



А.МЕДВЕДКО,
г.Минск, Беларусь.

История двух изобретений, или “второе дыхание” транзисторных усилителей

В этой статье обсуждается влияние противоЭДС индукции звуковой катушки динамического громкоговорителя на каскады УМЗЧ и как это влияние значительно уменьшить. Эта тема, на мой взгляд, является не тактической, а стратегической.

С появлением первых радиоламп радиоинженеры методично стараются повысить качество усилительной техники. За это время было много побед, появлялись новые радиоэлементы, схемные решения, но промахи и заблуждения также неоднократно встречались на тернистом пути к “идеальному” звуку. Одно из заблуждений, на мой взгляд, — это охват усилителей общей отрицательной обратной связью (ОООС).

Но сначала немного истории. Радиотехникой я стал увлекаться еще в конце 50-х годов. В начале 70-х мне довелось работать звукорежиссером в Белорусской государственной филармонии в таких коллективах, как “Верасы” и “Песняры”. Часто бывая на репетициях и концертах Белорусского симфонического оркестра, я имел четкое представление о звуча-

нии акустических музыкальных инструментов.

В то время для музыкантов-инструменталистов я пробовал изготавливать транзисторные усилители, но музыканты их постоянно браковали, отдавая предпочтение исключительно ламповым, поскольку, как они говорили, “ламповый звук” более натуральный, “теплый”... Это

обстоятельство не давало покоя, ведь измеренные параметры транзисторных усилителей были всегда лучше, чем ламповых.

Перепробовав все известные мне схемные решения и нововведения по линеаризации каскадов, также проверил разные комбинации отрицательных обратных связей (ООС) в усилителях, в том числе, и варианты

питания громкоговорителей от источников тока (с их проблемами). Можно сказать, все “освоено”, получены безупречные метрологические характеристики усилителей, а того, “желаемого звука” так и нет.

Сегодня очевидно, что в таком, на первый взгляд, хорошо проработанном направлении, как высококачественное звуковоспроизведение, далеко не все вопросы до конца изучены и объяснены. Так, некоторые схемотехники безапелляционно утверждают: “Транзисторы себя полностью исчерпали, и в обозримом будущем лампам нет замены!”, а некоторые заявляют даже более бескомпромиссно: “Транзисторным усилителям не достичь уровня ламповых усилителей никогда!”. В мире вновь стали наращивать производство радиоламп,

Рис. 1



а)

б)



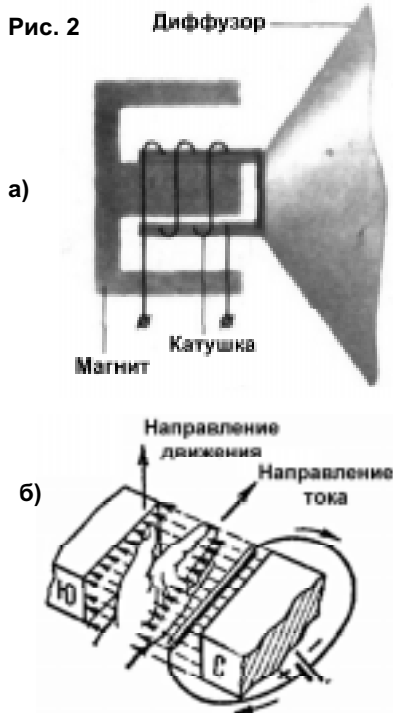
а схемотехники разделились на два лагеря: на “ламповиков” (рис.1а) и “транзисторников” (рис.1б).

Видимо, на сегодняшний день, знание только одной схемотехники не позволяет определить истинные причины искажений звукового сигнала в УМЗЧ. Инженеры, не имеющие навыков звуковой экспертизы или пренебрегающие ею, погнались за техническими показателями, а не за “правильным звуком”. Кстати, “правильный” и “приятный” звук — это далеко не одинаковые понятия, но которые часто приравниваются любителями “лампового звука”. Возможно, эти обстоятельства и повлияли на дальнейшие заблуждения в схемотехнике усилителей звуковой частоты. Получилось, хотя это и горько звучит, как у Шекспира в “Короле Лире”, когда слепой поводырь вел слепых, и известно, чем это кончилось!

Некоторые схемотехники причину плохого звука видят в глубокой общей отрицательной обратной связи (ОООС). Но в звуковом тракте (от микрофона до громкоговорителей), как правило, применяется много ОУ с глубокой ООС, и это радикально не сказывается на качестве звука. Исходя из этого, можно сделать вывод, что ОООС — прекрасный инструмент, но не всегда и не везде ею в полной мере можно пользоваться.

Среди разработчиков High-End усилителей постепенно формировалось мнение, что дело вовсе не в транзисторах, а в ОООС, которая разрушает музыкальный сигнал. В прессе стали появляться сообщения, что в петле ОООС циркулируя запаздывающие копии сигнала, что в нее подмешивается еще и сигнал противоЭДС. Последнее замечание очень интересно!

В электродинамических громкоговорителях (ЭДГ) существует явление самоиндукции — возникновение ЭДС индукции в звуковой катушке при изменении протекающего через нее тока. ЭДС самоиндукции в катушке отстает по фазе от тока, текущего через катушку, на 90° , что,



на мой взгляд, достаточно важно в формировании звука в ЭДГ. Такая зависимость существует не только для синусоидальных сигналов, но и для сложных музыкальных, поскольку они всегда могут быть разложены в ряд Фурье и таким образом сведены к синусоидальным.

Звуковая катушка громкоговорителя, на которую подано напряжение, находясь в магнитной системе громкоговорителя (рис.2а), перемещается (по известному из школьной программы “правилу левой руки” — рис.2б). Одновременно происходит и обратное воздействие: магнитная система громкоговорителя своим магнитным полем наводит на перемещающуюся катушку ту самую противоЭДС.

В то же время, в ЭДГ существуют и термофизические процессы, но они достаточно инерционны, и в данной статье не рассматриваются. Как видим, в ЭДГ происходит много разных взаимосвязанных физических явлений.

Чтобы представить себе уровень вырабатываемой головкой противо-

ЭДС, достаточно герметично соединить две одинаковые головки “лицом к лицу” и подать на одну из них сигнал от усилителя. Мы немало удивимся, обнаружив, что на клеммах второй головки уровень напряжения почти равен подводимому к первой головке. Можно считать, что примерно такой же уровень противоЭДС и вырабатывается при движении звуковой катушки. Куда же девается такой мощный отклик, возникающий в громкоговорителях и индуктивностях фильтров, и как избавиться от его пагубного влияния на работу усилителя и, как следствие, на деградацию звука? Будем разбираться.

Влияние отклика ЭДС громкоговорителя на работу усилителя неоднократно обсуждалось на протяжении всего времени развития звукоусилительной техники, но эта тема оставляет после себя больше вопросов, чем ответов, например, в [1]. Самое простое решение — отказаться от ОООС в усилителе, что сегодня и применяется в большинстве “топовых” усилителей, и это с особенной гордостью подчеркивается в их описаниях. Действительно, звук в таких усилителях становится “музыкальным”, но при этом появляются значительные гармоники, да и демпфирование АС далеко от оптимального.

Один из разработчиков такой аппаратуры — В.Хоменко — в интервью журналу “Аудиомагазин” о ламповом направлении заявил: “...Они (дилеры) ожидали от нас прогресса в сторону ламповую, а мы пошли в сторону лучшего звука” [2]. По поводу ОООС он 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”.

По такому же пути пошел и другой наш бывший соотечественник В.Шушурин. Его усилители “Lamm” (рис.3) — также без ОООС [3]. На-

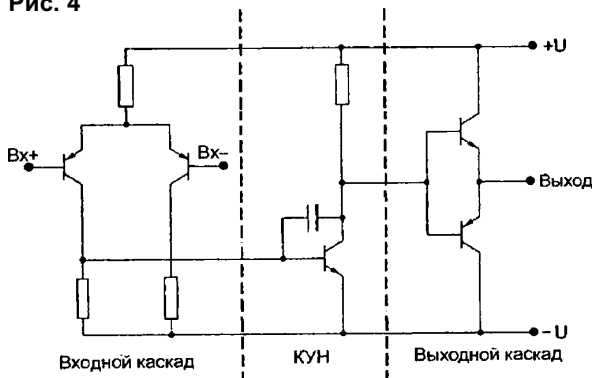
Рис. 3



пример, "Lamm M1.1" имеет выходное сопротивление $R_{\text{вых}}=0,2$ Ом и коэффициент гармоник $K_f=0,3\%$, что характерно для типовых схем двухтактных повторителей типа "тройка".

В 1956 г. Лин (Lin H.C.) опубликовал схему УМЗЧ с двухкаскадным усилителем напряжения (УН) с коррекцией Миллера и бестрансформаторным квазикомплементарным выходным каскадом. В дальнейшем

Рис. 4



входной каскад был заменен на дифференциальный (ДК), выходной — на комплементарный, и эта структура (рис.4) стала основой большинства современных ОУ да и УМЗЧ [4].

В принципе, для уменьшения гармоник в усилителе есть три пути:

- применение качественных элементов;
- линейризация каскадов;
- использование ООС.

По первым двум путям разработчики идут, применяя новые высококачественные, но дорогие элементы (ОУ, резисторы, конденсаторы и др.), специальные компенсационные схемы, введение местных ОС и пр. Но третий путь оказался схемотехникам более простым и привлекательным.

В ламповых усилителях глубокою ООС не удавалось применить из-за определенных технических трудностей. Но это "не подмочило" их репутацию. А если и удавалось использовать ООС, то звук от этого только ухудшался и начинал напоминать звучание транзисторных усилителей. В транзисторных же усилителях применение ООС не вызвало особых проблем, и это было привлекательно для уменьшения искажений. На первый взгляд, все казалось предельно ясным. Но тут и ожидало схемотехников самое главное заблуждение...

Казалось, что достаточно снизить нелинейные искажения до исчезающе малой величины, и звук будет безупречным. Так как транзисторная схемотехника более гибкая, на нее возложили ос-

новные надежды, а ламповые усилители на какое-то время предали забвению.

Транзисторные усилители обеспечивали небывало широкий диапазон передаваемых частот, имели фантастически низкий уровень нелинейных искажений, крайне малое выходное сопротивление, большие выходные мощности и несопоставимо более высокий КПД. Лампы проигрывали им по всему фронту, кроме одного: субъективно транзисторные усилители звучали хуже!

Но для массового потребления выпускаемые транзисторные усилители вписывались в существующие технические условия, и это, в основном, всех устраивало. До тех пор, пока не появилось новое течение в аудиоиндустрии — Hi-End. Все схемотехнические наработки за эти годы автоматически попали и в это направление. Но меломаны и аудиофилы-адепты Hi-End'a заметили, что их обманывают. И тут все пошло вспять, т.е. начался "бурный" возврат к лампам!

Разумеется, производители дорогих усилителей не хотели сдавать свои позиции в хоть и небольшом, но лакомом сегменте Hi-End'a, и стали улучшать их технические характеристики. К сожалению, зачастую разработчиков усилителей интересовало не качество воспроизводимого звука, а абстрактные для пользователя параметры. Они, за счет увеличения глубины ООС, методично добавляли нули после запятой в коэффициент гармоник и получали при этом, в качестве бонуса, практически нулевое выходное сопротивление усилителей. Менеджеры по продажам "размахивали" демпинг-фактором, доходившим до 2000 и более, и т.п. Это некоторое время способствовало реализации продукции, но звучание усилителей, вопреки ожиданиям, при этом не становилось более "живым", что и привело к "феномену транзисторного звучания". Вот выдержка из книги Роберта Харли [5] по этому поводу: "...Любопытно, что усилители, имеющие самые малень-

кие THD (гармоники), как правило, отличаются на более низком качеством звучания...". Стало ясно, что сам по себе коэффициент нелинейных искажений ничего не говорит о качестве звука.

Как сказал однажды немецкий патологоанатом Даниель фон Реклингхаузен: "Если измерения хороши, а здоровье плохое, то это плохо. А если измерения плохи, а здоровье хорошее, значит, вы не то измеряли..."

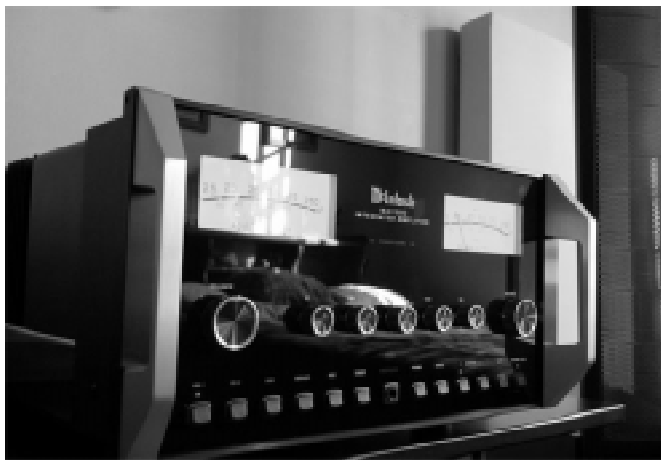
Как это точно подходит к современному Hi-End'у!

Некоторые разработчики транзисторных усилителей, по аналогии с ламповыми, для согласования с нагрузкой стали использовать трансформаторы или автотрансформаторы. Например, так сделано в усилителях известной фирмы Макинтош (McIntosh) (рис.5) [6].

На первый взгляд, может показаться, что гораздо проще и дешевле было бы установить пару-другую дополнительных выходных транзисторов. Однако решив задачу согласования с помощью трансформаторов, конструктора в качестве бонуса получили более эффективную борьбу их усилителей с противоЭДС. Но и наградили усилители существующими недостатками трансформаторов. Тем не менее, эти усилители славятся своей "точностью звука".

С возрождением лампового направления казалось, что достаточно избавиться от слабого и нетехнологичного звена — выходного трансформатора, и ламповые усилители поднимутся на высшую ступень. Ведь трансформатор — слишком нелинейный элемент. И действительно, такие усилители OTL (output-transformerless) появились (например, УМЗЧ "Graf GM20 OTL" — рис.6), но, не

Рис. 5



успев родиться, тут же умерли, не оправдав надежд [7].

Это наводит на мысль, что трансформатор, несмотря на все свои недостатки, играет важную роль в формировании "правильного звука"! По всей видимости, трансформатор в некоторой степени компенсирует противоЭДС динамиков, ведь он тоже вырабатывает свою противоЭДС и этим несколько уменьшает торможение диффузора громкоговорителя, вызванное действием его противоЭДС. Возможно, по этой причине, иногда говорят, что субъективно "ламповые ватты" громче "транзисторных". В то же время, получается, что громкоговоритель как бы работает в режиме, напоминающем режим генератора тока, т.к. выходное сопротивление ламп достаточно большое, а трансформаторы рассчитывают, исходя из $3R_i$ (для триодов, R_i — внут-

Рис. 6



реннее сопротивление лампы), но это отдельная и очень интересная тема со своими, иногда противоречивыми тонкостями...

Мною на слух было подмечено, что в усилителях с ООС, наряду со значительным улучшением параметров, происходит обеднение, "зажатость" звука вверху низкочастотного диапазона. Я для себя это явление назвал "пропадание телесности": вроде, все есть, а присутствия "телесной энергети-

ки" нет, хотя приборы аномалий не замечают. Я предположил, что из-за присутствия ООС в усилителе происходит некоторое изменение фазовых соотношений сигналов в этом диапазоне.

"Пропадание телесности" очень хорошо заметно на рояле. Тембрально эффект напоминает ухудшение послезвучания деки концертного рояля. Звук становится беднее и напоминает звук пианино. Он как бы "остается на сцене" и "не выходит в зал к слушателю". Разумеется, это не полное описание характеристик звука. Одновременно происходит некоторое увеличение энергетики внизу низкочастотного диапазона. В верхнем звуковом диапазоне происходит незначительное улучшение микродинамики, но при внимательном прослушивании замечаешь ее излишнюю подчеркнутость. В то же время, это происходит очень деликатно, и аудиофилы на это часто "покупаются". Из-за неестественной микродинамики появляется мнимое ощущение глубины сцены. В натуральном звуке эти обертоны также есть, но они находятся на задних планах и почти не слышны. Стало быть, надо искать, что влияет на ООС.

(Окончание следует)



А.МЕДВЕДКО,
г.Минск, Беларусь.

История двух изобретений, или “второе дыхание” транзисторных усилителей

(Продолжение. начало в №10/13)

Так случилось, что в позапрошлом году благодаря журналу “Радиомир” я познакомился с популярным автором многих статей в радиотехнических журналах Александром Петровым. Впоследствии у нас завязалась переписка и общение через Интернет. Мы оба при анализе схем используем среду электронного моделирования МС9, что облегчает обмен мнениями. При обсуждении существующих проблем в УМЗЧ затронули один из главных вопросов: какие гармоники и коэффициент демпфирования действительно необходимы.

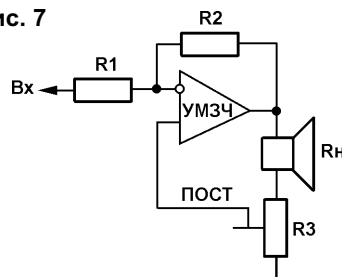
А.Петров предложил мне попробовать корректор Хауксфорда (M.J.Hawksford) [8], который он ранее применял в своих разработках для уменьшения гармонических искажений [9]. Этот корректор также использовался в усилителе В.Хорошева и А.Шадрова [10] с аналогичной целью. Основы такой коррекции были заложены еще в 1941 г. [11] (продолжены в 1978 г. [12]). Из статьи Хауксфорда известно, что при точной настройке корректора, когда его выходное сопротивление близко к нулевому, гармоники УМЗЧ минимальны.

Встроив корректор Хауксфорда в выходной каскад своего УМЗЧ, добившись его точной настройки и прослушав музыкальный материал, я отметил, что звук, несмотря на полученные весьма малые искажения (менее 0,02%, а практи-

чески, можно получить еще меньше), был “мертвым”, как и при введении в УМЗЧ ООС.

В ходе экспериментов выяснилось, что отклонение настройки корректора от оптимальной в одну сторону давало положительное выходное сопротивление УМЗЧ, а в другую — отрицательное (в усилителе с отрицательным выходным сопротивлением при увеличении сопротивления нагрузки выходное напряжение уменьшается, и наоборот).

Рис. 7



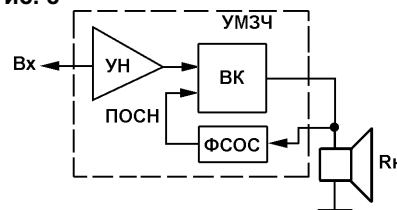
Обычно отрицательное выходное сопротивление получают введением в УМЗЧ в дополнение к обычной ООС по напряжению положительной обратной связи (ПОС) по току нагрузки (рис.7). При отключенной нагрузке ($R_n = \infty$) ПОС по току (ПОСТ) отсутствует, и коэффициент усиления УМЗЧ определяется только глубиной ООС. Подключение R_n приводит к увеличению коэффициента усиления, так что выходное напряжение усилителя возрастает.

Но с корректором Хауксфорда отрицательное выходное сопротивле-

ние получается за счет ПОС по напряжению (ПОСН) в самом конце усилительного тракта (рис.8), который можно представить как усилитель напряжения (УН) и выходной каскад (ВК), в который добавляется сигнал ПОСН от соответствующего формирователя ФСОС (формирователя сигнала ОС). Так как он находится на выходе УМЗЧ, то должен мгновенно реагировать на отклик ЭДС акустической системы и стараться компенсировать его противофазным напряжением выходного каскада.

Прослушивание показало, что при отрицательном выходном сопротивлении, полученным таким образом, звук становится значительно натуральнее, “живее”. Это обстоятельство подтолкнуло меня провести тщательные исследования влияния

Рис. 8



отрицательного выходного сопротивления на звук. Сообщил о результатах исследований А.Петрову и тут же через Интернет получил от него ответ:

“Андрей! Я подозреваю, что ты — на пороге открытия! Так что же отвечает за восприятие музыки? То, что не количество нулей после за-

пятой, уже давно понятно; то, что без ООС лучше — тоже понятно. В ВК на Шиклаи также есть токовая ООС, может быть, именно влияние против ЭДС как-то и здесь сказывается. Или все-таки изюминка в особой нагрузочной способности ВК? Я неспроста исследую поведение ВК в шаговом режиме с нагрузкой от 1 до 8 Ом, можно и до 16 Ом. Тогда видно, как ведет себя ВК. Еще можно посмотреть Transient'e в шаговом режиме при разных уровнях сигнала на выходе. Не мне тебе рассказывать об обработке звука типа вибрато, тремоло и т.п. Может быть, именно особая нагрузочная способность ВК и создает эффект глубины пространства. Я думаю, ты докопаешься... Успехов! Александр" (28 июня 2012 г.).

Из письма видно, что А.Петров тоже находится в поиске "правильного звука".

ПОС по напряжению позволяла использовать ее не только во всем звуковом диапазоне, но и за его пределами. Попробовал — ЭВРИКА! Я получил именно тот "звук", который все время искал! И это было первое открытие!

Самое интересное, при моем озвучивании с ранними зарубежными и русскоязычными публикациями по применению корректора Хауксфорда выяснилось, что все разработчики использовали его только для уменьшения гармоник! Вот так, иногда достаточно одного посыла для применения давно известной схемы (с незначительной доработкой) в решении других, еще более важных задач. Все дело слушая!

Анализ работы схемы и эксперименты подтвердили мои прежние предположения: виной всему — действие отклика ЭДС громкоговорителя, который попадает в цепь

ООС, независимо от того, охватывает ли она весь усилитель или только его выходной каскад, как это происходит в оригинальном корректоре Хауксфорда. При этом сигнал отклика ЭДС имеет непредсказуемые фазовые сдвиги относительно сигнала на выходных клеммах УМЗЧ. Поэтому отклик ЭДС, попадая в цепь ООС, приводит к значительной деградации звука.

Полученный результат можно зафиксировать только при реальной работе усилителя на громкоговоритель, и именно поэтому в процессе разработки звукового тракта необходимо уделять большое внимание слуховой экспертизе.

Помимо реально полученных результатов, было проведено и моделирование схемы в среде МС9. Ввиду того, что А.Петров обратил мое внимание на корректор Хауксфорда и помог на первых порах разоб-

Коррекция искажений в звуковых усилителях мощности

M.HAWKSFORD.

От редакции:

В последнее время в УМЗЧ для уменьшения искажений стал широко применяться так называемый "Корректор Хауксфорда". В литературе и на сайтах Интернета приводится его схема, но ссылки часто даются на более поздние публикации. Предлагаем читателям перевод (с небольшими сокращениями) "исходной" статьи М.Хауксфорда (M.J.Hawksford).

В настоящей статье обсуждаются проблемы минимизации переходных искажений в звуковых усилителях мощности класса "А" и "АВ". Обычно для достижения приемлемой линейности применяют обратную связь по выходному напряжению с соответствующим смещением для выходных транзисторов. Однако, поскольку все транзисторы имеют нелинейность и, кроме того, выходные транзисторы работают с отсечкой, возможности для успешного подавления искажений ограничены.

Существует несколько принципиальных проблем в применении отрицательной обратной связи для минимизации искажений в усилителе мощности.

1. Мощные биполярные транзисторы имеют ограниченную полосу частот (обычно 1...5 МГц), поэтому, если требуется "нединамическое поведение" в пределах полосы звуковых частот, то возможно петлевое усиление не более 30 дБ.

2. Поскольку искажения типа "ступенька" являются переходными (импульсными) по природе и широкопо-

лыми, неизбежно спадающее петлевое усиление на высоких частотах совместно с задержкой в петле усиления жестко ограничивает возможность подавления искажений.

3. В усилителях с отрицательной обратной связью по выходному напряжению искажения, возникающие в выходных транзисторах, направляются обратно во входной каскад. Поэтому предвыходной каскад обрабатывает одновременно полезный входной сигнал и искажения выходного каскада. В результате, ухудшается интермодуляция, особенно

раться с его расчетом, я предложил ему стать соавтором изобретения. Так была подана первая совместная заявка на изобретение: А20121287 — «Использование отрицательного выходного сопротивления с помощью ПОС по напряжению для борьбы с действием противоЭДС».

Исходя из полученных результатов, невольно напрашиваются выводы: стало быть, не в гармониках проблема и не в спектре, что на протяжении многих лет теории старались нам внушить. Сколько теорий, споров, мнений на эту тему..., смакование аудиофилами четных и нечетных гармоник и их подбор для разных музыкальных жанров. Просто целое «звукорежиссерское искусство», а ведь гармоник, по определению, вообще не должно быть: ни четных, ни нечетных. Разумеется, вопросы, касающиеся порога физиологической

заметности искажений и их комбинаций, остаются в силе.

Перейдем к практической схеме усилителя на основе структурной схемы по рис.8. Усилитель напряжения (рис.9) — однокаскадный, собранный по двухтактной каскодной схеме на транзисторах VT1...VT4. Коэффициент усиления по напряжению равен 30 дБ и определяется резисторами R4, R5 и R16. Токи покоя транзисторов VT1, VT2 и VT3, VT4 задаются по 3 мА с помощью резисторов R3, R6 и R13, R14 соответственно. Буферный каскад выполнен на транзисторах VT5, VT6, узел согласования — на конденсаторе C11 и резисторе R25. Все светодиоды — зеленого свечения. С помощью интегратора DA1 поддерживается ноль на выходе буферного каскада. При желании интегратор можно исключить из схемы и выставлять ноль на выходе УН с помощью потенци-

ометра, включенного между резисторами R8 и R9 (его средний вывод соединяется с общим проводом).

Данная схема УН — вполне самодостаточна. Другие схемные решения, дающие фактическое улучшение параметров в целом, не приводят к заметному улучшению звучания. Коэффициент гармоник при подборе элементов и тщательной настройке УН — не более 0,02%. При полном размахе выходного напряжения присутствуют только вторая и третья гармоники. Источник питания УН построен на отдельном трансформаторе.

Выходной каскад (рис.10) — трехкаскадный. Его особенность — узел на транзисторах VT1...VT8 (корректор Хауксфорда). Ток генератора стабильного тока (ГСТ) положительного плеча на транзисторе VT1 делится пополам между ветвями на транзисторах VT2 и VT5. Аналогич-

если полоса частот, в которой возникают искажения, значительно превышает полосу звуковых частот.

4. Если $R_{\text{вых}}$ выходного каскада не равно нулю (независимо от величины обратной связи), громкоговоритель становится неотъемлемой частью петли обратной связи. Поэтому, если нагрузка имеет нелинейность, компоненты искажений снова попадают назад во входной каскад усилителя.

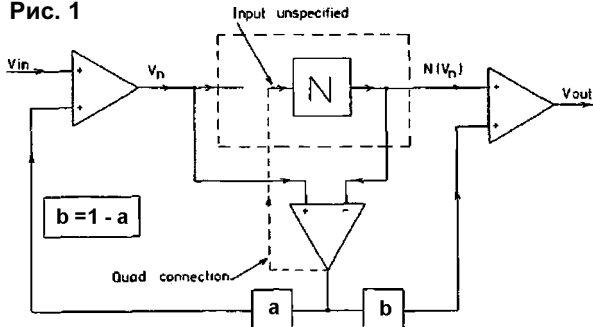
В настоящей статье предлагается методика, которая существенно ли-

неаризует характеристики выходного устройства как по отношению к напряжению, так и к току. Развивается подход, помогающий преодолеть указанные выше проблемы.

Принцип подавления искажений может быть описан путем рассмотрения обобщенной ошибки обратной связи (рис.1). В этой схеме есть чувствительная к ошибке прямая и обратная связь, применяемая по отношению к нелинейному элементу N .

Сигнал ошибки, используемый в системе, задается как разность сигнала на входе и на

Рис. 1



сигнала на выходе. Поэтому, если N — идеальный элемент ($N=1$), сигнал ошибки равен нулю и коррекция отсутствует. Однако во всех реальных усилителях N отличается от единицы, поэтому возникает сигнал ошиб-

ки, представляющий собой искажения каскада N .

Пусть V_n и $N(V_n)$ — входное и выходное напряжения для N . Анализ сигналов на рис.1 дает:

$$V_{\text{out}} = N(V_n) + b[V_n - N(V_n)]$$

$$V_n = V_{\text{in}} + a[V_n + N(V_n)].$$

Исключая V_n , получаем

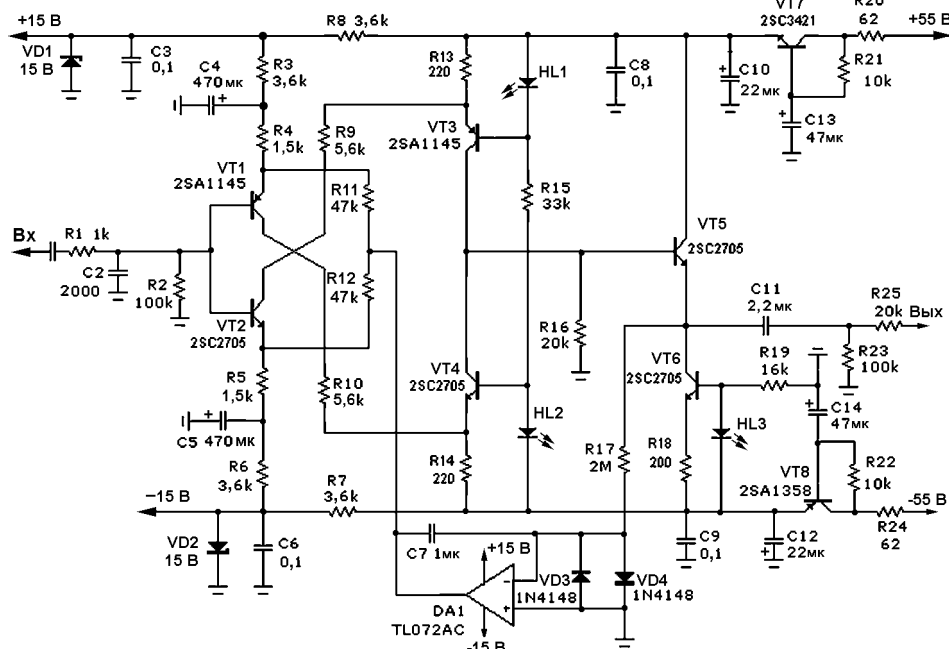
$$V_{\text{out}} = N(V_n) \left((1-b) - \frac{ab}{1-a} \right) + \frac{b}{1-a} \cdot V_{\text{in}}. \quad (1)$$

Если $(1-a)=b$ (2), то $V_{\text{out}}=V_{\text{in}}$ (3).

Таким образом, когда поддерживается необходимая стабильность усилителя и выполняется условие (2), происходит подавление искажений. Уравнения (2) и (3) показывают, что существует множество решений: от использования сигнала ошибки в обратной связи до использования сигнала ошибки в прямой связи.

Интересно отметить, что выходной сигнал N не определен. Поэто-

Рис. 9



но выполнено и отрицательное плечо на транзисторах VT3, VT4 и VT6.

Регулировать ток покоя выходных транзисторов можно с помощью

подбора сопротивления R16 и в небольших пределах токами ГСТ.

Поддержание нуля на выходе УМЗЧ обеспечивает интегратор на DA1. Диоды VD2, VD4 служат для защиты интегратора от перенапряжения по входу. При желании интегратор можно исключить из схемы и применить балансировку выходного каскада с помощью любых известных схем с применением потенциометра.

Для коррекции ошибки транзисторы VT5 и VT6 должны всегда быть в активном режиме, как при увеличении тока, так и при его уменьшении. От расчета режимов этого узла зависит точность коррекции сигнала ошибки, ток покоя оконечного кас-

му он может быть получен непосредственно из V_n , а также и из любой точки схемы при условии обеспечения устойчивости. Например, полагая $a=0$, $b=1$, приходим к классической схеме с прямой связью. Если на вход N подавать выходной сигнал усилителя разностной ошибки, приходим к схеме обратной связи Quad (пунктир на рис. 1).

В настоящей статье мы рассмотрим противоположный предельный случай, когда $a=1$, $b=0$, и входной сигнал N равен V_n . Такая система впервые обсуждалась Левелином в 1941 г. в связи с ламповыми усилителями и позднее Шерри в 1978 г.

В усилителях мощности обычно применяются биполярные выходные транзисторы с нелинейным усилением тока. Поэтому при включении таких транзисторов по схеме комплементарного эмиттерного повторителя, преобразованная нагрузка (импеданс громкоговорителя), приведенная к базам транзисторов,

становится нелинейной и вносит вклад в искажения усилителя.

Если использовать обратную связь с коррекцией ошибки, которая чувствительна к входному току, можно скомпенсировать изменения усиления тока. Тогда совместно с обратной связью, чувствительной к ошибке по напряжению, можно получить выходной каскад с единичным усилением и конечным выходным сопротивлением.

На рис. 2 показана схема, включающая цепи, чувствительные к току и к напряжению, на рис. 3 — ее практическая реализация.

Анализ показывает, что если

$$k_1 = 1 + \frac{2R_1}{R_2}, \quad (4)$$

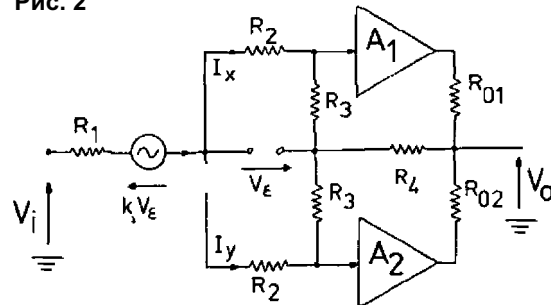
$$R_1 R_3 = R_2 R_4, \quad (5)$$

то усиление равно 1, даже если токи баз транзисторов T1 и T2 конеч-

ны и V_{BE}/I_E вносит нелинейность. Отметим, что сопротивление резистора R1 включает выходное сопротивление драйверного каскада. Это значит, что драйверный каскад не должен иметь нулевое выходное сопротивление.

Усиление по напряжению равно единице, а это значит, что выходное сопротивление каскада равно нулю даже при конечном выходном сопротивлении драйверного каскада. В результате, для работы усилителя с использованием такой системы обратной связи с коррекции-

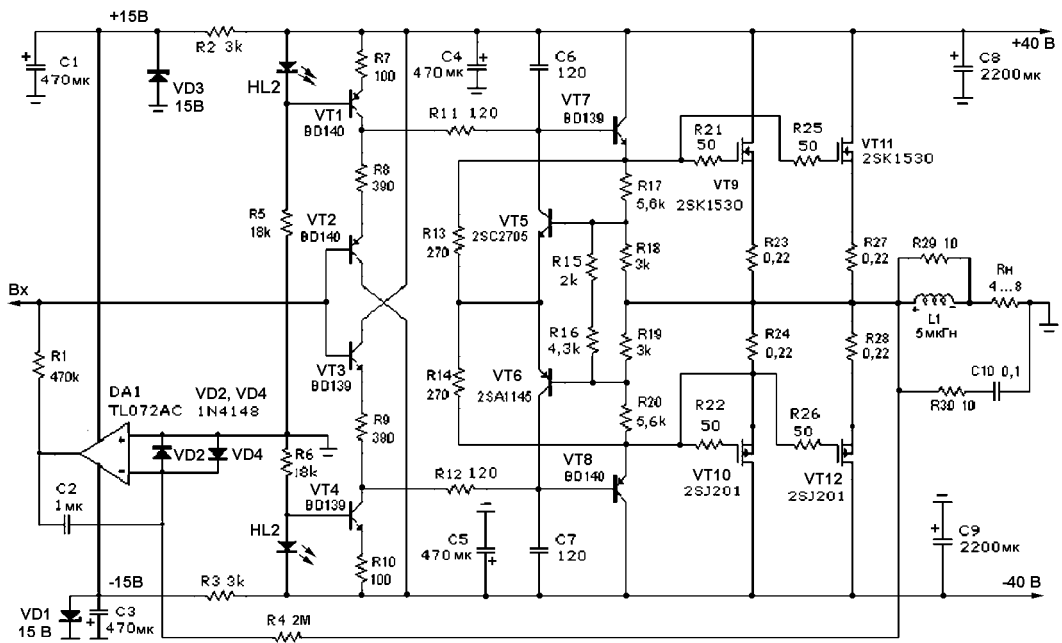
Рис. 2



када и выходное сопротивление усилителя. Для работы на АС сопротивлением 4 Ом лучше использовать по два полевых транзистора в плече.

Исходная схема корректора Хауксфорда с выходными транзисторами Дарлингтона (VT5, VT6) представлена на рис.11. E — это оптимальное смещение для выходных транзисторов с учетом падения напряжения на эмиттерных (ис-

Рис. 10

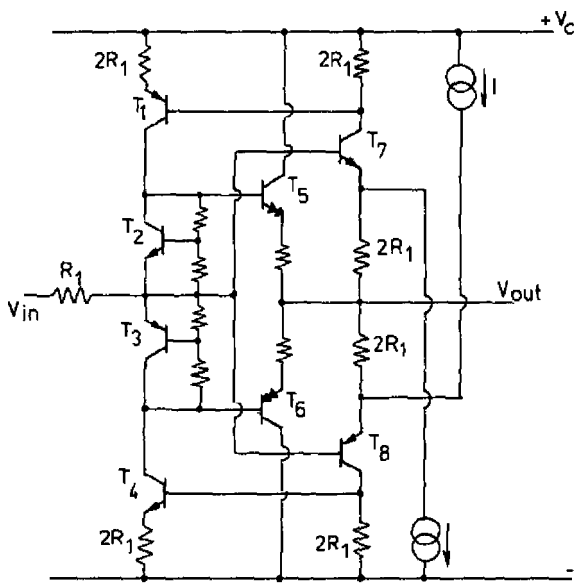


токовых) резисторах Re в классе “AB”, при котором искажения мини-

мальны. В моем усилителе вместо транзисторов Дарлингтона приме-

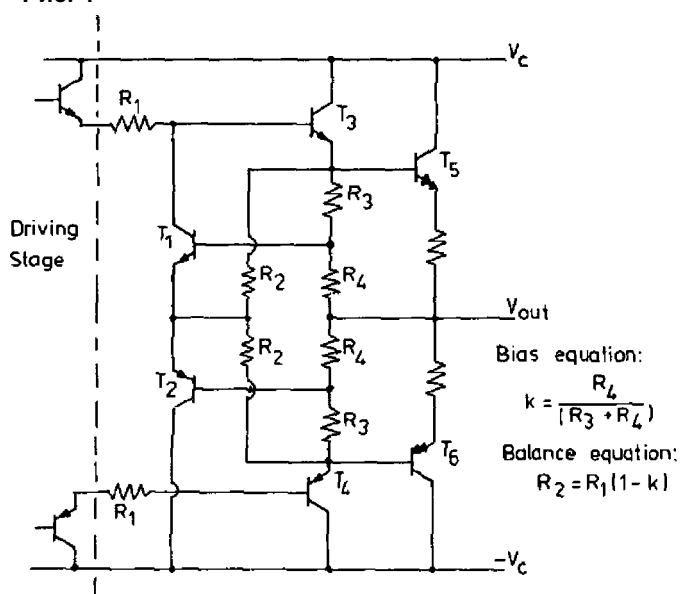
нены полевые (MOSFET) с порогом открывания 1,65 В. Оптимальное

Рис. 3



ей ошибки не требуется петля общей обратной связи по выходному напряжению для достижения требуемого демпфирования громкоговорителя. Одновременно нагрузка

Рис. 4

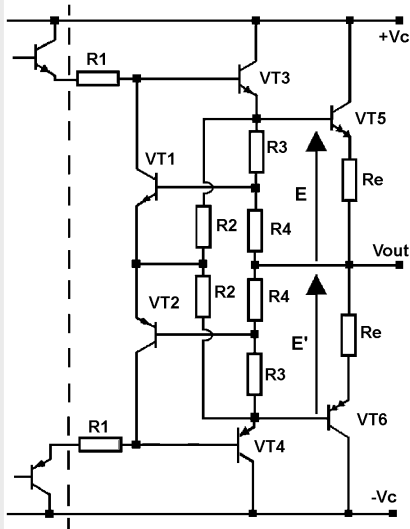


(громкоговоритель) эффективно развязана от петли общей обратной связи, и именно благодаря этому исключается проникновение продуктов искажений, возникающих в

громкоговорителе, во входной каскад усилителя мощности.

Схема на рис.4 имеет чувствительность к ошибке по напряжению. В ней усилитель ошибки выполнен

Рис. 11



значение тока покоя для ПТ типов 2SK1530 (2SK1529) и 2SJ201 (2SJ200) — 300 мА. Значение E будет около 1,8 В. Чтобы открыть транзисторы VT1, VT2, необходимо,

чтобы их напряжения база-эмиттер были примерно 0,65 В. Возьмем резисторы R4 равными 3 кОм. Тогда ток базовых делителей транзисторов VT1, VT2 будет равен 0,22 мА. Найдем сопротивление R3:

$$R3 = \frac{E - 0,65}{0,22} = \frac{1,8 - 0,65}{0,22} = 5,22 \text{ (кОм)}.$$

Берем ближайшее значение из стандартного ряда, равное 5,6 кОм. Зная резисторы базового делителя, вычислим коэффициент K :

$$K = \frac{R4}{R3 + R4} = \frac{3}{5,6 + 3} = 0,348.$$

Задав сопротивление R1 равным 500...700 Ом, нетрудно подсчитать сопротивление R2.

Резисторы R1 в корректоре, использованном в ВК усилителя, состоят из резисторов R8, R11 и R9, R12 (рис. 10) и разбиты так, чтобы по обоим парам резисторов протекали примерно одинаковые токи (5...7 мА). Тогда (для R2 на рис. 11):

$$R2 = R1(1 - K) = (390 + 120) \cdot (1 - 0,348) = 510 \cdot 0,67 = 332 \text{ (Ом)}.$$

Это — оптимальное сопротивление резисторов для получения минимальных гармоник. Теперь, для простоты расчетов задавшись током ГСТ 10 мА, будем иметь токи по 5 мА для этих резисторов. Остальные резисторы рассчитываются классическим методом.

Синхронно уменьшая сопротивление R13 и R14 (рис. 10), получаем ПОС по напряжению и добиваемся нужного отрицательного выходного сопротивления. Наиболее простой способ проверки выходного сопротивления заключается в измерении напряжения на выходе усилителя на холостом ходу и под нагрузкой, а затем расчет по формуле:

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_H (U_{\text{хх}} - U_H)}{U_H}.$$

(Окончание следует)

на “диодах с усилением” T1, T2, на транзисторах T3, T4 — драйверный каскад, а на транзисторах Дарлингтона T5, T6 — выходной каскад. При разработке практических схем чувствительность к балансировке будет сильно зависеть от тока покоя выходных транзисторов. Балансировка критична при очень малом смещении. При нормальном смещении подстройка не критична, чему также способствует и неглубокая общая обратная связь.

Заключение. В настоящей статье описан подход к построению усилителя мощности, при котором нелинейные искажения, возникающие в выходных транзисторах, компенсируются простой быстродействующей местной схемой, что обеспечивает высокую линейность и может применяться в выходных каскадах типа повторителей класса “А” и “АВ”.

Такой подход должен приветствоваться сторонниками школы конструирования усилителей с применением слабой обратной связи, так как корректирующая обратная связь применяется только при возникновении искажений в выходном каскаде. Поэтому, если выходной каскад N разработан так, чтобы иметь максимальную линейность, то можно получить минимальные сигналы ошибки.

Поскольку искажения выходного каскада и громкоговорителя принципиально изолированы от входных каскадов, эти каскады могут иметь незначительное усиление по напряжению, ввиду того, что не требуется большое петлевое усиление для достижения линейности усилителя. Следовательно, петлевое усиление может быть малым и широкополосным, обеспечивая “нединамическое поведение”

“петли” в полосе частот, превышающей звуковой диапазон.

В практических схемах чувствительность к балансировке сильно зависит от тока покоя выходных транзисторов и критична при очень малом смещении. При нормальном смещении подстройка не критична, чему также способствует и неглубокая общая обратная связь.

На практике полоса пропускания цепи коррекции велика, что позволяет получить быструю коррекцию искажений выходного каскада. Именно за счет скорости петли коррекции и удается сильнее подавить искажения по сравнению с системами с общей обратной связью.

Journal of Audio Engineering Society, 1981, v.29, p.27.
Перевод С. Гапоненко.



А.МЕДВЕДКО,
г.Минск, Беларусь.

История двух изобретений, или “второе дыхание” транзисторных усилителей

(Окончание. начало в №№10-11/13)

Продолжая эксперименты, я выяснил, что выходной каскад “не любит” жесткой привязки к источнику сигнала, т.е. низкого выходного сопротивления УН. Как это было открыто, опишу чуть позже, а пока вернемся к одному интересному, но до сих пор необъяснимому явлению, на которое указал В.Шушурин [13]: “...Транзисторный усилитель, построенный по принципу УПТ (усилителя постоянного тока, т.е. без использования переходных конденсаторов), каким-то образом сдвигает форманту инструментов, работающих в области басового регистра, не нарушая узнаваемости звучания самих инструментов...”. Поэтому в своих разработках он отказался от УПТ и использует переходной конденсатор между усилителем напряжения и оконечным выходным каскадом. Принято считать, что конденсатор ухудшает звук, а тут явное улучшение! Хотя большинство разработчиков продолжают настаивать, что УМЗЧ должен строиться только по принципу УПТ.

В гибридной схемотехнике применение переходного конденсатора было необходимо из-за присутствия высокого напряжения на выходе УН, а о второй причине (улучшении звука) мало кто знал, и она не была изучена, поскольку очевидно не просматривалась. Проверив это, я также убедился в улучшении качества звучания. Хотя переходной конденсатор использо-

вался емкостью 2,2 мкФ, что при входном сопротивлении оконечного каскада 47 кОм дает частоту среза около 1,6 Гц, тем не менее, эффект проявляется весьма заметно. Разумеется, хотелось найти истинную причину улучшения звука. Кстати, В.Шушурин на этот вопрос в вышеуказанной статье дал достаточно загадочный и неубедительный ответ: “...Решение пришло позднее, после того, как я стал заниматься некоторыми прикладными аспектами психоакустики и вопросами влияния акустических волн на человеческий организм...”.

Пришлось разбираться самому. Первое предположение было, что эффект заключается во вращении фазы сигналов в области НЧ. Я проверил работу одного и того же УМЗЧ на акустические системы и на головные телефоны (через резистивный делитель). Когда обнаружил, что в телефонах эффект не проявляется, стало ясно, что и здесь “выглядывает” отклик ЭДС акустических систем. После проверки выходного сопротивления испытываемого усилителя с конденсатором и без него на частоте 1 Гц выяснилось, что с конденсатором на инфранизких частотах оно еще больше снижается, т.е. становится более отрицательным. Это подтвердило и моделирование в МС9.

Без конденсатора на слух происходит пропадание “живости” энергетики НЧ-составляющих, звук ста-

новится как бы “суше”. Для неискушенного слушателя этот эффект малозаметен, поэтому о нем отсутствует информация в литературе. Тем более, в разных АС по-разному проявляется и действие противозвезд, так как применяются разные фильтры. Таким образом, переходной конденсатор улучшает демпфирование громкоговорителей на инфранизких частотах.

В моем усилителе был использован УН по схеме “сломанного каскода”, ранее описанный А.Петровым в [14], где был проведен сравнительный анализ разных схемных решений УН (в среде МС9), в которых первенство было за “сломанным каскодом”. Это побудило меня проверить его на практике в гибридном усилителе с некоторыми доработками (с неглубокой ООС и с выходным сопротивлением порядка 20 кОм). Каскод показал свое значительное превосходство по звуку по сравнению с ламповым каскадом по схеме SRPP (были испытаны разные лампы и менялись их режимы).

Для улучшения параметров УН было заманчиво увеличить глубину ООС. Увеличил и... звук значительно ухудшился! Тогда решил поставить эмиттерный повторитель для развязки УН от оконечного каскада, и... ситуация еще больше ухудшилась! Звук стал более “жестким” и “зажатым” чем прежде!

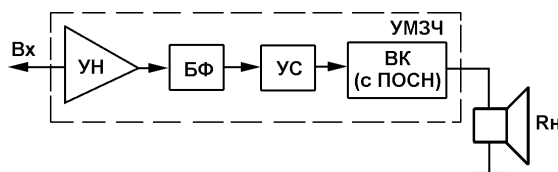
Все стало ясно: оконечный каскод плохо согласуется с малым

выходным сопротивлением предыдущего каскада! Ранее, когда использовался УН с неглубокой ООС, выходное сопротивление УН было большим (порядка 20 кОм), и усилитель очень хорошо звучал.

Напращивалось решение: увеличить выходное сопротивление эмиттерного повторителя. Я включил между эмиттерным повторителем и оконечным каскадом сопротивление непривычно большой величины, примерно равное ранее выставленному выходному сопротивлению УН (20 кОм).

Усилитель стало невозможно узнать! Он стал звучать лучше чем раньше (с неглубокой ООС в УН). Звук стал “быстрым”, “легким”, с прекрасной прорисовкой середины и собранным, хорошо артикулированным басом! Какая-либо окраска звука отсутствовала полностью — это то, о чем мечтает каждый аудиофил!

Рис. 12

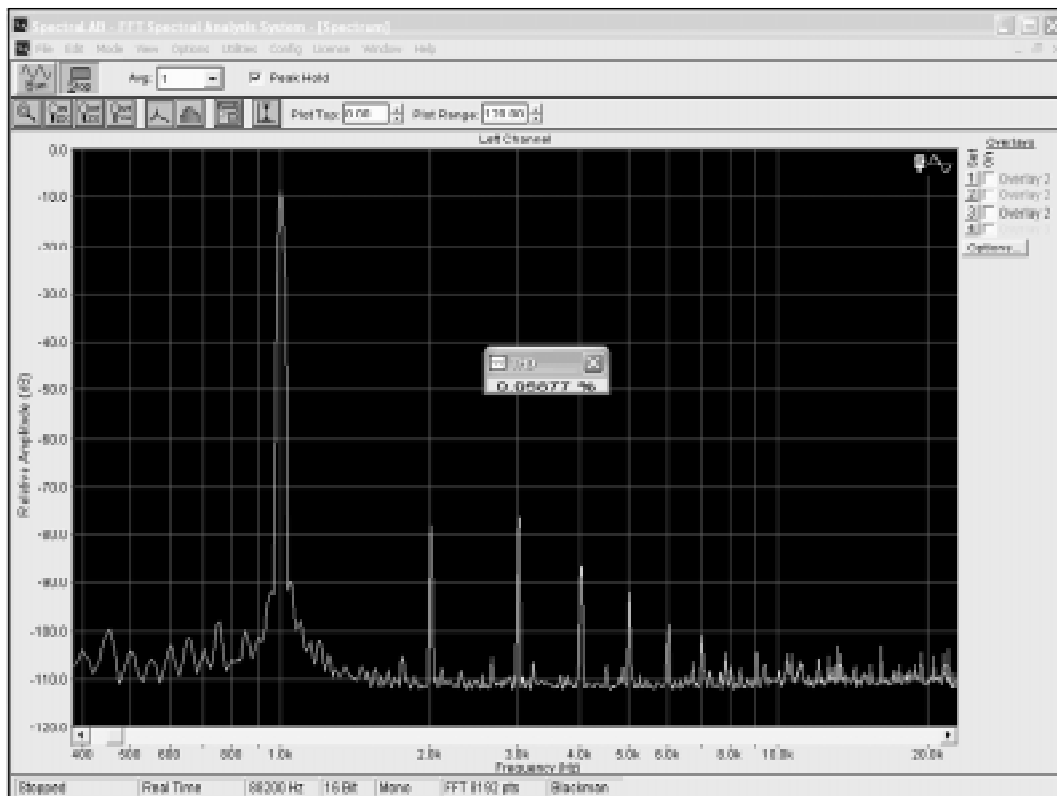


При прослушивании невозможно было определить “происхождение” усилителя, т.е. его звук стал явно не “ламповым”, но и не “транзисторным”. Если так можно выразиться, “нейтральным”! По звуку, создается такое впечатление, усилитель вообще не ощущает нагрузку (акустические системы). В то же время, полностью отсутствует “окрас звука”, который бывает из-за достаточно большого выходного сопротивления лампового усилителя и реактивного сопротивления акустических систем. Также отсутствует и “ламповая сладость”, возникающая благодаря определенному спектру искажений, которую так любят некоторые аудиофилы-“ламповики”.

Добавленный резистор действует как демпфер, поддерживая отрицательное выходное сопротивление в звуковом диапазоне на постоянном уровне, а далее на инфранизких частотах передает эстафету конденсатору, который еще более увеличивает отрицательное выходное сопротивление оконечного каскада.

Были проведены слуховые сравнения двух вариантов усилителей. В первом использовался УН с выходным сопротивлением 20 кОм и неглубокой ООС, во втором — такой же УН, как и в первом, но с узлом согласования (с резистором 20 кОм). Предпочтение было отдано второму варианту, т.к. в первом

Рис. 13



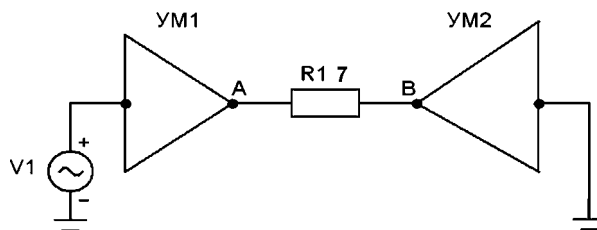
ощущалась незначительная “размытость” музыкальных образов. Объясняется это прониканием сигнала противоЭДС на вход оконечного каскада, который напрямую подключен к выходу УН, что приводит к незначительной модуляции режимов УН и, как следствие, к деградации звука. Особо это заметно при применении УН с глубокой ООС (со всеми вышеописанными последствиями). Это было проверено как в среде МС9, так и практически — на макетном образце.

Таким образом, узел согласования позволяет применять любой УН, даже с глубокой ООС, не нарушая согласования УН с выходным каскадом. Мне кажется, применение согласующих трансформаторов, встречающихся в некоторых публикуемых конструкциях [15], играет подобную роль, что и способствует улучшению звука.

Вот так родился узел согласования: последовательная RC-цепочка между выходом драйвера (УН) и входом оконечного каскада. Это было мое второе открытие и повод для подачи второй заявки на изобретение: А20121446 — “Структура усилителя звуковой частоты с буфером после усилителя напряжения и узлом согласования с оконечным каскадом, имеющим отрицательное выходное сопротивление, полученное с помощью ПОС по напряжению, для борьбы с противоЭДС” (рис. 12).

Если говорить об измерениях, то усилитель обладает широкой полосой частот (от 1,6 Гц до 250 кГц), значительно меньшими гармониками, чем в обычных усилителях без ООС (менее 0,1%), к тому же, с очень коротким спектром (рис. 13 — спектр гармоник усилителя с $R_{\text{вых}} = -0,2 \text{ Ом}$, $U_{\text{вых}} = 10 \text{ В}$, $R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом}$). На рисунке видно, что спектр искажений ограничен восьмой гармоникой. Суммарный коэффициент гармоник — 0,06%. Скорость нарастания выходного сигнала —

Рис. 14



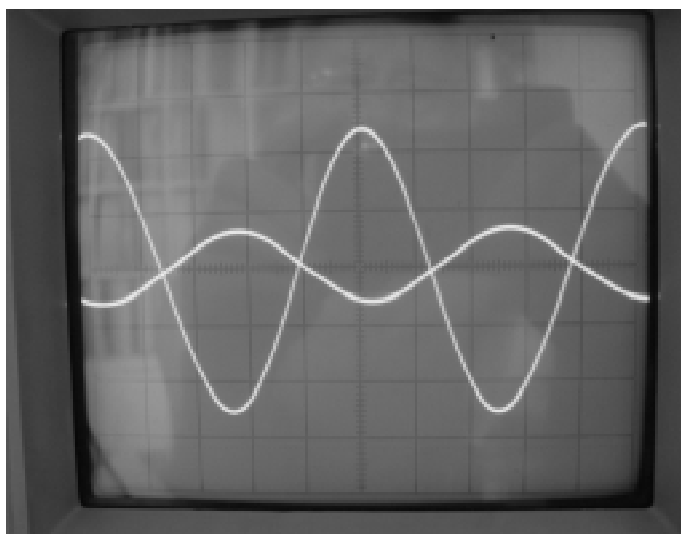
весьма высокая (50 В/мкс). Такие параметры, на мой взгляд, недоступны любому ламповому усилителю. Главное, теперь измеренные характеристики полностью согласуются с прекрасным звуком!

Для наглядной проверки эффективности работы модифицированного корректора мной был проведен очень показательный эксперимент. Я собрал схему (рис. 14), в которой в качестве УМ1 использовался традиционный усилитель с глубокой ООС, т.е. с очень низким выходным сопротивлением, а усилитель УМ2 имел отрицательное выходное сопротивление (с помощью ПОС по напряжению). Сигнал с УМ1 подавался на УМ2 через резистор R1 сопротивлением 7 Ом. На осциллограмме (рис. 15) видно, как УМ2 вырабатывает противофазный сигнал в точке “В” относительно сигнала в точке “А”, как бы компенсируя сигнал “про-

тивоЭДС” (сигнал в точке “А” амплитудой 12 В, цена деления — 5 В/клетка. Сигнал в точке “В” — осциллограмма с меньшей амплитудой, цена деления — 2 В/клетка). Подобным образом ведет себя усилитель с отрицательным выходным сопротивлением с ПОСН при работе на реальную акустику во всем звуковом диапазоне, когда от нее приходит сигнал противоЭДС.

Для отработки схемы и слухового тестирования мной были собраны два одинаковых стереотракта. Дальше использовался метод сравнения. За счет внедрения новых схемных решений я дорабатывал один из них до тех пор, пока он не становился явно лучше второго образца, который служил эталоном. Затем эти доработки вносились и во второй усилитель, они менялись ролями и т.д. Первостепенную роль в этом процессе играла слуховая экспертиза.

Рис. 15



Здесь, прежде всего, надо опираться на звуковые образы акустических инструментов и на свою музыкальную память. Кто знаком с этой работой, знает, сколько факторов влияет, особо подчеркну, на этот важный процесс при разработке звукового тракта. Надо точно знать, что требуется получить “по звуку”, и слышать, как конкретное схемное решение влияет на звук. Сколько терзаний, сомнений, противоречий..., а сколько стереотипов создано за эти годы...

Практические исследования подтвердили, что отрицательное выходное сопротивление, полученное ПОС по напряжению, можно использовать и для компенсации потерь на проводах к акустическим системам. Для достижения этого эффекта в усилителе достаточно установить величину отрицательного выходного сопротивления, равного сопротивлению акустических проводов. В этом случае напряжение на выходе УМЗЧ будет выше на величину падения напряжения на проводах, а на клеммах АС оно будет номинальным. А так как сигнал коррекции обрабатывается в выходном повторителе без участия ООС, то и не будет тех проблем, которые она вносит в работу усилителя в целом. Это прекрасный бонус при борьбе с противоЭДС!

Выводы:

1. Основной причиной деградации звука в транзисторных и ламповых усилителях с ООС является противоЭДС от индуктивностей в АС (динамических громкоговорителей и пассивных фильтров с индуктивностями).

2. Для эффективной борьбы с пагубным действием противоЭДС необходимо применять усилители с отрицательным выходным сопротивлением, полученным с помощью ПОС по напряжению.

3. Всесторонние практические исследования 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 Ом нежелательно, т.к. приводит к тембральным и повышенным гармоническим искажениям.

4. В качестве выходных транзисторов хорошо зарекомендовала себя пара MOSFET 2SK1530, 2SJ201. Использование же популярных и более дешевых транзисторов типа IRFP240, IRFP9240 (IRFP9140) приводит к “жесткому” звучанию при тех же измеряемых параметрах.

5. При работе УМЗЧ в режиме с отрицательным выходным сопротивлением между драйвером и выходным каскадом необходимо включать буферный каскад, который выполняет две основные функции: обеспечивает полную развязку драйвера от выходного каскада и создает высокое сопротивление нагрузки для драйвера, что благоприятно сказывается на снижении его искажений.

6. Усилитель не должен строиться по схеме УПТ.

7. На входе выходного каскада необходимо включать согласующее устройство, состоящее из последовательно включенного конденсатора и резистора сопротивлением до нескольких десятков килоом (верхнее значение зависит от входного импеданса оконечного каскада, при этом полоса пропускания УМЗЧ в целом должна быть не уже 70 кГц).

8. Если применяется УМЗЧ с ООС, к нему необходимо подключать излучатели, в которых при работе отсутствует противоЭДС, например, ионофоны, и использовать многополосные усилительные тракты с активными кроссоверами.

Возможно, новый подход, изложенный в этой статье, изменит некоторые взгляды радиолюбителей, занимающихся высококачествен-

ным звуковоспроизведением, на принципы построения усилителей звуковой частоты.

Литература

1. А.Алейнов, А.Сырицо. Улучшение звуковоспроизведения в системе УМЗЧ—громкоговоритель. — Радио, 2000, №7.
2. С.Таранов. Баланс и симметрия. — АудиоМагазин, 1998, №2.
3. С.Таранов. Глубина проникновения. — АудиоМагазин, 2008, №4, С.69.
4. Lin H.C. Quasi complementary transistor amplifier. — Electronics, 1956, September, p.173.
5. Роберт Харли. Энциклопедия Hi-End Audio. — Арт-Аудио, 2000.
6. J. Audio Eng. Soc. 1981, Vol.29, No.1/2, Jan./Feb.
7. И. Сухарев. Долой минимализм. — АудиоМагазин 2007, №3, С.102.
8. А.Петров. Домашний кинотеатр мини-макс. — Радиомир, 2012, №8.
9. В.Хорошев, А.Шадров. УМЗЧ без общей ООС. — Радио, 1989, №9, С.65.
10. F.B.Llewellyn. Wave Translation Systems. — U.S. Patent 2245598, 1941, June 17.
11. E.M.Cherry. A New Result in Negative-Feed-back Theory and Its Application to Audio Power Amplifiers. — Int. J. Circuit Theory Appl., vol.6, pp.265-288, 1978 July.
12. Бестрансформаторный ламповый усилитель мощности “GRAAF GM20 OTL”. — АудиоМагазин, 2001, №5, С.70.
13. Комментарии В.Шушурина к описанию конструкции усилителя “Lamm1.1”. — АудиоМагазин, 2000, №2, С.64.
14. А.Петров. Анализ драйверов для УМЗЧ без общей ООС. — Радио, 2012, №№7-8.
15. Гибридный цирклотрон класса “А” без ООС. — РадиоХобби, 2008, №3, С.54.
16. Усилитель мощности “Lamm Audio Laboratory M1.1”. — АудиоМагазин, 2000, №2, С.61.