



Чего ожидать в № 6 "Вестника А.Р.А.":

1. Отчет о выставке РХЭ'99
2. L.Olson и M.Kamna о спектре, стоящем за процентами гармоник (вся статья)
3. Все о 300В – материалы, опубликованные в мировой прессе за последние 10 лет. История и современное состояние легендарной лампы
4. Диалоги о трансформаторах

И многое другое...

Технология электронных ламп или полет над осиным гнездом

Технологам НИИ «Исток» — моим учителям...

Л. Ашкинази

Если бы существовали как отдельная область юмора «неприличные редакторские анекдоты», это стало бы ее венцом: рассказать о технологии электронных ламп в один присест. В лампах или при их производстве применяется почти все, созданное человеком в области технологии вообще, поэтому задача рассказать об этом в журнальной статье подозрительно напоминает задачу рассказать обо всем на свете в одной книге. А это удалось лишь однажды, 3218 лет тому назад, и то не все в это верят.

В нашем детстве была такая игра — «разминирование». Высыпались из коробка спички, и надо было растащить их по одной так, чтобы остальные не пошевелились. Самое общее деление всего инженерного искусства — это деление на теорию, конструирование и технологию. Но уже на этом уровне аккуратно разобрать природу не удастся. Теоретик говорит — нужен бесконечный плоский катод, бесконечно тонкая сетка во всю длину анода, не перехватывающая электроны, но фиксирующая потенциал и параллельная катоду... Пожалуй, — заявляет конструктор, — но бесконечный катод не влезет в самолет, да и сетки будет некуда девать. Насчет строго параллельно — это я на чертеже изобразить могу, но у всего на свете есть точность и погрешность. Какая нужна? — и лишнего не просите, чтобы у меня остатки волос не встали дыбом. Теоретик садится делать расчеты реальных конструкций, тем временем конструктор ему понемногу помогает, а в углу тихо рыдает технолог. И вот о чем его печаль: знаем мы, что эти двое сейчас нарисуют... Они такое изобразят — почище Эшера и Фоменко! Конструктор уговорит теоретика, что однородной сетки нулевой толщины не бывает, тот согласится на сетку из проволоки, сядет вычислять провисание потенциала в ячейки, фокусирующие свойства получившихся электронных линз, и возжелает проволоку нулевого диаметра. Пусть золотую рыбку просят!

Вот так, в противоречиях и конфликтах, но при этом в конструктивном сотрудничестве, складывается область и принятое в ней деление сфер влияния между названными выше персонажами. Деление на части, структура и организация взаимодействия между ними принципиально важны для выживания. Что является стимулом прогресса? Либо изменение внешних условий (началось оледенение — люди изобрели огонь и шубы), либо взаимодействие между частями. Важно правильно организовать это взаимодействие, как между ветвями власти в США или как между женщиной и мужчиной на Таити.

Собственно технология начинается с исходных материалов. Своих материалов требует любая область техники; специфика же состоит в том, ка-

кие именно материалы и с какими особыми свойствами требуются. Например, металл А, особо чистый по примесям В, С и Д — это обычная формулировка. Но А, В и т. д. — в каждой области свои. Электротехнике страшны те примеси к меди, которые понижают электропроводность — 0,1 % Р или Si уменьшают ее на 30-40%. Технике электронных ламп страшны примеси Саd и Zn к меди, на электропроводность не влияющие. Страшен кислород как примесь к меди, но совсем по другой причине.

Есть требования и по структуре — материал может иметь кристаллическую структуру, и в этом случае важно, какого размера эти кристаллы и как они расположены. Причем окажутся и примеси, и структура важны не только для работы лампы, но и для процессов изготовления: примесь (S в меди) или структура (длинные одинаково ориентированные кристаллы), которые делают металл хрупким, не дадут применить пластическое деформирование (гибку, выдавливание).

Проблемой исходных материалов для техники электронных ламп занимались целые институты, были опубликованы тысячи статей, немало и книг на эту тему. Все это не аргумент — скажите вы — мало ли кто занимался ерундой, мало ли дурацких книг было издано. Но, обратите внимание — в крупнейших электронных фирмах были специальные металлургические отделы. Те, кто делал лампы, считали необходимым иметь свою собственную металлургию. Значит, не могли обойтись...

После того, как изготовлены и разложены по полкам на складе исходные материалы, начинается изготовление деталей.

Для изготовления деталей ламп применяются те же способы, что и в технике вообще. Но одни применяются чаще, другие реже, а третьи — в каких-то вариантах или модификациях. Например, реже применяется механическая полировка — потому что при ней в поверхность внедряются загрязнения. Вместо нее используют химическую или электрохимическую полировку, а если надо применить именно механический процесс — то шлифовку.

Требования к чистоте деталей в электронной технике намного выше, чем в технике вообще. Чтобы понять, почему это так, достаточно посмотреть на лампы и осознать, что в ней вакуум.

В технологии электронных ламп, как и во всей технике, применяются химические способы очистки. Характерное отличие — широкое применение ультразвуковой очистки. Возможно, это связано просто с тем, что технология электронных ламп создавалась позже общетехнической и впитала в себя новые (на тот момент) решения. Затем, возрадив эти решения внутри себя, она стала оп-

лодотворять ими остальную технику. Позже такая же ситуация возникла между техникой электронных ламп и полупроводниковых приборов — последняя строилась на более прогрессивных методах, но первая позднее заимствовала их, оценив, насколько они хороши.

Намного чаще, чем где-либо вообще, при производстве ламп используют отжиг для очистки. Когда он правильно проведен, концентрация загрязнений уменьшается не только на поверхности, но и в глубине деталей. Там, откуда они все равно при работе лампы появились бы сначала на поверхности деталей, а затем в ее объем. Таким образом процесс отжига в некотором смысле имитирует работу деталей в лампе.

При отжиге из металлов выделяется в основном водород, иногда азот и кислород. Выделение воды и оксидов углерода — результат реакции вышедших из глубины металла атомов водорода и углерода с оксидами на поверхности, поскольку газы диффундируют в металлах не в виде молекул, а в виде отдельных атомов. При значительном содержании углерода желательно, чтобы металл был окислен, т. к. углерод сам по себе, без реакции с кислородом, с поверхности не удалится — он и не испаряется (при этих температурах), и в реакцию с водородом не вступает. Если же оксида для окисления углерода не хватает, то металл отжигают во «влажном водороде» — смеси водорода и воды — для окисления.

В диэлектриках газы могут диффундировать и в виде молекул, поэтому выделяющиеся из стекол и керамик вода и углекислый газ — не продукт реакций, а их собственные, имевшиеся в объеме вода и углекислый газ.

Вообще же для удаления примесей в печи должна быть среда, концентрация загрязнений в которой достаточно мала. Иначе загрязнения будут не удаляться из деталей, а насыщать их. Отжиг в вакууме является первым приходящим в голову решением, но не самым лучшим — получить в большой печи, набитой грязными (по меркам электроники) деталями такой вакуум, какой нужен в лампе — трудная задача. Поэтому чаще отжигают в водороде, который заодно восстанавливает оксидные пленки. Правда, при этом водород проникает в некоторые металлы; само по себе это не очень опасно — при обработке уже собранной лампы водород относительно легко покидает детали и откачивается насосами. Но нельзя отжигать в водороде титан, тантал, ниобий, цирконий — металлы, активно поглощающие водород. При поглощении водорода они становятся хрупкими и вообще изменяют многие свои свойства. В том числе те, которые определяют возможность дальнейших технологических операций — сборки лампы.

Кроме того, проникновение водорода в металл опасно, например, когда проникший вглубь металла водород соединяется с кислородом и получившиеся водяные пары разрывают металл. Называется это явление «водородная болезнь», и чтобы ее избежать, в технике электронных ламп используют медь с пониженным содержанием кислорода (бескислородную медь). Кроме водорода детали отжигают в аргоне, иногда в смесях инертного и восстанавливающегося газов. Отжечь детали так, чтобы они стали чище «снаружи и изнутри» — сложная задача. В этой области выполнено множество исследований, в книгах же по технологии электрон-

ных ламп отжигу отводится обычно весьма заметное место. Температура, время, состав газа, скорость потока, загружаемые детали — их количество, материал, расположение — все влияет на результат, зачастую непонятным и непредсказуемым образом.

Загрязнения переносятся при отжиге с одних деталей на другие; несмотря на избыточное давление внутри печи, атмосферные газы проникают внутрь; лампы, собранные из более тщательно очищенных деталей оказываются грязнее собранных из менее очищенных — эти и десятки других загадок, успешные и безуспешные попытки их решения — вот что такое ежедневная работа технолога. Фирмы RCA и Philips охотно взяли бы на работу Ш. Холмса, даже несмотря на отсутствие диплома технолога. Впрочем, у нас он — как имеющий друзей за границей — стал бы заниматься разве что технологией производства картофелеуборочного комбайна.

Что касается случая, когда хорошо очищенные детали оказываются хуже очищенных плохо, то причина такова: при особо тщательной очистке поверхность детали оказывается химически очень активной и мгновенно загрязняется при извлечении детали из печи. Если же очистка производилась не столь «зверски», то слегка окисленные детали далее окисляются уже медленно. Отсюда видна важность операции сохранения; действительно, в технике электронных ламп это — отдельная проблема. Существует специальная тара для хранения и транспортировки деталей, их содержат в осушенной и очищенной от пыли среде, иногда в среде инертного газа или в вакууме.

Отжиг применяется в технологии электронных ламп не только для очистки, но также для восстановления исходной, равновесной кристаллической структуры, изменившейся при механической обработке. При многих видах механической обработки, особенно при вытяжке и иной пластической деформации, происходит увеличение количества дислокаций (нарушений кристаллической решетки) и изменение размера кристаллов — удлинение в направлении деформации. У такого материала меняются свойства — механические, электрические, химические. В частности, у него уменьшается способность деформироваться — она уже частично (или полностью) израсходована. Для восстановления исходных свойств и, в частности, для возможной дальнейшей деформации надо уменьшить количество дислокаций и измельчить вытянутые кристаллы. Это и происходит при так называемом рекристаллизационном отжиге.

Если же материал деформирован в упругой области и форма его стабилизирована какой-то технологической оснасткой (например, на оправку намота проволока — мы хотим сделать пружину), то отжиг необходим для снятия напряжений. Иначе проволока после снятия с оправки благополучно расправится, и вместо пружины мы получим проволокой по носу, хорошо, если не по глазам. Другой процесс, который также имеет в электронике свою специфику — это процесс нанесения покрытий. Вообще в технике покрытия применяются чаще всего для увеличения коррозионной стойкости, коэффициента излучения и твердости, уменьшения трения. То есть детали и устройства в целом работали бы и без покрытий, но хуже. Вдобавок они быстрее вышли бы из строя. А вот

в технике электронных ламп покрытия, как правило, и являются тем, что работает, несет основную функцию. Покрытия экранов кинескопов излучают свет — без них кинескоп не работал бы вообще. Катодные покрытия эмиттируют, изоляционное покрытие на подогревателе изолирует его от катода — без них лампы не будут работать. Поэтому в технике электронных ламп было бы иногда логичнее говорить не о покрытиях на деталях, а о деталях, которые существуют лишь для того, чтобы на них могли быть покрытия. В самом деле, можно представить себе кинескоп вовсе без стеклянного баллона — если кругом вакуум, — но вот без люминофора — никак.

Разумеется, в технике электронных ламп могут применяться все обычные покрытия — например, медные радиаторы вполне могут снабжаться покрытиями, предохраняющими их от коррозии или увеличивающими проводимость (в области сверхвысоких частот, когда токи протекают по поверхности). Внутривламповые детали могут иметь покрытия, уменьшающие коэффициент излучения (для увеличения экономичности) или увеличивающие его для охлаждения соответствующих деталей. Например, чернящие покрытия на анодах. Все остальные покрытия, которые мы рассмотрим, специфичны для электровакуумных приборов, причем многие из них наносятся по специальной, применяемой в основном в этой области, технологии.

По обычным технологиям наносится в основном два типа покрытий. Антиэмиссионные покрытия на сетках ламп (золото, реже серебро, сплав олово-никель, титан, углерод и некоторые другие), предназначенные для увеличения работы выхода сеток, при загрязнении их барьером или торием с катода, наносятся либо гальванически, либо протягиванием проволоки через расплав того металла или сплава, который надо нанести. Полупроводящие прозрачные покрытия из оксида олова получают либо пиролизом паров хлорида олова, либо осаждением из раствора хлорида олова.

Остальные процессы нанесения покрытий в технике электронных ламп строятся по следующей схеме: на поверхность наносится порошок вещества, которым мы хотим покрыть поверхность, а затем деталь нагревается так, чтобы произошло «спекание» — срастание частиц друг с другом и с поверхностью путем взаимной диффузии. Степень спекания обычно невелика, а само покрытие получается пористым. Для эмиссионных и геттерных покрытий это необходимое условие работоспособности, для прочих оно допустимо. Обеспечить же высокую степень спекания нельзя потому, что для такого спекания нужна либо недопустимо высокая температура, либо давление, что обычно крайне затруднено технологически.

Сам порошок может наноситься несколькими способами, различающимися тем, в какой среде находятся частицы порошка — в газе или жидкости и под действием каких сил они приближаются к поверхности — электрических, гравитационных или упругих. Например, из суспензии в жидкости под действием электрических сил — это электрофорез, когда заряженные частицы устремляются к детали, на которую подается потенциал. Из жидкости под действием гравитации — это просто осаждение, так наносят в основном люминофорное покрытие на кинескопы. Из жидкости под действием упругих сил — это распыление или на-

мазка суспензии. Из газа под действием электростатических сил — это так называемое электростатическое напыление, часто применяемое в технике для нанесения красок... Чтобы порошок, попавший на поверхность, не осыпался с нее сразу, а дождался начала процесса спекания, к суспензии часто добавляют органические вещества с большой адгезией, клеи, испаряющиеся или разлагающиеся в процессе спекания.

По этим технологиям наносят покрытия почти всех видов — перечислим их. Проводящие покрытия из мелких частиц графита на баллонах кинескопов и электронных ламп. Полупроводящие покрытия из частиц оксидов хрома, железа и марганца для выравнивания потенциалов в высоковольтных электронных приборах. Геттерные покрытия из частиц активно взаимодействующих с остаточными газами металлов для поглощения их внутри лампы. Изоляционные покрытия из частиц оксида алюминия на подогревателях. Люминесцентные покрытия в кинескопах и — кто помнит? — лампах-индикаторах настройки («кочкачьи глаза», серия Е). Эмиссионные покрытия оксидных катодов из оксидов щелочноземельных металлов и покрытия из металлических, как правило, никелевых частиц, на которые обычно и наносится собственно эмиссионное покрытие. И наконец, покрытия из частиц оксидов магния и алюминия на слюдяных изоляторах в лампах. Зачем же наносить изоляционное покрытие на изолятор? — спросите вы. Его наносят не для изоляции, а для того, чтобы слюда стала шероховатой. А зачем ей становиться шероховатой? — последует еще вопрос, — ведь она в вакууме ни обо что не трется, это же не тормозные диски для Chegooke! Шероховатость нужна для того, чтобы оседающие на слюду при работе лампы атомы металлов не могли слиться в проводящую пленку и закоротить зазор.

Теперь, когда все детали изготовлены и молча лежат в эксикаторах с обеспыленной и высушенной средой или, лучше того, в вакуумных шкафах, окинем их взглядом:

- катоды с эмиссионным покрытием;
- сетки из проволоки с антиэмиссионным покрытием, намотанной на траверсы (стойки) или — на рамки для ламп с планарной геометрией;
- подогреватели, покрытые изоляцией;
- аноды, штампованные из черненого тонкого листового металла — для расположения внутри лампы и охлаждения излучением — или массивные медные, составляющие часть оболочки лампы и предназначенные для воздушного или водяного охлаждения;
- различной формы изоляторы из слюды или в мощных лампах из керамики, чтобы стабилизировать положение деталей относительно друг друга;
- оболочки ламп или, точнее, заготовки оболочек из стекла или, порой, для мощных ламп, из керамики;
- вводы, которые будут впаяны в стекло и начнут доставлять в лампу и из лампы электроны;
- наконец, газопоглотители или геттеры, которых, впрочем, может и не быть (об этом позже); а они изготавливаются в виде отдельных деталей или нераспыляемых геттеров, в виде геттерных покрытий на других деталях и в виде распыляемых геттеров, которые при термообработке лампы будут нагреты и напылят на стекло слой бария. Он-то и будет поглощать потом остаточ-

ные газы (станет, так сказать, нераспыляемым геттером). Все, во всяком случае — все основное. Чтобы перевести дух, сделаем небольшое пространное обобщение, касающееся электронных ламп и жизни.

Наблюдая людей — в работе (и не только в области электронных приборов) и в жизни, можно прийти к выводу, что теоретик, конструктор и технолог — это не профессии. Это — диагнозы.

Теоретик предпочитает мыслить функциями, т. е. рассуждает о том, что должен делать прибор. Для ламп — куда должны лететь электроны, как они должны отклоняться, какие нужны поля и как они должны зависеть от времени. Конструктор рассуждает на уровне частей прибора, делающих все это: испускающих электроны и собирающих их, создающих электрические поля или экранирующие их от них какие-то части прибора и так далее. Технолог — на уровне реализации этих частей: как сделать этот анод и соединить его с оболочкой, как сделать катод, чтобы его покрытие не осыпалось при вибрациях и так далее. Разумеется, каждый из них ставит задачи перед двумя другими, далее происходит загадочный процесс, именуемый работой, а в результате — EL34, 300B, 6С33С и так далее...

И хорошо, если человек находит себе работу, гармонично сочетающуюся с диагнозом; еще лучше, если он находит себе коллектив, в котором разумно, т. е. в интересах дела, поделены эти роли. И очень хорошо, если все они реализованы в группе людей, живущих вместе. Но если этих людей двое, а ролей, как мы видим три, то полезно быть немножко универсалом.

Пора приступить к сборке. На заре эпохи электронных ламп, более 75 лет назад, для работы в области больших мощностей применялись разборные лампы, работавшие с постоянной откачкой. Стучал насос, радиоволны неслись в эфир... Сейчас все лампы — неразборные и соединения в них выполняются, как правило, неразборными. Лишь в мощных лампах и то редко детали соединяют винтами; причем, поверх головок все равно приваривают накладку, исключая ослабление и отвинчивание винтов. Лампа — не пылесос, в нее с отверткой не залезешь.

Основной метод соединения деталей в маломощных лампах — контактная электросварка, называемая часто точечной сваркой; применяется также лазерная сварка. В мощных лампах применяется еще и аргоно-дуговая сварка, она дает вакуумно-плотный шов и поэтому может использоваться для соединения деталей оболочки лампы.

Сварка — это метод соединения, когда расплавляется материал обеих деталей. Если материалы остаются твердыми, а зазор между ними заполняется каким-либо жидким металлом, который застывает, — это пайка. Если же расплавляется один из материалов, это называется пайка оплавлением.

До сих пор мы говорили о соединении металл-металл. При соединении металлов с диэлектриками сварка, в обычном ее виде, не применяется, т. к. температура плавления керамики значительно выше температур плавления большинства металлов, и вдобавок керамика при плавлении разлагается. Стекло же плавится легко, даже слишком легко, а металлы, с которыми соединяют стекло, плавятся при более высоких температурах. Так что соединение металла со стеклом — это, по су-

ществу, пайка оплавлением, когда плавится стекло. Но ее традиционно называют пайкой.

Зачем вообще при пайке оплавлением расплавляют один из соединяемых материалов? Чтобы сблизить соединяемые материалы. Можно и не плавить — нагреть и сильно сжать. За счет пластичности материалы сблизятся на атомные расстояния, и диффузия, ускоренная нагревом, произойдет. Такой способ соединения называется термокомпрессионной сваркой. Слово сварка тут совершенно не к месту, но такова традиция.

Часто говорят, что те или иные материалы соединить можно или нельзя. Так говорить некорректно — ибо соединить можно любые материалы. Вопрос в том, какую прочность будет иметь такое соединение. Тем более, что кроме внешних усилий (лампы роняют), существуют еще и внутренние, возникающие из-за различий в термических расширениях. Действительно, все эти пайки — сварки делаются при высоких температурах. Потом мы прибор охлаждаем, и если соединенные при высокой температуре материалы по-разному укорачиваются при охлаждении, то в соединении возникают термические напряжения.

Поэтому вопрос о соединении — это вопрос о согласовании расширений, о возникающих усилиях на стыке и о прочности тех соединений, которые возникают в сварной зоне или в зоне диффузии припоя и материала друг в друга. Если говорят, что два металла хорошо соединяются, это означает, что созданные в зоне их взаимодействия соединения не хрупки и прочны.

Проблема согласования коэффициентов термического расширения особенно важна, если один из соединяемых материалов хрупок, например, при спаивании металла со стеклом. В частности, для согласования с теми или иными сортами и группами сортов стекла разрабатывались специальные сплавы. Иногда разрабатывались специальные надежные спайки с каким-то определенным металлом. На какие только чудовищные ухищрения не приходилось идти, чтобы спаять, например, германий со стеклом, сапфир со стеклом или, о ужас! — кварц со стеклом! У вас не сжалось сердце? Есть от чего. Ведь у кварца термическое расширение на порядок меньше, чем у стекол, и технологам пришлось разработать ряд из десятка стекол, которые спаивались так: первое с кварцем, второе с первым и так далее — до последнего, которое спаивалось с обычным электровакуумным стеклом.

Вот вам еще маленькая одиссея: в древности вводы в стекло делали из платины, подобрали стекла, которые с ней хорошо спаиваются и привыкли к ним. В конце концов от платины пришлось отказаться. И придумали вводы из «платинита» — проволоки из стали Н42 (42 % никеля, остальное — железо), покрытой медью, причем толщина меди подбиралась так, чтобы у этой композитной проволоки расширение было, как у платины.

...А еще в некоторых случаях в зоне контакта образуются легкоплавкие соединения. Автору этой статьи понадобилось как-то распылить в вакууме никель. Он взял титановую фольгу, вырезал ленточку, закрепил ее в вакуумной камере, положил на ленточку квадратик из никелевой фольги и начал греть титан, пропуская по нему ток. И в какой-то момент с ужасом увидел, что никель исчез, а в титановой ленте зияет аккуратная квадратная дыра. Как квадратное отверстие в облаках у Стругац-

ких, в «Гадких лебедях». При 955° С в зоне контакта титан-никель началось плавление интерметаллида и расплавившаяся зона просто «капнула» вниз. И все...

В отличие от спая металл-стекло, который, по существу, делается путем оплавления металла стеклом, соединение металла и керамики так получить нельзя — керамика тугоплавка. Поэтому сначала ее металлизуют, нанося на поверхность металлический порошок или соединения и расплавляя их. При этом за счет диффузии и реакций образуется переходная зона. А уж потом спаивают металлизированную керамику с металлом.

Можно, впрочем, обойтись и без металлизации. При так называемой «активной пайке» между керамической и металлической деталью прокладывают фольгу из титана, затем этот бутерброд сжимают и нагревают. При взаимодействии образуется переходная зона, и детали скрепляются.

Заметим, что в электронике, как и в повседневной жизни, более простая на вид технология требует более высокой технологической культуры и она более «строга», т. е. требует лучшей стабилизации параметров.

Наконец, металл с керамикой (равно как и стекло со стеклом), можно соединить с помощью пайки, но не металлическими припоями, а легкоплавкими стеклами, или «глазуриями». Фантазия технологов неисчерпаема! Особенно, когда постоянно приходят конструкторы с очередными безумными проектами.

Итак, лампа собрана и надо начинать ее обработку. Оказалось, что недостаточно выкачать из нее воздух и запаять стеклянную трубку (штенгель), по которой шла откачка (или перекусить, сварив холодной сваркой — металлическую). Даже когда лампа собрана из чистых деталей, то они чистые «не в том смысле», в котором должны быть чистыми в лампе, но некоторые — очень даже грязные, и вообще — они еще не детали, а, простите за грубое слово, полуфабрикаты. И это, между прочим, главные детали — катод и геттер. А одна деталь в лампе при сборке вовсе отсутствует. Позже мы узнаем, откуда она возьмется.

Начнем, однако с простого — с не так очищенных деталей. Помните детский юмор — ребенок спрашивает, к чему относится шея — к спине или к голове? Оказывается, от этого зависит, будет ли он ее мыть.

Как бы ни была хорошо очищена деталь до сборки, после нее она оказывается грязнее. И хоть собирают лампы в капроновых перчатках, и хоть отбирают девочек-монтажниц по сопротивлению кожи влажных рук (что связано и со степенью влажности и с концентрацией ионов), но все равно — после сборки надо чистить. Ведь, в печи деталь нагревается и обезгаживается не так, как в лампе. Во-первых, не при тех температурах — обычно при более высоких, но не всегда. Во-вторых, в лампе нагрев неравномерен. И, наконец, в лампе нагрев производится не только нагревателем и излучением катода, но и электронным потоком, который разлагает оксиды на поверхности деталей.

Для создания электронного потока катод должен эмиттировать, а для этого лампа не должна быть уж очень грязной. Поэтому процесс очистки лампы электронной бомбардировкой — отчасти саморегулирующийся. Если грязи летит слишком

много, эмиссия катода уменьшается. Из этого сразу следует, что существует оптимальный режим, но его построение — немалое искусство, вопрос чужья технология.

Одна из главных задач очистки лампы — грязь не надо гонять с электрода на электрод. Очистка всех частей должна вестись одновременно. Заметим, что эта идея психологически противоречит советской ментальности, выросшей на идее о «слабом звене в цепи империалистических государств» и мифе, что «лестницу надо мести сверху». В технике электронных ламп стараются чистить все электроды лампы одновременно, причем по возможности по всей площади. А не как в известной фразе «помойте шею под большое декольте».

Поскольку очистка всех деталей и чистая сборка — большие проблемы, то в технике электронных ламп известны по крайней мере два приема, позволяющих сделать более чистой лампу, собранную из грязных деталей. Во-первых, это прогрев лампы при прокачке через нее водорода, имитация отжига в среде водорода. Во-вторых, это зажигание в лампе газового разряда, очистка электродов бомбардирующими их ионами, аналогично очистке в газовом разряде, применяющейся в полупроводниковой технике для обработки подложек перед напылением. Разумеется, откачка ламп при их прогреве — это также и очистка деталей в уже собранной лампе, но, поскольку прогрев стеклянной лампы обычно производится при температуре около 400° С, реально обезгаживается только стекло.

Деталь, которая поступает на сборку и помещается в лампу в виде полуфабриката — это катод, а также все покрытия, нанесенные, как указано выше, с применением связок (клеев). При нагреве клей должен испариться или разложиться, при этом выделяется значительное количество газа и возможно загрязнение других деталей. Для оксидного катода эта ситуация усугубляется тем, что он наносится в виде кристаллов карбоната щелочноземельных металлов, а для перевода в оксиды их надо нагреть, разложить, откачать выделяющуюся смесь оксидов углерода, которая опять же, может окислить детали лампы. Построение такого режима нагрева катода, т. е. зависимости температуры от времени, чтобы клей не разлагался, а испарялся, а карбонаты разлагались, но не окисляли — предмет многих научных работ, объект стараний поколений технологов и их головная боль. Причем в эпоху массового выпуска ламп всем хотелось обрабатывать побыстрее, чтобы — план! план! — а при определенной скорости откачки чем быстрее греем, тем хуже вакуум в лампе, все окисляется... Позже острота этой проблемы по понятным причинам уменьшилась.

Наконец, после того, как лампа в основном обезгажена и даже катод превращен в оксиды, наступает этап активирования катода и обработки геттера. Активирование катода — это загадочный процесс, при котором в результате нагрева, отбора с него тока и химического взаимодействия оксида с активными присадками к материалу керны (основы, на которую нанесен оксид) в покрытии возникает некоторый дефицит кислорода (отклонение от стехиометрии). В результате катод становится катодом — у него увеличивается эмиссия и проводимость.

Процесс обработки геттера выглядит по-разному, в зависимости от того, распыляемый или не-

распыляемый геттер применен в лампе. Нераспыляемый — это кусочек пористого титана или какого-либо сплава, хорошо поглощающего остаточные газы и поддерживающего вакуум в лампе (как бы мы хорошо ни обезгаживали, при работе лампы вакуум в ней может и ухудшаться). Такой геттер начинает работать после кратковременного нагрева, при котором имеющийся на его поверхности кислород продиффундирует вглубь, очистив место для новых атомов, прилетающих из объема прибора. Если же геттер распыляемый, то его тоже надо нагреть, но с другой целью. При нагреве в геттерной смеси начинается экзотермическая реакция, он нагревается сильнее, но на короткое время и выделяющийся при этой реакции барий напыляется на стекло. Вот эта пленка бария — «геттерное зеркало» и есть та деталь, которой не было при сборке лампы. Она работает как геттер, конечно, уже «нераспыляемый».

Наличие специального геттера, вообще говоря, не обязательно. Если лампа очень хорошо обезгажена и если, вдобавок, она содержит детали из титана (которые сами работают как геттер), то можно обойтись. И обходятся — в лампах типа «кнустор» геттера как отдельной детали нет. Это миниатюрные металло-керамические лампы, содержащие титан и обезгаживаемые при откачке с нагревом до 700° С. Но нам еще осталась морока с высоким напряжением... Когда на лампу начнут подавать все более и более высокое напряжение, то будут происходить пробой — броски тока с последующим (если цепь не отключить) расплавлением электродов лампы. Посмотрим, почему и как это происходит.

Если на поверхности электрода есть пылинка или слабо держащийся кусочек материала, он отрывается, летит к противоположному электроду (кусочек заряжен, и поле его ускоряет), врезается в электрод, как метеор, испаряется и заполняет объем прибора паром. Если на электроде есть острие, на нем напряженность поля оказывается очень велика, начинается автоэлектронная (полевая) эмиссия, пучок электронов разогревает электрод, а ток, протекающий по острию, разогревает острие; где нагрев — там испарение, объем прибора заполняется паром. Что так, что этак, но в паре

происходит нормальный пробой в газе. Собственно, высуньте голову в окно в подходящий момент — это она и сверкнула. Только в приборе маленькая, а между тучами — большая.

Но если мощность разряда ограничить, то вредных последствий не будет, а то, что испарилось — откачается геттером или насосом. Высоковольтная тренировка — это и есть очистка прибора от пылинок, кусочков и остриев превращением их в пар при ограниченной мощности разрядов. Но вот напряжение доведено до рабочего (и с запасом), а пробой прекратился или их частота уменьшилась до границы технических условий.

Теперь лампу надо отпаять от вакуумного поста, отделить от насоса. Если баллон стеклянный и откачка производилась по стеклянной трубке (штенгелю), ее нагревают. Атмосферное давление сжимает размягчившееся стекло, и трубка запаивается (точнее было бы сказать — заваривается). После отпайки ее надо прогреть для уменьшения напряжений в стекле. В лабораториях, когда отпайка ламп производилась вручную, она считалась искусством, которое высоко ценилось. А ценой в те времена было уважение коллег и фраза типа «Позови-ка лучше Сан Саныча, пусть он отпаяет». Неумелая отпайка могла погубить недельную работу.

Если лампа откачивалась через металлический штенгель, его откусывают. К счастью, не зубами, а специальными клещами, создающими в зоне «куса» столь высокие механические напряжения, что металл течет и происходит холодная сварка.

Заметим, что отпайка (откусывание) прибора от насоса и активирование катода могут производиться и в иной последовательности. В частности, при обработке маломощных приборов активирование производят после отпайки; выделяющиеся при этом газы откачивает геттер.

Затем к лампе приделывают цоколь, пишут на ней, как она называется, испытывают, измеряют ее параметры, упаковывают, везут — слышите тук-тук, тук-тук, тук-тук — это стучат колеса. А потом вы идете на радиорынок, вертите эту стекляшку в руках и прицениваетесь.

Теперь вы знаете, как делали то, что вы сейчас вертите в руках.

Отбор электронных ламп

«SCREENING VACUUM TUBES»

VTV № 1. May 1995

How to evaluate new and used tubes
by John Atwood

Почему статья названа как «отбор ламп» а не «тестирование ламп»? Главным образом потому, что тестирование предполагает замеры параметров с помощью измерителей и дальнейшую браковку тех ламп, которые не прошли хотя бы по одному из них. В статье же затронуты вопросы более широкого характера, чем специфика измерений; здесь описаны наиболее важные дефекты и повреждения, встречаемые в лампах, обнаружив которые можно затем без труда отделить плохие приборы от пригодных к использованию.

Зачем отбирать лампы? Разве не все лампы, купленные мною в магазине, хороши? Или недостаточно поглядеть на упаковку, когда меняетесь с кем-то лампами? И да и нет. Порой новые лампы имеют дефекты, хотя их даже не доставали их коробочки, а техника, куда их поставят, выдвигает довольно строгие требования. В другой раз работавшая лампа безусловно хороша и долго еще прослужит. Даже старая, послужившая лампочка может оказаться лучше, чем новая с проблемным качеством. В третьем случае может статься, что лампы, не прошедшие жесткую отбраковку, вполне сгодятся для менее ответственных участков.

В статье как раз вскрываются виды дефектов и повреждений, свойственные лампам, и показаны методы отбора по требованиям для данного устройства.

Типы отказов и повреждений

Отказы в ламповой технике можно разделить на две категории: 1) одни проявляются сразу же в новой лампе; 2) присущи

только использованным, бывшим в работе лампам. В первом случае — отказ на совести производителя или вследствие плохого обращения, например при транспортировке или установке в панельку. Такие вещи случаются и с работавшими лампами, но кроме того у них есть свои специфика отказов.

Наиболее частые дефекты в новых лампах:

1. Короткое замыкание — чаще всего из-за отрыва какого-либо элемента: кусочка траверзы, пружины, распорки.

2. Нарушение геометрии и шага навивки сеток — следствие небрежности при сборке лампы. Сопровождается затянутой отсечкой анодного тока на I_a-U_c характеристиках, что в звуковых лампах приводит к повышению искажений.

3. Шумы и микрофонный эффект — вызваны недостаточной очисткой элементов или нарушением технологии сборки. «Микрофон» может кроме того являться следствием грубого обращения с лампой.

4. Неправильная маркировка — может быть нанесена умышленно либо ошибочно. Часто такая лампа будет «работать» в схеме, но с большими искажениями. Классическим примером является маркировка 6ES8 (ECC189) как 6DJ8 (ECC88). Лампа по виду та же, но имеет длинную характеристику, приводящую к высоким искажениям.

Работавшие лампы с неизвестным ресурсом (вроде тех, что попадают на развалах) могут иметь следующие дефекты:

1. Недостаточная эмиссия/низкая крутизна. Наиболее частый дефект в новых (моложе выпуска 1950 г.) и особенно в пальчиковых лампах с высокой крутизной. Либо ресурс исчерпан, либо

произошло «отравление» катода.

2. Обрыв нити накала. Частый случай в старых (старше выпуска 1950 г.) и в лампах батарейного питания.

3. Загазованность. Характерна для мощных ламп, особенно в тех, что были чрезмерно перегружены по мощности на аноде или высоким напряжением.

4. Повышенная утечка на участке накал-катод или «коротыш».

5. Шум — часто связан с подсевшей эмиссией.

6. «Тугой» катод — сопровождается неспособностью катода отдавать нужный ток на пиках сигнала.

Визуальная оценка ламп

Внешняя оценка поможет избежать проблем и к тому же быстро выяснить: на самом ли деле лампочка N. O. S. (New Old Stock — из старых запасов, но не работавшая).

Для начала гляньте на геттер — серебристый налет на стекле внутри баллона. Его назначение — поглощать молекулы газа в герметичной колбе лампы; как правило это зеркало из бария или магния. Если геттер полностью белый, это говорит о сильном натекании воздуха и лампа работать не будет. Если осталось небольшое пятнышко, то лампа до этого тяжело работала и может быть загазована. Может быть лампа и жива, но это маловероятно. Если же геттер «как новый», без потемнений и прозрачных пятен, то похоже, что лампа новая или мало работала. Однако другие проблемы вовсе не исключены, пойдем дальше.

Потрясите лампу. Если что-то дребезжит, приглядитесь внутрь

ее. Не стоит беспокоиться, если это кусочек стекла, но если этот кусочек металлический, придется лампу выбросить. Порою у октальных ламп отламывается ключ на цоколе, растрескивается сам цоколь — это не так страшно, пока лампа вовсе не лишится цоколя.

Можно отыскать лампу в родной упаковке и выглядит все это вполне новым (N. O. S.). Но так ли это в самом деле? Возможно, техник при замене подсевшей лампы просто сунул ее в коробку от новой. Внимательно приглядевшись, можно сказать про нее, работала она или нет. В первых, соответствует ли маркировка на стекле той, что на коробочке? Если нет, вряд ли эта лампа новая, не работавшая. Насколько чистыми, не затертыми выглядят надписи/штампы на стекле. У большинства ламп значок нанесен столь нестойкой краской, что она легко слетает при установке, или когда смахивают пыль. Есть ли отпечатки пальцев на стекле или въевшаяся грязь и пыль? Или стекло заметно потемнело? А может, геттер изрядно подношен, тогда он из блестящего непрозрачного становится дымчатым, полупрозрачным. Когда видна легкая дымка на стекле или геттер несколько посветлел по краям, это не страшно, такую лампу можно считать вполне свежей, хотя и бывшей в работе. Вот после этого можно приступать к измерениям (как правило, меряют крутизну). И маленький совет: даже при едва заметных признаках того, что лампа не новая, не платите за нее полную цену!

Проверка эмиссии и крутизны лампы

Падение эмиссии является главным признаком выхода лампы из строя. Причиной этому могут быть отравление эмиттирующей поверхности газом, либо истощение материала покрытия катода. Этот факт проявит себя сам через снижение крутизны (возможно и усиления) и неспособность развить большой ток в нагрузке, каким бы ни было смещение на сетке. Обычно этот

процесс идет равномерно и медленно по мере наработки, затем быстро ускоряется, что означает полный выход лампы из строя. Лампы с высокой плотностью эмиссии с катода, к примеру небольшие пальчиковые лампы для радиочастотного диапазона, теряют эмиссию быстрее, чем те, где плотность тока низка и условия работы их гораздо легче предельно допустимых.

Дешевые ламповые тестеры, обычно именуемые «тестерами эмиссии», продавались раньше едва ли не в аптечных киосках. У них напряжение на катоде (при определенном автосмещении) запросто подавалось на сетку и нужно было смотреть, насколько велик был ток анода. Стрелка могла показать, что эмиссия слабая, но на самом деле такой «контроль» мог вполне повредить лампу из-за броска тока, вызвав осыпание катода или перегрев хрупких сеток лампы. Если тестер не назывался «Измерителем крутизны» и выглядел дешевой, то скорей всего это тестер эмиссии. Не применяйте его.

В «измерителях крутизны» небольшое переменное напряжение подавалось на сетку и стрелка показывала величину анодного тока. Это уже более реалистичный тест, да и лампа не испытывала стресса, как в случае с «тестерами эмиссии». В большинстве из них напряжение на анод подавалось нефильтрованными, просто выпрямленным, так что значение крутизны нельзя было считать истинным. Конечно, для лабораторных измерений такие тестеры не подходили, зато были достаточно удобны для грубой оценки эмиссионной способности катода лампы. При этом анодные характеристики лампы в расчет не шли, просто подавалось всегда одно и то же анодное. В более сложных измерителях, таких как «лабораторная» модель Niskok 123 Cardomatic анодное точно выставляется и производится довольно точный замер крутизны. И все-таки из-за того, что измерения проводятся на одной точке (обычно указанной в справочнике), а не в широком диапазоне анодных токов, то под-

севшая эмиссия в области больших анодных токов почти не выявляется*. Таким образом, измерители ламп общего назначения как военный прибор TV-7/U, бытовой Heathkit TT-1, большинство измерителей фирмы Niskok и др. вполне прилично справляются с задачей.

Правда, за исключением действительно лабораторных приборов, все они проградуированы довольно произвольно. Производитель предлагает дать оценку годности лампы по нахождению стрелки в зеленом секторе. С другой стороны военные дают метку, ниже которой стрелка не должна падать, дальше лампа бракуется. Каждый измеритель требует индивидуального подхода и знания, где должна оказаться стрелка при действительно хорошей лампе. Так что всякий раз требуется «здоровая» лампа, чтобы понять насколько хуже ведут себя другие лампы. На моем измерителе TV-10/U (милитаристская версия Niskok 6000) хорошие лампы выводят стрелку в 1,5–1,9 раза правее отметки минимально допустимой крутизны. Когда же стрелка едва отрывается от этого сектора, я без сожаления бракую лампу. Другие тестеры еще чище — для их калибровки требуется заведомо хорошая лампа.

Так что, если лампа не показала удовлетворительных результатов при замерах крутизны, она либо изначально дефектная, либо сполна отработала свой срок. Если место на музейной полке уже занято такой же лампой и вы не собираетесь использовать ее в приборе даже с пустяковыми требованиями, лучшее место для нее — мусорное ведро.

Наблюдение кривых на экране

Характериограф рисует на экране осциллографа семейство кривых зависимости анодного тока от смещения на сетке при различных напряжениях на аноде (анодные характеристики). Однако для цели отбора ламп больше подошла бы кривая изменения анодного тока от напряжения сетки при фиксирован-

* Та же картина и с нашими измерителями советского производства. Как правило, рабочая точка выставляется штырями в отверстиях на перфокарте. Так вот, мы для некоторых типов ламп делаем самодельные карты, в которых предусмотрено изменение режимов в широком диапазоне. Судя по описаниям западных tubetester'ов, и сравнивая их с нашим ЛЗ-3, кроме гордости за отечественный прибор, испытываешь здоровое чувство патриотизма за наши электронные лампы. — Прим. ред.

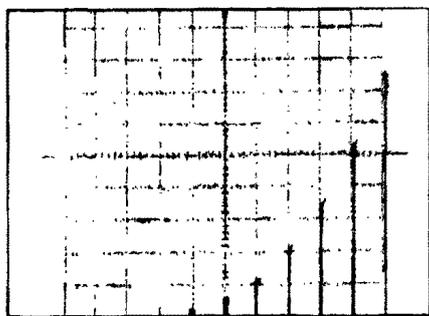


Рис. 1. Нормальная 12AT7



Рис. 2. 12AT7 с плохой отсечкой

ном анодном напряжении (анодно-сеточная характеристика). Она показывает кривизну передаточной характеристики и то, насколько хорошо лампа закрывается. Если кривизна большая, можно ожидать больших искажений. Если геометрия сетки нарушена при сборке, то анодный ток не будет исчезать при глубоком закрытии лампы (более отрицательном напряжении сетки). Если лампа с удлиненной характеристикой ошибочно отмаркирована как лампа с короткой (к примеру 6BA6 имеет значок 6AU6, или 6ES8 имеет значок 6DJ8), то при измерениях это сразу выяснится.

На рис. 1 показана анодно-сеточная характеристика лампы 12AT7 (в данном случае Raytheon JRP-12AT7, выпущенная в 60-е). Она выглядит, как нормальный образец, хотя и с кривизной, присущей 12AT7. На рис. 2 изображена характеристика другой половинки той же лампы, где отсечка тока не происходит даже при глубоком закрытии. Этот пример, конечно, избыточен по своей показательности, но интересно, как лампа с таким дефектом оказалась в военном приборе. К счастью, такие пороки у ламп весьма редки.

Отбор ламп на характериографе представляет собой операцию скорее качественную, нежели количественную. Прогон ламп через этот прибор помогает быстро выявить дефекты производства или причину высоких искажений, но он не укажет на севшую эмиссию до тех пор,

пока лампа еще хоть как-то дышит. Так что наблюдение характеристик на характериографе является, по сути, дополнением к измерениям крутизны.

Единственным характериографом, производившимся серийно, был Tektronix 570. Он выпускался с 1955 г. до начала 60-х. Но сделано их было немного, и найти его сейчас крайне сложно. На протяжении ряда лет в различной периодике публиковались статьи о том, как сделать характериограф. Сейчас, при наличии дешевых АЦП и ЦАП на борту компьютера, не составит никаких проблем построить характериограф управляемый машиной. Единственное, за чем дело стало — недорогой характериограф для измерения ламп.

Шум и «микрофон»

Шумы и микрофонный эффект являются, по сути, разными дефектами в лампе. Шум в виде шипения или треска может быть вызван: дробовым шумом**, явлением фликер-эффекта***, и тепловым движением электронов в пространственном заряде (шумы Джонсона)****. Микрофонный шум вызван движением электродов относительно друг друга и проявляется при избыточных вибрациях или ударах по лампе. Рокот (не фон!) также есть разновидность шума, но в хорошо спроектированных и собранных лампах он может проявиться лишь при появлении утечки катод-накал. Большинство современных ламп с высоким усилением запитываются,

как правило, постоянным током, исключая таким образом проблему рокота.

Наилучшим тестом для проверки лампы на шум можно считать ее работу в очень чувствительном усилителе, скажем в корректоре RIAA; остается только измерить шум на выходе. Щелчок по лампе или по шасси усилителя проявит наличие микрофонного эффекта. Альтернативой может служить специальный тест в усилителе с высоким усилением, где лампа включена с общей сеткой. Вообще-то померять шумы лампы и ее «микрофон» — задача не из легких, так что лучшим способом можно считать, когда переберешь массу ламп и выберешь самую «молчаливую». Однако, порой вам надо отобрать самые шумящие лампы (явно шумящих выше среднего). Это явится показателем того, что у иного производителя есть проблемы с качеством, и таких ламп надо держаться подальше*5.

Следует заметить, что и шум, и микрофонный эффект при том методе, который был описан выше, проявляются на низкой частоте (в аудио и видео диапазоне). Значение шумового напряжения на радиочастотах определено главным образом крутизной. «Микрофон» в радиодиапазоне практически не ощутим. Вот почему большинство высокочастотных ламп грешат жутким микрофонным эффектом. Исключением может оказаться генератор в FM тюнере. Здесь шумы и «микрофон» могут вызвать модуляционный шум, который наложится на FM сигнал.

Загазованность (эмиссия сетки)

Присутствие газа во внутреннем объеме баллона может быть довольно точно определено путем измерения сеточной эмиссии. Управляющая сетка способна излучать электроны, когда хоть сколько-нибудь молекул или атомов газа находятся внут-

** Из-за неравномерности во времени выхода электронов с поверхности катода, количество таких электронов в каждый момент времени различно, и тогда ток эмиссии не является строго постоянной величиной.

*** Благодаря неравномерному изменению эмиссионной способности отдельных участков катода. Активный слой катода все время пребывает в нестабильном состоянии. Площадки с максимальной эмиссией как бы мигрируют по поверхности.

**** Этот шум оценивается величиной эквивалентного по шуму сопротивления. Такой способ основан на том, что всякое сопротивление, по которому проходит ток, «шумит», так как в нем создаются флуктуационные токи за счет собственных тепловых скоростей электронов. — Прим. ред.

*5 Именно такой горький опыт был получен при работе с японскими 12AX7 фирм NEC, Hitachi, Matsushita. Однако Toshiba оказались вполне приличными. См. № 4 «Вестника». — Прим. ред.

ри лампы или материал катода осел на сетке и она стоит под высокой температурой. Частым эффектом такого нежелательного поведения сетки окажется смещение рабочей точки в сторону более высоких анодных токов. Это может стать проблемой для мощных ламп или в схемах с большими сеточными резисторами. Если в усилителе мощности с фиксированным смещением есть возможность сеточной эмиссии в выходном каскаде, то увеличенный анодный ток вызовет увеличение сеточного, тот в свою очередь еще сдвинет рабочую точку в сторону большего анодного тока и так далее. Налицо эффект саморазогрева лампы вплоть до выгорания одного их элементов. Но когда саморазогрев остановится, лампа уже мертва. Усилители с автосмещением и со схемой слежения по постоянному току (DC servo) менее чувствительны к загазованности лампы, так как изменение сеточного смещения ком-

пенсировано изменением тока в цепи автосмещения и соответственно напряжением катода относительно сетки*⁶.

Сеточный ток обычно замеряется при нормированном (справочном) токе анода путем измерения падения напряжения на сеточном резисторе утечки. Большинство ламповых измерителей способны измерять токи сетки. Очень часто сеточная эмиссия никак не проявляет себя, пока лампа работает как обычно. Поэтому нужно довести лампу до предельного анодного тока, прогреть ее как следует на этой мощности, а уж затем измерять сеточный ток.

Короткие замыкания и утечки

Непрогнозируемые, случайные замыкания вызваны отрывом или прогибом элементов лампы. Утечка может образоваться из-за оседания атомов металла на стекле или слюде,

расположенных между электродами. Наконец, эта утечка может произойти вследствие загрязнений между ножками лампы на цоколе. Многие ламповые тестеры имеют контроль короткого замыкания. Частенько «коротыши» блокируют проведение остальных измерений. Утечки становятся проблемой в очень чувствительных схемах, так что лучше для выяснения таких случаев тестировать лампы по месту, когда измеритель не способен ничего определить.

Выводы

В наше время, когда число производителей ламп неуклонно падает, а число пользователей ламп неуклонно растет, очень не вредно уметь выбирать лампы. Это не только помогает выделить лучшую из лучших, но среди огромного вала еще оставшихся работавших или N. O. S. ламп отобрать нужные для замены или для производства новой ламповой техники.

*⁶ Положим, в схеме с автосмещением напряжение катода было +30 V. Из-за протекания тока в цепи сетки, напряжение на ней стало +5 V, вместо 0 V, как должно быть вначале. Это даст напряжение смещения $30\text{ V} - 5\text{ V} = 25\text{ V}$ и соответствующее повышение тока (лампа открывается с уменьшением разности напряжений между катодом и сеткой!). Протекая по цепи автосмещения этот ток создаст большее падение напряжения, скажем + 35 V (относительно земли). Тогда $35\text{ V} - 5\text{ V} = 30\text{ V}$, что и было вначале. — *Прим. ред.*

ПОДБОР ЛАМП

VTV №2/Fall 95

John Atwood

Эта статья является логическим продолжением статьи, посвященной отбору ламп (Screening Vacuum Tube) в первом выпуске VTV. Основной материал, опубликованный здесь, был впервые представлен на встрече Bay Area Tube Enthusiasts* 24 июня 1995 г. в Сан-Франциско, Калифорния.

Еще недавно любой прайслист, предлагающий лампы, подобранные в пары, пользовался большим спросом. Что же такое эти подобранные лампы и когда они необходимы? Эта статья показывает необходимость подобранных ламп и технологии, используемые при их отборе.

Характеристики подобранных ламп

Лампы могут отбираться разными способами. Основные параметры, по которым производится отбор:

1. Ток покоя

Любой ламповый усилитель в режиме -А или -АВ, имеющий сигнальные, драйверные и выходные лампы, имеет определенные токи покоя, которые определены анодным напряжением, напряжением смещения и характеристиками самих лампы. Позже мы увидим на конкретных примерах возможность идентичности тока покоя, любой пары ламп, находящихся в одинаковых условиях.

2. Крутизна характеристики

Крутизна определена как gm = изменение анодного тока / изменение напряжения сетки в данной рабочей точке и является основным критерием усиления в тетрадах и пентодах**. Крутизна обычно изменяется при разных анодных токах и анодных напряжениях, поэтому заявленная в паспорте крутизна

характеристики верна лишь в том случае, когда рабочая точка для данной крутизны также дана. Крутизна падает при старении лампы. Правильно подобранные лампы будут иметь одинаковую крутизну, но лампы с одним значением крутизны не обязательно окажутся одинаковы по другим параметрам, так что крутизна сама по себе не является полным показателем хорошего подбора.

3. Усиление

Определено как μ = изменение напряжения на аноде / изменение напряжения сетки в данной рабочей точке. Она является основным показателем коэффициента усиления в триодах. Усиление в основном не меняется в различных режимах и с возрастом лампы, кроме случая, когда лампа выходит из строя или теряет эмиссию. Усиление само по себе не является показателем хорошего подбора.

4. Выходная мощность

В усилителях мощности можно обнаружить, что с одних ламп можно выжать большую максимальную мощность, чем с других (подобных). Как правило, это вызвано различными характеристиками, когда рабочая точка отдельной лампы сдвигается в область максимальной мощности. Иногда выходная мощность может быть ограничена недостаточностью эмиссии катода.

5. Разброс от партии к партии при производстве

Даже если две лампы абсолютно подобраны, но при этом они из разных партий или имеют разный ресурс до подбора, они могут со временем «развалиться» по характеристикам. Это особенно важно для слабосигнального усиления и в усилителях постоянного тока, где критичен дрейф постоянного напряжения. Чем больше различий

в параметрах подбираемой пары, тем меньше шансов, что в дальнейшем она этой парой и останется.

6. Внешний вид

Хотя этот момент более психологический, нежели практический, покупатель, найдя внешние различия при взгляде на пару подобранных ламп, может решить, что это вовсе не пара и качество звука из-за этого может пострадать.

Необходимость подбора ламп

Не все схемы требуют подобранных ламп, но есть и такие, которые требуют только конкретно подобранные параметры.

Слабосигнальные усилители и усилители постоянного тока

Подобранные лампы или одинаковые половинки ламп (в двойных триодах) обычно используются в усилителях постоянного тока с тем, чтобы свести до минимума разность параметров, связанных со старением и непостоянством тока накала. В звуковых и измерительных схемах для компенсации помех входных сигналов используются дифференциальные усилители. В этих схемах помехоустойчивость максимально зависит от подбора.

Элементы управления балансом по постоянному току помогают минимализировать разброс ламп не только в момент включения подобранной пары, но и при старении ламп. Для дифференциальных усилителей типовой подбор ламп необходим почти по всем параметрам: анодному току, μ , крутизне и партии производства.

Дифференциальные усилители также используются как фа-

* Ближе всего по смыслу окажется такой перевод: «Тусовка языческих огнепоклонников».

** Во всем подлунном мире, кроме американцев, крутизна обозначается как S.

зоинверторы, но здесь всегда имеется присущий данному типу схемы некоторый разбаланс, который делает тщательный подбор менее необходимым, чем в полностью балансном дифференциальном усилителе. В звуковых усилителях балансные схемы, требующие подбора ламп, как правило, не используются. Однако, исключением являются полностью балансные схемы, что применяются в современных усилителях с балансным входом, таких как Acrosound UL-2 и усилители Audio Research.

Параллельное включение ламп

Лампы включают параллельно для достижения более высокой выходной мощности или для получения более низкого выходного сопротивления. Передаточная характеристика (зависимость анодного тока от отрицательного смещения на сетке) является суммой характеристик каждой лампы.

Если подбора по μ и/или крутизне не было вовсе, передаточная кривая имеет изломы, подобно тому, как показано на рис. 1. Тем не менее при параллельном

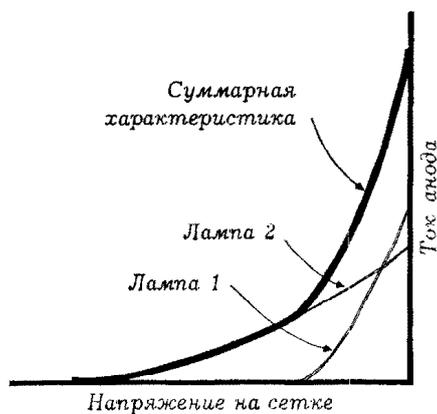


Рис. 1

включении большого количества ламп незначительные несовпадения уравниваются. Одинаковость по анодному току здесь не так критична.

Двухтактные выходные каскады

Существуют две причины необходимости подбора ламп в PP выходных каскадах: для уменьшения несбалансированного постоянного тока через выходной трансформатор и для компенсации четных гармоник. Разбаланс токов по плечам может вызвать насыщение стали, что в резуль-

тате приведет к снижению индуктивности (ухудшение воспроизведения низкочастотного диапазона) и росту искажений. Насыщения возможно избежать, сделав воздушный зазор в сердечнике, как это делается в SE выходных трансформаторах, однако ценой снижения индуктивности. В свою очередь снижение индуктивности должно быть компенсировано увеличением количества витков, что усугубит высокочастотные проблемы. Вот поэтому большинство производителей трансформаторов предпочитают доводить воздушный зазор до минимума, тем самым выдвигая требование, чтобы схема работала с минимальным разбалансом по постоянному току. Это особенно касается тороидальных трансформаторов, которые вообще не имеют воздушного зазора. Кроме снятия проблемы с насыщением сердечника, точная балансировка пушпульной схемы позволяет исключить любые четные (2, 4, 6 и т. д.) гармоники, появившиеся в ее усилительных элементах (но это не касается подавления четных гармоник, присутствующих во входном сигнале!). Отсутствие разбаланса по плечам особенно важно для усилителей в режиме АВ и В, где лампы выключаются на часть периода. Поэтому в тщательно сбалансированной PP схеме суммарные искажения будут снижены путем подавления четных гармоник. Однако считается, что четные гармоники придают «благозвучие», а нечетные, особенно высокого порядка, дают резкий тяжелый звук. Таким образом, пытаюсь абсолютно сбалансировать лампы в PP каскаде, можно тем самым уменьшить суммарные искажения, но при этом оставить «звуковое клеймо» нечетных гармонических искажений. Балансировка токов покоя для исключения подмагничивания выходного трансформатора важна для сигналов малой амплитуды, ведь усилитель работает с ними большую часть времени.

Подбор на больших уровнях сигнала также необходим для предотвращения эффекта «выпрямления», когда лампы несбалансированы. Такой эффект создает условие для протекания несбалансированного тока, пропорционального уровню сигнала.

Степень требуемого подбора выходных ламп в PP схемах зависит от цепей смещения и схемы драйвера. Если применяется нерегулируемое фиксированное смещение (как в большинстве дешевых усилителей или в некоторых ресиверах, подобных Fisher 500) или единая регулировка смещения на оба плеча одного канала (как Dynaco ST70, Mark III, Mark IV), то необходим полный отбор ламп по анодному току. Любой разбаланс по плечам ведет к потерям в выходном трансформаторе. Если же имеется регулировка смещения отдельно для каждой лампы или регулировка баланса смещения (иногда называемая DC-коромысло), то одинаковость самих ламп по анодным токам менее важна и достаточно лишь сходства характеристик. Когда обеспечен баланс по переменному току (чего можно добиться регулировкой амплитуд по каждому плечу драйвера PP усилителя), то требование абсолютной одинаковости выходных ламп на предельных токах еще менее критично. К сожалению, очень трудно произвести настройку баланса по переменному току без использования измерителя нелинейных искажений.

Технологии подбора

Несколько лет назад, когда мы с Tim'ом Eding'ом обзавелись большим количеством EL34 и 6BQ5 и искали лучший способ подбора их в пары, нами были разработаны следующие технологии подбора:

Прогрев

Собственные параметры многих ламп изменяются после первых часов работы. В прошлом лампы для чувствительных усилителей постоянного тока перед установкой стояли на прогреве 48 часов. Tim Eding обнаружил, что в мощных лампах (китайских EL34 и югославских 6BQ5) значение анодного тока в основном стабилизируется за несколько часов прогрева при нормальном отборе тока. Мы решили, что 12 часов тренировки — это хороший компромисс между стабильностью и достоверностью данных в наших тестовых экзерсисах. Это происходило не со всеми лампами, поэтому лампы, подобранные сходу, без длитель-

ного прогрева, пришлось подбирать заново после небольшого использования.

Измерители характеристик ламп

Для большинства пользователей единственным прибором, который дает представление о параметрах лампы, является лампомер, поэтому проще подбирать лампы на нем. На рис. 2 показано, как два триода с одинаковым μ , но разными анодными характеристиками имеют заметно разные анодные токи. Рис. 3 похо-

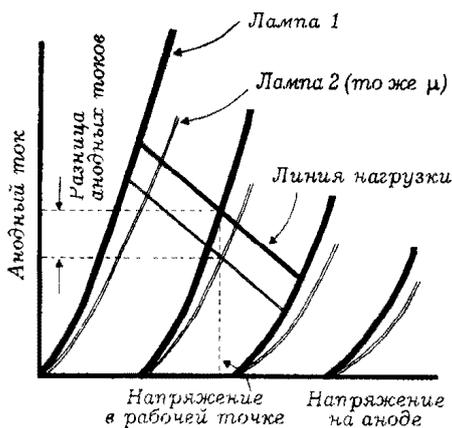


Рис. 2

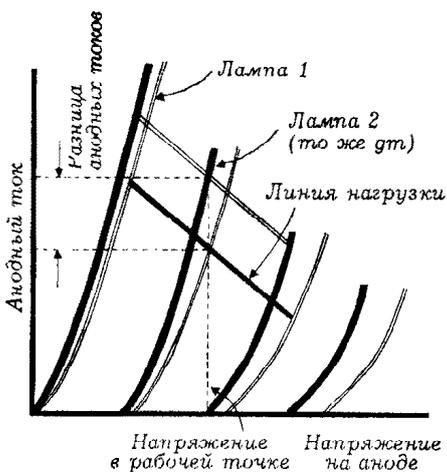


Рис. 3

жим образом показывает два разных триода с одинаковой крутизной, но разными анодными токами. Поскольку большинство лампомеров измеряют крутизну без контроля анодного тока, совершенно ясно, что такие приборы для подбора ламп непригодны, либо требуется контроль токов.

Измерения постоянного тока в статическом режиме

Лучший способ подобрать лампы в пару по анодному току — это установить их в тестовый

прибор, который задаст им условия, идентичные усилителю, выставит смещение для требуемого тока и отметит его. Одинаковость на максимальных режимах проверяется на больших напряжениях и токах для уверенности, что подобранные лампы имеют одинаковые характеристики в разных рабочих точках. Будьте осторожны, не превышайте мощность рассеяния анодом или экранной сеткой слишком долго, пока проводите эти испытания!

Динамические измерения в каскаде

Одним из методов подбора парных ламп является проверка их в живом РР усилителе. Баланс по постоянному току может быть проведен на частоте насыщения сердечника. Это делается путем подачи на вход синусоидального сигнала, дающего полную мощность на эквивалент нагрузки, и понижения частоты до тех пор, пока сигнал не станет отчетливо искажаться на экране осциллографа. Для хороших трансформаторов это частота сигнала от 40 Гц и ниже. Критерием подбора ламп в динамическом режиме является наличие минимальной второй гармоники. Отбор ламп в каскаде так, как описано выше, дает хорошие результаты только в том случае, если подобранные в пару лампы отбирались на усилителе, где они будут использованы в дальнейшем. Тем не менее из-за возможных разбалансов в тестовом усилителе специальные приборы все равно требуются, так как лампы могут не подойти для использования в другом усилителе. Довольно трудно таким способом подобрать более чем одну пару ламп.

Характериограф

Самым быстрым способом подбора ламп в пару, согласно их рабочим характеристикам во всем диапазоне, является использование лампового характериографа наподобие Tektronix 570. Кривые характеристик двух ламп могут быть ясно сравнимы на экране электроннолучевой трубки. Если кривые совпадают, то лампы можно считать парными. Численные значения токов и напряжений с экрана получить несколько сложнее, поэтому хо-

рошим способом подбора является использование характериографа с предварительным измерением по постоянному току в статическом режиме, методом, описанным выше. Затем пары с одинаковым значением смещения могут быть измерены на характериографе. Как правило, они будут совпадать в этой точке. Если нет, выберите другую пару с похожей величиной смещения. Очевидно, таким способом можно сделать подбор если не всех, то большинства ламп.

Рис. 4 и 5 показывают кривые характеристик двух разных по устройству КТ66 с одинаковым током в определенной рабочей точке (смотри по центру экрана), но с разными характеристиками на крайних точках. На рис. 4 представлены характеристики старейшей КТ66, сделанной в Англии (с серым графитовым покрытием внутренней стороны баллона), на рис. 5 — характеристики 7581/КТ66 General Electric более позднего производства (примерно середины 70-х). На обоих экранах шаг развертки по сеточному напряжению был 5 вольт, по абсциссе — 50 вольт на клетку, по оси ординат — 20 мА на клетку. Хотя в центральной части экрана лампы выглядят очень похожими, при крайних значениях токов они заметно разнятся друг от друга.

Некоторые тонкости при работе с характериографом

При подборе пар либо одновременно включайте накалы обеих ламп, либо дайте лампам прогреться несколько минут, чтобы температура катодов стабилизировалась.

В том случае, когда лампы будут использоваться только в триодном включении (для тетродов и пентодов), будет разумно проверить их на характериографе именно в триодном включении. Если в обычном или ультралинейном — установите напряжение питания для второй сетки несколько ниже предельного анодного.

Если кривые имеют непривычно изломанный вид или изображение на экране слегка размыто, возможно лампа влетела в паразитную генерацию. Попробуйте подвигать соединительные провода относительно друг друга и убедитесь, чтобы анти-

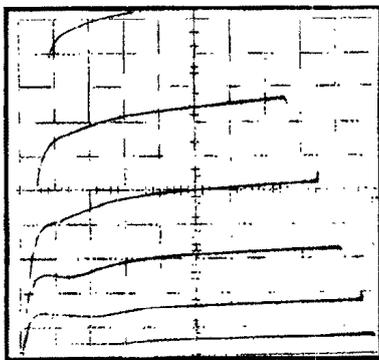


Рис. 1. Старая британская KT66

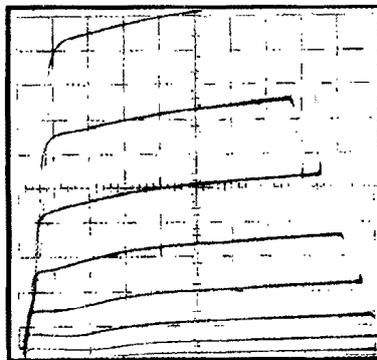


Рис. 2. GE 7581A/KT66

паразитные резисторы в сетках (управляющей и экранной) были припаяны непосредственно к лепесткам панелек с минимальной длиной выводов. Если эти манипуляции не дадут нужного результата, попробуйте подключить конденсатор малой емкости (0,001 мкФ) с анода и/или второй сетки на катод, естественно, непосредственно на выводах панели.

Что такое «подобранные пары» в продаже

Эта статья не вызвана желанием дать оценку лампам, продаваемым как подобранные пары, но призвана заострить внимание на тех моментах, которые необходимо знать при их покупке. Опыт приобретения парных ламп у дилеров ранее уже обсуждался на встречах «огнепоклонников» в Сан-Франциско. Обычно на вопрос о применяемых технологиях подбора продавцы либо не знали, как это делалось, либо молчали чепуху,

говоря, что это их частные (секретные) методики. Некоторые покупатели отмечали, что купленные ими лампы оказались абсолютной парой, другие наоборот, что характеристики заметно разошлись при проверке ламп на характеристикографе. Вот несколько вопросов, которые уместно задать дилеру при покупке парных ламп:

1. Подвергались ли лампы термотренировке? Как долго? Происходило ли это с токоотбором, либо грелись только нити накалов? (Прогрев только накалов, без токоотбора, ничего не даст для стабилизации ламп.)

2. При каких анодных и сеточных напряжениях проводился отбор? (В идеальном случае они должны быть близки к условиям работы в вашем усилителе.)

3. Происходил ли подбор по одному-единственному значению, либо в нескольких точках? (Компьютеризованные тестеры или аналоговые характеристикографы обычно проводят измерения в широком диапазоне характеристик.)

4. Насколько точен подбор? (5% или точнее.) По каким параметрам велся отбор? (Смещение на сетке для получения данного анодного тока — наиболее приемлемый ответ. Не решайтесь на покупку, если отбор велся только по крутизне.)

Часто методики подбора пар держат в секрете под видом ноу-хау, однако нет нужды скрывать их и покупатель, отдавая деньги, должен знать, за что он их отдает.

Подведем итог

Подбор ламп по парам не является магией, но так ли уж нужны пары в любом случае? Однако, если придерживаться следующих советов, вы наверняка добьетесь лучших результатов за те деньги, которые потратили:

Лампы для усиления слабых сигналов редко требуют подбора; исключением являются усилители постоянного тока (что в настоящее время мало актуально) и полностью балансные схемы.

Строго подобранные пары нужны только в усилителях, где отсутствует балансировка плеч по анодному току (как ни смешно, это касается как раз дешевых усилителей).

Убедитесь, что подбор ламп производился после тренировки, а критерием их подобия является равенство анодных токов при едином напряжении смещения на управляющей сетке. Не приобретайте ламп, парность которых гарантирована только ламповым измерителем.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ЗВУЧАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ

А. Дмитриев, г. Омск, ф. «Каденция»

В настоящее время на рынке радиоэлементов предлагается большое количество разных типов конденсаторов, как отечественных, так и зарубежных, применяемых в качестве разделительных в ламповых усилителях [1-3]. С целью определения, какие типы конденсаторов предпочтительны к использованию в любительских конструкциях, были проведены электрические измерения характеристик конденсаторов, понавших мне под руку, и субъективная оценка их влияния на звук. Наибольшее внимание уделялось отечественным изделиям, во-первых, потому что наша промышленность произво-

дила (с грустью, в прошедшем...) конкурентоспособные, а часто — и уникальные изделия, во-вторых, отечественные радиоэлементы более доступны любителям. Оговорюсь, что эта статья не претендует на полноту обзора всех имеющихся типов конденсаторов, а призвана лишь помочь любителям хорошего звука в применении того или иного типа. Рекомендую также ознакомиться со статьей [3].

Избавлю уважаемого читателя от теоретических выкладок, диаграмм и прочего, все это подробно изложено в [1, 3]. Буду подробно рассматривать лишь емкость конденсатора C_x и потери энергии переменного сиг-

нала, выражаемые тангенсом угла потерь D_x . Отмечу, что фактор D_x зависит от материала диэлектрика, и во многом — от конструкции конденсатора и технологии производства. Причем параметры C_x и D_x зависят как от частоты, так и от амплитуды приложенного к конденсатору сигнала. Эти параметры измерялись цифровым измерителем иммитанса E7-14, позволяющего производить измерения на частотах 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц при величине переменного сигнала 2 В rms (для частоты 10 кГц проводились измерения также сигналом с уровнем 40 мВ) [4]. Результаты измерений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование	100 Гц		1 кГц		10 кГц		
	C_x	$D_x \cdot 10^{-3}$	C_x	$D_x \cdot 10^{-3}$	C_x	$D_x \cdot 10^{-3}$	$D_x \cdot 10^{-3} U_{40mV}$
СГМ-3 1100 пФ 500в	1062	1,0	1060	0,5	1060	0,1	0,1
К 40У-9 10000 пФ 630в	9806	2,9	9755	4,0	9693	6,9	6,8
К 40У-9 0,33 мкФ 630в	0,315	2,4	0,314	3,8	0,312	7,0	5,6
Audio Note Audio Signal Capacitor Paper In Oil Type 0,47 мкФ 630в	0,469	2,5	0,466	4,1	0,464	7,9	6,6
К71-4 0,47 мкФ 250в	0,459	0,6	0,459	0,1	0,459	0,4	0,9
К71-4 1,8 мкФ 160в	1,878	0,2	0,879	0,1	1,880	0,6	0,7
К71-7 0,201 мкФ ± 0,5% 250в	0,2016	0,4	0,2016	0,1	0,2016	0,2	1,3
К72п-6 0,2 мкФ 500в	0,2005	0,4	0,2004	0,1	0,2005	0,2	1,3
К72п-6 0,047 мкФ 500в	0,0467	0,2	0,0467	0,1	0,0467	0,0	0,7
ФТ-3 0,22 мкФ 200в	0,223	0,4	0,223	0,1	0,223	0,9	0,5
MultiCap RTX 0,22 мкФ 600в	0,206	0,4	0,206	0,1	0,206	0,1	1,3
К73-17 0,47 мкФ 630в	0,488	1,1	0,486	5,0	0,481	11,4	10,0
К75-10 10,0 мкФ 250в 50 Гц	9,772	2,1	9,737	4,0	9,813	18,0	17,1
ОС К76-3а 5,6 мкФ 250в	5,724	5,3	5,67	9,1	5,594	15,3	14
ОС К77-1 12000 пФ 400в	12227	0,5	12209	0,8	12194	1,4	1,2
ОС К77-1 0,1 мкФ 100в	0,0998	0,2	0,0997	1,0	0,0995	1,6	0,4
ОС К77-1 10 мкФ 63в	9,993	0,4	9,988	1,0	10,08	10,8	10,0
К78-2 0,2 мкФ 315в	0,198	0,3	0,198	0,2	0,198	0,1	1,4
К78-2 0,2 мкФ 1000в	0,211	0,3	0,211	0,1	0,211	0,1	1,4
WIMA МКР10 0,47 мкФ 630в	0,479	0,5	0,479	0,2	0,479	0,1	1,0
Solen МКР-РС 4,0 мкФ 450в	4,079	0,1	4,080	0,1	4,087	0,5	0,5
MultiCap PPFХ-S 0,22 мкФ 600в	0,221	0,3	0,221	0,2	0,221	0,1	1,3
КБГ-МН 4 мкФ 1000в	3,69	3,1	3,68	5,4	3,69	31	28
SHOEI 100 мкФ 16а	98,7	63	93,1	368	78,7	2878	2990
К50-35 200 мкФ 25в	203,4	154	175,4	914	85,3	3423	3500
Matsushita 180 мкФ 400в	163	33	159	210	145	1729	1820
К52-2 80 мкФ 6в	76,9	107	41	738	6,9	1600	1600
К53-28 68 мкФ 16в	67,8	6,8	67,4	23,7	65,7	169	172

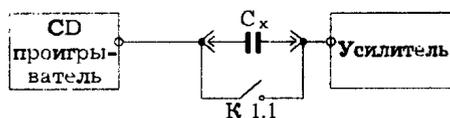


Рис. 1

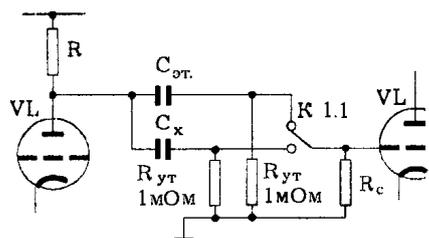


Рис. 2

Субъективная оценка влияния конденсаторов на звук проводилась в два этапа. Первоначально использовался метод исключения, когда оцениваемый конденсатор C_x (рис. 1), включенный на входе усилителя, шунтировался контактами реле. После этого использовался метод замещения или попарного сравнения:

1. в самодельном двухтактном усилителе на EL34 конденсаторы подключались между драйверным и выходным каскадами;

2. в однотактном усилителе на 300B по схеме H. Reichert'a между тремя каскадами.

Схема установки показана на рис. 2, в качестве эталонного конденсатора $C_{от}$ использовались конденсаторы MIT Multi Cap RTX.

Прослушивание проводилось на комплекте аппаратуры стоимостью около 4000 USD следующим образом. Трое моих друзей, далеких от технических подробностей, но любящих и ценящих музыку (отдельное им спасибо за то время, что они потратили!), отдельно записывали свои впечатления от звучания, причем в момент прослушивания они не знали, подключен ли Multi Cap за 16 USD, или K78-2 за 3 одеревеневших RusRubl. Обобщенные результаты субъективных экспертиз я привожу в табл. 2.

Что же можно сказать по результатам измерений и прослушивания? С моей точки зрения, наибольший интерес в качестве разделительных представляють бумагомасленные фольговые K40y-9 и фторопластовые ФТ, K72п-6 конденсаторы, которые ни в чем не уступают своим именитым аналогам. Примечательно,

Тип конденсатора	Субъективная оценка влияния на звук	Возможная область применения
СГМ	В качестве шунтирующего для разделительных конденсаторов улучшает передачу «воздуха», может излишне подчеркивать высокочастотные составляющие	Корректоры RIAA Шунтирование конденсаторов других типов
K40y-9, Audio Note	Красивый мягкий музыкальный звук, но может проявляться завуалированность общей картины (мутноватость)	Разделительные конденсаторы
K71	Легкое ограничение баса, слегка окрашенный ВЧ диапазон	K71-7, ПОВ — корректоры RIAA K71-4 — разделительные, фильтры акустических систем
K75, K76	Окрашивание звучания, потеря микродинамики	Блоки питания
K72п-6, MultiCap	Нейтральный звук, прекрасная передача микродинамики	Разделительные Шунтирование конденсаторов
ФТЗ	По передаче нюансов звучания и расположения инструментов в пространстве — наилучший	Разделительные Шунтирование конденсаторов
K77	Легкое упрощение звуковой картины, сглаживание шероховатости звучания	Шунтирование катодных резисторов Фильтры акустических систем
K78, WIMA MKP	Смазывание баса, пропадают послезвучия инструментов, сильное упрощение звуковой картинки	Шунтирование блоков питания
Solen	Потеря микродинамики звучания инструментов	Блоки питания Фильтры акустических систем
MultiCap PPFX-S	Лучший среди полипропиленовых, но по передаче «воздуха» уступает RTX	Разделительный Шунтирование конденсаторов

что у конденсаторов K40y-9 и ФТЗ тангенс угла потерь снижается с уменьшением уровня сигнала и достигает у ФТЗ $D_x = 0,0005$, что, по-видимому, благоприятно сказывается на звуке. Конденсаторы MIT Multi Cap оправдали свою популярность, а вот изделия французской фирмы Solen я бы не рекомендовал использовать в слабосигнальных цепях, тогда как их применение в сильноточных цепях — в разделительных фильтрах акустических систем и в блоках питания дает прекрасные результаты. Заслуживают внимания и поликарбонатные конденсаторы K77, имеющие достаточно большую емкость при небольших габаритах, а также и полистирольные K71. Комбинированные K75 и лакопленочные K76, несмотря на тенденцию снижения D_x при уменьшении амплитуды сигнала лучше использовать в блоках питания, тем более, что для этого они и разрабатывались. В конце табл. 1 приведены результаты измерения электролитических конденсаторов (начи-

ная с южнокорейских SHOEI), выводы делайте сами. Несмотря на хорошие показатели оксидно-полупроводниковых конденсаторов K53-28, их применение для шунтирования катодных резисторов приводит к появлению резкости, «механистичности» в звуке. Если есть возможность, применяйте в блоках питания усилителя конденсаторы КБГ-МН, K75-24 и т. п. (если только потом сможете такой усилитель поднять...)

Какие выводы я хочу сделать? Итак:

1. Измерение параметров не дает полной информации, будет «звучать» данный конденсатор или нет, хотя стабильность характеристик в широком диапазоне и снижение потерь при уменьшении сигнала является обнадеживающим фактором.

2. Чем сильнее сигнал, тем большее влияние на него может оказать диэлектрик разделительного конденсатора. Влияние конденсаторов в фильтрах акустических систем и на выходе драйверных каскадов менее ощу-

тимо, чем во входных. В последних это влияние особенно заметно при больших значениях сеточного сопротивления утечки, что оправдывает применение схем с гальванической связью, то есть без разделительного конденсатора.

3. Верно, конденсаторы оказывают влияние на звук, но не стоит это влияние переоценивать, так как оно несоизмеримо слабее, чем влияние выходных и прочих трансформаторов, схемотехники (в частности, выбор режимов ламп, тип ламп и экземпляров ламп). Как показывает опыт, изменение режима работы лампы входного каскада кардинально меняет звук всего усилителя, тогда как замена разделительных конденсаторов в посредственном усилителе не изменит практически ничего, пусть даже и стоимость такого «чуда» возрастет вдвое.

4. Ламповый усилитель, при внешней простоте схемы, является устройством, где все узлы, элементы, конструкция комплексно взаимодействуют как между собою, так и с внешними устройствами: источником сигнала, акустическими системами

(а через них и с помещением прослушивания), электрической сетью. Причем чувствительность к типу применяемых радиоэлементов разных узлов усилителя так же может изменяться с учетом изложенных факторов*. Поэтому определять, какой тип конденсаторов (резисторов, проводников) предпочтителен в данной конкретной конструкции, необходимо уже после того, как отработана схемотехника, конструкция усилителя. При этом не отменяются личные пристрастия разработчика и то, с какой другой аппаратурой и для прослушивания каких музыкальных жанров усилитель будет использоваться и, что немаловажно, какова планируемая себестоимость Вашего создания (или возможности Вашего кошелька).

5. Не без гордости отмечу, что отечественные конденсаторы (наряду с радиолампами, резисторами) обеспечивают прекрасное качество звука при их грамотном применении.

Хочу пожелать самодельщикам успехов в их таком прекрасном хобби! Побольше экспериментируйте, пробуйте различные радиоэлементы, лампы, схе-

мы (не отрицая огульно при этом классические), и это поможет вам по-настоящему почувствовать музыку!

Смею надеяться, что вышеизложенный материал окажется Вам полезен.

Список литературы:

1. Справочник по электрическим конденсаторам / Под ред. И. И. Четверткова, В. Ф. Смирнова. М., 1983.

2. The Parts Connection. (Каталог радиодеталей, 1997 г.)

3. Фрунджян Артур. Маленькие секреты конденсаторов / Класс А. — 1996. — спецвыпуск — с. 12–15.

4. E7-14. Измеритель иммитанса. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.

Аппаратура, используемая при прослушивании:

Проигрыватель CD Exposure CD Player, усилители MARANTZ PM16, Arion Nereus 300B (редкая недоделка, даром что от П. Квортрупа!), колонки переделанные Serwin Vega DX9, шнуры все TARA Labs Reference, диски Focal, Pope Music.

* Мне кажется, что принцип неопределенности уже перехлестывает через борт. Жизнь все-таки не сложнее, как нам порой кажется, но и не проще, как оказывается потом. Не без едкости, А. Б.

ГОЛОС МАШИНЫ: гармоника, стоящие за цифрой искажений

«Glass Audio» 4/97

Lynn Olson, Matt Kamna

Те мощные изыскания при разработке высококачественной аппаратуры свели на общую землю голую правду и красоту, левое и правое полушария и пытается помирить оппонентов.

Если вы не можете представить себе возможность мирного сосуществования между собой обоих или упрямо полагаете, что только один имеет право на жизнь, вы слепец.

До этого я 22 года занимался разработкой акустических систем и потратил массу времени на поиск соответствия слуховых восприятий с измерениями. При огромном числе всевозможных тестов, самое трудное решить, какое из измерений наиболее показательно.

Выбор параметров

Предмет раздора среди разработчиков акустики исходит из несогласия, какое измерение считать главным. Вероятно, ни один громкоговоритель не обладает всем набором данных, оттого что одни дизайнеры «завернуты» на одном параметре и не обращают внимания на другой. Вот почему громкоговорители всех ценовых категорий так по-разному звучат: разработчики под влиянием маркетингов, следуют сиюминутной моде. Сегодня — это высокая чувствительность, вчера — минимальная фильтрация, еще раньше — линейная фазовая характеристика, до этого — отсутствие окраски. В до хай-файные времена был спор между звучанием техники с западного побережья с техникой с восточного берега США. Вот и судите после этого.

В электронике все выглядело гораздо проще: нет забот о характеристике направленности, переходная характеристика превосходила реакцию любого динамика, частотный диапазон был

шире любого из акустических преобразователей — микрофона, головных телефонов или громкоговорителя. О чем заботиться? Меряй себе искажения и все тут.

К сожалению, не все так просто. В электронике корреляция между процентами искажений (THD — Total Harmonic Distortion — суммарный коэффициент искажений) и субъективной оценкой звучания практически равна нулю. В результате, какой-нибудь ресивер из дешевой стойки имеет гармоника куда меньшие, чем ламповый усилитель из лучших. Значит ли это что «все усилители звучат одинаково»? Определенно нет с качественной акустикой. А справедливо ли обратное утверждение, мол, измерения ничего не значат? Нет, ни первое, ни второе не подтверждаются; в мире масса усилителей с плохими параметрами, причем и звучат они ужасно. Стало быть есть смысл в измерениях.

Причина здесь не в субъективизме слушателя, он не виноват, а в самих измерениях. В этом нет никакой новости, вы можете измерять все что угодно, но масс-спектрометр не выявит особой разницы между ленчем из институтской столовки и классным завтраком из приличного ресторана. Было бы глупо полагать, что машина права, а ресторанные гурманы сами введены в заблуждение вроде «эффекта плацебо». Это наглое игнорирование субъективизма выглядит как попытка прикрыть неприличные фиговым листком науки.

И гурманы и искушенные слушатели как раз правы в своем субъективизме; такое положение дел должно побуждать серьезных разработчиков на поиски того, что лежит под поверхностью. Мы же можем заявить с полным правом лишь одно — простое измерение THD несет очень мало информации о качестве самого аппарата.

Анализ спектра

Когда Мэт Камна (Matt Kamna) предложил мне участвовать в измерениях ламповых драйверов с помощью его собственного анализатора спектра (Hewlett Packard 3585A), я ухватился за этот шанс. Мне было долгое время ужасно любопытно объяснить, отчего различные схемы звучат так, как они звучат. Ведь это влияет на мою работу как разработчика акустики; замена схемы в усилителе равносильна разбалансу в разделительном акустическом фильтре в 1-2 дБ, хотя при этом частотная характеристика всего усилителя не изменилась.

Работа с этой мощной машиной представляет интерес — разрешение на экране 100 дБ и полосу измерений 40 мГц. Мы с Мэтом пошли дальше и использовали дополнительно анализатор Tektronix AA501A, чтобы с его помощью удалить основной тон; подключив HP анализатор к выходу Tektronix, мы получили дополнительные 20 дБ разрешения динамического диапазона.

Для упрощения анализа мы использовали синус частотой 1 кГц, а на выходе добились 50 V RMS. Если бы тестовый сигнал был частотой выше, то гармоника высших порядков получились бы меньших значений из-за завала высоких самой схемой. К тому же я хотел, чтобы гармоника со второй по пятую попали в диапазон 1-5 кГц, область максимальной чувствительности уха к искажениям.

Выходное напряжение в 50 V RMS было выбрано произвольно, однако для 300B, 2A3/6B4G, EL34/КТ88 это значение будет вполне компромиссным. При сигнале в 50 V динамический диапазон измерительного тандема оказался равен 118 дБ, позволяя измерять искажения вплоть до 0,0002%. Сигнал поступал от генератора Tektronix SG505.

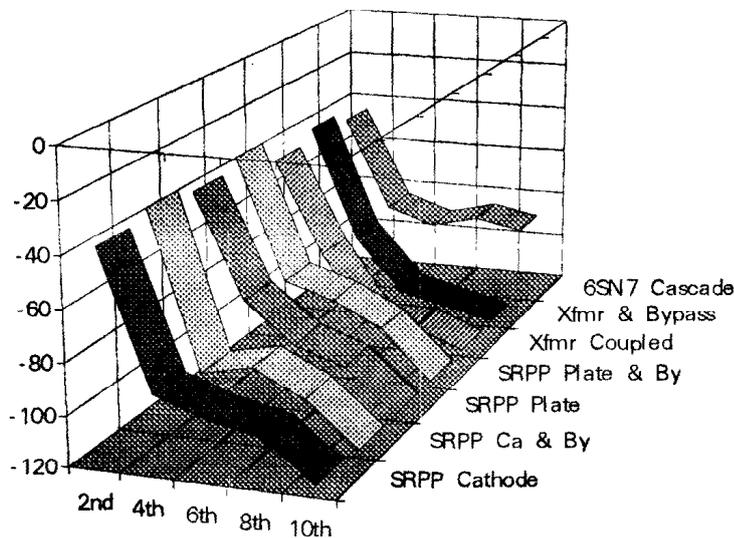


Рис. 1. Спектр четных гармоник 6SN7 при $U_{\text{вых}} = 50 \text{ V rms}$

6SN7 Harmonics	2nd	4th	6th	8th	10th	THD	Vp	Rk	mA
SRPP Cathode	-38	-91	-98	-103	-118	0,88	450	800	8
SRPP Ca & By	-34	-96	-92	-102	-120	1,6	450	800	8
SRPP Plate	-38	-80	-96	-103	-120	0,97	450	800	8
SRPP Plate & By	-34	-84	-90	-100	-120	1,88	450	800	8
Xfmr Coupled	-45	-84	-112	-112	-120	0,41	325	1400	7
Xfmr & Bypass	-40	-88	-110	-115	-120	0,76	325	1400	7
6SN7 Cascade	-45	-84	-91	-86	-90	1,23			

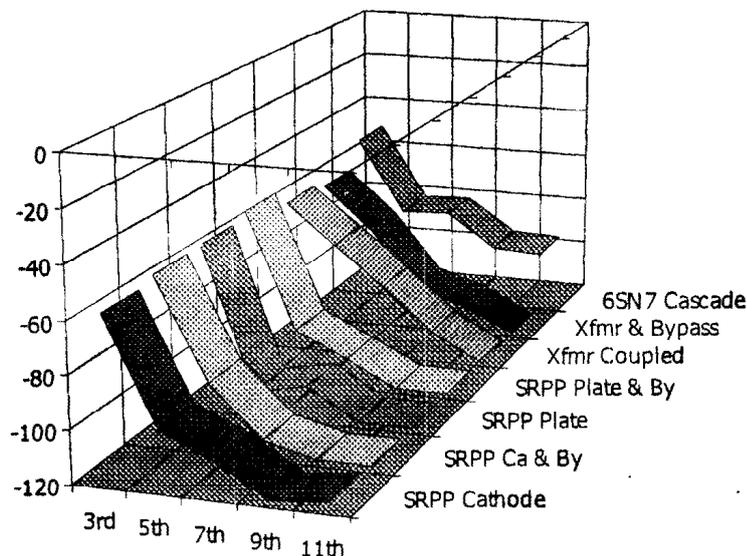
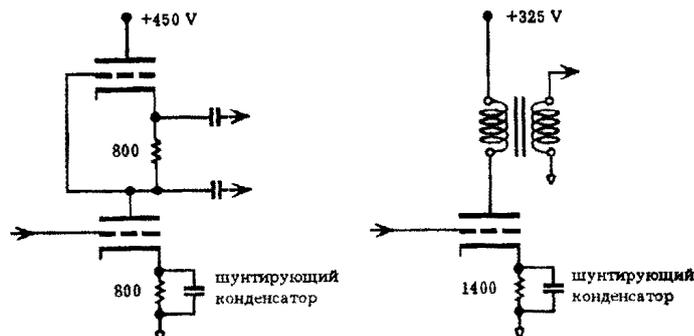


Рис. 2. Спектр нечетных гармоник 6SN7 при $U_{\text{вых}} = 50 \text{ V rms}$

6SN7 Harmonics	3rd	5th	7th	9th	11th	THD	Vp	Rk	mA
SRPP Cathode	-58	-99	-108	-120	-118	0,88	450	800	8
SRPP Ca & By	-56	-95	-115	-120	-120	1,6	450	800	8
SRPP Plate	-56	-112	-108	-120	-120	0,97	450	800	8
SRPP Plate & By	-53	-100	-110	-120	-120	1,88	450	800	8
Xfmr Coupled	-60	-76	-92	-109	-120	0,41	325	1400	7
Xfmr & Bypass	-63	-80	-104	-110	-120	0,76	325	1400	7
6SN7 Cascade	-52	-83	-82	-96	-97	1,23			



И наконец для тестов мы выбрали двойной триод 6SN7 во всех пяти схемах. Это одна из самых линейных драйверных ламп, ее искажения обычно в несколько раз меньше в сравнении с 12AU7 и 6DJ8. Чтобы добиться еще меньших искажений, вам пришлось бы применять экзотику вроде триода 76, 56 или прямонакальный монотриод 26 — настоящего старожилы звукотехники. Измерять искажения этих ламп я оставляю журналу MJ Stereotechnic.

Я полагаю, что не каждый располагает подобной измерительной установкой из Tek SG505, TekAA501A и HP3585A. Вы можете провести эти измерения, используя приличный тестовый CD и анализатор FFT с программой LAUD. Чтобы провести измерения точнее и расширить динамический диапазон, удобно использовать пассивный режекторный LC фильтр для удаления 1 кГц сигнала с выхода измеряемой схемы*. Желающие могут обратиться к статье в журнале TAA (The Audio Amateur) 2/96, стр. 42, 43.

Когда мы состыковали все приборы и запустили тест, то увидели на экране множество мелких деталей. Но, как обычно, «прочитать» сходу всю картину искажений с экрана оказалось очень непросто. Гармоники вплоть до 11-й у каждой схемы имели свой характер и при такой массе экранных картинок сделать какие-либо выводы о гармонической сигнатуре каждой схемы просто невозможно.

После некоторых раздумий мы с Мэтом решили сгруппировать все четные и нечетные гармоники отдельно. Ведь четные обязаны несимметричному механизму искажений, а нечетные — симметричному. После этого нам оставалось данные из таблиц перенести на график. Чтобы не вычерчивать все это от руки и не заниматься скучнейшей работой, я использовал Microsoft Excell (см. рис. 1 и рис. 2).

* Удаление основного тона окажется полезным и при простых замерах THD и при наблюдении суммарных продуктов искажений на экране осциллографа. Чтобы не быть голословным, рекомендую пару решений режекторной цепи. Смотри схемы и расчетные формулы в конце статьи. — Прим. ред. «Вестника».

Интерпретация полученных данных

После чартов в Excell скрытое поведение гармоник становится очевидным. На экране спектроанализатора мы видели малопонятный частокол из-за того, что скорость убывания четных и нечетных гармоник была разной у каждой схемы. Теперь это сложное переплетение стало объемным и развалилось на две гистограммы, одну с четными, другую с нечетными гармониками. Каждая из них по-разному влияет на появление интермодуляционных боковых полос.

Нечетные гармоники создают частокол из близкостоящих боковых полос, в то время как четные гармоники создают ряд из очень удаленных друг от друга боковых полос. Посмотрев на рис. 3 с измерительным сигналом в 14 и 15 кГц (по стандарту ССIF), картина становится более понятной. При этом тесте вторая гармоника (точнее, нелинейность второго порядка) производит интермодуляционные продукты с частотами 1 и 29 кГц (рис. 4), а третья гармоника, то есть нечетная, создает ИМ продукты с частотами 13 и 16 кГц (рис. 5).

Вернувшись к таблицам данных на рис. 1 и рис. 2, можно без труда заметить, что значение THD от 0,4 % до 1,88 % всякий раз получено благодаря доминирующей второй гармонике, и потому остерегайтесь цифр THD в паспортах на аппараты, где полностью игнорируется информация о заполнении спектра и характере спада уровней каждой гармоники. В этом случае при одинаковых цифрах THD полностью маскируется весьма разный характер «хвоста».

Глянув на величины составляющих спектра можно увидеть, как в одних схемах есть возможность неглубокой компенсации одних гармоник и никак не подавить (скомпенсировать) другие, в других схемах наблюдается спад гармонического «хвоста» прямо-таки по учебнику. Возможно такое поведение является причиной субъективного восприятия тонального баланса (или небаланса) различных схем, что никак не вычислить с помощью измерений частотного диапазона.

Субъективное восприятие может быть на самом деле создано перевесом составляющих на уровне шума (даже весьма малого) в той или иной области частотного диапазона или соотношением между собой гармонических составляющих, и вовсе не отклонением частотной характеристики от прямой линии. Последнее-то выдержать на определенном участке как раз труда не составляет, ведь каждый из нас слышал транзисторный усилитель с призвуком жести и ламповый с притупленным скучным звуком; хотя всякий раз их «частотка» была ровной, но ведь звучали-то они не ровно!

Вкл/Выкл шунтирующего конденсатора

При включении и выключении шунтирующего конденсатора в катод картина искажений на экране анализатора спектра меняется разительным образом. Хотя эта операция выглядит примитивной, однако она заметно меняет рабочие характеристики триода. Если он включен в схеме с фиксированным смещением или катод зашунтирован конденсатором, справочные данные на усиление, сопротивление r_p (внутреннее динамическое со-

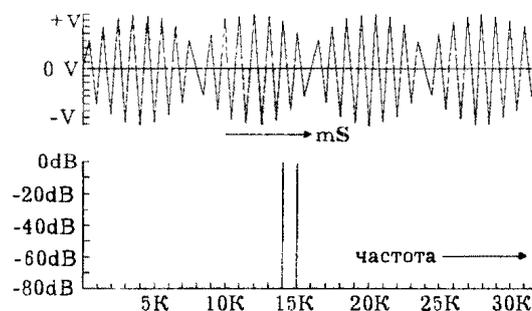


Рис. 3. Смесь 1:1 сигналов 14 кГц и 15 кГц, каждый без искажений. Вверху представлена картина на экране осциллоскопа в размерности V/mS. При том, что тестовые сигналы свободны от искажений, верхняя и нижняя огибающая уже заметно искажены, очевидно благодаря нелинейности осциллографа.

Внизу представлена картина на экране анализатора спектра в размерности dB/кГц. Здесь более понятно, что искажений во входном сигнале нет благодаря высокой избирательности анализатора и логарифмической шкале. Шкала с глубиной -80 ДБ соответствует 0,01 % искажений, тогда как на экране даже тренированный глаз способен заметить искажения не раньше 2 %, да и то на простой синусоиде. На сложных сигналах это еще сложнее увидеть. На экране осциллоскопа можно ясно увидеть жесткое клиппирование (отсечку, ограничение) или выброс на ступенчатом сигнале.

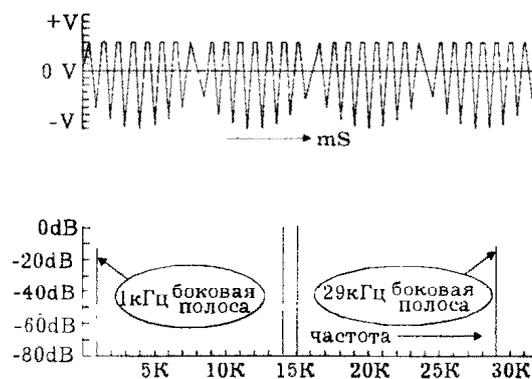


Рис. 4. Смесь 14 и 15 кГц при четных гармониках. Отметьте, как четные гармоники создают боковые полосы (комбинационные составляющие), удаленные от тестовых сигналов. Очевидно подобие с амплитудным детектированием (АМ), показывающим, как выделяется огибающая 1 кГц при несущей 15 кГц посредством диодного детектора.

Конечно, при сильном ограничении, показанном на верхней осциллограмме, образуется гораздо больше комбинационных тонов. Для простоты на спектре изображены только две боковых полосы.

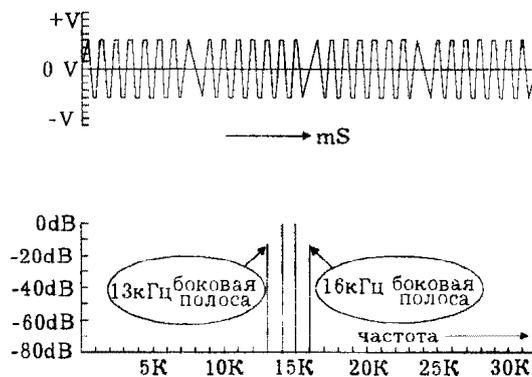


Рис. 5. Смесь 14 и 15 кГц при нечетных гармониках. Нечетные гармоники сгруппировались рядом с тестовыми сигналами. При жестком ограничении образуется гораздо больше составляющих. Огибающая подобна функции Бесселя (характеристика гребенчатого фильтра), а также спектру фазо-частотной модуляции (FM). Для простоты на спектре изображены только две боковых полосы, образованных нелинейностью третьего порядка.

противление) и крутизну усиления вполне пригодны для расчетов. Если конденсатор отключен, то r_p и s изменятся и весьма значительно.

Большинство думает, что резистор в катод, не шунтированный конденсатором, лишь создает локальную обратную связь, линеаризующую поведение схемы. Это правда, но не вся правда. В тот момент, когда усиление остается прежним, внутреннее сопротивление лампы возрастает, а крутизна ее падает**.

К примеру, лампа 6SN7 с катодным резистором 800 Ом изменяет свое внутреннее сопротивление r_p с 7,7 кОм до 23,7 кОм — более чем в три раза! Одновременно с этим крутизна падает также втрое. В результате линейность лампы здорово ухудшается; это подобно резкому падению эмиссии.

В схемах с межкаскадной RC связью последствия от такого вот отключения (или неподключения изначально) шунтирующего конденсатора весьма ощутимы и печальны. Чтобы работать с низкими искажениями, триоду требуется нагрузка в аноде не менее чем в 3-4 раза большая его внутреннего сопротивления r_p . Так как при RC связи между каскадами нагрузка лампы представляет собой параллельное соединение анодного резистора с сеточным сопротивлением утечки следующего каскада, то в этом случае и впрямь не мно-

го свободы в деле увеличения нагрузки в анодной цепи лампы (за исключением разве что питающего напряжения $V+$, что создаст проблемы во всем усилителе***).

Когда вы удаляете конденсатор, прежде удовлетворительное соотношение нагрузки в аноде к r_p становится гораздо менее приемлемым, так как теперь внутреннее сопротивление r_p оказалось втрое больше, что эквивалентно развороту линии нагрузки по часовой стрелке и характеризуется большей нелинейностью. Образовавшаяся локальная обратная связь по току старается как-то линеаризовать эту нелинейность, но что можно поделывать, когда линия нагрузки почти вертикальна и половинка синусоиды на закрытие заходит в очень нелинейную область при малых токах.

Влияние на искажения

Все это имеет катастрофическое влияние на весь спектр продуктов искажений. Теперь лампа приобретает присущие ей искажения, которые частично выправляются обратной связью. Это даже может привести к уменьшению второй гармоники, но не способно справиться с высшими гармониками, которые безудержно вырастут. Судя по табличным данным, это не так очевидно, но все-таки мы с Мэтом пытаемся обойтись без RC связи между каскадами за ис-

ключением обычной двухкаскадной схемы, где в самом деле уровень высших гармоник весьма ощутим. Хотя мы не занимались измерением их специально (двух каскадов, включенных друг за другом), но когда схема составлена из каскадов с нешунтированными катодами, то суммарные продукты нелинейности окажутся несомненно выше, чем намеряно на одном каскаде. Схемы без прямого включения резистора в анод, то есть различные SRPP, μ -повторители и с трансформаторной нагрузкой, даже внешне выглядят предпочтительней.

Плавное снижение уровня высших гармоник особенно заметно на схеме с трансформаторной нагрузкой. Возможно, воспринимаемая на слух «натуральность» и «прямота» трансформаторной связи как раз в этом и кроется, если посмотреть на характеристику спектра. Пожалуй, это самый «красивый» хвост гармоник, виденный мной, прямо точь-в-точь как в справочниках и книгах RCA, да и амплитуды составляющих меньше, чем у других схем. Нука, попробуйте найти схему на транзисторе, который бы давал 50 V RMS на выходе при 1% искажений без обратной связи!

Продолжение статьи и обещанные схемы в № 6 «Вестника».

** Это следует из общеизвестной формулы $\mu = r_p \cdot s$. Произведение сомножителей может оставаться постоянным, но сами множители могут изменяться в любой пропорции. Вывод того факта, что усиление не изменяется, следует из простого измерения $U_{вых}/U_{вх}$ — параметр усиления есть едва ли не единственный, измерить который напрямую, не составляет труда. — Прим. ред. «Вестника».

*** Положим, что питание каскада +300 V, а на аноде +150 V, при этом $R_A = 20$ кОм. Мы можем его безнаказанно увеличить вдвое и при этом не изменить $U_A = 150$ V, но тогда напряжение питания должно возрасти до $7,5$ mA \times 40 кОм + 150 V = 450 V. Где его взять, да еще отфильтрованное — в этом и будут заключаться проблемы. — Прим. ред. «Вестника».

КАК РАБОТАЮТ ЗВУКОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

GA № 1/92

Norman H. Crowhurst

Эта статья была, вероятно последней, написанной Норманом Кроузерстом, и мы печатаем ее в память о нем, несмотря на то, что он не возвращался к написанию второй части.

В следующем выпуске GA, мы перепечатаем его статью из АЕ, которая изначально появилась в апреле 1957 (с. 54) как своего рода продолжение.

См. некролог в GA 1/91, с. 35 для биографической информации. Ред. Glass Audio.

Говорят, знакомство порождает презрение. Я бы сказал, что презрение порождает знакомство! Я начал разрабатывать трансформаторы и другие элементы с «железным» сердечником более 60-ти лет назад. Так что вопросы, которые мне задают, помогают мне видеть в среднем человеке недостаток понимания относительно того, как они работают, тогда как мне это «очевидно»!

Первичная индуктивность, индуктивность рассеяния, емкость обмотки, как эти величины реагируют с импедансом ламп и другими элементами схем, например, громкоговорителями или микрофонами — остается глубокой тайной для большинства аудиофилов, в то время как мне это знакомо. Так что я начну сначала, как кто-то предложил Алисе в Стране чудес.

Теория трансформатора

Сначала схема, куда Вы подключаете ваш трансформатор: мы идеализируем как ее, так и его; затем мы рассмотрим недостатки обоих. Везде, где Вы поставите трансформатор, он работает от сопротивления источника на сопротивление нагрузки.

Начнем со входа: микрофон или любое другое устройство в качестве источника подключено к первичной обмотке трансформатора. Источник имеет сопротивление. Вторичная обмотка подключена к другому сопротивлению. Во времена ламп это было сетка, теперь это может быть что-нибудь другое, вроде перехода база-эмиттер у транзистора, или даже более высокий импеданс, чем сетка лампы — полевой транзистор (рис. 1).

Межкаскадные трансформаторы теперь не очень-то в моде — и верно, имеются лучшие способы — но там, где они используются, они должны работать аналогично: между двумя различными сопротивлениями (импедансами).

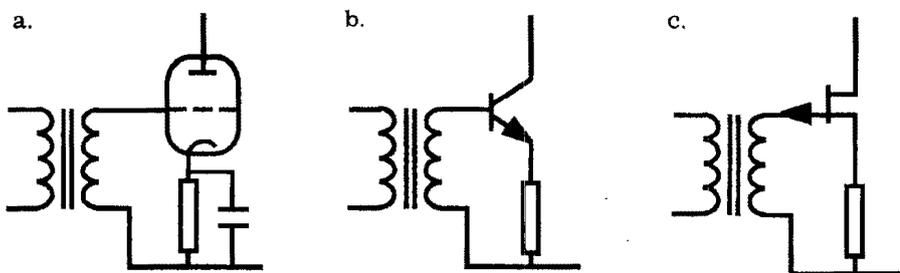


Рис. 1. Различные «нагрузки», к которым подключен входной трансформатор: а) сетка лампы, высокий импеданс, отсутствие активного сопротивления, небольшая емкость; б) эмиттерный переход транзистора, имеющий низкое, нелинейное сопротивление; в) полевой транзистор: даже более высокое сопротивление и более низкая емкость чем а)

Выходные трансформаторы работают от сопротивления источника, которым может быть триод, пентод, нечто среднее — подобно пентоду или тетроду, работающему в ультралинейном режиме или что-нибудь еще. Их разработка может быть усложнена такими вещами как класс АВ, но мы придем к этому позже. Все они подключены к сопротивлению, которое мы считаем активным, но более вероятно, что это одна или более звуковых катушек громкоговорителей, или почти все, что угодно, кроме активного сопротивления!

В теории трансформаторов понятие источника включает в себя понятие «генератора». Трансформатор видит это как источник «сигнала» (звукового), с которым должна работать вся остальная схема. Сложные теории предлагают выбор эквивалентов генератора: источник напряжения или тока. Каждый из них является подходящим в различных ситуациях. Но начнем с источника напряжения, он проще в понимании.

Отсутствие магнитодвижущей силы*

Рис. 2 показывает схему, использующую эквивалент генератора напряжения. Считается, что внешняя по отношению к трансформатору схема состоит из эквивалентных сопротивлений (позже мы это распишем полнее). Строчная «г» — это сопротивление источника, в то время как прописная «R» — нагрузка на выходе (иногда удобно поменять их

* Магнитодвижущая сила (м. д. с.) или намагничивающая сила (н. с.), скалярная величина, характеризующая намагничивающее действие электрического тока, проходящего по виткам катушки с железным сердечником. Измеряется в амперах или ампер-витках. Если предположить отсутствие тока в витках, тогда в идеализированной модели остается оперировать лишь импедансами. — Прим. ред. «Вестника».

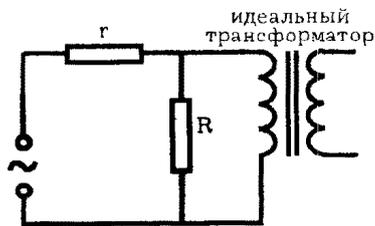


Рис. 2. Эквивалентная схема трансформатора, работающего от источника напряжения на резистивную нагрузку. R — значение фактического сопротивления нагрузки, приведенное к первичной обмотке, $г$ — сопротивление источника в первичной цепи

местами). Мы начнем с этого и объясним, что каждая часть означает в типовых схемах.

Нам не доступен совершенный трансформатор, но мы можем понять, что реальный с реальными дефектами, включенный соответствующим образом, лучше совершенного. Итак, что сделал бы совершенный трансформатор?

Даже это многие плохо понимают, так что простите меня за урок, если Вы его уже знаете. Сердечник совершенного трансформатора не испытывает действия намагничивающего тока. Считается, что этого тока просто нет. Фактическая первичка потребляет крошечный намагничивающий ток для установления напряжения на обмотке. Но теоретически совершенный транс дает нам отсутствие намагничивания. Первичные и вторичные напряжения непосредственно пропорциональны их соответствующим числам витков (рис. 3).

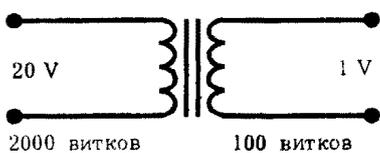


Рис. 3. Идеальный трансформатор обеспечивает только передачу напряжения и свободен от намагничивающего действия тока

Совершенный трансформатор

Теперь наступает первый сложный момент. Потому что теоретически в совершенном трансформаторе именно это «отсутствие» намагничивания производит требуемое число вольт на виток (или витков на вольт),

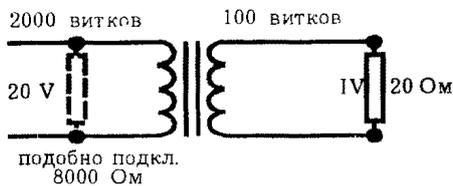


Рис. 4. Первичная обмотка потребляет 2,5 mA при 20 V

так что присутствие тока в двух обмотках должно быть совершенно сбалансировано. Если в одной обмотке нет тока, то его нет и в другой. Мы имеем только напряжения, но не ток.

Предположим, коэффициент трансформации равен 20:1. Итак, если на одной обмотке 20 V, то на другой — 1 V. Теперь предположим, что вторичная (1 V) обмотка подключена к схеме, которая потребляет 50 mA. Это должно быть сбалансировано первичным током в 20 раз меньше (по количеству витков), так что первичная должна потребить ток в 1/20 от 50 mA, что составляет 2,5 mA. Давайте интерпретировать это в терминах импеданса.

Сопротивление нагрузки, потребляющей 50 mA при 1 V, должно быть 20 Ом. Чтобы сбалансировать это, первичная потребляет 2,5 mA при 20 V (рис. 4). Таким образом в первичной это выглядит как 8 кОм**, что в 400 раз больше 20 Ом вторичной нагрузки, вызывающей это.

Итак, совершенный трансформатор умножает сопротивление на квадрат отношения витков. Напряжение умножено на отношение витков, а ток делится на отношение витков. В действительности он скорее трансформирует сопротивление, чем напряжение или ток. Измените вторичную нагрузку на 40 Ом, и первичная будет выглядеть как 16 кОм вместо 8.

Приведение к первичной

Как мы увидим позже, совершенный трансформатор трансформирует реактивные значения типа индуктивности и емкости таким же способом. Он также работает обоими способами. Я только что описал наиболее очевидный: он отражает сопротивление нагрузки обратно умноженным на квадрат отношения

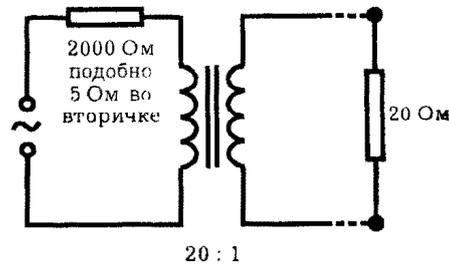


Рис. 5. Преобразование импеданса действует в обе стороны. Сопротивление источника также понижено в 400 раз при условии, что отношение числа витков составляет 20 : 1

витков. Он также и таким же образом отражает сопротивление источника вперед, на сопротивление нагрузки. Цифры могут пояснить, что это означает (рис. 5).

Реальная нагрузка в 20 Ом отражается на первичку как 8 кОм, т. е. умноженная на квадрат отношения витков, равный 400 : 1. Предположим, что цепь анода (или что является источником для первички) эквивалентна 2 кОм. Величина взята как пример, нагрузочные линии лампы сообщат Вам истинное значение. Трансформатор делает так, что 2 кОм выглядят как 5 Ом на вторичной — это 2000, поделенные на квадрат отношения витков.

В целях разработки далее удобно думать о совершенном трансформаторе как о перемещении всего «на одну и ту же сторону», если бы такая была. После этого станем думать о том, как дефекты реального трансформатора влияют на его работу.

Наша нагрузка 20 Ом, как договорились. Если мы относим все к первичке, то это 8 кОм. Мы думаем о первичной индуктивности, индуктивности рассеяния, емкости обмоток, оптимальном секционировании, как управлять специальными выходными каскадами, обо всех этих вещах, приводя все к первичке.

Что это означает

Вернемся к рис. 2, повторенному на рис. 6 с некоторыми дополнениями. Дефекты реального трансформатора помещают дополнительные эквивалентные «компоненты» в схему несколькими способами. Сначала мы определим первичную индуктивность. Это ток, собственно и создающий передачу энергии из первичной во вторичную об-

** Из элементарной арифметики: $20 \text{ V} : 2,5 \text{ mA} = 8000 \text{ Ом}$. — Прим. ред.

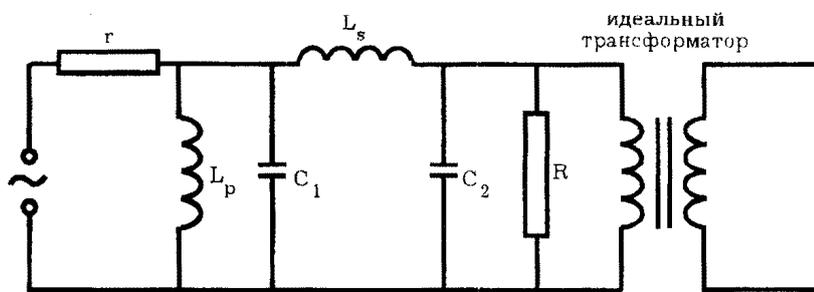


Рис. 6. Одна из возможных форм эквивалентной схемы реального трансформатора. R и r имеют значение из рис. 2. L_p — индуктивность первичной обмотки. L_s — индуктивность рассеяния. C_1 — емкость первичной обмотки. C_2 — емкость вторичной обмотки. Все значения приведены к первичной цепи.

мотки, но взамен намагничивающий сердечник, и порождающий потери, он в нашем совершенном трансформаторе отсутствует. Это похоже на шунтирующую индуктивность между источником и нагрузкой.

Присутствие этого тока может иметь много эффектов, но пока мы будем думать о низкочастотном склоне, а в другие проблемы, обусловленные намагничивающим током, вникнем позже. На отметке в -3 дБ индуктивное сопротивление первичной обмотки равно параллельно соединенным сопротивлениям источника и нагрузки.

Смотрите, что это означает! Предполагая, что источник — 2 кОм, а нагрузка — 8 кОм, параллельное соединение из тех двух рисунков дает $1,6$ кОм — немного меньше источника. Индуктивность, имеющая на частоте 20 Гц сопротивление в $1,6$ кОм, приблизительно равна $12,75$ Гн.

Дополнительная осторожность при разработке

Теперь предположим, что тот же самый усилитель используется с пентодом или тетродом, который по-прежнему работает на 8 кОм-ную нагрузку, но внутреннее сопротивление источника равно (снова те нагрузочные

линии) 100 кОм, что в параллель составит около $7,4$ кОм, не намного меньше нагрузки. Это означает, что переход на пентод или тетрод отодвинет точку -3 дБ у того же самого трансформатора на $92,5$ Гц, что, согласитесь, является совершенно различным в сравнении с триодом***.

Если высокочастотный склон обусловлен емкостью обмотки, то произошло бы то же самое ограничение. 20 кГц-овый спад (в первом случае) теперь опустился бы до $4,3$ кГц****. Но если ВЧ-спад обусловлен только индуктивностью рассеяния, то характеристика может оказаться более приличной. Как так?

Мы доберемся до поведения трансформатора на ВЧ позднее, а сейчас индуктивность рассеяния приводит к спаду в 3 дБ, когда общее индуктивное сопротивление равняется последовательной сумме r и R , а не параллельной. Первичная индуктивность уже не имеет никакого значения, так что мы убираем ее из схемы (рис. 7). С 2 кОм-ным источником индуктивность рассеяния будет производить спад на 3 дБ, когда ее индуктивное сопротивление составит 10 кОм.

Если это происходит на 20 кГц (для первого случая), то увеличение сопротивления источника до 100 кОм отодвинет спад, где индуктивность рассеяния имеет сопротивление в 108 кОм, к от-

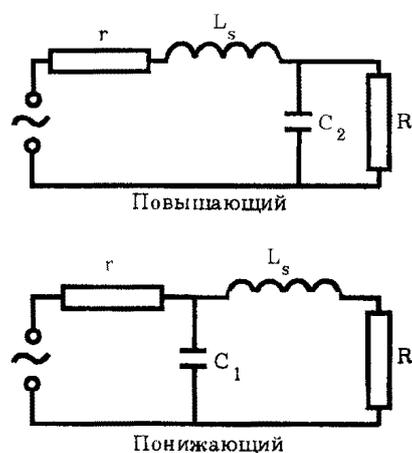


Рис. 7. Два возможных упрощенных эквивалента для ориентировочного расчета точки ВЧ перегиба — для повышающего или понижающего трансформаторов соответственно

метке в 3 дБ до 270 кГц! На практике все не так просто, потому что мы учитывали либо емкость обмотки, либо индуктивность рассеяния, выступающую единственной причиной ВЧ спада, другую же вообще не принимали во внимание. Все не так просто. Мы преуспеваем в том и многом другом, но в следующий раз. Эффективность, мощность, специальное секционирование для обеспечения хорошей характеристики передачи в таких режимах, как класс $-B$ и $-AB$ или ультралинейное включение — все вызывает к дополнительной осторожности при разработке.

Прежде чем закончить это первое введение, я хочу подготовить Вас к кое-чему: использование более дорогостоящих способов выполнения этого — не всегда лучше. Меня спрашивали: «Лучше иметь много секций обмотки или мало?» Иногда более простое расположение лучше, если это правильно сделано. Кроме того, трансформатор может выполнять специальные забавные функции (подобно встроенному фильтру) который лучше чем тот, который вы использовали в ином случае.

*** Частота в $92,5$ Гц взялась из предположения, что трансформатор по первому примеру имеет индуктивность первички $12,75$ Гн. Вот этот-то трансформатор при работе с пентодом и даст точку перегиба в НЧ диапазоне, равную $f = 7,4 \text{ k} / 2\pi \cdot L = 92,5$ Гц. — Прим. ред.

**** Из формулы, определяющей полюс интегрирующего звена (см. рис. 7) $f = \frac{1}{2\pi RC_1}$; При одинаковом в обоих случаях C_1 , сопротивление R в первом случае равно $1,6$ кОм, во втором случае — $7,4$ кОм. Таким образом $7,4 : 1,6 = 4,625$. Во столько раз сузится полоса.

Жили-были Standby и Soft Start...

А. Белканов, А. Пугачевский

Требование опций *standby* и *soft start* обычно считается уместным в дорогостоящих моделях. Их неоправданно считают объектом удовлетворения капризов состоятельного покупателя. Это не совсем так, вернее, вовсе не так. Это скорее инструмент продления ресурса дорогих ламп и поддержания их стабильных свойств длительное время.

Переводя на язык общепонятный, *standby* — это режим готовности, режим ожидания до востребования. То есть лампы стоят в режиме либо пониженного токоотбора, либо напряжение на аноде уменьшено против рабочего и, следовательно, износ катода сведен к минимуму. Таким образом, ресурс ламп продлевается на то время, которое они «бесплатно» грелись и старели. К тому же появляется возможность почти мгновенного перевода усилителя в режим работы — музыка польется тут же, после нажатия кнопки или щелчка тумблера.

Soft start (ss) — плавный запуск, момент мягкого включения усилителя, гарантирующий неаварийные режимы всех его элементов, Исключается форсаж разогрева ламп, ударного воздействия на выпрямитель, силовой трансформатор и саму сеть питания. *SS* призван повысить надежность всего устройства не только при включении, но также продлить ресурс изнашиваемых элементов.

Кроме причин очевидных, вроде превышения мощности на аноде и сетках, перекала нити накала напряжением выше нормированного, подачи недопустимо высокого анодного или примитивного недоразумения при вытягивании лампы из панельки, можно указать еще пять (5) неочевидных причин выхода ламп из строя.

• 1. Наиболее частой причиной смерти лампы является пере-

горание нити накала в момент подачи на нее полного накального напряжения. Бросок тока вследствие того, что сопротивление холодной нити в 5-7 раз меньше нагретой, если не сразу «убьет» лампу, то существенно снизит ее ресурс из-за циклического форсированного разогрева. В конце концов, лампу «хватит инфаркт» где-нибудь в пути, когда она честно трудится.

• 2. Отсутствие токоотбора при полной рабочей температуре чревато отравлением катода. Между никелевым керном и оксидом образуется слой силиката бария, имеющий высокое термо- и омическое сопротивление. Естественно, уменьшается эмиссия. Кроме того, из-за неравномерности толщины этого слоя, с участков эмитирующей поверхности электроны вылетают с разной скоростью. От этого дробовой шум, вызванный неодинаковым количеством электронов, покинувших катод в единицу времени, усиливается.

• 3. Вакуум в баллоне не абсолютен, в нем присутствуют остаточные молекулы и атомы газов, не удаленные за время вакуумирования. К тому же появляются новые из-за того, что элементы внутри баллона, да и само стекло, «парят». В момент появления анодного напряжения до начала эмиссии, случайные электроны, выдернутые мощным электростатическим полем, бомбардируют эти молекулы и ионизируют их. Ускоренные ионы устремляются на поверхность катода и «прорывают» его эмитирующую поверхность толщиной 1-2 атома. Эти дыры уменьшают эффективную поверхность катода и соответственно снижается его эмиссионная способность. Для сигнальных ламп этот процесс отмечается через повышение уровня шума (по

природе мерцающие или фликкер шумы, не путать с дробовыми!), для мощных ламп — через «облысение» катода и потерю эмиссии. Геттер частично нейтрализует остатки газов и в большей степени тогда, когда нагрев катода происходит раньше подачи анодного напряжения. Геттер эффективнее, когда он горячий.

• 4. Неправильная ориентация лампы в пространстве (звучит как ориентация космического корабля!). Если для прямонакальных это принципиально недопустимо, то для ламп косвенного накала необходимо избегать их горизонтальной установки. В этом случае возможно провисание сетки (других сеток) при нагреве и контакт ее с катодом или анодом. В обоих случаях выход лампы из строя неминуем. Даже если лампу не запрещено устанавливать как угодно, то золотым правилом будет одно: она должна стоять вертикально! У перевернутых вниз головой ламп (в некоторых гитарных усилителях) остается вероятность оторваться от мастики, соединяющей баллон с цоколем. Весьма не редка ситуация, когда температура лампы такова, что припой в штырях расплавляется и баллон, ничем не удерживаемый, отваливается.

• 5. Пыль, грязь, следы от пальцев на баллоне, неумело сконструированные радиаторы — все это снижает степень лучеиспускания и ведет к перегреву анода. В некоторой степени грязь провоцирует образование на поверхности раскаленного стекла участков, где оно размягчается и баллон «схлопывается».

Впрочем, это все банальности, известные любому, кто хоть однажды заглядывал в книжку

с теорией электровакуумных приборов*. Кажется всего-то делов, стоит лишь придержать подачу анодного, пока медленно греется накал с катодом, а когда появится видимое вишнево-свечение нити накала, клацнуть тумблером и — дело в шляпе. Как бы не так!

Во-первых: лень ждать всякий раз, когда включаешь музыку, иначе теряется весь кайф от мгновенно исполняемого желания. Это же не сенокосилка с ее рычагами, педалями и кнопками, и потому дисциплина оператора (словцо-то какое, зарубежное, к сенокосилке в самый раз подходящее!) машины многим просто претит.

Во-вторых: завораживающие малиновые (рубиновые, охряные, цвета соломы или спелого арбуза, зависит от типа лампы и цветовосприятости) точки еще увидеть надо. А если усилитель придуман закрытым? Не станешь же с секундомером стоять, верно? Или с буханьем сердца отсчиты-

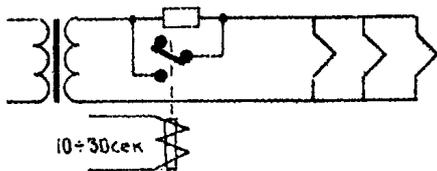


Схема 1. Ограничение тока накала при включении

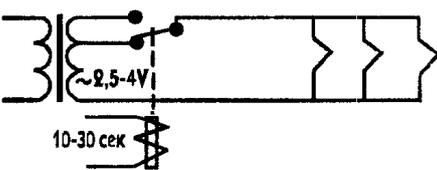


Схема 2. Уменьшение напряжения накала при включении

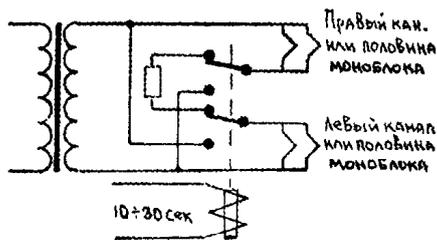


Схема 3. Включение нитей накала последовательно

вать томительные секунды, скорей бы они летели.

В-третьих: если включаете не вы, а скажем, ваша подруга. Тогда ваши объяснения способны испортить настроение не только на вечер, но навсегда. Она непременно сочтет вас занудой, уйдет к автомобилисту, и правильно сделает.

В-четвертых: даже если вы вручную задержите подачу анодного напряжения, то напряжение накала вы все равно включаете щелчком и тогда — см. пункт 1 неочевидных причин выхода из строя.

Значит, нужна автоматика.

Автоматика для soft-start'a

Прежде всего это означает включение элемента токоограничения в цепь нитей накала. Самой простой реализацией окажутся схемы 1, 2, 3. Хотя в этом случае ударный ток все же будет, хотя и уменьшенный по амплитуде.

При наличии свободных контактов на исполнительном реле можно включить светодиоды, показывающие режим прибора на данный момент. Если использовать светодиод с встроенным мультивибратором, то время прогрева будет сигнализироваться красным и зеленым огоньками попеременно.

Если есть смысл питать накал постоянным током, используя при этом стабилизатор напряжения, то можно обойтись схемой 5. Мощность микросхемы будет зависеть от суммарного тока потребления и мощности, рассеиваемый на ее корпусе. Наши K_p, E_H на 5 или 6 вольт, LM7805, LM78MD5, поставленные на радиатор, вполне сойдутся.

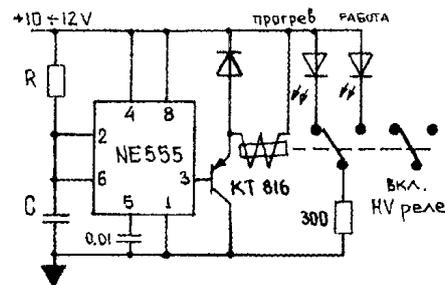


Схема 4. Таймер 1006 ВИ1 / NE555

Исполнительное реле получает сигнал управления от таймера. Обычно это 1006ВИ1 или NE555. Постоянная времени определяется произведением RC. Обычной практикой является использование R до 1 МОм, а емкость конденсатора до 100 мкФ. Усердствовать в увеличении R не стоит, так как ток утечки входа таймера может оказаться выше тока заряда емкости. А чтобы ток утечки конденсатора не путал карты, советую ставить либо хороший электролит (для этой цели вполне подходят танталовые, ниобиевые, оксидно-полупроводниковые; не смущайтесь, здесь они на звук не влияют), либо пленочные. Тип К73 — будет лучшим выбором (лавсановый диэлектрик). Время выдержки будет равно 0,6-0,75 T и будет зависеть от ваших требований, хотя более 1-1,5 минут задерживать нет смысла (схема 4).

Финский инженер и автор многих статей Юкка Толонен (Jukka Tolonen) представил в одном из номеров GA результаты экспериментов, отражающие время готовности схемы в зависимости от поданного на нити накала напряжения прогрева.

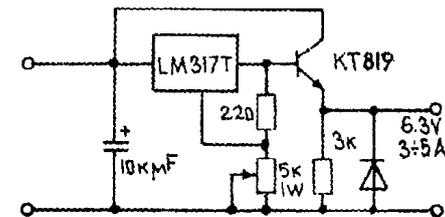
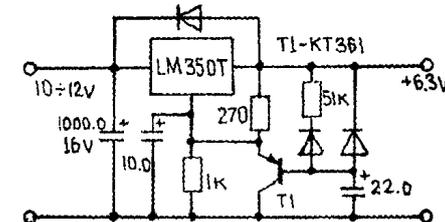
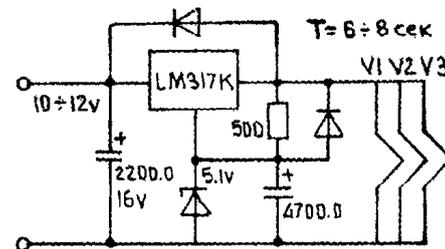


Схема 5. Примеры включения различных трехвыводных стабилизаторов

* Кацман Ю. А. Электронные лампы — теория, основы расчета и проектирования. Высшая школа. 79 г.

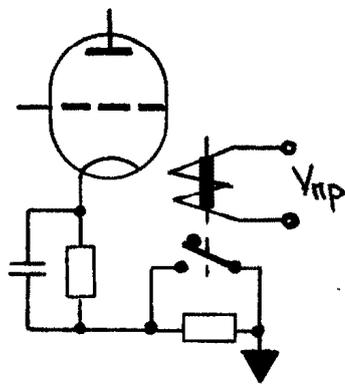


Схема 12. Standby для каскада с автосмещением

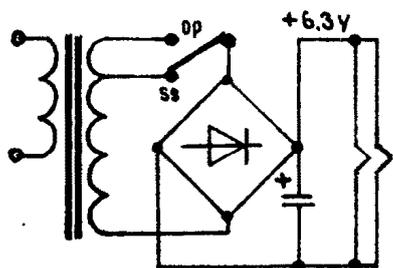
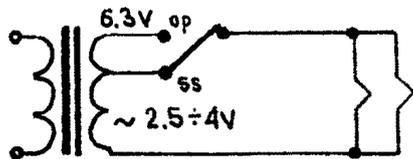


Схема 13. Включение накалов на отвод обмотки

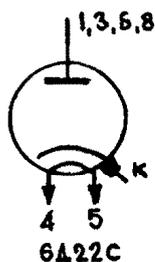
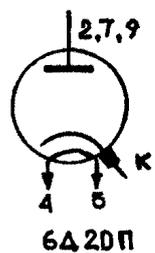


Схема 14. Выпрямление со средней точкой

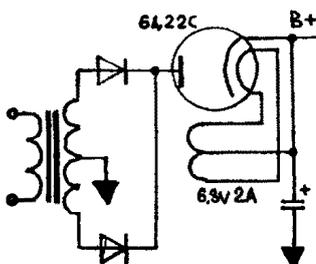
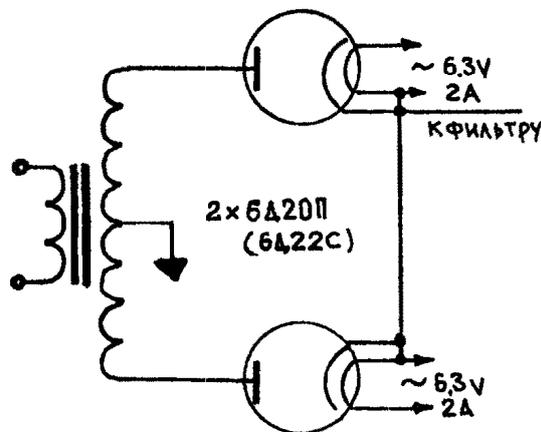


Схема 15. Кенотрон в качестве демпфера

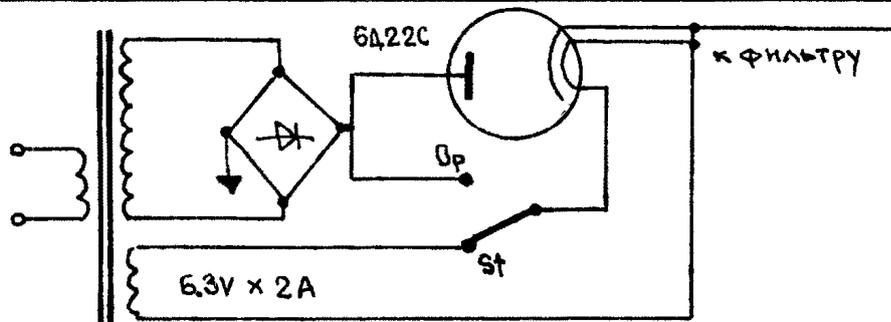


Схема 16. Шунтирование кенотрона с отключением накала

Просто и надежно

Наиболее демократичны схемы с кенотроном. В том смысле, что процесс прогрева его самым естественным образом замедляет время готовности. Если токовые запросы схемы усиления велики, скажем, 300-500 мА на канал, то подойдут 5Ц8С, 5Ц9С — убойные наши кенотроны. Для аппетита до 300 мА сгодятся 5Ц4С/5С4М и демпферные диоды 6Д20П, 6Д22С (см. схему 14). Последние два особенно пригодны в выпрямителях анодного напряжения, так как быстры и эмиссионная способность высокая.

Кенотрон чем хорош? Пока сам не прогреется, анодное питание не попадет на лампы схемы, а к тому моменту сами лампы уже будут готовы к работе. Плюс к этому отсутствует ударный зарядный ток при включении, если поставить кенотрон в виде демпфера сразу после выпрямителя. Но не после фильтра! Смотри схему 15.

Все мило, подача анодного происходит насколько возможно плавно, причем одним щелчком тумблера сети и такая «автоматика» работает надежнее не придумать. Однако взамен имеем три беды: 1) накалы демпферов жрут ток и не малый. В лучшем случае — 2

ампера, в худшем — аж 5! 2) демпферы жрут не только ток, но и напряжение. Падение на вакуумном диоде зависит от тока через него и запараллеленности половин. В кенотроне (двуханодном) их следует соединить параллельно, и не только ради уменьшения внутреннего сопротивления, но и с целью разгрузки теплового режима лампы. Так вот, здесь можно потерять 20-50 вольт**. Значит следует предусмотреть запас напряжения на силовом транссе, либо отказаться от такого «неуклюжего изящества», например, шунтированием кенотрона. При этом не забыть отключить его накал! (Схема 16). Ко всему учтите, если все обмотки у вас на одном силовом трансформаторе, то он обещает превратиться в утюг, и «просесть» до неприличных значений выходного напряжения. Ведь какими бы толстыми проводами ни намотать накальные обмотки, ток в первичке сделает свое дело и величина напряжения, действительно приложенного в первичной обмотке, будет ощутимо ниже 220 V. Для этого случая предусматривают отводы в первичке, чтобы хоть как-то скомпенсировать это уменьшение. Беда № 3: кенотроны тоже лампы и ресурс их ограничен. Они потребуют замены при явном ослаблении эмиссии, хотя это все-таки дешевле, чем замена выходных (и входных тоже) ламп.

Есть еще одна беда, побороть которую не сложно: при использовании кенотронов прямого накала с питанием накала переменным током, возникает проблема колебаний анодного тока. Это происходит вследствие малой тепловой инерции, когда нить накала успевает дважды за период раскалиться и остыть; с той же частотой колеблется эмиссия, а стало быть, и ток анода будет колебаться. Лечение этого

** При расчете запаса на анодных обмотках следует отличать R_i (внутреннее сопротивление кенотрона по переменному току) и R_0 — сопротивление по постоянному току. В любой точке характеристики I_a-U_a справедливо соотношение $R_i = 2/3 R_0$. Только R_i работает на подавление пульсаций, а на R_0 падает постоянная составляющая.

недуга показано на рис. (схема 17). Подробнее об этом в книге В. Ф. Власова «Электровакuumные приборы» за 49 год, стр. 129.

Но, если вы окончательно решили долететь до Солнца и по выражению В. Хлебникова — «отъявленный Суворов», плюньте на кремний и демпферы, ставьте прямонакальные кенотроны. Из достаточно мощных остался 5Ц3С. Устаревшие ВО-183 (аналог RCA83, весьма популярного), немецко-венгерские серии AZ, EZ, а также ртутные — это для гурманов. Я особого звука в них не ищу. Так вот, в «Ongaku» из гурманов гурман — Хироюсу Кондо — применил 5AR4, включенные мостом, для получения 960 В от трансформатора с двумя обмотками по 360 В. Естественно, по схеме со средней точкой этого не добиться, иначе пришлось бы использовать либо схему умножения, либо ценой применения кенотронов с косвенным накалом. А как же чистога идеи? Оказывается, можно слегка поступиться принципами, если очень хочется. Это я к тому, что особого смысла в прямонакальности кенотронов не вижу (схема 18).

Я использую кремниевые диоды и вакуумный демпфер. Перед ним ставлю еще маленькую емкость 4-10 мкФ типа МБГЧ или бумагу в масле (КБГ-МН и др.) и считаю (возможно ошибочно), что это помогает звуку. Объясняю тем, что это линеаризует характеристику передачи диода, поскольку диапазон изменения тока через него уменьшается (пульсации ослабляются конденсатором), а во-вторых, появляется лишнее звено фильтрации, в виде достаточно линейного и почти активного резистора (вакуумный диод с низким внутренним), который грех не использовать по схеме л-фильтра. Если, при этом, он скоростной, как демпферный диод для строчной развертки, то проблем с выбросами на кромке разряда не возникает. При выпрямлении только полупроводниками, даже если они скоростные, вроде HEX FRED, выбросы хоть и ослабляются элементами фильтра, но в виде широкополосной помехи все-таки попадают на аноды ламп. Этот прием уже можно рассматривать, как борьбу за питание ради питания, так что пусть он станет отдельной историей. Наконец, в качестве живого примера — реализация автоматики в усилителе PROTOTYPE представленного на выставке РХЭ'99. Ее автор — А. Пугачевский.

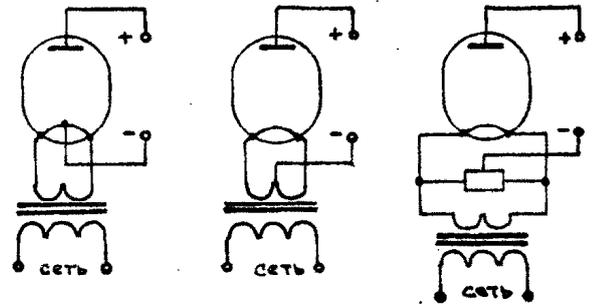


Схема 17. Вывод средней точки (антифон)

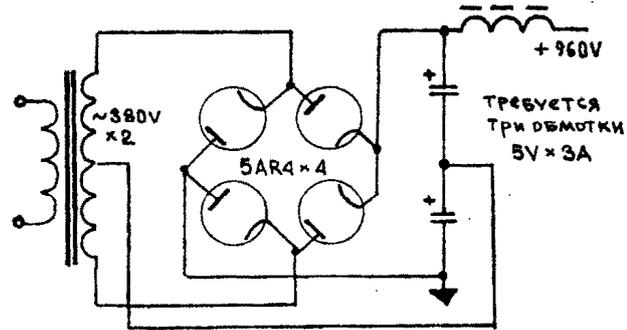
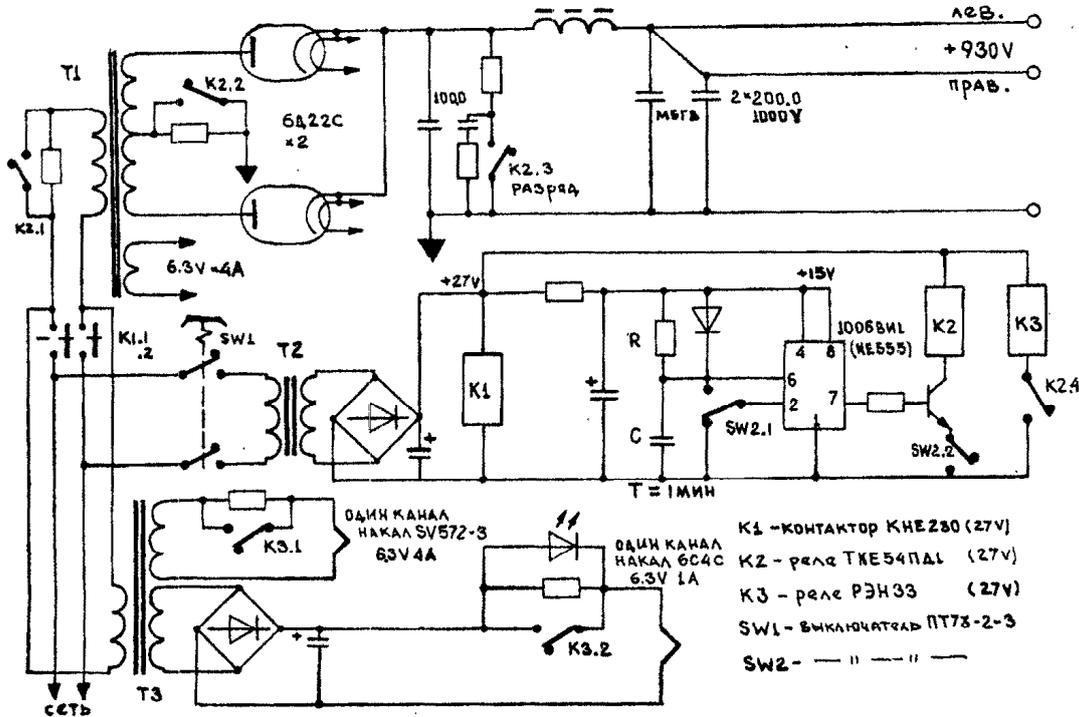


Схема 18. Выпрямитель в схеме «Ongaku»
Audio Note



Сх. 19. Схема автоматики softstart и standby в усилителе «Prototype». Упрощенный вариант

Выводы

Мы не ставили себе задачу дать полную, исчерпывающую схему Soft start'a и Standby'я, пригодную на все случаи жизни. К тому же остались за бортом некоторые решения, освещать которые довольно затратно по времени, а пользы они дают чуть. Так что пусть каждый выберет себе решение по вкусу и по плечу. Стоит обратить внимание вот на что: напихать автоматики побольше — не самоцель. Субъективные оценки звучания аппарата от этого не сдвинутся на много, но она (автоматика) является показателем заботы производителя о покупателе. Чтобы, спустя время, у него не возникло головных болей и, соответственно, у вас.

А. Б. и А. П.