

Трансформаторы в звуковом тракте

*Новое — это хорошо забытое старое.
Пословица*

Двадцать лет назад я, как и многие радиолюбители, интересующиеся звуковой аппаратурой, зачитывался журналом „Радио“ и его младшим братом — сборником „В помощь радиолюбителю“. Со своими друзьями я бурно обсуждал необходимое количество нулей после запятой в коэффициенте нелинейных искажений „идеального“ усилителя и его устремляющуюся в космос скорость нарастания. Тогда ведь не столько слушали звучание, сколько восхищались техническими характеристиками. К сожалению, этой болезнью многие страдают и поныне.

Однажды, примерно в 1980 году, на запрещенном тогда радиорынке у магазина „Юный техник“ в Автово я увидел молодого человека, продающего наушники „Sennheiser“. На груди у него на скрепке висел листок бумаги с надписью: $R = 600 \text{ Ом}$, $DF = 40 \text{ Гц} — 18 \text{ кГц}$. Об этой фирме я уже кое-что знал, хотя для Ленинграда она была большой редкостью. Удивили меня характеристики. Как же так? У всех наушников того времени диапазон частот меньше чем $20 \text{ Гц} — 20 \text{ кГц}$ не писали. Даже у гонконгских. На мой удивленный вопрос парень ответил: „А ты их послушай“. И дал совет: не верить глазам своим, а верить ушам.

Мы познакомились. Это был известный „ламповщик“ Сергей Егоров. Он пригласил меня к себе домой, и я попал в комнату настоящего профессионала-фаната — в „звуковой“ рай. На рабочем столе полукругом возвышался небоскреб из десятков классных измерительных приборов, вокруг громоздились коробки с лампами, конденсаторами, трансформаторами, лежали груды корпуса для усилителей, „кинаповские“ динамики и т. д. У стены была сложена фанера, деревянные бруски и стояло несколько пар полутораметровых рупорных акустических систем. Такого я никогда не видел.

Сергей показал мне несколько японских радиотехнических журналов, которые были заполнены ламповыми схемами. Недоумение мое возрастало: весь мир завален японской транзисторной техникой; для себя, значит, лампы, а для остальных стран — транзисторы? Почему?

Окончательно меня повергло в изумление натуральное и живое звучание лампового усилителя и то, что у него, как сказал Сергей, коэффициент нелинейных искажений аж 1%. В голове все смешалось.

С этого момента я вошел в мир ламповой аудиотехники и рупорной акустики. По японской схеме, но на наших лампах собрал свой первый ламповый усилитель, затем корректор (кстати, без катодных повторителей, без SRPP и с пассивной коррекцией). Как-то мы с Егоровым попали на прослушивание, проходившее в одной известной коммунальной квартире в Басковом переулке. Было несколько экспертов, один из которых, когда испытывали мой корректор, язвительно-весело заметил: „А у вас фонит!“ Это был уже тогда знаменитый А. Лихницкий. Другой, которому при прослушивании вообще ничего не нравилось, слушая усилитель Егорова, указал на „зализанность и волосатость“ звучания и как итог — на „ядовитость“ звука. И добавил: „Похоже, это общая болезнь трансформаторов“. Как выяснилось, одна неосторожно брошенная фраза может надолго увести с правильного пути.

Шли годы. Мой интерес к звуковой технике и к звуку возрастал. Решив соединить профессию и хобби, я поступил на работу в Дом радио. Но там вопрос качества звучания и его улучшения стоял далеко не на первом месте. К примеру, звукорежиссеру не нравится звучание; техники прикатывают похожий на робота мультиизмерительный комплекс на колесиках, тестируют тракт и говорят, что параметры в норме и претензии не принимаются. Но энтузиасты-радийщики все-

гда предпочитали использовать в звуковом тракте трансформаторы, особенно на входе и выходе микшерных пультов, микрофонных усилителей и на выходе микрофонов. Старые звукорежиссеры с нескрываемой ностальгией вспоминали прозрачное динамичное звучание профессиональных ламповых усилителей с высокочувствительными акустическими системами на больших бумажных диффузорах. Да и уши за рабочую смену от них не уставали,— добавляли они.

К началу 1995 года последователи Егорова собрались вместе. Казалось, теперь можно быстро решить все проблемы качества звучания. Мы плотно занялись исследованием влияния на звук отдельных радиокомпонентов (резисторов, конденсаторов, ламп, проводов и т. д.); начали определять закономерности изменения звучания при использовании различных схемотехнических решений, комбинаций элементов и способов монтажа; стали упрощать сигнальные схемы, уменьшать количество используемых элементов, укорачивать путь прохождения сигнала. После каждого изменения звуковой тракт тщательно прослушивался. Отказавшись от „кругового пути“— ООС, мы стали отказываться и от всевозможных „параллельных путей“. При этом обнаружилось, что эти „круговые“ и „параллельные“ пути есть везде и не так просто их выявить. Зато, если удастся это сделать, насколько улучшается звук! Например, устранение „параллельных путей“ в блоке питания улучшает звучание на порядок больше, чем замена межблочного кабеля или кабеля к АС, пусть даже на очень дорогой. Хотя это вовсе не значит, что нужно забыть о влиянии конструкции и материала проводов на качество звука.

После того как в разработанных нами схемах с гальваническими межкаскадными связями остался один выходной (или разделительный) конденсатор, встал вопрос: а нельзя ли избавиться и от него? В свое время основатель фирмы „Audio Note“ Хирояши Кондо сказал: „Если количество элементов в цепи уменьшить хотя бы на один, то будет устранен еще один источник механического звучания“ [1]. А уж насколько пагубно влияют конденсаторы на звук, я думаю, знают многие.

Мы стали искать новое решение, которое на поверку оказалось очень старым. Как сообщает журнал „Sound Practices“ [2], еще в 1912 году был создан первый звуковой усилитель „Audion“, вообще не имевший разделительных конденсаторов; все межкаскадные связи в нем были построены на трансформаторах (а вот первые резистивно-емкостные схемы, говорится в этом же журнале, появились лишь в 1916 году). Значит, применяя трансформаторы, *можно полностью избавиться в звуковом тракте от разделительных конденсаторов, а с учетом современных разработок — и от резисторов.* Останутся только лампы и трансформаторы! И все!

А какова ситуация в этой области сегодня? Два года назад фирма „Marantz“ выпустила флагманский усилитель „Project T1“ на прямонакальных лампах с трансформаторными связями. Уже много лет известный разработчик фирмы „Yoshiki Industrial Co., Ltd“ Шишидо применяет в своих моделях трансформаторы по всему тракту, да и сам Кондо-сан в последнее время в своих разработках все больше использует межкаскадные трансформаторы. И наконец, из „Интернета“ мы узнали, что в Японии есть знаменитый аудиофил Сакума, вот уже 20 лет разрабатывающий различные усилительные устройства на основе не менее знаменитых входных, межкаскадных и выходных трансформаторов фирмы „Tamuga“.

Чем же так привлекательна (была и снова стала) трансформаторная связь? Из теории известно [3], что трансформаторный каскад (рис. 1, а) отличается от резистивно-емкостного (рис. 1, б) следующими чертами:

1. обладает значительно более высоким КПД;
2. способен создавать для лампы наивыгоднейший режим нагрузки (то есть режим, в котором она получает максимально возможное напряжение и мощность при минимальных искажениях);

3. позволяет получать необходимое выходное сопротивление и добиваться оптимального согласования между каскадами;
4. дает возможность получать большое выходное напряжение сигнала;
5. позволяет наиболее просто получать симметричные выходные напряжения (для двухтактных каскадов и для работы на длинную линию).

Недостатками трансформаторных каскадов являются увеличенные массогабаритные параметры (что не так важно в ламповых конструкциях) и не очень хорошие амплитудно- и фазочастотные характеристики. Впрочем, последние можно улучшить путем повышения качества трансформатора, что, однако, непросто и недешево.

Проверим (для тех, кто любит все считать) первое, наименее очевидное преимущество трансформаторного каскада перед резистивно-емкостным. Возьмем, к примеру, лампу 6С45П-Е, которая имеет высокий коэффициент усиления $\mu \approx 50$, низкое внутреннее сопротивление в рабочей точке $R_i = 1,25$ кОм и низкий уровень собственных шумов. Выберем рабочую точку: напряжение анода $U_a = 150$ В, ток покоя $I_0 = 35$ мА, при этом мощность, рассеиваемая на аноде, составит $P_a = U_a I_a = 5,25$ Вт. С целью уменьшения нелинейных искажений возьмем нагрузочный коэффициент $\alpha = 3,76$, тогда сопротивление анодной нагрузки по переменному току составит $R_a = \alpha R_i = 4,7$ кОм. Пусть переменное напряжение на выходе обоих каскадов составит $U_n = 60$ В, а нагрузкой служит резистор $R_n = 47$ кОм (входное сопротивление следующего каскада). Возьмем трансформатор с КПД $\eta_{тр} = 0,9$ (что реально) и сопротивлением первичной обмотки $R_T = 200$ Ом. При этом коэффициент трансформации $K_T = \sqrt{R_n/R_a} = \sqrt{10}$.

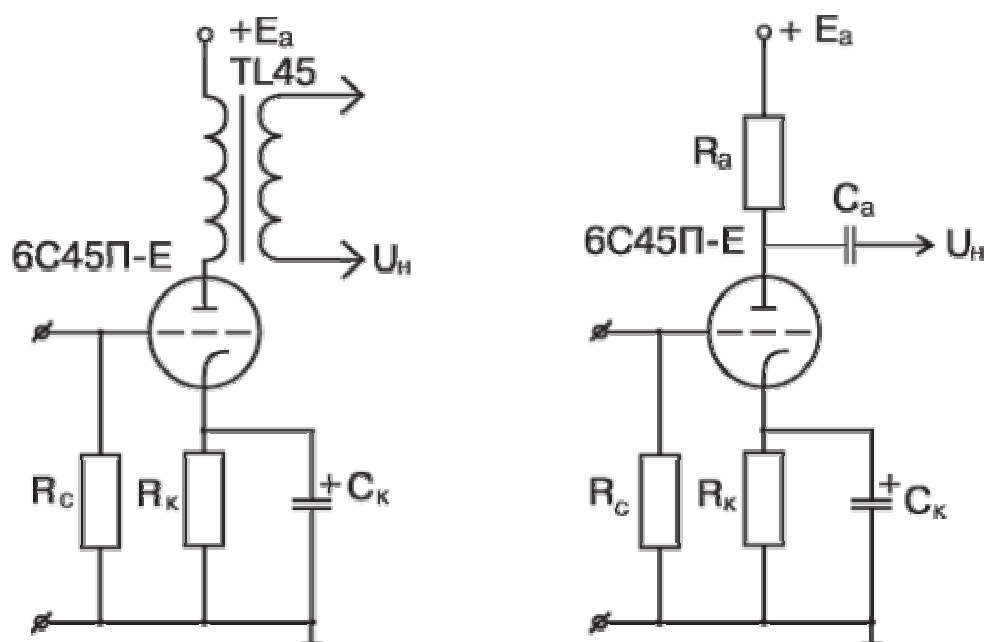
1. Подсчитаем КПД анодной цепи для двух видов каскадов. Мощность на нагрузке: $P_n = U_n^2/R_n = (U_n^2 K_T^2)/R_n = 0,689$ Вт; $P_n = U_a^2/R_n = 0,0766$ Вт.

КПД анодной цепи:

$$\eta_a = P_n * 100\% / P_a = 13,13\%; h_a = P_n * 100\% / P_a = 1,46\%.$$

Рис. 1 Выходной каскад усилителя:

слева — трансформаторный; справа — резистивно-емкостной



Итак, КПД трансформаторного каскада почти в 9 раз больше КПД резистивно-емкостного каскада.

2. Пойдем дальше. Посмотрим, какое напряжение источника питания требуется для обеспечения необходимого режима по постоянному току:

$$E_a = U_a + I_0 R_T = 157 \text{ В};$$

$$E_a = U_a + I_0 R_a = 314,5 \text{ В}$$

Таким образом, требуемое напряжение (а следовательно, и мощность) источника анодного питания для трансформаторного каскада будет в 2 раза меньше, чем для резистивно-емкостного.

3. Проверим, какая часть мощности сигнала достигает нагрузки. Мощность сигнала, выделяемая на аноде лампы:

$$P_{ac} = U_n^2 / R_a = 0,766 \text{ Вт};$$

$$P_{ac} = U_a^2 / R_э = 0,843 \text{ Вт}$$

(здесь $R_э = R_a R_n / (R_a + R_n)$ — эквивалентное сопротивление нагрузки лампы).

Мощность сигнала, выделяемая на нагрузке

$$P_n = \eta_{тр} / P_{ac} = 0,689 \text{ Вт};$$

$$P_n = U_n^2 / R_n = 0,0766 \text{ Вт}.$$

Отсюда следует важный вывод: в трансформаторном каскаде 9/10 мощности сигнала достигает нагрузки, а в резистивно-емкостном — лишь 1/11 часть (остальные 10/11 выделяются на анодном резисторе впустую!).

Ну, хорошо, цифры цифрами, а как же самое главное — звучание? Мы уже знали, насколько поразному могут звучать трансформаторы разных фирм — входные (МС) и выходные. Свои выходные трансформаторы мы рассчитывали и многократно дорабатывали, учитывая только параметры. Как заразен вирус технократизма! Правда, экспериментировать со звучанием выходных трансформаторов чрезвычайно трудоемкая работа, и не очень это корректно, ведь перед трансформатором у нас было несколько нетрансформаторных каскадов. Надо было идти от простого к сложному. Решили отработать звучание только одного линейного трансформаторного каскада.

Нам попался под руку старый выходной двухтактный трансформатор от радиолы „Симфония“. Не трогая обмоток и собрав заново железо сердечника с зазором, мы сделали стандартный трансформаторный каскад. При подключении его к источнику питания и измерении параметров были получены неважные характеристики, в частности АЧХ 90–11000 Гц (по уровню -3 дБ). А как это воспринималось на слух? Несмотря на явно слышимые ограничения частотного диапазона, звучание оказалось быстрым, энергичным, с большими динамическими контрастами. При этом в нем было столько музыки, что мы просто поразились. Традиционные резистивно-емкостные схемы такого эффекта не давали. Не помогали и гальванические схемы (частный случай резистивно-емкостных).

Мы вплотную занялись конструкцией выходного трансформатора для предусилителя — с целью получения наиболее низкого выходного сопротивления (которое позволяет снизить влияние паразитных параметров соединительного кабеля [4]), много раз перематывали обмотки, и наконец нам удалось получить отличные технические характеристики: АЧХ 8–140000 Гц (-0,5 дБ), $K_{ни} = 0,09\%$ (50–12500 Гц, $U_{вых} = 1 \text{ В}$). Но звучание нас не совсем удовлетворило. Что-то мешало...

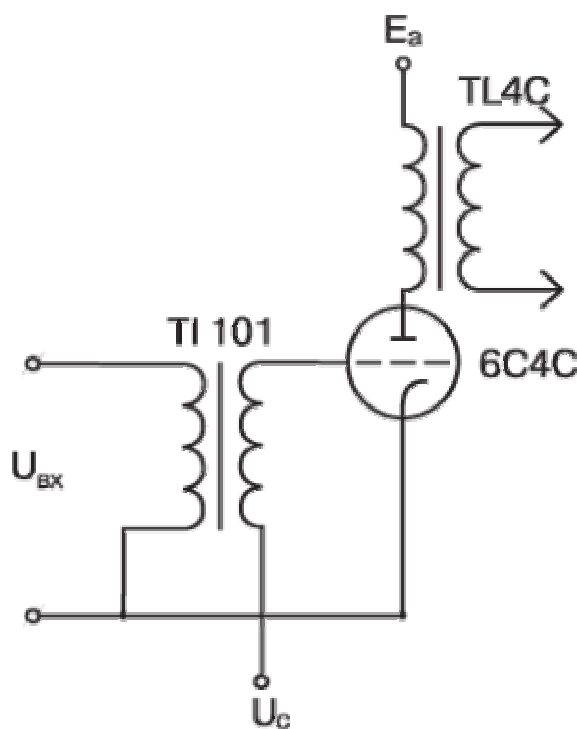
На основе наработанного нетехнократического опыта был сделан тщательный анализ конструкции трансформатора и найден камень преткновения. Убрав этот „камень“, мы смогли добиться желаемого звучания. Технические характеристики же при этом явно ухудшились: АЧХ 22–24500 Гц (-0,5 дБ), $K_{ни} = 0,12\%$ (50–12500 Гц, $U_{вых} = 1 \text{ В}$). Лишний раз мы убедились, что связь технических параметров, имеющих в нашем распоряжении, с качеством звучания далеко не однозначна.

Полученный трансформатор для выходного каскада линейного устройства оказался достаточно универсален: его с успехом можно использовать в линейном предусилителе, усилителе для телефонов, выходном каскаде проигрывателя компакт-дисков, корректора RIAA или цифро-аналогового преобразователя. На данный момент разработаны и запущены в производство две версии трансформатора: „TL 45“ для лампы 6С45П-Е и „TL 4С“ для ламп 2А3, 6В4G, 6С4С, включенных по схеме, которая показана на рис. 2. Эта схема является дальнейшим развитием „трансформаторной идеи“ в выходных линейных каскадах.

Четвертое свойство трансформаторных каскадов (см. выше) делает весьма привлекательным их использование в предмощных (драйверных) схемах, работающих на мощные выходные триоды типа 300В, 6В30В, 211, 845, 6М70, 6СВ572 и др. В этом случае трансформатор позволяет получить огромную амплитуду выходного напряжения (100 В и выше) при низких нелинейных искажениях (0,2–0,4%), а также малое выходное сопротивление, что необходимо для работы оконечной лампы с токами сетки [5].

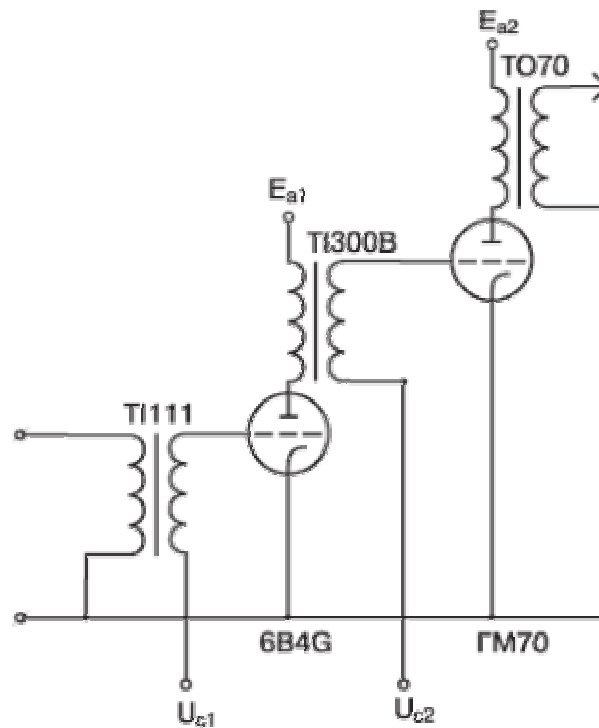
Работа в этом направлении привела к созданию драйверного межкаскадного трансформатора ТИ300В для ламп 300В, 2А3, 6В4G и др. Он используется в драйверном каскаде усилителя „SPb Sound T70SE“ на лампе 6В4G для „раскачки“ 6М70 (рис. 3). Данный каскад обеспечивает переменное напряжение 100 В на нагрузке 12 кОм при значениях $K_{ни}$ 0,3% (60 Гц), 0,22% (1 кГц), 0,45% (12,5 кГц); АЧХ: 17,5–22000 Гц (-0,5 дБ), 7–65000 Гц (-3 дБ); коэффициент усиления 4,5.

Рис. 2



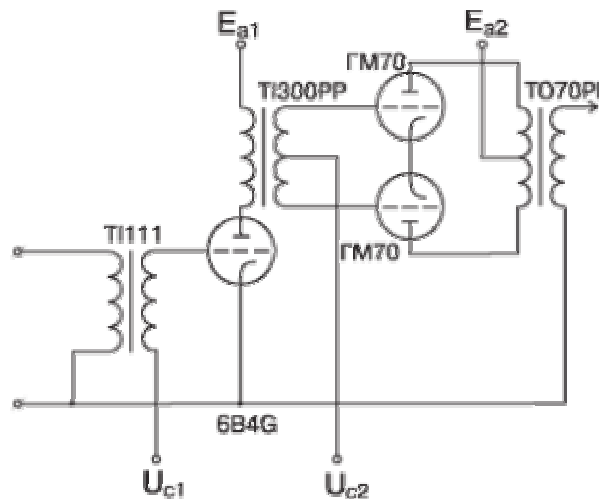
Подобное схемотехническое решение применяется также в однотактных усилителях „CAD 805“ фирмы „Cary“, „Ankoru“ (фирмы „Audio Note“) и некоторых других.

Рис. 3



Использовать пятое преимущество трансформаторного каскада оказалось труднее всего, и это потребовало очень много времени. Зато как упростилась схема двухтактного усилителя (рис. 4)! Количество ламп сократилось до трех за счет полного отсутствия резисторов и конденсаторов в сигнальной цепи. Полученный двухтактный межкаскадный трансформатор ТИ300РР имеет следующие параметры: асимметрия $\pm 0,02$ дБ (18–16000 Гц), при $U_{\text{вых}} = 40$ В и значениях $K_{\text{ни}}$ 0,65% (60 Гц), 0,55% (1 кГц), 0,46% (10 кГц); АЧХ: 26–16000 Гц ($\pm 0,5$ дБ), 18–20000 Гц (± 1 дБ).

Рис. 4



На проходившей недавно в Москве выставке „Hi-Fi Show’98“ главному разработчику „Audio Note UK“ Питеру Квортрупу был задан вопрос о целесообразности применения трансформаторной связи в ламповых усилителях. Ответ был однозначным: трансформаторные каскады на самом деле существенно улучшают звучание, но выгодно это для производства усилителей только высоких ценовых категорий, так как хороший трансформатор стоит очень дорого.

Литература

1. „Sound Practices“, vol. 1: № 2 (Fall 1992), p. 5. Перевод мой.
2. „Sound Practices“, issue 10, 1996, p. 16.
3. Г. В. Войшвилло. Усилители низкой частоты. М., Связьиздат, 1939.
4. Ю. Макаров. От „Неофита“ до „Адепта“.— „Hi-Fi & Music“, 1997.
5. Г. С. Цыкин. Трансформаторы низкой частоты. М., Связьиздат, 1950.