

Тепловые искажения в усилителях HiFi

S.GYULA.

Rádiotechnika Évkönyve, 1998

Перевод А.Бельского (с сокращениями)

Когда несколько десятилетий назад началась разработка усилителей HiFi, электроника, как наука, была развита еще очень слабо. Однако, несмотря на это, результаты были очень даже неплохими (на сегодняшний взгляд). За истекшие 30...40 лет был пролит свет на многие более или менее существенные вопросы, но результаты этого развития никак (или почти никак) не сказались на технике HiFi.

Интересующиеся данной областью читатели с большим изумлением следят за тем, что в технике HiFi нет никакого прогресса и даже наоборот, наблюдаются порою отступления назад (например цифровое ТВ с его специфическим качеством звука). Прошло уже несколько десятилетий с момента первой высадки на Луну, а звукотехника все еще остается где-то в эпохе "лошадиных повозок".

Давайте познакомимся с такими физическими явлениями, о которых редко идет речь даже в специальной литературе, посвященной HiFi. А между тем, в действительности, это и есть то самое "колумбово яйцо"...

Известно, что предусилители, оконечные усилители HiFi и другие звукотехнические устройства проходят двойной контроль. С одной стороны, специалисты по электронике и акустике подвергают жесткому контролю с помощью измерительных приборов любое устройство как в процессе его сборки, так и в собранном виде. С другой стороны, характеристику каждому усилителю дают также и люди с хорошим слухом — не обязательно специалисты (это могут быть, например, музыканты или меломаны). Прослушивая безо всяких приборов звучание музыки, они относят усилитель к тому или иному классу.

Своеобразие возникающей ситуации в том, что на практике результаты этих двух проверок очень часто противоречат друг другу. Бывает, что вопреки хорошим результатам измерений, качество звучания на слух кажется не очень хорошим и наоборот. Например, несколько десятилетий назад автор построил свой первый полупроводниковый усилитель HiFi, имевший очень хорошие характеристики, полученные по существовавшим в то время методикам измерений. Но усилитель имел такое убийственно "свежее" звучание, что жаль было потраченного времени и работы и я еще долгое время потом наслаждался красивым звучанием усилителя на электронных лампах.

В течение последних лет специалисты разрабатывают все новые и новые процедуры электрического тестирования, на свет появляются усилители со все более высокими электрическими характеристиками, а качество звучания, определяемое прослушиванием, по-прежнему оставляет желать лучшего.

Специалистов (теперь уже и непрофессионалов) особенно раздражает то, что прибор, отнесенный по электрическим характеристикам к высокому классу, при использовании его в качестве усилителя, дает неприятный (иногда невыносимый) звук. Многие из числа моих друзей, увлеченных электроникой и знакомых с HiFi, после оживленных дискуссий начали лихорадочно переконструировать измерительные приборы, разрабатывать новые, изобретать хитроумные способы измерений, потратив на это месяцы и злясь затем, что все это не приводит к настоящему убедительным результатам. Электрические характеристики и оценки в результате прослушивания очень редко коррелируют друг с другом.

То, что где-то между известными вещами может оказаться запрятанной какая-нибудь "гадость", автор впервые заметил тогда, когда, модифицировав метод измерений интермодуляционных искажений с помощью двух сигналов, подал (чисто случайно) на проверяемый усилитель еще и третий (какой оказался под руками — медленный сигнал частотой около 0,1 Гц, примерно треугольной формы). Результат, контролировавшийся осциллографом, получился весьма своеобразным. До сих пор вполне прилично сдававший "экзамен" усилитель, теперь в определенные моменты времени начал вносить разнообразные грубые искажения,

очевидно, связанные с наличием третьего сигнала. И при этом усилитель во время проверки несомненно находился в номинальном режиме, гораздо ниже предела перегрузки. Характер искажений был довольно причудливым и капризным: в некоторые моменты времени они имели вид “амплитудного обрезания”, давая то вторую, то третью гармонику. С помощью осциллографа наблюдать весь “репертуар” было трудно, невозможно было точно оценить эти искажения и непонятно было, что с “этим” делать. При изменении частоты медленного сигнала в диапазоне инфразвука характер и величина искажений несколько менялись. У усилителя другого типа, который сразу же, “по горячим следам”, был подвергнут таким же испытаниям, аналогичные искажения были меньше. Несмотря на достаточно хорошие результаты измерений (анализ спектра показал меньше 0,1% гармонических искажений), оба усилителя на слух воспринимались одинаково плохо.

Автор уже давно отнес усилители к категории устройств, “опасных для нервной системы”. А вся серия измерений была предпринята из-за того, что стандартно измеряемые параметры выглядели трафаретно и досадно красиво, чего не скажешь о результатах прослушивания. Все это казалось алогичным и непостижимым. Поскольку не было возможности оценить обнаруженные искажения, измерения были прерваны, хотя во время обсуждения проблемы со знакомыми были с успехом проверены некоторые превосходные гипотезы. И только через несколько лет проблема случайно нашла свое решение.

Исходить нужно из того, что большинство электрических методов измерений и прослушивание отличаются друг от друга в одном, кажущемся несущественным, но очень важном моменте. Как происходят измерения? Мы сначала подаем на вход усилителя сигнал от какого либо генератора и только потом контролируем выходной сигнал. Весь метод измерения сам по себе представляет стационарный процесс: сигнал уже достаточно долго был в усилителе, прежде чем был подвергнут точному анализу. Процесс измерений достаточно длителен (например занимает несколько секунд или даже минут), а его результаты относятся к установившемуся состоянию и характеризуют непрерывное наличие стандартного, хорошо определенного измерительного сигнала на входе.

Что же происходит при прослушивании и в чем здесь различие? Музыкальный входной сигнал, производимый, например, скрипачом, хаотично проводящим смычком по струнам скрипки, или гитаристом, свирепо дергающим струны гитары, или барабанщиком, отчаянно колотящим в барабан, или вдохновенно поющим певцом, может быть похож на что угодно, но только не на стандартный сигнал в 1 кГц. Он (входной сигнал) меняется псевдослучайным образом по амплитуде, частоте, спектральному составу и стереохарактеристикам. А уши и мозг превосходно анализируют акустическое качество такого сигнала и непогрешимо оценивают впечатления от появившихся помимо (вместо) исходной звуковой мелодии дополнительных звуковых сигналов. Мы хорошо чувствуем, что звучит музыка, но звучит еще и “что-то такое”, что хотя и как-то связано с этой музыкой, но не имеет к ней никакого отношения.

Все системы передачи звука вносят те или иные искажения. И это относится не только к какой-либо “крикливой” музыке с ее широким спектром, но и к узкополосной речи, например к какой-либо лекции на “деревянном” языке. Главный вопрос в том, как измерять эти искажения и как классифицировать усилители. Опыт прошлых лет показывает, что проводившийся до сих пор контроль был недостаточно корректен и не давал надежной точки опоры для такой классификации.

В промышленной электронике (измерительной технике, технике автоматического регулирования и управления, приборостроении) профессионалами было накоплено огромное число наблюдений, разработаны и получили широкое применение методы измерений, которые (из-за их большой стоимости и узкоспециального характера) может освоить и использовать только небольшая группа специалистов. Если бы и в разработку техники HiFi можно было вложить столько же средств и интеллектуальной энергии, то, без сомнения, мы не находились бы там, где сейчас находимся.

То, что до сих пор недостаточно контролировалось специалистами по акустике и электронике — это довольно быстрые тепловые изменения режимов и вызываемые ими иногда очень существенные переходные искажения. Эти искажения не обнаруживаются ни одним из

существующих теперь методов измерений, поскольку все они, по существу, носят стационарный характер. Эти искажения можно было бы уловить только с помощью динамического тестового сигнала и быстродействующего измерителя искажений (анализатора спектра).

Большинству читателей, конечно же, известно, что при изменении внешней температуры и температуры полупроводникового кристалла изменяется все множество параметров полупроводника. А потому едва ли можно получить улучшение звукотехнических параметров, не учитывая тепловых процессов. И все это настолько просто, что, вероятно, именно поэтому и упустилось до сих пор из виду.

Рассмотрим наипростейшую полупроводниковую схему (рис. 1), в которой полупроводниковый диод вместе с обычным резистором образуют последовательную цепочку.

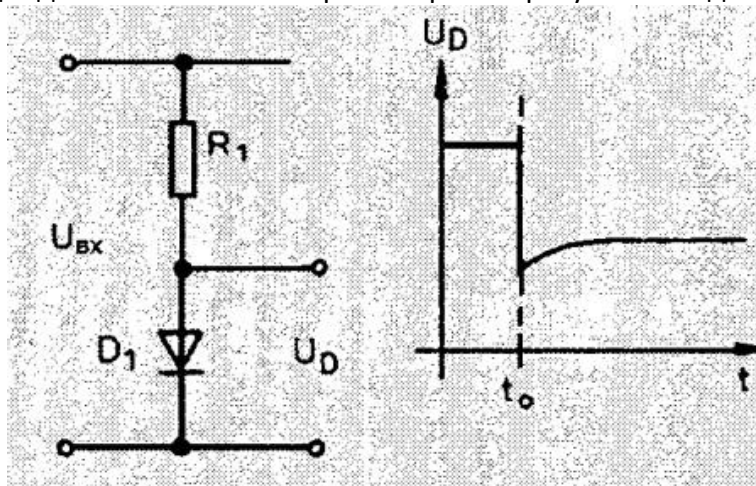


Рис. 1

Такая схема может использоваться в усилителе HiFi (рис. 2).

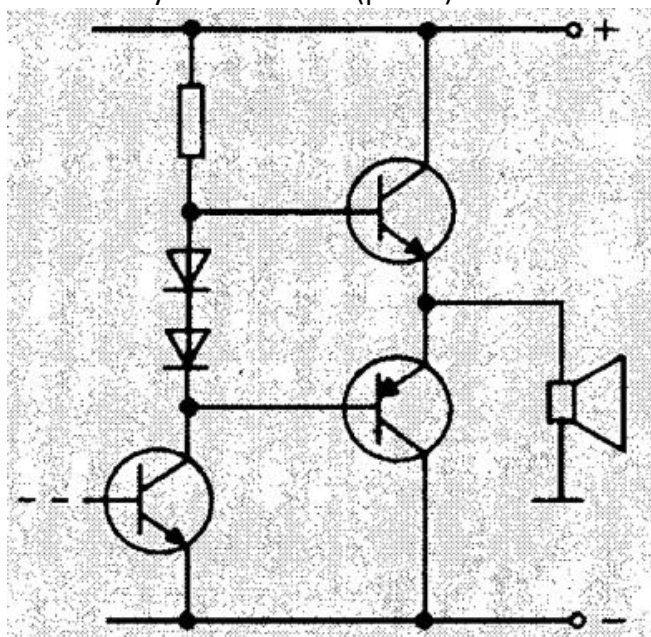


Рис. 2

Если схема давно включена и установилось какое-то тепловое равновесие, выходное напряжение $U_{вх}$ постоянно. При увеличении входного сигнала увеличивается протекающий по цепочке ток. Под его воздействием несколько увеличивается падение напряжения на диоде и он начинает сильнее нагреваться. Нагревание продолжается до достижения нового теплового равновесия, а затем все стабилизируется в новых условиях. Большинство измерений завершается примерно в этот момент, довольствуясь регистрацией нового теплового равновесия. Все было бы хорошо, если бы под воздействием нагревания не изменялось сопротивление полупроводникового диода, которое, вследствие отрицательности температурного коэффициента, приводит к уменьшению падения напряжения на диоде. Следовательно, имеется как повышение, так и понижение падения напряжения и все это происходит в разные моменты времени. Увеличение падения напряжения

при увеличении тока происходит почти мгновенно (с "электронным" временем запаздывания порядка пико- и наносекунд), в то время, как его уменьшение определяется скоростью прогревания диода вместе с корпусом (медленно, с "тепловой" скоростью). Нагревание характеризуется несколькими постоянными времени. Быстрее всего нагревается сам полупроводниковый переход, имеющий малую массу. Гораздо медленнее нагревается весь заключенный в корпус диод. Учитывая все эти медленно затухающие во времени процессы, влияющие на выходное напряжение, нетрудно сделать вывод, что откликом диода на скачкообразное изменение тока будет сначала скачкообразное изменение напряжения, уровень которого будет затем постепенно приближаться к исходному значению (причем, скорость приближения будет определяться несколькими постоянными времени). Таким образом, передача схемой регулярных скачков тока происходит не идеально, появляются "выбросы", величина и постоянная времени затухания которых не связаны ни с какими электрическими характеристиками. Возникающие при этом искажения имеют чисто тепловое происхождение. Очевидно, что в данном случае безразлично, идет ли речь о дискретных диодах и транзисторах, или же об интегральных схемах. Поскольку среди диодов имеются как массивные, так и миниатюрные, разброс постоянных времени может быть очень широким.

Подвергнем такому же непривычному анализу простейший эмиттерный повторитель, схема которого приведена на рис. 3.

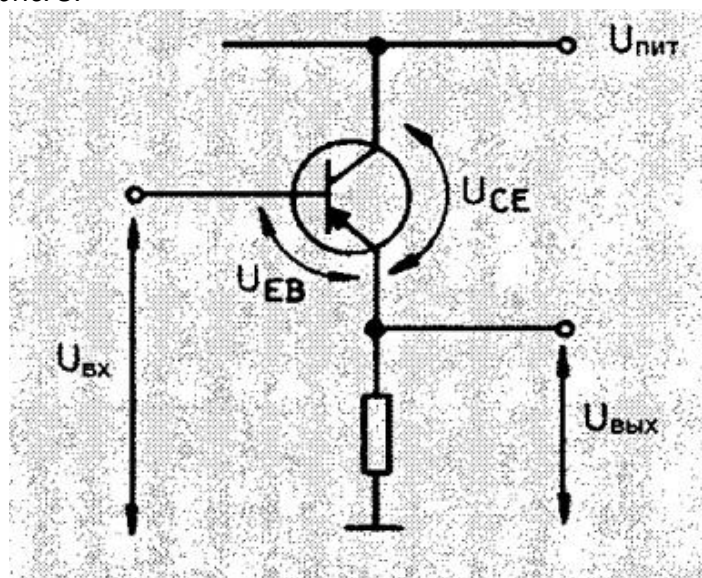


Рис. 3

Зададимся вопросом, имеются ли в такой схеме низкочастотная постоянная времени (нижняя граничная частота) и обусловленные ею частотно зависимые переходные процессы? Опираясь на учебники, специалисты и неспециалисты отвечают хором: НЕТ! Мы же, наученные предыдущим опытом, присмотримся к ней более внимательно.

Предположим, что схема включена уже достаточно давно, транзистор и его окружение уже достигли какого-то теплового равновесия, при котором на транзисторе рассеивается мощность P_1 , поддерживающая постоянную температуру транзистора:

$$U_{CE1} \cdot I_{C1} = P_1$$

Изменим рабочую точку транзистора, заметно изменив входное напряжение. Как только коллекторный ток транзистора изменится (хотя и здесь можно было бы учесть временную постоянную), изменится и напряжение эмиттер-коллектор. На транзисторе теперь уже будет рассеиваться мощность P_2

$$U_{CE2} \cdot I_{C2} = P_2$$

которая отличается от вышеупомянутой, а это приведет к изменению установившейся температуры транзистора.

Для иллюстрации возникающих при этом искажений, из множества подлежащих контролю параметров, выберем один из наиболее легко измеряемых — напряжение U_{EB} . В установившемся состоянии на выходе эмиттерного повторителя имеется:

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{ex1}} - U_{\text{EB1}},$$

которое легко измеряется, например, мультиметром. Изменение входного напряжения в первый момент почти полностью попадает на выход.

Однако, теперь транзистор имеет уже другую рабочую точку, соответствующую рассеиваемой мощности P_2 . Это оказывает влияние на напряжение U_{EB} ($-2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$) и вызывает смещение (дрейф) выходного напряжения (поскольку теперь транзистор становится или немного холоднее, или теплее в сравнении с предыдущим состоянием). Изменение напряжения необходимо добавить (с правильной полярностью) к выходному напряжению и определить в каждом конкретном случае тепловую постоянную времени.

Здесь возникают важнейшие вопросы:

- какая величина тепловой постоянной времени;
- в каком направлении происходит ее изменение;
- какая величина ее изменения?

То, как транзистор нагревается или остывает в новой рабочей точке, зависит от его состояния в предыдущей рабочей точке. Если транзистор работал в состоянии согласования по мощности ($U_{\text{CE}}=0,5U_{\text{пит}}$), то на любое изменение рабочей точки он отвечает остыванием. Поэтому в данном случае на воздействие какого-либо небольшого постоянного управляющего напряжения транзистор всегда выдает сигнал помех одного и того же вида, который добавляется к выходному сигналу.

Если рабочая точка транзистора отличается от согласованной, в новой рабочей точке транзистор может как остывать, так и нагреваться. В этом случае полярность сигнала помех, появляющегося на выходе, будет зависеть от полярности управляющего сигнала. В зависимости от управляющего сигнала тепловой сигнал помех теперь может как добавляться к выходному сигналу, так и вычитаться из него.

Рассмотрим схему дифференциального усилителя (рис. 4), которая представляет интерес и с исторической точки зрения — несколько десятилетий назад порождаемые этой схемой тепловые искажения составляли главную часть всех тепловых искажений.

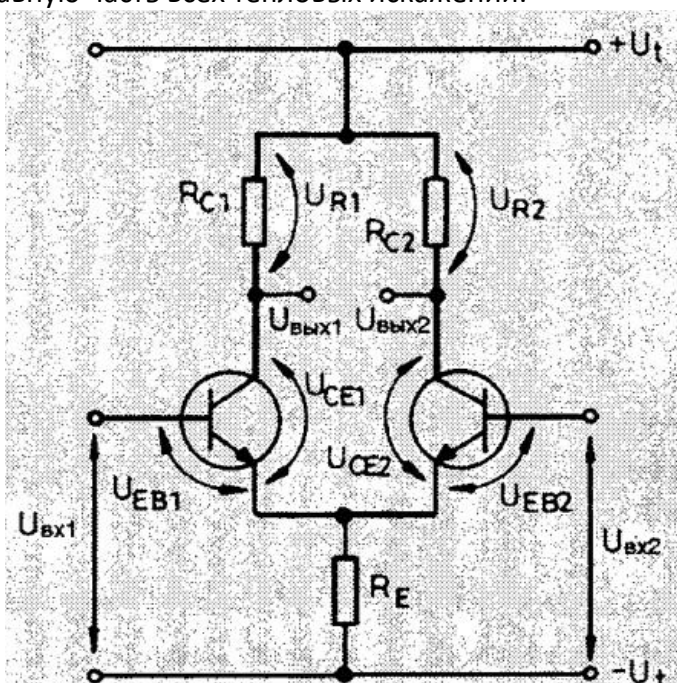


Рис. 4

Возможны две ситуации. В первом случае, когда дифференциальный усилитель согласован по мощности, воздействие управляющего сигнала приводит к остыванию обоих транзисторов (имеющих практически одинаковые размеры). Тогда в усиленном сигнале, имеющемся на коллекторах транзисторов, появляется новая, синфазная составляющая (под влиянием остывания U_{EB} увеличивается, растет коллекторный ток и, как следствие, снижается коллекторное напряжение). В неблагоприятных случаях этот компонент может распространиться в усилителе дальше и, например,

“сбивать” настройку рабочей точки двухтактного выходного каскада, или же вызывать неприятные смещения рабочих точек других каскадов.

Обычно говорят, что в выходном дифференциальном сигнале существенных помех не имеется. Величина возникающего синфазного сигнала пропорциональна входному управляющему напряжению и коэффициенту усиления синфазного напряжения, которое в хорошем приближении определяется отношением коллекторного и эмиттерного сопротивлений. Поскольку у усилителей звуковой частоты эти значения обычно достаточно близки, можно считать, что синфазный сигнал усиливается в несколько раз (например в 1...10).

Следовательно, если в каскаде уже имеется дифференциальный сигнал достаточно высокого уровня, величина напряжения синфазного сигнала может быть достаточно большой. Этот сигнал (синфазный) сам по себе не прослушивается, но он может оказать возмущающее действие на рабочие точки последующих каскадов.

Между прочим, точно такое же действие оказывает и изменение температуры окружающей среды, приводящее к изменению температуры полупроводниковых устройств (например, при использовании усилителя в жаркий солнечный день или же в морозную погоду). Оба рассмотренных эффекта суммируются. Таким образом, при проектировании усилителей HiFi уже недостаточно позаботиться о статических тепловых связях. Необходимо учесть и упомянутые выше динамические синфазные воздействия.

Во втором случае, когда дифференциальный усилитель работает с рассогласованием по мощности, под воздействием управляющего сигнала на выходе возникают переходные процессы, имеющие тепловую постоянную времени. По величине и частоте они в этом случае сравнимы с управляющим сигналом, их можно обнаружить как искажения полезного дифференциального выходного сигнала, соответствующим способом измерить или услышать. Поскольку один из транзисторов будет нагреваться, а второй остывать, возникает противофазный сигнал помех, практически неотличимый от полезного сигнала.

Каверзный вопрос — величина тепловой постоянной времени. Данных об этом нет ни в каких каталогах и опереться здесь можно только на некоторые экспериментальные факты. Некоторые из таких экспериментальных данных опубликованы в узкоспециальных малотиражных изданиях ряда заинтересованных фирм (например Tektronix, Philips, Ates и др.). Для них эти данные не оказались слишком уж неожиданными.

Транзисторные полупроводниковые р-п переходы “приличного” размера, как, например, у 2N3055 (мы пока не говорим о самом полупроводниковом приборе в корпусе, размеры которого могут также зависеть от серии и фирмы-изготовителя) могут термически отслеживать (т.е. нагреваться/остывать) частоты вплоть до верхней граничной — порядка 1 кГц. Приборы с меньшим р-п переходом, например, BC107, или того меньше, отслеживают частоты вплоть до частоты 90 кГц (!). Для элементов поверхностного монтажа (SMD — Surface Montage Device) и интегральных схем предельная частота еще выше. Естественно, между полупроводниковым кристаллом и корпусом имеется хороший тепловой контакт и большая тепловая постоянная корпуса стремится, в соответствии с величиной теплоотдачи контакта, приглушить температурные колебания.

Думаю, что теперь уже понятно, что усилитель постоянного тока (например изображенный на рис. 3 эмиттерный повторитель, который тоже своего рода УПТ) имеет такую же нижнюю (!) граничную частоту, как и, например, эмиттерный повторитель на 200 МГц. Эти звуочастотные искажения невозможно измерить традиционными методами.

Часто применяемый при измерениях принцип “подождем, пока прогреется схема”, как раз и обходит рассматриваемые здесь проблемы. Но как можно обнаружить этот эффект при прослушивании музыкального произведения через усилитель HiFi?

Конечно, больше всего нас интересует величина эффекта. Из проведенных измерений выяснилось, что возникающий таким путем вторичный сигнал в усилителе (который может восприниматься, как искажение) легко может достигать 5...20% амплитуды полезного сигнала. Вполне возможно, что у многих читателей имеются усилители HiFi в пластмассовом корпусе, покоящиеся на книжных полках, у которых все в поряд-ке с “антуражем” и, между тем, они имеют очень сильные тепловые искажения. Они не обязательно искажают всегда и всё, а только

определённые мелодии и в определенных звуко сочетаниях (после удара и т.п.). А при традиционных методах измерения искажений усилитель выглядит очень хорошо.

Иной вопрос — почему до сих пор эти явления не наблюдались при измерениях и не изучались специалистами? Ответить можно примерно так:

1. Они наблюдались, однако, поскольку речь идет об усилителях постоянного напряжения и об искажениях всего в несколько процентов и только во вполне определенных обстоятельствах, их приписывали ошибкам измерения и искажениям, вызываемым самими измерительными приборами и т.п. А большинство специалистов вело себя так, как если бы увидело трехголового барана: в учебниках об этом ничего нет, УПТ не имеют нижней предельной частоты, поэтому этим не стоит и заниматься.

2. Наблюдались и изучались, но не в области HiFi, а при проектировании схем высокой точности и прецизионных методов измерений. Однако, подобно тому как нейрохирургу не до методов убоя свиней, так и специалистам, по уши погруженным в свои запутанные схемы, не было и нет дела до HiFi, так что полученные ими результаты не проникают на эту территорию. А жаль.

Вот почти школьный пример. Где-то в начале шестидесятых годов, еще в эпоху электронных ламп, разработчики схем осциллографов во всем мире столкнулись с каверзным вопросом. Каждый из усилителей постоянного тока, построенный на превосходных, новейших для того времени лампах с большой крутизной и катодом небольшой массы, обнаруживал характерный низкочастотный завал характеристики, хотя в нем и отсутствовал разделительный конденсатор, а напряжение питания имело необходимую степень стабилизации. Непонятно почему, но медленный прямоугольный сигнал на экране осциллографа имел “падающую крышу”.

Серия измерений показала, что явление было обусловлено возникающим при подаче управляющего сигнала значительным вторичным изменением величины анодного тока. Работающая на полную мощность лампа при переходе от запертого состояния (малый катодный ток) к открытому (максимальный катодный ток значительной величины) испытывала существенное изменение своего теплового состояния (главным образом, катода). Если за таким критическим каскадом имелись еще каскады со значительным усилением, этот изъян был хорошо виден на экране, приводя к значительным искажениям. Вообще-то очень запутанное явление для внешнего наблюдателя выглядело так, как если бы анодный ток “всасывался” катодом и катод от этого немного остывал. Это влекло за собой хотя и небольшое, но вполне наблюдаемое изменение параметров (например эмиссии и крутизны) на частотах ниже вполне определенной, хорошо измеряемой частоты (несколько десятков герц).

С точки зрения HiFi, этот дефект вносит искажения на низких и средних частотах — и не такие уж малые: в некоторых случаях искажения формы составляют 10...20 % (при измерениях с прямоугольными импульсами в диапазоне частот 0,1...50 Гц). Вследствие тепловой инерции на более высоких частотах такие искажения уже не обнаруживаются. Для устранения этого явления в УПТ можно использовать параллельную положительную низкочастотную обратную связь, которая компенсирует тепловое поведение лампы данного типа. Естественно, при замене типа лампы потребуются новая настройка, соответствующая новым тепловым связям. Для настройки используются медленные прямоугольные импульсы.

Возвращаясь в наши времена, отметим, что с подобного рода дефектами можно встретиться в большинстве интегральных усилителей звуковых частот (не HiFi, а например ТВ — в серии TBA800 и т.п., особенно отметим TDA2020). Кроме того, подобного же рода изъяны имеет практически каждый из усилителей полупроводниковых осциллографов.

Почему же эти искажения в усилителях HiFi, иногда не такие уж и малые, не обнаруживаются простыми методами? Объяснение заключается в их капризном характере. Музыкант не использует генератор звука на 1 кГц, а композитор сочиняет музыкальное произведение, а не “килогерцовую сонату”. Поэтому форма обычного музыкального сигнала (сточки зрения рассматриваемых здесь тепловых эффектов) имеет вид специального электронного квазишума, зависящего от характера исполняемого произведения. Производимый полупроводниками вторичный (паразитный) сигнал также будет шумоподобен, т.е. псевдослучаен. Но он находится в тесной причинной связи с управляющим сигналом. Поскольку для звуковых сигналов, проходящих через усилитель,

доминирующая тепловая частота одних его частей слишком мала, а других частей — слишком велика, возникающие при этом интермодуляционные, перекрестные и переходные искажения можно было бы проследить только с помощью ЭВМ. Обычно выходные транзисторы имеют небольшую тепловую инерцию, однако, частота точки излома как раз попадает в середину звукового диапазона. Не лучше положение и с маломощными транзисторами. Их тепловая постоянная времени критична с точки зрения фазовых соотношений и может попасть (и попадает) в диапазон частот, располагающихся сразу же за полосой звуковых частот.

Обычно оконечные транзисторы усилителя мощности работают в условиях согласования по мощности (в состоянии покоя $U_{ce}=U_{пит}/2$), а поэтому основная часть искажений приходится на долю предварительных каскадов. Возникающие в предкаскадах сигналы помех беспрепятственно проходят в остальные каскады усилителя. Усиливаясь, они могут вызвать и дополнительные проблемы (смещение рабочих точек, перегрузки и т.п.).

Из-за тепловых явлений проходящий через усилитель сигнал всегда сопровождается специфическими помехами. Сигнал помех не имеет вполне определенной частоты, поскольку, с одной стороны, определяется эффективным значением музыкального сигнала, а с другой стороны, возникают компоненты сигнала искажений низких и средних частот, которые с определенной временной задержкой (зависящей от конструкции полупроводникового устройства) сопровождают, словно эхо, изменения звукового сигнала.

Вначале изменяется тепловое состояние самого полупроводникового слоя и контактов, гораздо позже и медленнее — корпуса. Легко понять, что характер искажений будет очень своеобразен, а их величину вряд ли можно предсказать, хотя она может достигать нескольких процентов величины полезного сигнала. Нетрудно понять, что на величину искажений оказывают влияние окружающая температура, а также то, что происходило с усилителем непосредственно перед данным мгновением (только что включён, “орал” уже несколько часов и т.п.). Кроме того, можно ожидать, что при усилении симфонической музыки или соло на фортепиано с их широким динамическим диапазоном, тепловые искажения будут гораздо больше, чем при усилении поп- или рок-музыки, когда уровень управляющего сигнала почти постоянен. Однако, тепловые искажения в обоих случаях “затягивают” музыкальную мелодию переходными эхоподобными процессами, “смазывают” ее своеобразным гулом и грохотом, существенно “размывают” фазовые соотношения (стереосигналы). Вполне понятно также, что, учитывая узкополосность человеческого голоса, появляющиеся в нём искажения будут хорошо слышны, что совершенно непонятно и необъяснимо с традиционной точки зрения. Любопытно, хотя после всего сказанного и не удивительно, что в выходном сигнале будет тем больше искажений высокого тона, чем меньше теплоемкость использованных в схеме полупроводниковых устройств. Но пока для такого типа искажений не разработаны терминология и техника измерений, их как бы и нет. В худшем случае мы их просто слышим.

Из сказанного выше следует, что нужно заботиться не только об оконечных усилителях. В гораздо худшем положении находятся различного рода корректоры звука (например грампластинок) и предусилители магнитофонов, усиливающие низкие и средние частоты. Конструкторы часто совершают ошибку при проектировании таких усилителей, исходя из того, что сигнал “и без того очень маленький”. Поэтому, вследствие тепловых воздействий, их рабочие точки часто оказываются в “плохом” положении.

И только тут мы начинаем осознавать, почему усилители на электронных лампах имеют гораздо меньшие искажения. Ведь катод электронной лампы или другие важные ее детали гораздо массивнее “лапок” полупроводниковых устройств. Поэтому возможные тепловые постоянные времени в лампах гораздо больше и тепловыми явлениями можно, в принципе, пренебречь. Нормальная электронная лампа с косвенным накалом почти не реагирует на “юркий” звуочастотный сигнал. Только при случайном совпадении многих обстоятельств может проявиться какой-либо медленный тепловой эффект. Отметим еще, как дополнительный аргумент, что величины сигналов в ламповом усилителе заметно больше, чем в полупроводниковых схемах. Кроме того, каскады на электронных лампах почти всегда работают в условиях, близких к согласованию по мощности. Это же обстоятельство объясняет, почему полупроводниковые

оконечные усилители класса "А" имеют в среднем лучшее качество при прослушивании. Такие усилительные каскады используются в большинстве своем в условиях согласования по мощности, так что тепловые искажения будут меньше.

Возникает вопрос: что можно сделать, чтобы уменьшить тепловые искажения в уже готовом усилителе? Конечно, конкретные рецепты можно дать только для конкретной схемы. Естественно, рекомендуется прежде всего внимательно изучить данный усилитель — нет ли в нем определенно слабых мест с тепловой точки зрения. Не учитывая другие аспекты, можно сказать, что в маломощном усилителе (предусилителе) наиболее благоприятны с тепловой точки зрения каскады, работающие с сигналом малого уровня (по отношению к напряжению питания), или, что почти то же самое, каскады с большим напряжением питания. Возникающий в этом случае тепловой сигнал помех относительно мал. Поэтому нужно стремиться использовать в предкаскадах как можно большее напряжение питания. В классических же правилах проектирования усилителей рекомендуется обратное. Вовсе не исключено, что при использовании хорошо спроектированного усилителя с другим (например меньшим) напряжением питания, в новой рабочей точке появятся или же существенно возрастут бывшие ранее минимальными тепловые помехи.

Очень важно настроить каскады на правильное согласование по мощности. В состоянии покоя напряжение на данном транзисторе должно быть примерно равно напряжению на коллекторном (или эмиттерном) нагрузочном резисторе. Возможно, что для соблюдения этого условия придется основательно “повозиться” с усилителем. Где возможно, необходимо использовать симметричные каскады, неизменно выдерживая принцип правильного согласования по мощности.

Если в усилителе следуют друг за другом много симметричных каскадов, необходимо стремиться создавать препятствия на пути распространения сигнала помех, т.е. необходимо использовать каскады с большим коэффициентом ослабления синфазного сигнала. Помешать возникновению сигнала помех, к сожалению, невозможно (даже с помощью правильного согласования мощностей), можно только помешать его дальнейшему распространению. В частности, это можно сделать, используя большое эмиттерное сопротивление (по сравнению с коллекторным), например, эмиттерный генератор тока.

Обычно включение в усилитель каждого нового каскада приводит к увеличению тепловых искажений. Поэтому нет никаких гарантий, что пред- или окончательный усилитель, собранный по сложной схеме “собственного изобретения”, даст результат лучше, чем исходный простой усилитель. Может возникнуть мысль как либо использовать тепловую компенсацию, однако, из-за того, что неизвестны постоянные времени, мы оказываемся здесь “на довольно болотистом месте”. Тем не менее, имеет смысл поэкспериментировать с полупроводниками разных типов, используя их в качестве компенсирующих элементов.

В случае устройств на интегральных схемах (операционные усилители, оконечные каскады на ИМС) поступают так же как и ранее: по возможности исключаются все известные источники помех и путем прослушивания выносится решение — пригоден ли этот образец (изделие), или же нет. И пока нет других методов, кроме прослушивания, которые приводили бы к той же цели.

Хочу высказать следующие соображения, которые могут служить исходной точкой для дальнейших размышлений, но не должны восприниматься буквально. Прежде, чем приступить к переделкам, необходимо внимательно изучить схему данного конкретного усилителя и оценить его возможности. Обычно легко установить, что в большинстве популярных схем предусилителей и оконечных усилителей имеется каскад (или каскады), построенные достаточно плохо с тепловой точки зрения. Предпринимаемые улучшения должны не только учитывать принципы функционирования данной схемы, но и тип используемых полупроводниковых устройств. Например, в плохо построенном каскаде тепловая предельная частота будет выше, а возникающие искажения меньше при использовании транзисторов небольших размеров, типа SM. Использование деталей разных типов является, вероятно, одной из основных причин того, что усилители, рассчитанные по одинаковой методике, имеющие одинаковые схемы и практически одинаковые конструкции, при прослушивании дают всё же разные результаты. Беда в том, что многие фирмы изготавливают полупроводники какого либо типа не обязательно по одной и той же технологии. Более того,

технология иногда меняется, в то время, как марка полупроводника остается неизменной и даже корпус, на первый взгляд, тот же.

Предпринятые автором некоторые переделки усилителей и серия измерений уже дали первые, внушающие надежду, результаты. После переделки усилителя, с соблюдением сформулированных выше правил, переходные процессы "необъяснимого" происхождения снижаются (с большой вероятностью) до благоприятно низкого уровня, так что они или не регистрируются, или же обнаруживаются с трудом. Расчеты показывают, что можно ожидать уменьшения такого рода переходных искажений примерно на порядок. Можно ликвидировать или значительно снизить странное изменение качества звучания после прекращения или значительного уменьшения сильного входного сигнала. Не появляются (по крайней мере, не различимы или почти не различимы на слух) иногда встречающиеся "загадочные" перекрестные искажения некоторых музыкальных мелодий.

Еще раз нужно подчеркнуть, что речь здесь идет не о тех искажениях в усилителе, которые контролируются традиционными методами измерений. Напротив, речь идет о тех случаях, где эти методы терпят крах (не обнаруживают заметных искажений), а качество звучания все же неудовлетворительное.

Конечно, с помощью хитроумных (например дифференциальных) способов можно было бы все же измерить тепловые изменения параметров усилителя. Однако здесь, опять же, возникает проблема оценок ошибок измерений, возникающих по похожим причинам у используемых измерительных приборов. И все равно, исправленный "на слух" усилитель будет иметь более высокую категорию. Естественно, переконструирование и экспериментирование — работа не для новичков. Необходимы осторожность, аккуратность и воображение. Могут встретиться другие побочные эффекты (например ультразвуковое возбуждение и т.п.), которые больше ухудшают, чем улучшают положение.

Автор не пытается скрыть того, что цель этой статьи, в первую очередь, пробудить мысль читателей, заставить взглянуть на "вечнозеленую" проблему искажений под новым углом.