

БезОСный УМЗЧ с отрицательным выходным сопротивлением

А.ПЕТРОВ,
г.Могилев.

Многие радиолюбители, занимающиеся высококачественным звуковоспроизведением, с нетерпением ждут свежих публикаций по УМЗЧ в надежде собрать своими руками самый современный и самый совершенный (в плане звуковоспроизведения) усилитель.

В последнее время многие радиолюбители, разочаровавшись в “транзисторном направлении”, переключаются на “ламповое”. И это не удивительно, так как в поисках “своего” звука они смакетировали и прослушали почти все, что удалось найти в печати и в Интернете. Однако того, что искали, так и не нашли.

Вот, например, ответ ZugDuk'a (с сайта Вегалаб) на вопрос, какие усилители он перепробовал: “...Семигора, Заратустра, Zen4, Follower 2009, цирклотрон Granta, различные повторители с нагрузками на ИТ, резисторы и дроссели, мостовые и одноконтурные. Наименее напрягающий звук дает мостовая схема с нагрузкой на пассивные элементы (резисторы и дроссели). Наиболее живой звук у фолловера Чуиффолли. Наиболее динамичный и мощный в басу — цирклотрон Гранта с IRFP240. Хуже всех звучал Заратустра... Имеющая смысл схема — Follower 2009 на транзисторах 2SK1058. Но живость, которую дает эта схема, — искусственная. Это — эксайтирование...”.

И таких разочаровавшихся немало. Но не спешите делать выводы. А что же лампы? Вот сообщение от Delta213 (<http://audioportal.su/printthread.php?t=558&page=14&pp=25>): “Есть у меня усь на 300В. ...Все было хорошо, слушал я и радовался, все устраивало, но тут решил провести обмеры этого усилка, прогнал через RMAA и spectraplus. Я был в шоке: 6,5% K_{HI}

на 7 Вт/8 Ом! Частотокл гармоник, третья — много выше второй, да и высших много. Начал с этим бороться, раза в два снизил подбором напряжения на второй сетке, но все равно меня это не устроило. Перевел СЗМ в триодный режим, мощность всего 2 Вт, K_{HI} 0,6% (вторая и третья), остальные — на уровне шумов, менее -80 дБ, все как в книжках. Сегодня весь день слушал, эффект: как будто расширился частотный диапазон, особенно вверх, но! Что-то не так звучит, сцена пропала, “воздуха” нет, как-то сразу транзисторный напоминать стал. Теперь хочу переключатель соорудить, пентод/триод. Боремся, боремся с K_{HI} , а может, не надо? Но дело-то не в этом, а в том, что с кошмарным спектром он звучал интереснее, чем с “вылизанным” графоаналитически. Получается, что мой режим более лиричен, в живую все плохо, да, признаю. Опять хочется назад к тому плохому откатиться”.

Как видим, не все так гладко и с лампами (даже с легендарными 300В), как это многим представляется. Как говорится, “на вкус и цвет товарищей нет”. Одним нравится звук, обильно “сдобренный” ламповыми гармониками, другие же, напротив, не терпят какого-либо украшения.

Не случайно возник такой класс безОСных (без общей отрицательной обратной связи) усилителей, как гибридные, которые являются компромиссом между транзисторными усилителями, не требующими выходного трансформатора, и ламповыми, создающими “благозвучный” спектр гармоник. И таких усилителей появляется все больше и больше, ведь китайская промышленность стремительно наращивает их производство. По сравнению

с ламповыми они более “всеядны” и менее прихотливы к акустике.

Что же касается более правильной передачи огибающей сигналов одноконтурными усилителями, как утверждают их идеологи, то это — миф, который легко разбивается проверкой передачи сигналов типа “меландр” частотой 15...20 кГц. Изменение скважности сигналов говорит о появлении в них постоянной составляющей. На звуковом сигнале это приводит к “болтанке” постоянной составляющей, а соответственно, и к “болтанке” их огибающей.

Спустя 12 лет после публикации схемы транзисторного усилителя “The End Millenium” [1] радиолюбители наконец начали “входить во вкус” безОСных усилителей. Практически все, кто послушал клон этого усилителя, влюбляются в его звук с первого раза. В нем нет тех гармоник, которым приписывают “ламповое звучание”, тем не менее, звук впечатляет своей натуральностью. Вот сообщение MAXIM-A (с Вегалаба): “...Сегодня приходил в гости Вадим. У него усилитель Миллениум оставил очень хорошее впечатление. Мягкий, приятный звук, совершенно не утомляющий. Сцена очень хороша, каждый инструмент на своем месте, особенно это отчетливо слышно на Пинк Флойд. В песне Time великолепно прозвучали часы и маленькие барабаны, а голос был очень натуральным, максимально приближенным к концертному исполнению. Совпадение видеоряда и звукового сопровождения в пространстве — полнейшее, расстановка музыкантов и перемещение их по сцене Миллениум отслеживает полностью. Это было довольно удивительно. Из НЧ, СЧ, ВЧ хватает всего, но вся музыка преподносится мягко, без надрыва”.

Вопрос о взаимодействии усилителя и акустики периодически всплывает в печати, но оставляет после себя больше вопросов, чем ответов. Взять хотя бы, сколько разных, причем абсолютно противоположных, мнений существует об оптимальном выходном сопротивлении УМЗЧ: от стремящегося к нулю (глубокоОСные усилители) до стремящегося к бесконечности по схеме ИТУН (источника тока управляемого напряжением).

Были попытки делать усилители и с отрицательным выходным сопротивлением. Но так как эти усилители были с ПОС по току выхода, то получить отрицательное выходное сопротивление выше 150...300 Гц не удавалось. Это и не удивительно, так как ПОС способствует самовозбуждению усилителя, тем более, по току, сдвинутому относительно входного сигнала.

При пропуске через звуковую катушку динамика переменного тока I звуковой частоты на нее действует периодическая сила, пропорциональная току:

$$F \approx B \cdot I \cdot \ell,$$

где B — магнитная индукция в зазоре катушки;

I — ток в катушке;

ℓ — длина проводника катушки.

Под действием этой силы катушка и связанная с нею излучающая поверхность (диффузор) совершают вынужденные колебания с частотой пропускаемого тока. В ИТУН, благодаря высокому выходному сопротивлению, можно считать, что $I = \text{const}$. В обычном усилителе, т.е. ИНУН (источнике напряжения управляемого напряжением), сила, прикладываемая к диффузору со стороны катушки, зависит от тока в катушке, который определяется ее комплексным сопротивлением. Это сопротивление, в свою очередь, зависит от омического сопротивления катушки, ее индуктивности и возникающей в ней противоЭДС, пропорциональной скорости перемещения звуковой катушки в магнитном поле.

Сопротивление катушки заметно изменяется под действием температуры, так как ТКС меди равен $0,4\%/^{\circ}\text{C}$. Но процесс нагрева и охлаждения — относительно медленный по сравнению с частотой колебаний катушки, и поэтому он может проявляться только на очень низких частотах. Другое дело, индуктивность звуковой катушки: она постоянна и зависит от положения катушки в магнитной системе, т.е. может уменьшаться в крайних положениях на 40% из-за уменьшения магнитной индукции.

Отсюда в усилителях с токовым выходом (ИТУН) в крайних положениях диффузора имеет место ослабление развиваемой силы со стороны звуковой катушки, что приводит к появлению нечетных гармоник в звуковом сигнале (преимущественно третьей), которые как будто придают звуку какую-то “прозрачность” и “яркость”, что многим аудиофилам очень нравится (напоминает “пентодный звук”). Более того, для усилителей типа ИТУН характерна большая неравномерность АЧХ, они очень капризны в отношении различных типов акустики из-за электрического раздмпфирования динамических головок, так что часто возникает характерное “бубнение”. В усилителях же с выходом по напряжению (ИНУН) уменьшение комплексного сопротивления приводит к росту тока, а значит, и к компенсации спада развиваемого катушкой усилия.

Мощные сигналы противоЭДС самоиндукции катушки за счет падения напряжения на акустических проводах образуют очень большие искажения. С этим явлением столкнулся при разработке УМЗЧ ВВ [2] Н.Сухов и был вынужден использовать компенсатор сопротивления проводов [3]. 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.

В процессе исследований выходных каскадов УМЗЧ [4] я изменял сопротивление источника сигнала от нуля до 30 кОм, так как выходное сопротивление драйверов известных мне безОСных УМЗЧ лежало в пределах 3...30 кОм. Когда дело дошло до ВК с корректором Хауксфорда, я обнаружил, что при нулевом сопротивлении источника сигнала и точной балансировке корректора искажения, вносимые ВК, ничтожно малы, а его выходное сопротивление стремится к нулю (ВК с высокой точностью повторяет входное напряжение).

С ростом сопротивления источника сигнала выходное сопротивление УМЗЧ становится отрицательным и снижается до минус 0,3 Ом ($R_{\text{ист}} = 30$ кОм). При снижении сопротивления нагрузки (проверялось при изменении сопротивления от 8 до 1 Ом) выходное напряжение усилителя с отрицательным выходным сопротивлением возрастает, что также благоприятно сказывается на компенсации искажений динамических головок в крайних положениях диффузора за счет роста тока, отдаваемого в нагрузку. При разбалансировке корректора (до $\pm 20\%$) даже при нулевом сопротивлении источника сигнала выходное сопротивление может отклоняться (до $\pm 0,1$ Ом).

При перекомпенсации обратная связь в корректоре становится положительной, а выходное сопротивление — отрицательным. При недокомпенсации выходное сопротивление растет и приближается к выходному сопротивлению ВК без корректора. В обоих случаях растут и искажения. Но так как сам Хауксфорд [5] и его последователи Роберт и Боб Корделлы [6, 7] проводили исследования при нулевом сопротивлении источника сигнала и максимально точной настройке корректора с целью снижения искажений на 40 дБ (в 100 раз) и более, то это явление они не обнаружили, и о нем нет упоминания в прессе. При публикации указанных исследований я не стал заострять внимание на этой

особенности, рассчитывая продолжить исследование в составе УМЗЧ.

Как выяснилось, несмотря на возрастающий уровень нелинейных искажений (до 0,05%), звучание усилителя с отрицательным выходным сопротивлением становится более артикулированным, с большим динамическим контрастом при сохранении “шелкового верха” и прекрасно “читаемой” середины (вокала, музыкальных инструментов). Сцена становится более масштабной, кажущиеся источники звука (КИЗ) как бы “материализуются” в пространстве. Это как раз то, о чем мечтает каждый аудиофил.

Кстати, усилитель из [8] при правильно рассчитанном и настроенном корректоре также имеет отрицательное выходное сопротивление, соответствующее выходному сопротивлению драйвера (5 кОм), т.е. примерно минус 0,05 Ом, на что авторы также не обратили внимания. По поводу качества звука модифицированного варианта этого усилителя (почти все

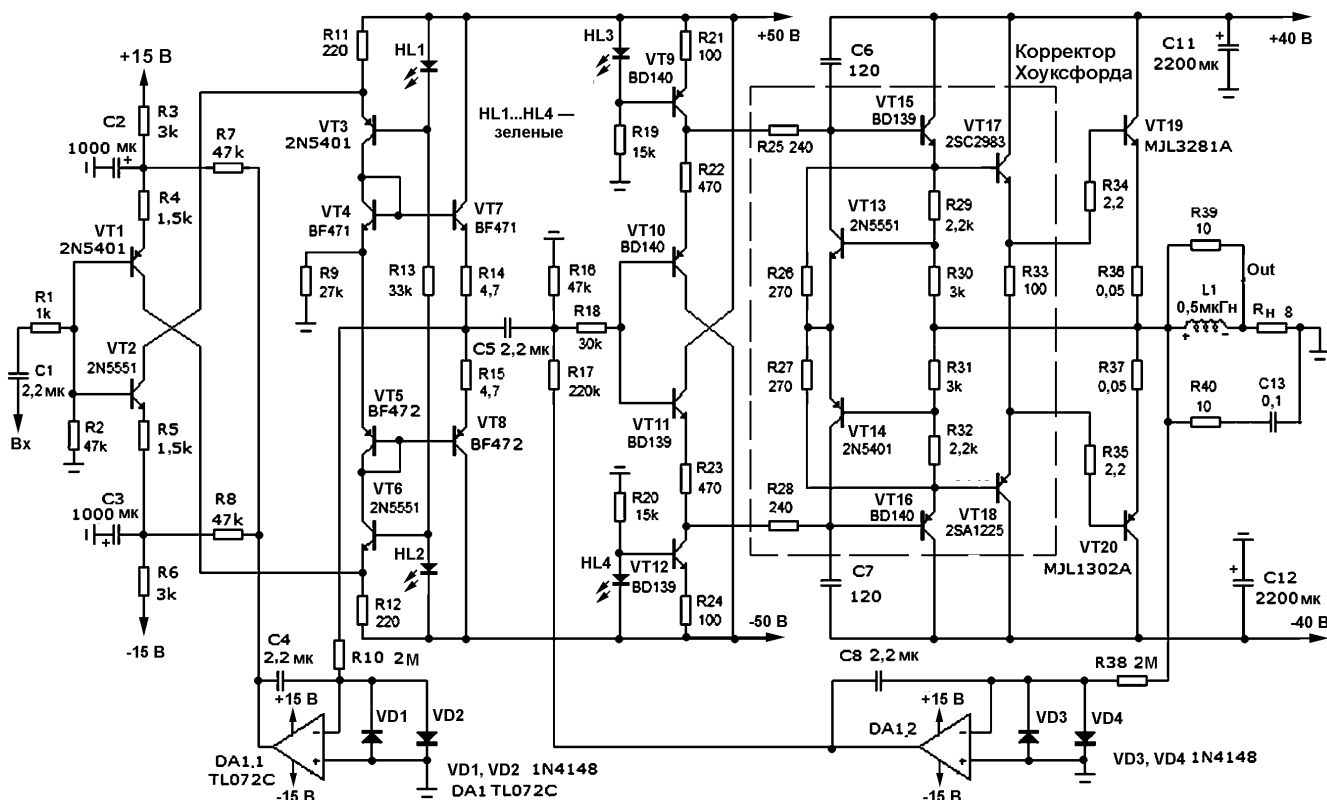
каскады снабжены следящим питанием для устранения эффектов Миллера и Эрли) на одном из форумов встретил фразу: “...даже слышно, как пломбы поют во рту у певицы”.

На рисунке приведена схема предлагаемого безОСного усилителя с отрицательным выходным сопротивлением. Усилитель — инвертирующий. Это необходимо учитывать при подключении АС, чтобы тракт в целом был неинвертирующим, т.е. сохранял фазу исходного сигнала. Схема УМЗЧ состоит из двух каскадов: однокаскадного драйвера и выходного повторителя. В качестве драйвера использован хорошо себя зарекомендовавший простейший двухтактный “ломаный каскод”. Этот драйвер вносит малые искажения (не более 0,05%) с очень коротким спектром (гораздо короче, чем у лучших ламповых каскадов). Такой каскод может служить альтернативой для тех, кому надоело возиться с капризами ламп в гибридных усилителях. Входное сопротивление усилителя достаточно

высокое благодаря взаимной компенсации базовых токов входных транзисторов и определяется, в основном, сопротивлением R2.

Коэффициент усиления по напряжению равен 30 дБ и определяется резисторами R4, R5 и R9. Буферный каскад на транзисторах VT4, VT7 и VT5, VT8 исключает модуляцию сопротивления нагрузки драйвера R9 входным сопротивлением выходного каскада (ВК) и, тем самым, способствует более четкому формированию КИЗ, а значит, и сцены в целом.

Выходной каскад уже использовался в [9] и хорошо зарекомендовал себя, поскольку практически не нуждается в налаживании. Правильно настроенный корректор Хауксфорда (HEC — Hawksford Error Correction) на VT13...VT18 обеспечивает практически нулевое выходное сопротивление отдельно взятого выходного каскада при работе от источника с низким выходным сопротивлением. В результате, при использовании такого каскада в со-



ставе УМЗЧ с общей ООС [9] получаем усилитель с беспрецедентно низким выходным сопротивлением, обеспечиваемым совместным действием корректора и общей ООС.

Корректор Хауксфорда представляет собой сбалансированную систему ООС, выполненную на транзисторах токового шунта VT13, VT14, причем базы транзисторов используются как инвертирующие входы, а эмиттеры — как неинвертирующие. Инвертирующие входы отслеживают входное напряжение и отвечают за смещение выходных транзисторов. Неинвертирующие входы контролируют выходное напряжение посредством резисторного делителя R26-R27, и, как только это напряжение отклоняется от входного, транзисторы усиливают сигнал рассогласования, который выделяется на коллекторах транзисторов VT13, VT14 и восстанавливает равновесие.

При выполнении баланса выполняется компенсация искажений близко к 100%. Как отмечено выше, расчетные формулы для балансировки справедливы только для ну-

левого источника сигнала. С ростом выходного сопротивления источника сигнала баланс нарушается в сторону ПОС по напряжению, что приводит к отрицательному выходному сопротивлению. Но даже в усилителях с общей ООС это не вызывает ухудшения устойчивости.

Таким образом, регулировку выходного сопротивления можно производить как подбором резистора R18, так и изменением сопротивлений резисторов R26, R27. Однако не следует сильно увлекаться. При увеличении (по модулю) отрицательного выходного сопротивления (более чем минус 0,4 Ом) на некоторых типах акустики возможно “трубное” звучание из-за подъема частот в области 150...250 Гц (на “седле” АЧХ НЧ-головки). В данном усилителе отрицательное выходное сопротивление получено в самом конце тракта — в выходном каскаде (повторителе напряжения). Поэтому, в отличие от ПОС по току, оно отрицательно практически во всей звуковой полосе частот и даже за ее пределами, что нереально сде-

лать с помощью ПОС по току по вполне понятным причинам.

Проблемы с устойчивостью легко решаются подбором конденсаторов C6 и C7. В случае необходимости их емкость можно увеличить до 220...330 пФ. Но даже с емкостью 330 пФ частота полюса ОС будет равна

$$f_n = \frac{1}{2\pi \cdot (R_{22} + R_{25}) \cdot C_6} =$$

$$= \frac{1}{6,28 \cdot (470 + 240) \cdot 330 \cdot 10^{-12}} =$$

$$= 680 \text{ (кГц)},$$

т.е. далеко за пределами звукового диапазона, что трудно выполнить при обычной общей ООС. Если учесть, что фаза сигнала начинает “крутиться” с частоты, в 10 раз меньшей, то даже в этом случае до 68 кГц будет обеспечена синфазная коррекция ошибок.

Ток покоя усилителя можно подстраивать изменением в небольших пределах сопротивления резисторов R21, R24 (110...130 Ом).

(Окончание следует)

Трехмерный звук

(Продолжение. Начало в №2-8/13)

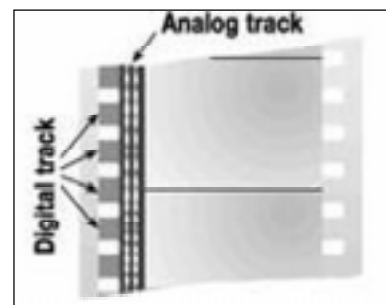
Dolby digital

В конце 80-х, на волне возобновившегося интереса к кино, Dolby Laboratories разработала цифровую технологию записи и воспроизведения многоканального звука для 35-миллиметровой пленки. Несколько аналоговых сигналов звука преобразовывались в цифровой поток, который затем подвергался информационному сжатию по алгоритму

Dolby AC-3. Было использовано весьма оригинальное решение. Так как к этому времени огромное число существующих проекторов использовали 2-канальную стереозапись или аналоговую систему Dolby Pro Logic, две аналоговые оптические дорожки на ленте необходимо было сохранить. Тогда цифровую информацию разместили на “нерабочей” части пленки, между

окошками перфорации (рис.47). Система использовала шесть каналов звука, поэтому получила наименование “Dolby Digital 5.1”.

Рис. 47



Dolby Digital (рис.48) использует цифровую компрессию звука, обеспечивающую минимально необходимую скорость цифрового потока (до 320 Кбит/с). Это позволяет наиболее эффективно использовать инфор-