генератора тока в качестве нагрузки позволяет приблизить параметры драйверов на отдельных лампах к параметрам рассмотренного двухтактного ломаного каскода.

Возвращаясь к ИТУН приведу впечатления А.Медведко: *«С ИТУНом в своё время я повозился со всеми вариантами... ты даже не представляешь сколько всего перепробовано. Даже подсел на него в многополосных вариантах, для активных АС... но всё это не то. Есть своя специфика звука, да, то что пишут, имеет место, но это не истина. Мы подошли к ней вплотную. И это так. Я абсолютно уверен!»*

При следующем разговоре Андрей рассказал мне о выходном каскаде который он использовал и спросил есть ли у меня соображения по его улучшению. Я сказал, что лучше ВК чем с корректором Хауксфорда я не знаю. А так как его ВК был с параллельным повторителем на входе и «двойкой Дарлингтона» с вертикальными ПТ на выходе, то для доработки до модифицированного корректора Хауксфорда оставалось добавить пару

транзисторов и несколько резисторов. Доработку он сделал в виде отдельной платки и встроил в готовые выходные каскады. Вот первые впечатления:

*«Ура! запустил! Кэ 0,07% под нагрузкой, но есть ПОС. Что дальше, диктуй...».*

Оказалось что он ошибся в расчетах, вот впечатления после перерасчета элементов корректора: *«Ндааа..., после перерасчета гармоники стали 0,007% при токе покоя 300ма! Ведёт себя как гвоздь в тракте. Что вошло то и вышло..., Звук чистый, как с ООС — но не торкает, отстранённый, нет жизни..., что посоветуешь?»*

Посоветовавшись мы решили, а почему бы не поработать с отрицательным выходным сопротивлением, тем более что в данном случае представилась уникальная возможность получить его в самом конце тракта и не с помощью сдвинутого по фазе сигнала с датчика тока, а с помощью ПОС по напряжению непосредственно в выходном повторителе. Чем не средство для эффективной борьбы с противоЭДС? И буквально на следующий день получаю сообщение:

*«Александр, слушаю и думаю, мне кажется, что мы с тобой ещё не осознали, что за столь короткое время сделали. Штурманули такое дело...! Надо ещё сообразить всё... Звучит так, как будто усилитель не чувствует акустику... пожалуй, точное определение! Поверь, у меня и раньше достаточно приличный звук был..., но сейчас просто чудо!»*

Разумеется, в качестве эталонов для сравнения использовались лучшие ламповые и гибридные образцы. Но это только начало, вся работа была еще впереди.

Для исследований Андрей собрал два комплекта усилителей, на одном из них проводил эксперименты и исследования до тех пор пока он не становился явно лучше второго образца, который служил эталоном. Затем победитель занимал место эталона, а над вторым усилителем снова производились эксперименты и доработки и т.д..

Через некоторое время Андрей прислал мне вырезку из журнала Аудиомагазин №2 2000 с интервью В.Лэмм (Шушурин) и обратил внимание на фразу: *«...транзисторный усилитель, построенный по принципу УПТ каким-то образом сдвигает форманту инструментов, работающих в области басового регистра, ... не нарушая узнаваемости звучания самих инструментов».* Поэтому в своих разработках Лэмм отказался от УПТ и использует переходной конденсатор между драйвером и выходным каскадом.

Андрей проверил это решение и сообщил об улучшении качества звучания, хотя переходной конденсатор использовался емкостью 2,2 мкФ, что при входном сопротивлении 47 кОм дает частоту среза около 1,6 Гц, тем не менее, эффект заметно проявляется.

Сначала мы подумали, что эффект связан с изменением ГВЗ (ведь с конденсатором в области НЧ происходит фазовращение сигналов до 45 градусов и более). Тогда Андрей проверил работу одного и того же УМЗЧ на акустику и на телефоны через активный делитель. Когда выяснилось, что на телефонах эффект не проявляется, стало ясно, что и здесь проявляется действие противоЭДС акустических систем. Тогда мы проверили выходное сопротивление нашего усилителя с конденсатором и без конденсатора на частоте 1 Гц и выяснили, что с конденсатором на инфранизких частотах оно еще больше снижается, т. е. становится еще более отрицательным. Без конденсатора по ощущениям на слух по выражению А.Медведко происходит пропадание живости, энергетики НЧ-составляющих, звук становится как бы суше. Для неискушенного слушателя этот эффект малозаметен, поэтому о нём отсутствует информация в литературе. По ощущениям эффект проявляется в том, что без конденсатора концертное фортепиано превращается в пианино, звук которого остается на сцене, в зал не идет. Таким образом, переходной конденсатор в ВК с отрицательным выходным сопротивлением улучшает демпфирование на инфранизких частотах, что напоминает действие выходного трансформатора в ламповых усилителях.

Чтобы разгрузить драйвер и еще больше развязаться от проникания противоЭДС в драйвер Андрей предложил добавить эмиттерный повторитель между драйвером и ВК, что и сделал. Каково же было его удивление когда вместо ожидаемого улучшения звук ухудшился, стал зажатым, как с глубокой ООС, хотя метрологические параметры улучшились. Он тут же в растерянности сообщил мне об этом. Я предложил ему ничего

не меняя последовательно с переходным конденсатором ввести резистор сопротивлением 20 кОм, что он незамедлительно и сделал. И снова восторг от звука, звук стал лучше чем в эталоне - быстрый, лёгкий, с прекрасной прорисовкой середины и в тоже время собранный, с плотным хорошо артикулированным басом! Звучание очень рельефное и выразительное, с хорошей макро- и микродинамикой. Какая-либо окраска звука отсутствует полностью — это то, о чём мечтает каждый меломан и аудиофил! Вот и объяснение, почему в первом случае с глубокой ООС драйвер себя не проявил, у него тоже было низкое выходное сопротивление, а когда Андрей увеличил эмиттерные резисторы и уменьшил глубину ОС выходное сопротивление увеличилось.

Вот так родился узел согласования - последовательная RC-цепочка между выходом драйвера и входом ВК.

Надо сказать, что здесь полностью отсутствует ламповая слащавость, которая появляется благодаря определённому спектру искажений, и которую так любят некоторые аудиофилы-лампадники.

Вот впечатления от одного из последних вариантов: *«Александр, сейчас звук несколько напоминает хороший дорогой одноканальный, но только очень чисто, легко и хороший бас. Очень интересный, быстрый, мясистый, но в тоже время артикулированный. Если есть удар, то в грудь прилично быстро, ощутимо ударяет, но в тоже время мягкий. Очень вкусно звучит. Это на фоне чистой прозрачной середины и шёлкового верха».*

Разумеется, был проверен и чисто безОСный драйвер без буферного повторителя в котором резистор «веревочки» уже имеется - это сопротивление его нагрузки, определяющее коэффициент усиления и выходное сопротивление драйвера. Оказалось, что в этом случае глубина сцены даже увеличивается, но в то же время происходит размытие кажущихся источников звука (КИЗ). Происходит это потому, что сопротивление нагрузки драйвера дополнительно модулируется входным сопротивлением ВК. Таким образом резистором «веревочки» можно достаточно просто управлять в определенных пределах глубиной сцены.

Ну а теперь вернемся к компенсации сопротивления проводов на которое в свое время обратил внимание Н.Сухов. Оказывается для достижения такого же эффекта в нашем усилителе достаточно установить величину отрицательного выходного сопротивления равной полному сопротивлению акустических проводов. В этом случае напряжение на выходе УМЗЧ будет выше ровно на величину падения напряжения на проводах, а на клеммах АС оно будет номинальным. Таким образом все проски противоЭДС будут скомпенсированы. А так как предискажения вносятся в выходном повторителе без участия ООС и не требуются дополнительных усилителей, то и микродинамика исходного сигнала фонограммы претерпевает минимальные изменения.

Были проведены исследования на критичность отрицательного выходного сопротивления к различным типам АС (в том числе и рупорных). Отрицательных эффектов не выявлено.

В качестве примера на рисунке 1 показана схема возможного варианта усилителя.

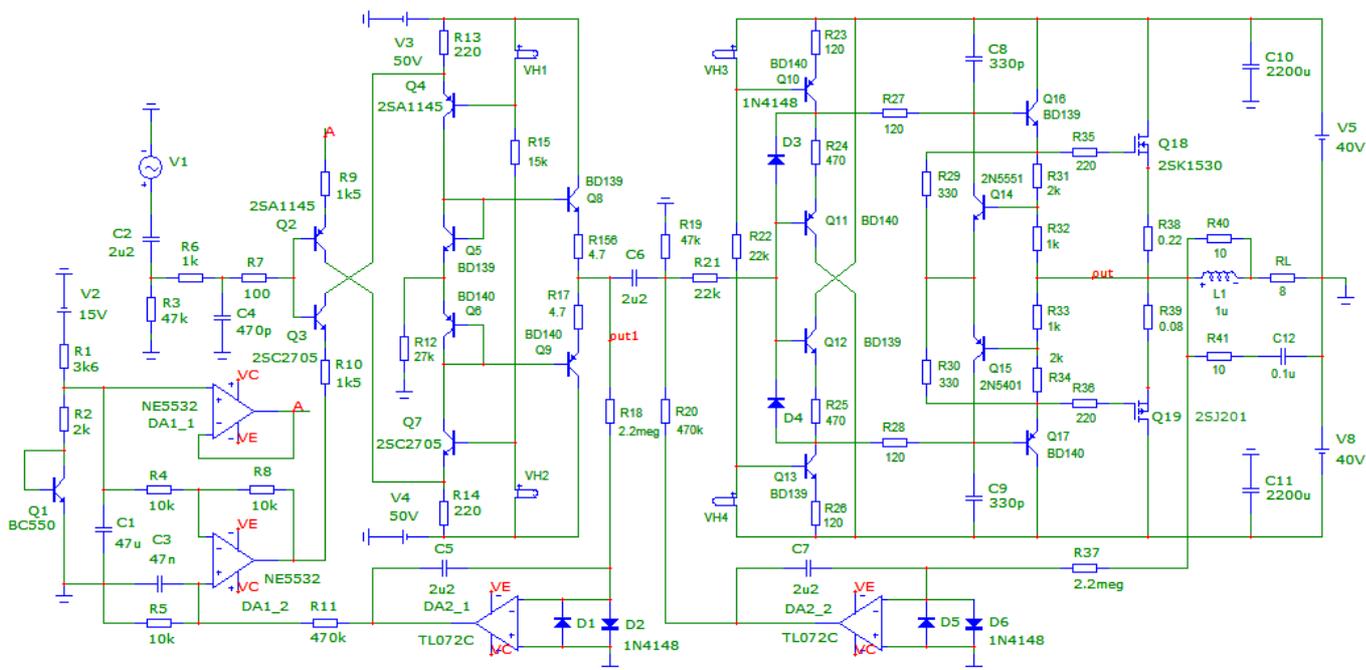


Рис. 1

Краткое описание узлов схемы.

Драйвер выполнен на транзисторах Q2-Q9. Коэффициент усиления по напряжению равный 30 дБ определяют резисторы R9, R10, R12. Питание эмиттерных цепей входных транзисторов обеспечивает ОУ DA1. Ток покоя транзисторов Q2, Q3 задается равным 3 мА с помощью делителя R1, R2, Q1. Транзистор Q1 обеспечивает температурную стабилизацию. С помощью интегратора на DA2.1 обеспечивается поддержание нуля на выходе драйвера. Конденсатор C2 при отсутствии постоянной составляющей на выходе источника сигнала может отсутствовать, C3 также не обязателен.

Выходной каскад выполнен на транзисторах Q10-Q19. Для получения отрицательного выходного сопротивления резисторы R29, R30 уменьшены с 390 Ом по расчету до 330 Ом. Величина выходного сопротивления зависит также и от резистора R21. Подбором резистора R39 добиваются минимума второй гармоники в спектре искажений. Поддержание нуля на выходе УМЗЧ обеспечивает интегратор на DA2.2. Диоды D3, D4 служат для защиты от перенапряжения по входу. Транзисторы Q14, Q15 должны быть в активном режиме и брать на себя примерно половину тока транзисторов Q10, Q13. Тогда у них будет запас по отработке ошибки как в сторону приращения тока, так и в сторону его уменьшения.

Все светодиоды зеленого свечения. Их можно шунтировать конденсаторами по 47 мкФ.

Конденсатор C6 и резистор R21 элементы узла согласования с помощью резистора которого можно регулировать глубину сцены.

Расчет элементов корректора Хайксфорда.

Для начала обратимся к исходной схеме с расчетными коэффициентами:

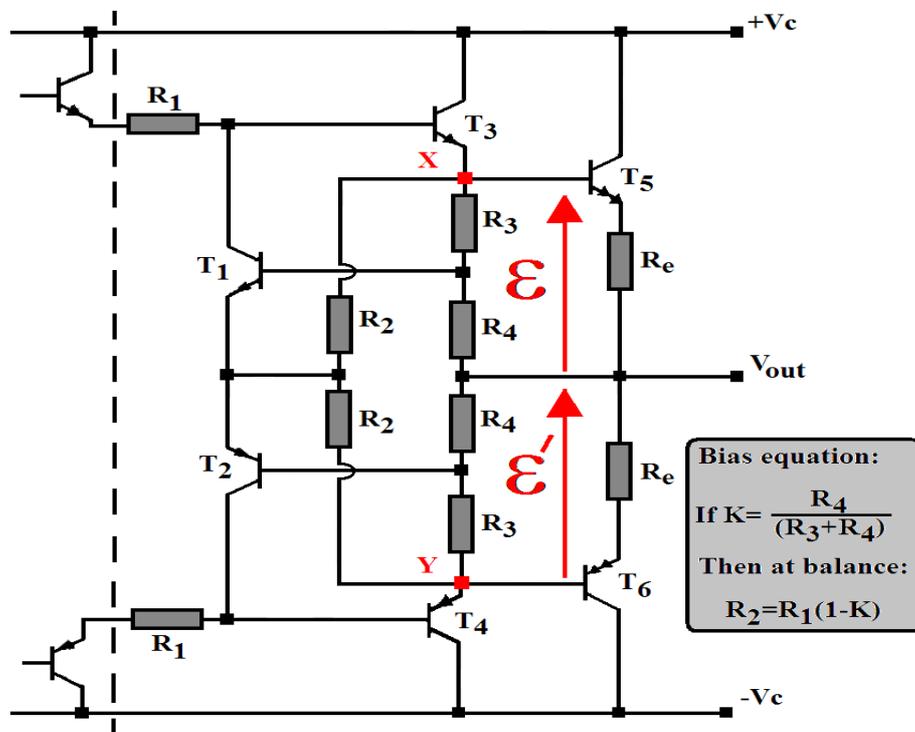


Рис. 2.

Исходная схема показана с выходными транзисторами Дарлингтона (Т5, Т6)  $\epsilon$  (показано красным) — это оптимальное смещение для выходных транзисторов с учетом падения напряжения на эмиттерных (истоковых) резисторах в классе АВ при котором искажения минимальны. У нас в качестве выходных не Дарлингтоны с порогом открывания 1,05 В, а транзисторы МОСФЕТ с порогом открывания 1,65 В

При начальном токе стока 300 мА (оптимальное значение для ПТ типа 2SK1530 (2SK1529); 2SJ201 (2SJ200) значение  $\epsilon$  будет около 1,8 В. В таком случае для того чтобы открыть транзисторы Т1, Т2 необходимо разделить напряжение  $\epsilon = 1,8$  В на 3. Возьмем резистор R4 равным 1 кОм, тогда резистор R3 необходимо взять равным 2 кОма. Это предварительный расчет.

Зная резисторы делителя вычислим коэффициент К.

$$K = R4 / (R3 + R4) = 1 / (1 + 2) = 0,33$$

Задавись резистором R1 в пределах 500...700 Ом нетрудно подсчитать резисторы R2.

$$R2 = R1(1 - K) = (470 + 120) (1 - 0,33) = 590 \times 0,67 = 395 \text{ Ом}$$

Резистор R1 разбит так, чтобы по обоим половинкам протекал примерно одинаковый ток в пределах 5...7 мА.

Теперь задавшись током ГСТ 10 мА (для простоты расчетов) будем иметь ток по 5 мА для этих резисторов. В дальнейшем током ГСТ можно в небольших пределах регулировать ток покоя выходных транзисторов.

Для работы на АС сопротивлением 4 Ома лучше использовать спаренные полевые транзисторы.

Проверка выходного сопротивления

Наиболее простой способ проверки заключается в измерении выходного напряжения на выходе усилителя на холостом ходу и под нагрузкой и расчет по формуле:

$$R_{\text{вых}} = R_n(U_{\text{хх}} - U_n) / U_n$$

Для ориентировочного определения выходного сопротивления удобно выставлять

напряжение на холостом ходу численно равным сопротивлению нагрузки. Тогда приращение напряжения под нагрузкой в Вольтах (но со знаком минус) будет примерно равно выходному сопротивлению усилителя а Омах.

Если необходимо выставить выходное сопротивление равным сопротивлению акустических проводов, то закорачиваем клеммы кабеля с одной стороны, а с другой измеряем сопротивление омметром. Реальное сопротивление типового кабеля сечением 2,5 мм.кв. под нагрузкой будет раза в полтора больше из-за скин-эффекта и температурного коэффициента сопротивления (ТКС). После чего устанавливаем отрицательное выходное сопротивление равным полученному значению. На самом деле сопротивление кабелей не является чисто активным. Поэтому с целью более эффективного подавления противоЭДС смело можно использовать величину отрицательного сопротивления в 1,5...2 раза большую сопротивления кабеля.

### **Выводы:**

1. Всесторонние практические исследования, проведенные А.Медведко подтвердили, что УМЗЧ должен быть безОСным и иметь отрицательное выходное сопротивление в пределах минус 0,15...0,35 Ом. Снижение выходного сопротивления ниже минус 0,4 Ома на некоторых АС приводит к «трубному» звуку.
2. Если говорить о параметрах, то мы получили широкую полосу частот, достаточно малые все виды искажений (нелинейные, интермодуляционные) с очень коротким спектром по сравнению с другими типами безОСных усилителей. Такие высокие параметры недоступны любому ламповому усилителю. Теперь измерения полностью согласуются с прекрасным звуком! Мощность можно получить практически любую, как и в обычном транзисторном усилителе, а качество звука соответствует лучшим ламповым усилителям и даже выше.
3. Драйвер может быть выполнен по любой схеме, в том числе и с глубокой ООС. В качестве такого каскада хорошо себя зарекомендовал простейший двухтактный сломанный каскод.
4. При использовании отрицательного сопротивления между драйвером и ВК желательно включать буферный каскод, который выполняет две основные функции: полную развязку драйвера от ВК и обеспечивает высокое сопротивление нагрузки для драйвера, что благоприятно сказывается на снижении его искажений.
5. На входе ВК необходимо включать согласующее устройство состоящее из последовательно включенного конденсатора и резистора сопротивлением до нескольких десятков кОм (верхнее значение зависит от входного импеданса ВК, при этом полоса пропускания УМЗЧ в целом должна быть не уже 70 кГц).
6. В качестве ВК необходимо использовать двухтактный усилитель тока с отрицательным выходным сопротивлением, например, ВК с модифицированным корректором Хауксфорда. С вертикальными ПТ достаточно «двойки» Дарлингтона, а не «тройки», как это сделали Роберт и Боб Корделлы, [15], [16]. В то же время использовать повторитель на «голых» ПТ [17] тоже нецелесообразно из-за большой входной емкости.
7. В качестве выходных транзисторов хорошо зарекомендовала себя пара MOSFET 2SK1530, 2SJ201. По своим характеристикам они занимают промежуточное положение между вертикальными полевыми транзисторами и транзисторами типа LATERAL. По сравнению с другими вертикальными ПТ они наиболее комплементарны [18]. Ближайшие аналоги 2SK1529, 2SJ200. Использование же популярных более дешевых транзисторов типа IRFP240, IRFP9240 (IRFP9140) приводит к жесткому звучанию при тех же измеряемых параметрах.

*p.s.*

Я благодарен судьбе что на последнем этапе этой работы она свела меня с легендой Андреем Медведко. Благодаря его неутомимой энергии и «очумелым» ручкам (и ушкам тоже) в короткий срок была проделана большая работа, которая и привела нас к изобретению. На разных этапах Андрей привлекал для контрольного прослушивания

авторитетных специалистов в области звука, но даже промежуточные макеты неизменно получали очень высокую оценку.

Из письма А.Медведко после очередного прослушивания: *«Основные подчеркиваемые всеми признаки звука это лёгкость, чистота, естественная глубина сцены! Хочу сказать, эксперты - уважаемые среди аудиофилов в Минске. Не зря мы с тобой потрудились»*

Из впечатлений одного из посетителей: *«система реально передаёт звуковую картину, настроение, сам сюжет и дарит потрясные эмоции!!! Хочется закрыть глаза и не открывать их долгое время, уповая на то, что это сладкий сон, яркий, добрый и светлый...»* Вот такое ощущение от прикосновения к материи звука, теплой и живой помогающей слушателю погрузиться в мир музыки, наполненный яркими эмоциями и переживаниями. По выражению другого эксперта звук даже лучше чем на живом концерте. И это не удивительно по ряду причин.

Надеюсь что эта работа внесет свежую струю в развитие схемотехники транзисторных УМЗЧ и изменит отношение к ним. Что касается Андрея Медведко, то он пишет подробную статью, где собирается привести схемы пригодные для практической реализации, надеюсь что поделится и некоторыми секретами от которых во многом зависит успех. Эта статья всего лишь анонс.

Хочется отметить также что результаты макетирования драйвера проводимые Андреем на 100 % совпадали с результатами моделирования, а результаты макетирования ВК даже превосходили их, что приятно радовало.

#### Литература:

1. В.Иванов, Бестрансформаторный УНЧ, Радио №2, 1970, с.29
2. О.Русси, УМЗЧ с обратной связью по вычитанию искажений, Радио 1997, №3 с.12
3. И.Рогов, УМЗЧ с регулируемым выходным сопротивлением, Радио 2008, №4 с.14
4. Н.Сухов, УМЗЧ высокой верности, Радио №6,7 1989
5. патент США №4441085, МКИ H03F 1/34, публ. 03.04.1984
6. А.Петров, О пользе микрокапа для аудиофила-схемотехника и наших ушей, Радиолюбби, №6, 2012 с. 45
7. Jean Hiraga, The Many Faces of Distortion, Glass Audio, May 2005, Pages 40-49
8. С.Таранов, «Баланс и симметрия», Аудиомагазин №2, 1998
9. А.Петров, Усилители напряжения без ООС, Радиоаматор 9,10, 2011
10. А.Петров, Анализ драйверов для УМЗЧ без общей ООС, Радио 7,8, 2012
11. А.Петров, Выходные каскады УМЗЧ без общей ООС, Радио 10,11, 2012
12. Хорошев В., Шадров А. УМЗЧ без общей ООС. — Радио, 1989, № 9, с. 65—67
13. Дайджест, The End Millenium, Радиолюбби №4, 2000 г., с.58.
14. А.Петров, Домашний кинотеатр мини-макс, Радиомир №8, 2012
15. Robert Cordell, A MOSFET power amplifier with error correction, j. Audio engineering society, Vol. 32 №1,2 1984 January/February
16. Bob Cordell, Designing Audio Power Amplifiers, McGraw-Hill 2010 • ISBN 007164024X
17. К.Царев, УМЗЧ без общей отрицательной обратной связи класса Hi-End, Радиоаматор 6, 2011 г.
18. Stewart Edmond, Autobias for mosfet audio output stage, Electronics World 12/2003 p.17-20

24 марта 2013 года

Александр Петров