

ПТ-ЭМУЛЯЦИЯ ТРИОДНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ

Виктор Кемпф, © 2006.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Многие знают автора этой статьи как последовательного сторонника использования в тракте гитарного усиления полевых транзисторов, с переменным успехом пытающегося добиться от применения последних приемлемых (с точки зрения формирования традиционного гитарного звука) результатов. В гитарном звуке, как известно, на первый план выходят вопросы формирования спектра сигнала посредством его усиления и ограничения. Традиционно считается, что только ламповое ограничение может придать гитарному сигналу тот самый специфический окрас, столь почитаемый гитаристами и просто любителями гитарной музыки. Тем не менее, несмотря на существенное различие выходных ВАХ полевых транзисторов и вакуумных триодов, оказалось возможным заставить ПТ в ограничении вести себя подобно триоду, хотя для этого пришлось пройти долгий путь, полный ошибок, разочарований и неожиданностей.

ОГРАНИЧЕНИЕ ВАКУУМНОГО ТРИОДА

Рассмотрим, как ограничивает сигнал вакуумный триод. Возьмем для примера распространенный триод 12AX7. Предположим, что на вход подано синусоидальное напряжение 20В двойной амплитуды.

Верхняя полуволна ограничивается на сетке уровнем U_K (U_K – потенциал катода относительно «земли»). При превышении напряжения U_K между сеткой и катодом возникает ток. Таким образом, со стороны входа триод можно рассматривать как вакуумный диод, включенный между сеткой и катодом (рис. 1).

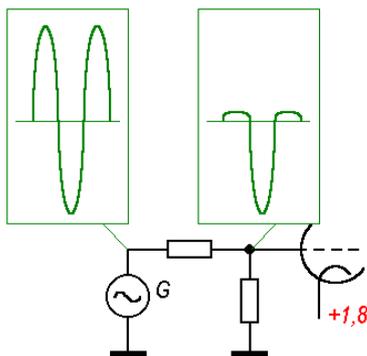


Рис.1. Ограничение триодом положительной полуволны на сетке ($U_K=1,8В$)

Естественно, это не является открытием для человечества и известно давно. При обычных для 12AX7 значениях катодного резистора 1...3кОм уровень ограничения верхней полуволны сигнала по входу составляет около 2В.

Сигнал на аноде – это инвертированный и усиленный в K_U раз входной сигнал каскада (рис.2).

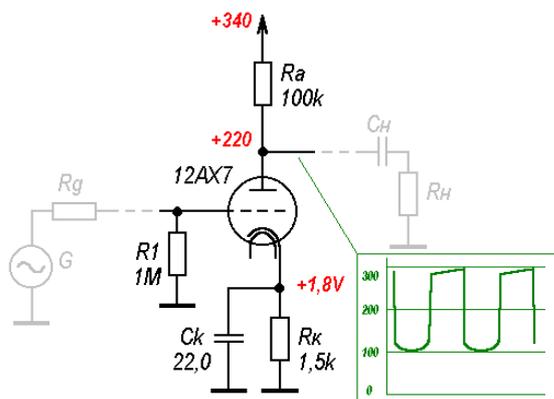


Рис.2. Типовой каскад на вакуумном триоде 12AX7.

Усиление каскада по напряжению:

$$K_U = S \times (R_A // r_A // R_H), \text{ где } r_A = \mu \times S$$

μ – коэффициент усиления по напряжению триода;

S – крутизна в рабочей точке;

R_A – резистор в цепи анода;

r_A – динамическое сопротивление со стороны анода;

R_H – сопротивление нагрузки.

K_U в основном определяется внутренним сопротивлением триода r_A , обычно равным 50...60кОм. В отсутствие нагрузки усиление каскада на 12AX7 составляет около 65.

Рассмотрим сигнал на выходе по полуволнам. Всё, что может сделать триод, чтобы выдать максимальный сигнал верхней полуволны – это полностью закрыться. И в этом случае максимум положительной полуволны на выходе определяется отношением R_A и R_H , которые образуют обычный делитель напряжения. В отсутствие нагрузки верхняя полуволна достигнет уровня напряжения питания +340В. При наличии нагрузки (пусть это будет, к примеру, 200кОм) верхняя полуволна достигнет лишь +280В. В итоге мы имеем сигнал, изображенный на рис.3 (наклон вершины сигнала обусловлен зарядом проходного конденсатора C_H и зависит от его емкости).

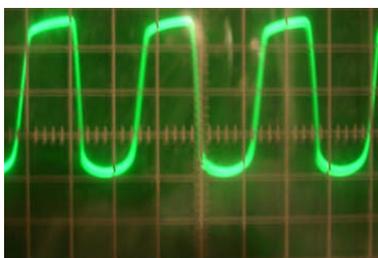


Рис.3. Осциллограмма реального сигнала на аноде (50В/деление)

Нижняя полуволна на этом рисунке есть ничто иное, как ограниченная входная положительная полуволна, усиленная в K_U раз. Т.к. «входной диод» триода ограничивает положительную волну на входе уровнем 2В, то на аноде мы получаем сигнал нижней полуволны с характерным «диодным» закруглением (в нашем случае $K_U=55$, и сигнал «закругляется» на уровне $220В - 2В * 55 = 110В$, рис.3).

Таким образом, триод на выходе в действительности ограничивает только верхнюю полуволну. Именно в этом и кроется необходимость питания каскада от достаточно высокого анодного напряжения. Если питание каскада на рис.2 снизить до 220В, то выход каскада будет ограничивать также и снизу, что приведет к резкому ухудшению благозвучности ограничения. Это и есть причина того, что лампа «не звучит» при пониженном анодном напряжении.

Примечание. При сниженном анодном напряжении всегда есть возможность уменьшить сопротивление анодного резистора либо уменьшить анодный ток, увеличив катодный резистор, до тех пор, пока рабочая точка не займет «нормальное» положение: 55...65% от U_n .

Итак, триод ограничивает только положительную полуволну, как на сетке, так и на аноде.

ОГРАНИЧЕНИЕ КАСКАДА С ОБЩИМ ИСТОКОМ И РЕЗИСТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Полевой транзистор (речь идет о n-канальном приборе на основе кремниевого p-n-перехода) также представляет собой диод и ограничивает входной сигнал сверху. Уровень ограничения при этом составляет $U_{p-n} + U_S$, где

U_{p-n} – падение напряжения на кремниевом переходе ($\approx 0,5В$)

U_S – потенциал на истоке.

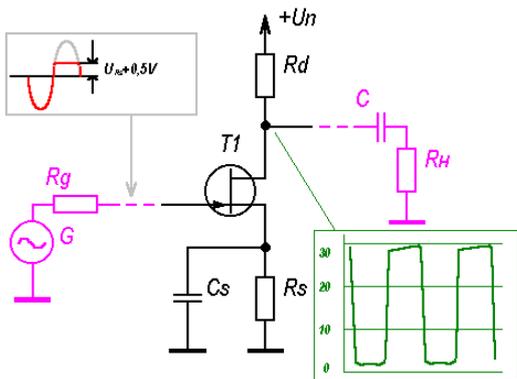


Рис.4. Каскад с ОИ в ограничении по выводу и входу.

Проблема ПТ, включенного по схеме с общим истоком и резистивной нагрузкой, состоит в том, что, ограничивая сигнал на выходе сверху **подобно вакуумному триоду**, он «успевает» ограничить на выходе нижнюю полуволну ранее, чем наступит ее ограничение по входу (рис.4). К моменту ограничения на входе мы имеем уже полностью открытый прибор, и весь входной ток целиком складывается с током через канал ПТ. Этот ток беспрепятственно проникает в выходной сигнал, формируя на нижней полуволне так называемый «обратный выкус». Эффект можно несколько ослабить добавлением последовательно в затвор резистора большого номинала (0,4...1МОм). Но способ этот, уменьшая «выкус», не избавляет от ограничения на выходе снизу, поэтому ПТ сами по себе не могут звучать в ограничении так же, как триод. Одной из попыток хоть как-то улучшить это ограничение «снизу» было каскадное включение ПТ. Но, к сожалению, следует признать, что даже с учетом некоего подобия формы сигнала на выходе при малых уровнях на входе, при перегрузе по входу начинают проявляться все те же проблемы. И это в равной степени относится ко всем каскадам с ОИ, в том числе и к мю-каскадам. Мю-каскады, кроме того, не дают токового ограничения «сверху», что скорее уводит нас дальше от «лампового звука», нежели приближает к нему. В итоге даже появился термин – «полевое звучание».

Примечание: мю-каскады на вакуумных триодах (SRPP), по мнению автора, не звучат в ограничении по той же самой причине: ограничение сверху – не «токовое».

«ПСЕВДОТРИОДНОЕ» ОГРАНИЧЕНИЕ НА ПТ

Итак, мы знаем, как выглядит картина ограничения сигнала триодным каскадом, а также знаем, почему каскад на ПТ не ограничивает подобным образом. Основная проблема в том, что относительный уровень ограничения по входу у ПТ оказывается значительно выше.

Попытаемся решить эту проблему.

Во-первых, помня о соотношении между питанием и ограничением по входу у триодов (+250...350В/+2В), ПТ следует питать от высокого напряжения, и использовать приборы с низким напряжением отсечки.

Во-вторых, для снижения уровня ограничения на входе использовать германиевый диод или диод Шоттки, включив его параллельно собственному переходу ПТ.

В-третьих, необходимо обеспечить такое усиление каскада, чтобы ограниченная по входу положительная полуволна, умноженная на K_U каскада, гарантированно не приводила бы к ограничению на выходе снизу. Проще всего это сделать, введя дополнительное сопротивление в исток.

На рисунке представлен каскад на ПТ, удовлетворяющий всем этим условиям

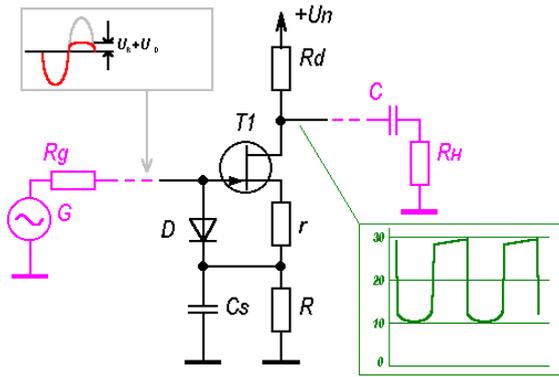


Рис.5. Каскад по схеме ОИ с «триодным» ограничением

Если с выполнением первых двух условий особых проблем не возникает, то с учетом технологического разброса параметров ПТ, выполнение третьего условия требует расчета резисторов R и r в истоке, исходя из напряжения отсечки U_0 и начального тока стока I_0 конкретного прибора.

(Далее следует математическая часть, которую самые нетерпеливые могут пропустить)

Суммарное сопротивление резисторов в цепи истока определяет положение рабочей точки, которое выбирается из расчета $\frac{2}{3}U_{П}$. (Реально рабочая точка сместится на 1...3В вниз из-за влияния обратного тока германиевого диода и будет оптимальной)

$$R_{\Sigma} = (R + r) = \frac{U_S}{I_d} = \frac{U_0}{I_d} \left(1 - \sqrt{\frac{I_d}{I_0}} \right), \text{ где } I_d - \text{ток стока.}$$

Т.к. $I_d \approx \frac{U_{П}}{3R_c}$, то суммарное сопротивление резисторов в истоке:

$$R_{\Sigma} = \frac{3U_0R_c}{U_{П}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{П}}{3R_cI_0}} \right)$$

Коэффициент усиления каскада (без учета «мю» ПТ):

$$K_U = \frac{R_c}{r_k + r}, \text{ где } r_k - \text{сопротивление канала ПТ, которое может быть вычислено по формуле:}$$

$$r_k = \frac{U_0}{2\sqrt{I_0I_d}} \approx \frac{U_0}{2\sqrt{\frac{U_{П}I_0}{3R_c}}}$$

Положим, что максимальная допустимая амплитуда нижней полуволны на выходе без ограничения равна $\frac{U_{П}}{2}$ (с учетом возможного смещения рабочей точки из-за влияния обратного тока диода D – это вполне разумный выбор). Тогда математически третье условие будет выглядеть как:

$$K_U \times (U_D + U_R) = \frac{U_{П}}{2}$$

С учетом формулы для расчета K_U и, приняв во внимание, что $U_R = I_d R = \frac{U_{П}R}{3R_c}$ мы приходим к системе уравнений:

$$\frac{R_c}{r_k + r} \left(U_d + \frac{U_{\Pi} R}{3R_c} \right) = \frac{U_{\Pi}}{2}$$

$$R_{\Sigma} = \frac{3U_0 R_c}{U_{\Pi}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{\Pi}}{3R_c I_0}} \right)$$

Решением этой системы является:

$$r = \frac{6}{5} \left(U_D \frac{R_c}{U_{\Pi}} - \frac{R_{\Sigma}}{3} + \frac{r_k}{2} \right)$$

(На этом математическую часть можно считать законченной)

Таким образом, зная U_{Π}, R_c, U_0, I_0 , мы можем рассчитать значения истоковых резисторов в 4 шага. Первые два шага – вспомогательные расчеты, 3-й и 4-й – основные.

1-й шаг. Расчет суммарного сопротивления: $R_{\Sigma} = \frac{3U_0 R_c}{U_{\Pi}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{\Pi}}{3R_c I_0}} \right)$.

2-й шаг. Расчет сопротивления канала ПТ: $r_k = \frac{U_0}{2 \sqrt{\frac{U_{\Pi} I_0}{3R_c}}}$.

3-й шаг. Расчет верхнего сопротивления в истоке: $r = \frac{6}{5} \left(U_D \frac{R_c}{U_{\Pi}} + \frac{R_{\Sigma}}{3} - \frac{r_k}{2} \right)$.

4-й шаг. Расчет нижнего сопротивления в истоке: $R = R_{\Sigma} - r$.

ДИОД

Особенностью каскада является использование диода с малым падением напряжения в прямом направлении. Сравнительный анализ использования диодов Шоттки и германиевых диодов, выявил явное превосходство по звуку германиевых диодов, которые имеют более мягкую ВАХ. При этом надо признать, что экспериментов со всем многообразием диодов Шоттки не проводилось, поэтому вполне возможно, что некоторые пары металл-полупроводник будут звучать не хуже германия.

Ток через диод и падение напряжения на нем связаны уравнением Эберса-Молла:

$$I_d = I_{d0} \left(\exp\left(\frac{U_d}{U_T}\right) - 1 \right); \text{ где } U_T = \frac{kT}{q} \approx 0,025B, I_{d0} - \text{ток насыщения}$$

При выборе диодов необходимо в первую очередь обратить внимание на обратный ток диода (асимптотически приближается к току насыщения I_{d0} с увеличением обратного напряжения). Из отечественных диодов малым током насыщения обладают Д18 и 1Г507А. Диоды серии Д9 требуют тщательного отбора. Прямые измерения тока насыщения затруднены, но косвенно о величине этого тока можно судить по измерениям сопротивления диода в обратном включении:

$$I_{d0} \approx \frac{U_{\Omega}}{R_{d-}} \text{ где } U_{\Omega} - \text{напряжение на клеммах омметра при заданном пределе измерений (можно измерить}$$

еще одним вольтметром). Обычно это напряжение составляет 0,3...0,5В.

Примечание: при отборе диодов рекомендуются экземпляры с «обратным сопротивлением» более 500кОм.

Ток через диод в момент максимального ограничения ориентировочно можно принять:

$$I_d \approx \frac{U_{\Pi}}{4R_G}$$

С учетом последующего логарифмирования и некоторой неидеальности, свойственной в той или иной мере всем переходам, такие оценки I_d и I_{d0} при приблизительном расчете U_d вполне допустимы.

Таким образом, падение напряжения на диоде зависит от величины «добавочного» сопротивления в цепи затвора R_G и при заданном напряжении питания U_{Π} для диода с известным сопротивлением в обратном включении R_d приближенно описывается формулой:

$$U_d \approx \frac{1}{40} \ln \left(U_{\Pi} \frac{R_d}{R_G} \right).$$

Хорошей альтернативой германиевому диоду являются германиевые высокочастотные БТ в диодном включении (коллектор соединен с базой, рис.6): П416, П417, П422, ГТ309, ГТ322, ГТ346 и др.

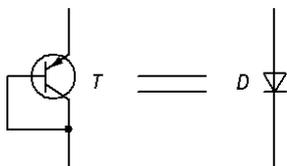


Рис.6. pnp-транзистор в диодном включении.

Для БТ в диодном включении падение напряжения определяется приблизительно:

$$U_d \approx \frac{1}{40} \ln \left(U_{\Pi} \frac{R_d}{\beta R_G} \right).$$

Для германиевых ВЧ БТ при малых токах и напряжениях коллектор-эмиттер можно принять $\beta \approx 10$.

В случае Ge-БТ в диодном включении падение напряжения составляет обычно 0,07...0,1В, для обычных Ge-диодов – 0,1...0,15В.

Примечание: В большинстве случаев для расчетов U_d можно условно принять равным 0,1В (и для Ge-диодов, и для Ge-БТ).

ПОЛЕВОЙ ENGL-BOGNER

В качестве «подопытного кролика» выбрана схема преампа Engl-Mod2 от Азнаура Гишяна (<http://www.azg.spb.ru/azgschemes/azg-engl-mod2.gif>). При «подгонке под себя» увеличено количество НЧ посредством включения параллельно проходному конденсатору на 1нФ после первого каскада резистора на 1,2МОм, исключена цепь 1,5нФ/220кОм перед 3-м каскадом. В выходном темброблоке ёмкости конденсаторов снижены с 47нФ до 22нФ.

Формирование АЧХ

При повторении ряда ламповых схем на ПТ возникает необходимость в еще одном виде расчетов, учитывающих, что необходимая форма АЧХ в ламповых схемах зачастую формируется соотношением катодного резистора и конденсатора. Здесь можно пойти двумя путями. Первое – использовать «широкополосные» каскады с большими шунтирующими емкостями в истоке. При этом вся необходимая АЧХ формируется между каскадами. Второй путь – расчет номиналов конденсаторов после расчета номиналов истоковых резисторов. Причем второй путь не гарантирует полного повторения АЧХ, т.к. мы имеем дело уже с двумя истоковыми резисторами. Практичнее использовать «широкополосные» каскады, формируя требуемые частотные характеристики между каскадами.

Для сохранения АЧХ при переносе цепей коррекции из ламповой схемы в полевой вариант необходимо учитывать разницу в выходном сопротивлении триодного и полевого каскадов. Для 12AX7 выходное сопротивление каскада примерно в 3-5 раз меньше сопротивления анодного резистора и составляет 30...45кОм. В полевых каскадах выходное сопротивление равно сопротивлению стокового резистора. Здесь также можно пойти двумя дорогами. Первый путь – брать стоковые резисторы с номиналом, близким к выходному импедансу каскада на 12AX7 (33кОм). При этом межкаскадная коррекция переносится в полевой вариант без изменений. Но при ограничении верхней полуволны на стоке нарушается соотношение стокового, нагрузочного сопротивлений и разделительного конденсатора, что несколько изменяет спектр искажений. И, кроме того, при питании +30В начальный ток стока ПТ должен быть хотя бы более 1мА. Второй путь – использование стоковых резисторов по номиналу совпадающих с ламповой схемой, что дает весьма похожую на ламповую верхнюю полуволну. Но при этом необходимо уменьшить номиналы проходных межкаскадных резисторов на разность в импедансах полевого и триодного каскадов.

Выбор усиления каскадов

Т.к. ламповые устройства питаются от напряжений порядка +300В, а ПТ-устройства – от +30В, то общее усиление ПТ-устройства должно быть раз в 10 меньше для достижения идентичного уровня ограничения. С учетом того, что в ламповых преампах 1-й каскад работает без ограничения, а второй начинает ограничивать при сигналах на входе преампа более 50мВ, то в полевых устройствах целесообразно делать 1-й каскад с усилением 10, а следующий – с усилением 20, что даст примерно такой же выход в ограничение, что и в двух обычных ламповых каскадах. Причем, т.к. 1-й полевой каскад работает без ограничения, то его можно выполнить по схеме ОИ с резистором в нагрузке, применив ПТ с отсечкой около 2...2,5В, без ограничивающего германиевого диода. При этом мы получим перегрузочную способность по входу, аналогичную типовому каскаду на 12AX7.

Максимально возможное усиление «псевдотриодного» ПТ-каскада может быть приблизительно оценено из отношения напряжения питания и напряжения отсечки используемого ПТ:

$$K_U \max \approx \frac{U_{\text{П}}}{U_0}$$

Для выхода в ограничение, подобное ламповому оригиналу, усиление 3-го и 4-го каскадов нужно устанавливать аналогичным. При напряжении питания +30В это возможно лишь при использовании ПТ с отсечкой 0,4...0,5В. Из отечественных ПТ такой отсечкой обладает, к примеру, сборка КПС104А (два одинаковых ПТ в составе сборки). Использование сборки имеет еще один «плюс»: возможность измерения параметров лишь одного ПТ для дальнейшего расчета сразу двух каскадов. Но возможно и использование дискретных ПТ.

Схема хайгейнового ПТ-преампа (канал DRIVE LEAD)

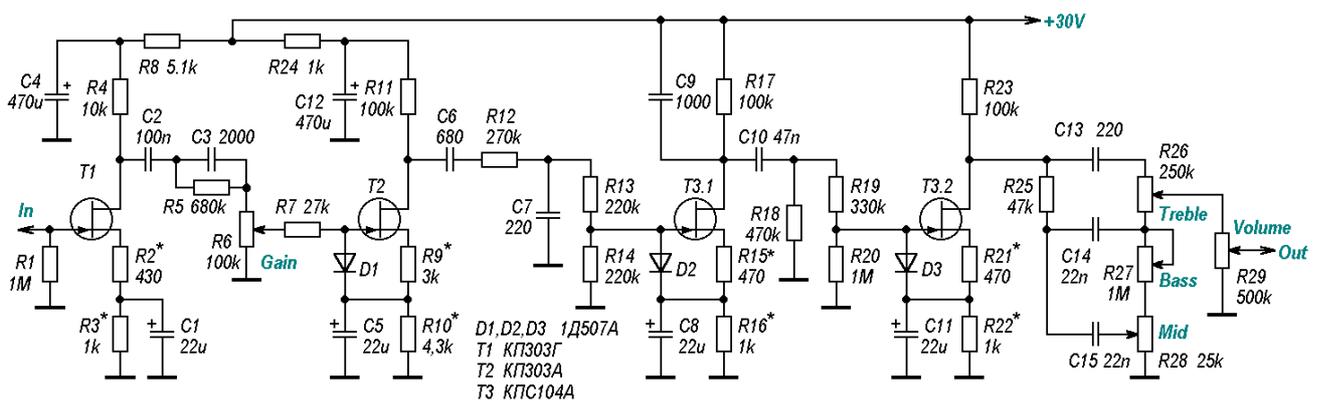


Рис.7. Итоговая схема.

1. Напряжение пульсаций источника питания должно быть не более 1мВ.
2. Пары резисторов в цепях истоков $R2/R3$, $R9/R10$, $R15/R16$ и $R21/R22$ рассчитываются для конкретных экземпляров ПТ. Для облегчения вычислений можно воспользоваться прилагаемым [EXCEL-файлом](#).
3. Схема не является окончательной и дорабатывается. Здесь она представлена в качестве примера «перевода» ламповой схемы на ПТ.

R12 уменьшен до 270кОм для компенсации разницы в выходном сопротивлении триодного и полевого 2-го каскадов с целью повторения АЧХ оригинала. Стоковый резистор 3-го каскада уменьшен до 100кОм. При этом емкость C9 осталась как и в оригинале равной 1нФ. Последний каскад имеет выходное сопротивление 100кОм

(35кОм у оригинального устройства) и, соответственно, пару связанных с этим нюансов. Во-первых, полевой вариант имеет подъем на низких частотах на 1-2дБ. Во-вторых, т.к. он нагружен на сравнительно «низкоомный» темброблок, то усиление каскада оказывается примерно на 6дБ меньше оригинала. При большом желании эти 6дБ можно получить, адекватно уменьшив R21 (и настолько же увеличив R22).

Ламповый оригинал и полевой вариант звучат немного по-разному, и это всё же слышно. Автор не добивался абсолютной идентичности АЧХ: использованные резисторы имеют допуск 10%, конденсаторы – 20%. Также свой небольшой вклад вносит и разница в выходных вольт-амперных характеристиках триодов и ПТ. Выводы относительно «похожести» звука вы можете сделать самостоятельно, прослушав прилагаемый сэмпл с двумя идентичными фрагментами, сыгранными на одном инструменте, при одинаковом относительном усилении, одинаковом положении регуляторов тембра, через один и тот же кабинет ([звуковой сэмпл](#), 331кБ)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трудно было ожидать, что подобные исследования проводились лишь автором статьи. Известны некоторые работы, в которых вопросы ПТ-эмуляции ограничения триода решать уже пытались. Примером могут служить патенты [US Patent No.05647004](#) и [US Patent No.05619578](#). Авторы патентов тоже пришли к выводу о необходимости ограничения положительной полуволны на входе и снижения усиления каскада путем введения дополнительного сопротивления в исток. Но, вместе с тем, следует отметить, что способ ограничения входного сигнала, предложенный в упомянутых патентах, не обеспечивает стабильности уровня ограничения по входу при колебаниях температуры, что приводит к весьма существенным изменениям амплитуды выходного сигнала и, соответственно, к заметному ухудшению его спектра в случае выхода нижней полуволны за допустимые пределы ограничения. В нашем же случае, уровень ограничения по входу есть сумма «неизменного» напряжения затвор-исток ПТ и падения напряжения на германиевом переходе, что почти на порядок снижает зависимость уровня ограничения каскадом от колебаний температуры. Кроме того, формирование уровня ограничения из напряжения затвор-исток и диода с малым прямым падением напряжения больше соответствует процессам, происходящим в реальном вакуумном триоде, нежели простое ограничение положительной полуволны диодом «на землю».



В заключение хочу поблагодарить всех, кто поддерживал меня, помогал в поисках и обсуждении идеи. Особая благодарность Сергею Лузану за проведенный патентный поиск, html-вариант и помощь в редакции, а также Игорю Шаеву за любезно предоставленную возможность опубликовать статью на его сайте.

© Виктор Кемпф
xbananov@mail.ru