



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 линейаризации каскадов, также проверил разные комбинации отрицательных обратных связей (ООС) в усилителях, в том числе, и вари-

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

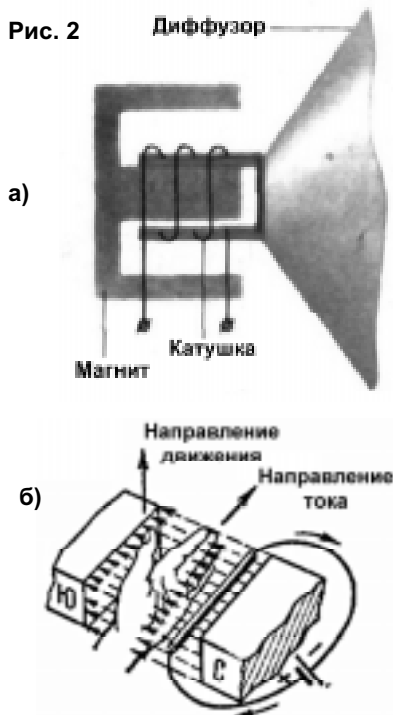
Видимо, на сегодняшний день, знание только одной схемотехники не позволяет определить истинные причины искажений звукового сигнала в УМЗЧ. Инженеры, не имеющие навыков звуковой экспертизы или пренебрегающие ею, погнались за техническими показателями, а не за “правильным звуком”. Кстати, “правильный” 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 циркулируют 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  $90^\circ$ , что,

Рис. 2



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

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;
- линеаризация 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 глубокую 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 вызывало 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-

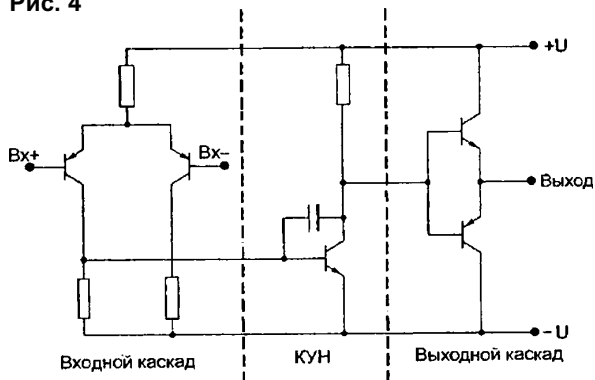
новные надежды, а ламповые усилители на какое-то время предали забвению.

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, доходящим 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-

Рис. 4



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..."

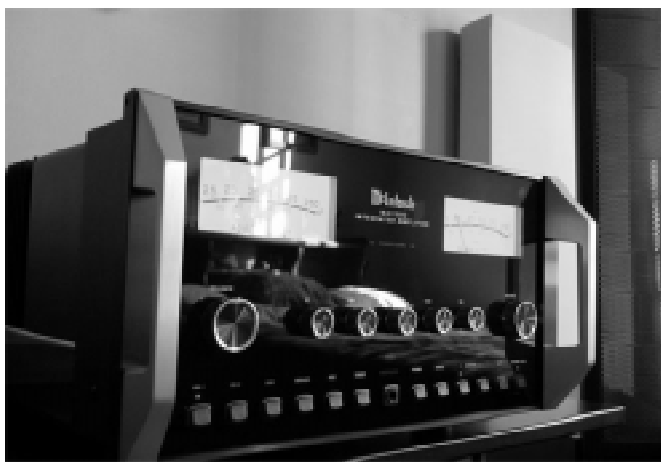
Как это точно подходит к современному Hi-End'у!

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-

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

Мною на слух было замечено, 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)

Рис. 6

