

М. С. АРАЛОВ



ВЫПУСКНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПЕНТОДАХ И ИХ СВОЙСТВА



«ЭНЕРГИЯ»

БИБЛИОТЕКА ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ
○

Выпуск 5

М. С. АРАЛОВ

ВЫПУКЛЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ
В ПЕНТОДАХ
И ИХ СВОЙСТВА

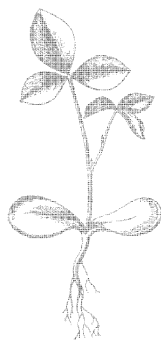


ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА

1966

ЛЕНИНГРАД



Scan AAW

Рассматриваются и сопоставляются основные свойства выпуклых характеристик в пентодах с обычными характеристиками электронных ламп вида «трех вторых» с одной нарастающей ветвью.

Показано, что выпуклые характеристики в пентодах обладают более широкими возможностями при преобразованиях электрических сигналов, чем обычные характеристики вида «трех вторых». Изложен метод получения выпуклых характеристик в пентодах, приведены их параметры и дается сравнение его с известными методами получения функционально вогнутых характеристик.

На ряде примеров показаны свойства выпуклых характеристик в пентодах, применяемых в усилителях, а также при решении задач преобразования сигналов в импульсы.

Книга рассчитана на инженерно-технических и научных работников.

Аралов Мстислав Семенович. Выпуклые характеристики в пентодах и их свойства (Б-ка по радиоэлектронике, вып. 5), издательство «Энергия», М.—Л., 112 стр. с илл.

3-3-12
340-66

Редактор *В. Н. Шахгеданов*

Техн. редактор *В. В. Зеркаленкова*

Сдано в набор 26/VII-1966 г.

Подписано в печать 14/X-1966 г.

Бумага типографская № 3 84×108¹/₃₂

Физ. печ. л. 3,5

Усл. печ. л. 5,88

Уч.-изд. л. 5,84

T-01183

Тираж 10 000 экз.

Цена 29 коп.

Зак. 2553

Издательство «Энергия», Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Глава первая. Основные свойства вольт-амперных характеристик вида степени трех вторых и выпуклых характеристик в электронных лампах	7
Глава вторая. Способы получения функциональных характеристик вогнутых и выпуклых форм	20
Глава третья. Пентод и его свойства при отрицательном потенциале на третьей сетке	32
1. Виды управления током электронов в многосеточных лампах	32
2. Управление токораспределением в пентодах при помощи тока	35
3. Выпуклые характеристики и параметры пентода в статическом режиме	40
4. Метод получения выпуклых анодно-сеточных характеристик заданной формы	48
5. Повторяемость характеристик и устойчивость работы пентодов	66
6. Влияние напряжения на второй сетке и отрицательного потенциала на третьей сетке на время пролета электронов	72
7. Сравнение свойств характеристик выпуклых форм в пентодах с характеристиками, получаемыми другими способами	74
Глава четвертая. Некоторые свойства пентодов с выпуклой формой характеристики	78
8. Свойства пентода с выпуклой характеристикой как усилителя	78
9. Основные свойства пентодов с выпуклыми характеристиками как преобразователей сигналов в импульсы	88
Литература	111

ПРЕДИСЛОВИЕ

В качестве нелинейных элементов для различных преобразований электрических сигналов обычно применяют электронные лампы или полупроводниковые приборы. Характеристики этих приборов чаще всего имеют форму, аппроксимируемую законом «трех вторых», и содержат одну нарастающую ветвь.

Такие характеристики далеко не оптимальны для различных задаваемых условий преобразования сигналов, т. е. кроме полезных составляющих, которые часто неполностью отвечают заданным условиям, на выходе таких приборов содержатся и вредные. Кроме того, при различных преобразованиях сигналов сталкиваются с необходимостью использования характеристик анодного тока как симметричного, так и несимметричного видов. Если характеристика «трех вторых» с одной нарастающей ветвью несимметрична и может быть использована для соответствующих видов преобразований, то для случаев, в которых необходимы характеристики симметричного вида, приходится применять более сложные схемы или специальные электровакуумные приборы.

Также, например, известно, что для ряда случаев преобразований, таких, как получение коротких импульсов или импульсов различных форм, импульсной модуляции и др., их решение или дает относительно низкие результаты, или вызывает необходимость построения сложных схем.

Эти обстоятельства вызывают необходимость решения задачи реализации таких форм нелинейных характеристик, при которых преобразования выполнялись бы наилучшим образом и с минимальным содержанием бесполезных составляющих или полным отсутствием их. Таким образом, следует признать, что разработка в 1904—

1908 гг. электровакуумных ламп с такого вида характеристиками была случайной в том смысле, что в то время не могли быть сформулированы задачи, решаемые при их помощи, и требования, которым должна была отвечать форма характеристики ее анодного тока.

Если в настоящее время круг вопросов, решаемый при помощи электронной лампы, достаточно определился, то те требования, которым должна отвечать анодно-сеточная характеристика, еще неполностью ясны. Вот почему по мере развития новых областей техники, как, например, счетно-решающая, вычислительная, импульсная, а также атомной физики выяснялась необходимость в иных видах вольт-амперных характеристик, что привело к появлению электровакуумных приборов, у которых характеристики анодного тока отвечали различным функциональным зависимостям. Однако такие электровакуумные приборы, а также другие методы получения заданных характеристик достаточно сложны, обладают рядом технических и эксплуатационных недостатков и поэтому не нашли распространения.

Универсальность применения ламп с характеристиками вида «трех вторых» и других подобных им приборов с одной нарастающей ветвью определяется относительной простотой их конструкции и прогрессом, достигнутым как в получении высоких электрических параметров, так и повторяемости, технологии изготовления и эксплуатационной надежности. Электровакуумные приборы с иными видами характеристик не могут быть в этом сравнимы с ними.

В этой книге рассматривается одна из иных возможных характеристик анодного тока в электронных лампах, т. е. анодно-сеточная характеристика, которая имеет выпуклую форму, содержит максимум и определяется некоторым замкнутым промежутком. Как будет показано, такая характеристика анодного тока более универсальна, обладает свойствами не только симметричной, но и несимметричной функций, что позволяет использовать ее как для двухтактных преобразований, так и для тех, которые осуществляются лампами с обычной формой характеристики. Этот вид характеристик позволяет, например, формировать более короткие импульсы, образование которых происходит из нарастающих и падающих фронтов колебаний, подводимых к лампе. Свойство формирования импульсов из отдельных фронтов дает

возможность изменять их длительность и фазовое положение при изменении амплитуды подводимых колебаний или угла отсечки.

Замкнутость функции в некотором промежутке обладает свойствами удвоения частоты колебаний, подводимых к лампе, вообще не зависящими от формы выпуклой характеристики.

В том случае, если выпуклая характеристика или область ее максимума выражает какую-либо аналитическую зависимость, она может быть использована для функциональных преобразований. Падающая и нарастающая ветви выпуклой характеристики в свою очередь обладают свойствами обычных характеристик могут быть использованы в соответствующих схемах.

Простота получения выпуклых анодно-сеточных характеристик в пентодах дает основание полагать о реальной возможности их применения, а также разработки специальных ламп.

Данная работа, насколько известно, — одна из попыток рассмотрения вопроса общих свойств характеристик электронных ламп, применяемых для преобразования сигналов, и первого изложения метода получения в пентодах анодно-сеточных характеристик выпуклых форм, а также возможного применения их. Поэтому, естественно, эта работа не может претендовать на полноту и законченность, должна рассматриваться как попытка рассмотрения изложенных здесь вопросов в первом приближении и, конечно, имеет недостатки.

Автор очень признателен С. Г. Басистому и С. А. Ноздрину за просмотр рукописи и высказанные ценные замечания, а также с благодарностью примет все предложения и критические замечания, которые следует направлять в адрес издательства «Энергия»: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

М. С. Аралов

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИДА СТЕПЕНИ ТРЕХ ВТОРЫХ И ВЫПУКЛЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ

Основными нелинейными элементами, применяемыми в современной радиоэлектронике для решения различных задач, являются электронные приборы, электронные лампы и полупроводниковые приборы, вольт-амперные характеристики которых сводятся к нескольким видам. Это характеристики, содержащие одну нарастающую ветвь, аппроксимирующиеся законом «трех вторых», в верхней своей части могут переходить в горизонтальный участок (рис. 1), а также падающие характеристики со свойствами отрицательного сопротивления. Известны также электронные приборы с характеристиками, отвечающими различным функциональным зависимостям, например таким, как парабола, синус, гипербола и др., а также с характеристиками, обладающими гистерезисно-разрывными свойствами (рис. 2).

Если первый вид характеристик наиболее распространен и применяется для линейных преобразований, например усиления, и нелинейных — детектирования, выпрямления, образования импульсов, возбуждения разрывных колебаний и др., то второй вид характеристик используется только для генерирования различного вида колебаний.

Электронные приборы с функциональными характеристиками применяются для преобразования входного напряжения в ток, изменяющийся по заданному закону. Этот вид электронных ламп из-за их конструктивной сложности и низких параметров имеет ограниченную об-

ласть применения. Лампы с разрывно-гистерезисными характеристиками применяют в амплитудных дискриминаторах, бинарных запоминающих устройствах, ключевых схемах и ограничителях.

Каждая из электронных ламп, в зависимости от вида характеристик имеет свою область применения для пре-

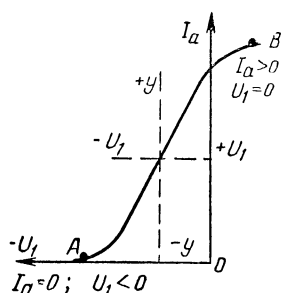


Рис. 1. Характеристика с нарастающей ветвью, аппроксимирующаяся законом $3/2$.

образования какого-либо колебания в другое, которое может быть выполнено при помощи характеристики определенного типа. Так, например, электрические колебания усиливаются путем применения ряда электронных ламп с характеристиками, содержащими одну нарастающую ветвь, тогда как для образования импульсов заданной формы, частоты повторения и длительности может потребоваться, например, характеристика с нарастающей ветвью в сочетании с электронной лампой, имеющей падающую характеристику, и т. п.

Из-за ограниченного количества видов вольт-амперных характеристик существующих электронных ламп часто приходится значительно усложнять схемы, применяя большее количество вспомогательных и иных каскадов. Так, для двухфазного детектирования или выпрямления необходимы два электронных прибора — диода или триода; фазо-широтно-импульсную модуляцию можно получать только при помощи сложной схемы, часто содержащей большое количество различных элементов и электронных приборов.

Таким образом, современное состояние электронной техники таково, что не позволяет совместить в одном электронном приборе выполнение

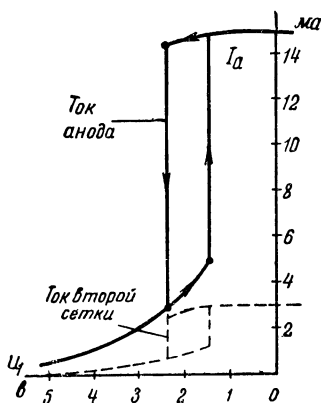


Рис. 2. Характеристика с гистерезисно-разрывными свойствами.

различных функций при преобразованиях сигналов. Для того чтобы это было возможно, вольт-амперная характеристика должна иметь такую форму, которая в совокупности содержала бы все свойства, необходимые для различных применений.

Рассмотрим вначале общие свойства электронной лампы или другого электронного прибора с характеристикой вида «трех вторых», содержащей одну нарастающую ветвь. Вообще говоря, характеристики таких электронных ламп могут содержать, кроме нарастающей ветви, и падающую. Для этого напряжение на первой сетке должно быть положительным и по своему значению приближаться или быть выше анодного (если это триод). Образование падающего участка происходит в этом случае в результате перераспределения тока эмиссии между анодом и первой сеткой, ток которой резко увеличивается, уменьшая ток анода. Пример такой характеристики приведен на рис. 3 [Л. 1].

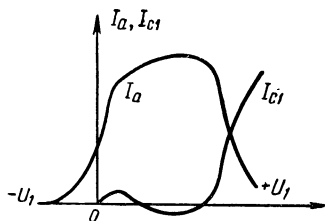


Рис. 3. Характеристика анодного тока электронной лампы с падающей ветвью.

Значительные сеточные токи, искаженная форма характеристики, возникновение вторичной эмиссии в цепи сетки, а также большая область управляющих напряжений $U_{упр}$ приводят к тому, что такие характеристики не могут быть практически использованы. Это одна из причин, ограничивающих область использования характеристик современных ламп лишь в пределах нарастающей ветви при условии, что ток анода $I_a=0$, когда $U_1<0$ (точка A), и $I_a>0$, когда $U_1\geq 0$ (точка B на рис. 1).

Характеристика $I_a=f(U_1)$ симметрична относительно оси OU_1 , несимметрична относительно оси OI_a , если начало координат соответствует условиям $f(0)=0$, т. е. перенесено в среднюю точку характеристики (см. рис. 1), и нечетна, так как $f(U_1)=-f(-U_1)$. Если в такой функции аргумент изменяет свои как положительное ($+U_1$), так и отрицательное ($-U_1$) значения, то функция $I_a=f(U_1)$ соответственно изменит свой знак, т. е. при $+U_1$ ток $I_a>0$ и при $-U_1$ ток $I_a<0$. Это свойство определяет возможность использования лампы как усилителя.

В том случае, когда аргумент U_1 изменяется от крайнего значения функции, например от значения $I_a = -f(-U_1) = 0$, только положительные изменения его будут однозначно определять величину переменной I_a , т. е. $I_a > 0$ (см. рис. 1). Это свойство функции определяет возможность таких нелинейных преобразований, как детектирование, выпрямление, преобразование частоты, образование импульсов и др. Из общих свойств этой функции видно, что если характеристика лампы содержит одну ветвь, т. е. имеются условия $I_a = 0$ при $-f(-U_1)$ и $I_a \ll I_{a.\text{макс}}$, когда $U_1 \geq 0$, нельзя получить однозначное изменение функции $I_a = f(U_1)$ при положительных и отрицательных изменениях аргумента. Таким образом, если необходимы нелинейные преобразования, при которых образуются постоянные составляющие, например детектирование или выпрямление, то характеристика должна быть несимметричной относительно оси напряжения управления $U_{упр}$ (ось OU_1) и содержать четную часть. В этом случае при обычной форме характеристики аргумент $U_{упр}$ должен изменяться, начиная с $I_a \approx 0$, когда только положительные изменения его и вызывают ток в лампе.

Если необходимо двухфазное детектирование, выпрямление или какое-либо другое преобразование, то функция должна быть, очевидно, симметричной относительно оси OI_a , для чего в настоящее время соединяют две обычные характеристики в одну при помощи схемы,

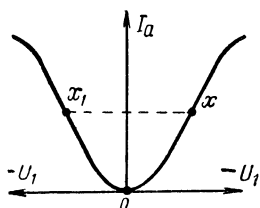


Рис. 4. Результирующая характеристика двух электронных ламп.

содержащей две электронные лампы или два диода. Результирующая характеристика такой схемы, имеющая вогнутую форму, приведена на рис. 4. Такая функция обладает свойством симметрии, которое определяется как $f(x) = f(-x)$ и характеризуется тем, что любая точка x имеет точку x_1 , отстоящую от оси OI_a на том же расстоянии, т. е. $x = x_1$.

Горизонтальный участок в анодно-сеточной характеристике вида «трех вторых» обуславливает свойство лампы как ограничителя, так как в этом режиме значение функции на выходе лампы остается неизменным при изменении аргумента.

Таковы вкратце основные свойства вольт-амперных характеристик электронных приборов обычного вида.

Одну из форм анодно-сеточной характеристики электронной лампы $I_a = f(U_1)$, которая обладает более разнообразными свойствами, чем обычные характеристики вида «трех вторых» с нарастающей ветвью, представляет собой характеристика выпуклой формы, приведенная на рис. 5.

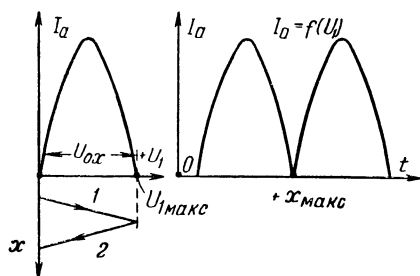


Рис. 5. Выпуклая характеристика анодного тока, которая может быть получена с обычным пентодом.

Выпуклая характеристика состоит из нарастающей ветви, падающей ветви и области максимума, соединяющей их между собой, и расположена в отрицательной области напряжений по первой (управляющей) сетке. Если нарастающая ветвь такой анодно-сеточной характеристики $I_a = f(U_1)$ обладает свойствами характеристик «трех вторых», то падающая ветвь обладает свойствами характеристики с падающим участком. Область максимума такой характеристики может отвечать функциональным зависимостям, а значения максимума определяет уровень ограничения. В целом же вся характеристика выпуклой формы обладает свойствами двухтактных схем и рядом других, которые будут рассмотрены.

В таких функциях, если положительное или отрицательное изменение аргумента $U_1(x)$ происходит, начиная с точки, соответствующей максимуму функции (если функция имеет выпуклую форму) $I_a = I_{a, макс}$ при $U_1 = 0$, то функция уменьшается и достигает в пределе нулевого значения (рис. 6): $f(U_1) = 0$, не изменяя своего знака.

Изменение аргумента за пределами $\pm U_1 > \frac{U_{0 \cdot x}}{2}$ приводит

к значению x , выходящему за область определения функции, где ей не соответствует никакое значение. Здесь $U_{0,x}$ — основание характеристики.

Если изменение аргумента начинается с условий $I_a = 0$ и $U_1 = -U_{1\text{макс}}$ (см. рис. 5), то увеличение его при-

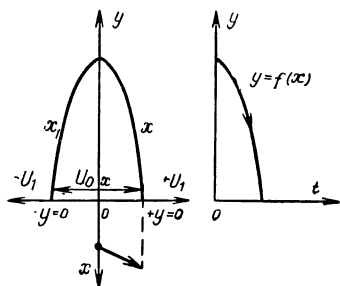


Рис. 6. Выпуклая характеристика и форма тока при рабочей точке, расположенной в максимуме I_a .

водит к возрастанию функции $I_a = f(U_1)$, которая достигает максимума, а затем, уменьшаясь, принимает нулевое значение: $f(U_1) = 0$. При обратном изменении аргумента функция описывает ту же зависимость, не изменяя своего знака. Следовательно, при прямом и обратном изменениях аргумента U_1 рассматриваемая симметричная функция $f(U_1) = f(-U_1)$ описывает 2 раза одну и ту же зависимость. Когда аргумент при-

нимает значение, большее $U_{0,x}$, функция выходит за пределы ее определения.

Таким образом, основные свойства выпуклой характеристики в электронной лампе состоят в наличии области определения, задаваемой некоторым замкнутым промежутком, отвечающим условиям $U_1 \leq 0$ при $I_a = 0$ и $U_1 = 0$ при $I_a = 0$ с максимумом анодного тока $I_a = I_{a\text{макс}}$, расположенным в данном промежутке. В отличие от этого обычные характеристики электронных ламп не имеют области, определяемой замкнутым промежутком, что представляет собой основное условие, ограничивающее использование их при преобразованиях сигналов. Из условия замкнутости вытекают следующие основные свойства выпуклой характеристики:

1. Однозначность в изменении тока анода I_a при неоднозначности изменения напряжения, подводимого к сетке лампы, если рабочая точка соответствует условию $I_a = I_{a\text{макс}}$.

2. Удвоение частоты анодного тока при однозначности изменений напряжения, приложенного к сетке лампы, если рабочая точка соответствует условиям $I_a = 0$ и $U_m \geq U_{0,x}$. Здесь U_m — амплитудное значение напряжения, подводимого к сетке лампы, а $U_{0,x}$ — «основание»

выпуклой характеристики, т. е. область управляющих напряжений.

3. Выход за пределы характеристики анодного тока, если подводимое к сетке лампы напряжение $U_m > U_{o.x}$, когда рабочая точка соответствует условию $I_a = 0$, и $U_m > \frac{U_{o.x}}{2}$, если рабочая точка соответствует $I_a = I_{a.макс}$.

Первое свойство определяет возможность использования ламп с подобной характеристикой для нелинейных преобразований двух фаз из подводимых к лампе колебаний, т. е. совмещение функций двух ламп с характеристикой, содержащей только нарастающую ветвь.

Из второго свойства вытекает умножение (удвоение) частоты, не зависящее от формы выпуклой характеристики.

Третье свойство дает возможность укорочения длительности периода колебаний T , подводимых к сетке лампы, если $U_m > U_{o.x}$ или $U_m > \frac{U_{o.x}}{2}$ с изменением его фазового положения, если происходит изменение U_m .

Из свойства выпуклой характеристики лампы преобразовывать частоту входного напряжения в удвоенную, когда $U_m \geq U_{o.x}$, вытекает возможность селекции напряжения по амплитуде.

Действительно, если рабочая точка расположена в начале нарастающей или падающей ветви характеристики, а подводимое к сетке напряжение $U_m \geq U_{o.x}$, то в анодной цепи лампы образуются колебания с двойной частотой $f_a = 2f_{подв}$. Когда амплитуда подводимых к лампе колебаний U_m равна или меньше половины «основания» характеристики, нарастающую или падающую ветвь которой полагаем линейной, то ток анода имеет частоту колебаний, соответствующую входному сигналу.

Таким образом, в первом случае используется вся область выпуклой характеристик, а во втором — только ее нарастающая или падающая ветвь.

Включение в анодную цепь лампы фильтров, настроенных на частоту входного сигнала и удвоенное значение ее, позволяет в зависимости от амплитуды подводимых колебаний выделять одну или другую частоту. Следовательно, выделение той или другой частоты будет происходить при соотношении амплитуд на управляющей сетке лампы $\frac{U_{m2}}{U_{m1}} \geq 2$, где U_{m2} — амплитуда колебаний, соответствующая двойной частоте, а U_{m1} — основной.

Сочетание второго и третьего свойств позволяет образовывать парные импульсы, форма которых зависит от формы выпуклой характеристики и формы подводимых к лампе колебаний.

Кроме рассмотренных общих свойств выпуклой характеристики, определяющихся целиком ее формой, она обладает рядом таких, которые задаются отдельными частями ее. К таким свойствам относятся: максимум анодного тока, ограничивающий амплитуду подводимых колебаний, падающий участок, позволяющий усиливать и преобразовывать колебания, подводимые к первой сетке, без изменения фазы в цепи анода. Падающий участок определяет также условия самовозбуждения, при которых не требуется изменение фазы в цепи анода по отношению к первой сетке.

Действительно, при обычной форме характеристики действие изменения напряжения сетки на ток анода всегда противоположно действию изменения напряжения на аноде, т. е. $-\Delta E_a = \Delta I_a Z_a$. Для падающего же участка выпуклой характеристики действие изменения напряжения на сетке будет совпадать с действием напряжения на аноде, т. е. $\Delta E_a = \Delta I_a Z_a$.

С другой стороны, возможность получения выпуклых характеристик, отвечающих различным функциональным зависимостям с различными параметрами, и отсутствие сеточных токов в области, соответствующей анодному току, позволяют изменять спектральный состав подводимых колебаний, производить функциональные преобразования и оптимальное умножение частоты, а также преобразовывают колебания в такую форму, которая определяется формой анодно-сеточной характеристики (если не учитывать влияние паразитных емкостей).

Нарастающая ветвь выпуклой характеристики обладает такими же свойствами, как и обычная анодно-сеточная характеристика, и может быть использована, так же как и падающая, для усиления, генерирования колебаний, детектирования и т. п.

Наряду с симметричными формами выпуклых характеристик рассмотрим свойства несимметричных характеристик, которые могут быть получены в пентодах. Особенность этих характеристик состоит в том, что крутизна падающей ветви $S_{\text{пад}}$ больше крутизны нарастающей $S_{\text{нар}}$ и соответственно $U_{\text{пад}} < U_{\text{нар}}$. Полагая такую ха-

рактическую идеализированной, представим ее в форме косоугольного треугольника, состоящего из двух подобных прямоугольных треугольников (рис. 7). Условие несимметричности такой характеристики может быть определено как $f(x) = f(-nx_1)$ при $n > 1$ и $x_1 < x$. Нетрудно видеть, что такая характеристика несимметрична как относительно оси OI_a , так и относительно оси $O U_1$.

Если несимметричность относительно оси $O I_a$ определяет четную часть характеристики, то несимметричность относительно оси $O U_1$ определяет ее нечетную часть.

Несимметричная характеристика обладает такими же основными свойствами, как и симметричная. Однако ее несимметричная форма определяет одну главную особенность, заключающуюся в том, что положительные и отрицательные изменения напряжения на сетке лампы вызывают различные изменения тока анода. Например, если такая функция (рис. 7) изменяет свое значение, начиная с точки $I_a = I_{a.макс}$, при $x_1 = -U_{1пад}$, то при $x = U_{1пад}$ ток анода $I_a = 0$, а при $-x = U_{1нар}$ ток анода $I_a > 0$. Следовательно, при положительном изменении напряжения на сетке лампы ток анода доходит до нулевого значения, а при отрицательном он имеет некоторое конечное значение $I_{a.кон}$. Когда $x_1 > U_{1пад}$, а $-x = U_{1нар}$, то как при положительном, так и при отрицательном значениях напряжения на сетке лампы ток анода будет иметь нулевое значение. Однако при положительных изменениях аргумента функция выходит за пределы области определения, если x_1 достигает значения $x_1 \geq U_{1пад}$, а при отрицательных она не выходит за эти пределы.

При изменении аргумента, начиная с точки $-x = -U_{1нар}$, если $x_1 + |x| = U_{0.x} = U_{впр}$, функция вначале возрастает, достигая максимума анодного тока, а затем, уменьшаясь, достигает нуля.

В случае, если $x_1 + |-x| > U_{0.x}$, при условии $U_1 > U_{0.x}$ функция выходит за пределы области определения.

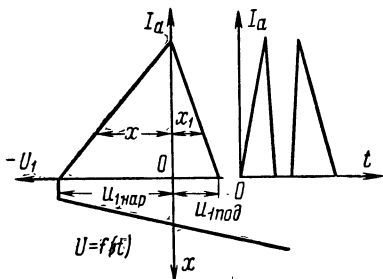


Рис. 7. Выпуклая характеристика анодного тока несимметричной формы.

Если сопоставить свойства электронных ламп с выпуклыми характеристиками со свойствами двухтактной схемы (см. рис. 4), то увидим, что та и другая четны и симметричны. Первая имеет выраженный максимум, а вторая — минимум. Если выпуклая характеристика содержит точки, определяющие ее начало в виде $I_a=0$ при $U_1<0$ и конец в виде $I_a=0$ при $U_1\geq 0$, то вогнутая характеристика их не имеет.

Каждая из ветвей вогнутой характеристики теряет свою первоначальную форму и будет содержать точку перегиба, вызванную ограничением из-за увеличения сеточных токов, если напряжение на сетке становится выше напряжения смещения. Это ограничивает использование таких характеристик обычно теми пределами, при которых сохраняется их первоначальная форма.

При выпуклой форме характеристики анодного тока, если она расположена в отрицательной области напряжения по первой сетке, токи сетки не влияют на ее форму, так как при этом ток анода отсутствует. В результате перегрузка анодной цепи лампы исключена, как бы ни было велико положительное напряжение на первой сетке.

Так как источник, создающий напряжение управления $U_{уп}(t)$ на первой сетке, обычно имеет некоторое внутреннее сопротивление, то его значение не может возрасти выше определенной величины $U_{уп.макс}$ из-за влияния возникающих токов сетки. Это условие ограничивает токи сетки, предохраняя ее от перегрузки, как и при обычной форме характеристики.

Из перечисленных основных свойств электронных ламп, определяемых выпуклой формой их анодно-сеточных характеристик, видно, что они совмещают в себе качества характеристик обычного вида, падающих, функциональных и двухтактных. Таким образом, анодно-сеточные характеристики обычных форм могут рассматриваться как частные случаи выпуклых характеристик. Кроме того, выпуклые характеристики обладают некоторыми свойствами, позволяющими решать ряд вопросов, требующих в настоящее время сложных схем и устройств. К таким вопросам, например, относятся получение фазо-шиотно-импульсной модуляции, избирательность амплитуды и др.

В заключение рассмотрим еще одно свойство электронных ламп с выпуклой анодно-сеточной характери-

стикой, имея в виду получение таких характеристик в пентодах. Это свойство определяется цепью второй (экранирующей) сетки лампы, режим работы которой отличается от обычного.

В обычных режимах работы пентода цепь второй сетки выполняет свои основные функции по электростатическому экранированию цепи первой (управляющей) сет-

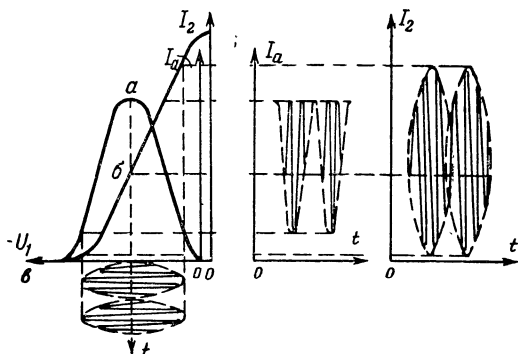


Рис. 8. Преобразование сигнала в цепи анода и второй сетки при рабочей точке, расположенной в максимуме I_a .

ки от анода. Для устранения влияния второй сетки на цепь анода напряжение на ней поддерживается постоянным как со стороны источника питания, так и по переменной составляющей. Последнее достигается шунтированием конденсатором цепи второй сетки на катод.

Как будет показано, выпуклая форма характеристики в пентоде образуется при изменении напряжения на первой сетке в результате либо совместного действия изменяющегося напряжения на аноде и второй сетке, либо изменения напряжения только на второй сетке. Поэтому на нагрузке, включенной в цепь второй сетки, под воздействием напряжения, прикладываемого к первой сетке, будет изменяться напряжение постоянной и переменной составляющей. Таким образом, в цепи второй сетки будет происходить усиление.

Если характеристика анодного тока имеет выпуклую форму, то характеристика тока второй сетки $I_2 = f(U_1)$ (как и обычная) содержит лишь одну ветвь, т. е. несимметрична относительно оси ∂I_a (рис. 8).

Следовательно, в одной лампе сочетаются характеристики двух видов: симметричная (выпуклая) и несимметричная, что дает возможность одновременно производить над подводимым к лампе колебанием два различных преобразования. При этом токи анода и второй сетки практически начинаются одновременно при некотором

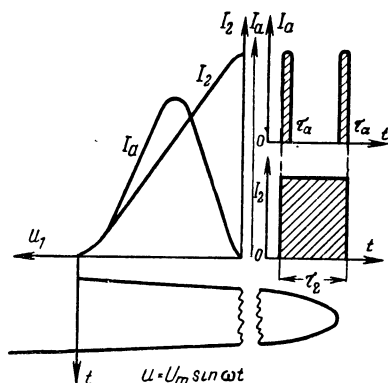


Рис. 9. Преобразование сигнала в цепи анода и второй сетки при рабочей точке, расположенной в начале нарастающей ветви.

но-сеточной характеристики и характеристики тока второй сетки при условии, что $U_{\text{упр}} = U_{0, \text{х}}$, то в анодной цепи возникнут выпрямленные колебания двойной частоты, тогда как в цепи второй сетки удвоения частоты не произойдет (рис. 9).

Когда выпуклая характеристика отвечает какой-либо функциональной зависимости, ток в анодной цепи изменяется по заданному закону, а в цепи второй сетки — нет. Для случая использования падающей ветви усиленные колебания в анодной цепи не изменяют своей фазы по отношению к напряжению на первой сетке, тогда как в цепи второй сетки фаза изменится на 180° . Таким образом, фаза напряжения на нагрузке в цепи второй сетки всегда будет противоположна фазе напряжения анодной цепи на падающем участке характеристики.

Одновременное воздействие в одной лампе на две цепи с различными характеристиками позволяет также свести к минимуму временные расхождения между преобразованными сигналами на выходе пентода.

отрицательном напряжении на первой сетке. Так, например, при расположении рабочей точки в максимуме анодного тока характеристика четная и в анодной цепи может быть получено двухполупериодное детектирование или выпрямление. В цепи же второй сетки будет использоваться нечетная составляющая характеристики и будет получаться усиление.

Если рабочая точка соответствует началу нарастающей ветви анод-

При обычном режиме работы пентода цепи анода и второй сетки имеют характеристики тока одинаковой формы и их реакция на подводимое к лампе колебание будет одинаковой.

В заключение сравним возможности пентода в режимах выпуклых и обычных характеристик.

В режиме выпуклой характеристики	В обычном режиме
Усиление с изменением фазы в цепи анода	Возможно
Усиление без изменения фазы в цепи анода	Невозможно
Самовозбуждение с условием изменения фазы в цепи анода	Возможно
Самовозбуждение без изменения фазы в цепи анода	Невозможно
Однополупериодное детектирование, преобразование частоты и выпрямление	Возможно
Двухполупериодное детектирование, преобразование частоты и выпрямление	Невозможно
Удвоение частоты	Невозможно
Ограничение амплитуды	Возможно
Укорочение периода	Возможно
Изменение фазового положения импульсов	Невозможно
Формирование импульсов различной формы	Невозможно
Функциональные преобразования, определяемые заданной формой характеристики	Невозможно
Умножение частоты	Возможно
Оптимальное умножение частоты	Невозможно
Отсутствие перегрузки в цепи анода	Невозможно
Различное действие на ток анода отрицательных и положительных изменений напряжения на сетке лампы	Невозможно
Два одновременных различных преобразования подводимого к сетке лампы сигнала с использованием цепей анода и второй сетки	Невозможно

ГЛАВА ВТОРАЯ

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОГНУТЫХ И ВЫПУКЛЫХ ФОРМ

Рассмотрев основные свойства электронных ламп с обычными анодно-сеточными характеристиками вида «трех вторых» с одной нарастающей ветвью, а также характеристик выпуклых форм, определим возможность получения последних в существующих лампах.

Изготовление ламп с вольт-амперными характеристиками различных форм достаточно сложно. В этом заключается причина того, что такие лампы не нашли в настоящее время широкого распространения.

Можно указать на ряд способов получения функциональных выпукло-вогнутых характеристик при помощи электронных приборов, которые используют такие методы, при которых их форма не зависит от действующих напряжений на электродах, не связанных с цепью управления. Это лампы, у которых форма характеристики определяется их конструкцией (например, лампа QK-329 фирмы Raytheon [Л. 2] типа форматрон [Л. 3], лампы со специальными конструкциями отдельных электродов, например сеток [Л. 4]. Можно указать также на получение функциональных зависимостей методом управления токораспределением в обычных многосеточных электронных лампах.

Известно большое количество способов получения заданных характеристик в электронных лампах, но все их можно разделить на три основные группы: схемные приборы с использованием обычных электронных приборов, применение специальных ламп сложной конструкции, создающих заданную форму характеристики, и применение электроннолучевых трубок со специальными экранами — масками.

Первый способ — схемный, основан на использовании электронных ламп или полупроводниковых приборов существующих конструкций. Перестраивая внешние элементы схемы или используя различные схемы включения электронных ламп, можно воспроизводить в одном и том же устройстве различные функциональные зависимости. Согласно существующей классификации этот метод от-

носится к разряду универсальных преобразователей [Л. 5].

В настоящее время схемный способ получил большое развитие и может быть в свою очередь разделен на ряд способов: многократного управления, линейно-кусочной аппроксимации на диодах, электронных пассивных трехполосников и многократного управления с применением одной или нескольких ламп.

Рассмотрим некоторые из них.

Многократное управление. Многократное управление применяют в многосеточных лампах путем одновременного воздействия управляющего напряжения на несколько электродов (сеток). При определенных функциональных связях между управляющими напряжениями вида $U_{\text{упр}} = f(U'_{\text{упр}})$ можно получать различные анодно-сеточные характеристики в лампе. Простейшим способом принципа многократного управления может служить двойное управление, рассмотренное И. Ф. Некрасовой. Этот способ использует частотопреобразовательные или смесительные лампы при подаче на две сетки управляющих напряжений, находящихся в линейной синфазной или противофазной связи. Принципиальная схема такого устройства приведена на рис. 10. Пентоды для получения этим методом функциональных характеристик по выводу И. Ф. Некрасовой непригодны.

Из приведенной схемы видно, что действие ее основано на одновременном управлении как общим током электронов первой сетки, так и распределением тока между положительными электродами третьей сеткой.

Так как управляющее напряжение на первой и третьей сетках связаны, то это дает возможность путем подбора соответствующей связи, а следовательно, и значений потенциала на третьей сетке, получать «падающий» участок и область максимума в характеристике анодного тока.

При помощи двойного (или многократного) управления могут быть получены анодно-сеточные характеристики синусоидального и параболического видов, «падающие» анодно-сеточные характеристики, несимметричные анодно-сеточные характеристики с различной крутизной на нарастающем и «падающем» участках, а также ли-неаризированные характеристики.

У несимметричных анодно-сеточных характеристик «падающий» участок не доходит до нулевого значения

анодного тока, а сами характеристики имеют искаженную форму. Пример семейства таких характеристик, полученных И. Ф. Некрасовой, для лампы 6А7, приведен на рис. 11,а, а типичная «синусная» характеристика, полученная для лампы 1А1П при изменении аргумента от 0 до π , — на рис. 11,б. Точность, с которой была получена аппроксимация «синусных» и параболических характеристик, относительно невелика и составляет 5—12%.

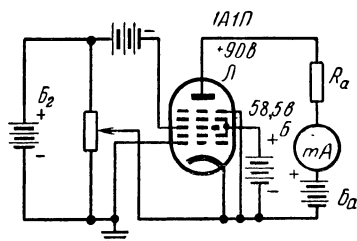


Рис. 10. Принципиальная схема способа многократного управления.

Вследствие невысокой точности соответствия характеристик требуемым закономерностям искаженной формы, а также низкой стабильности и повторяемости, зависящих в первую очередь от устойчивости работы катода, этот способ пока не нашел распространения.

Линейно-кусочная аппроксимация с использованием диодов. Получение функциональных характеристик при помощи линейно-кусочной аппроксимации основано на том, что непрерывная функция заменяется участками ломаной линии, т. е. выражением

$$y = y_0 + \sum_{b=1}^n b_1 (x - x_{\text{нач}}).$$

Количество прямолинейных участков $y = b_1 (x - x_{\text{нач}})$ берется в зависимости от требуемой точности воспроизведения заданной зависимости. Схема устройства должна представлять собой некоторый делитель напряжения с переменным коэффициентом деления, состоящим из резисторов $R_{n-1}, R_{n-2}, \dots, R_n$, образующих пороговую цепь, питаемую стабильным напряжением, и ряда вентилей (диодов) с последовательно включенными ключевыми резисторами $R'_{n-1}, R'_{n-2} \dots$. Принципиальная схема такого устройства приведена на рис. 12, где снимаемое с каждой ступени напряжение соответствует вполне определенным величинам, при которых происходит последовательное включение того или иного диода (кклю-

ча). Таким образом, происходит образование ступенчатого делителя с переменным коэффициентом.

Пороги включения диодов рассчитывают для требуемых точек сопряжения кривой с аппроксимирующими отрезками. Чем больше количество отрезков, тем выше

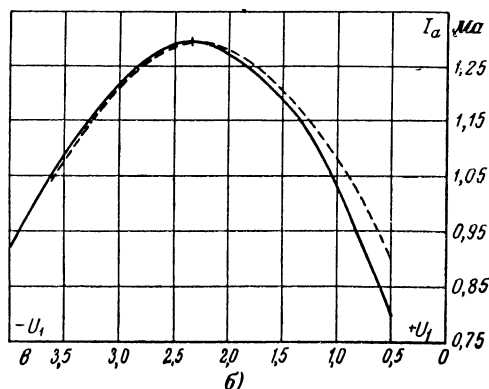
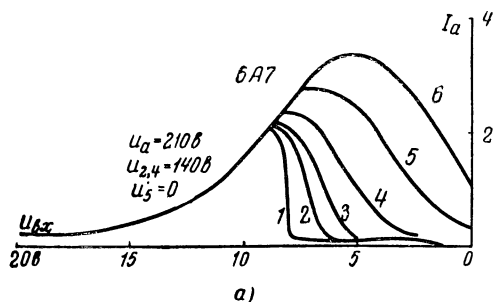


Рис. 11. Синусная и несимметричные характеристики при многократном способе управления.

может быть получена точность аппроксимации заданной кривой. Так, точность воспроизведения функции синуса в пределах изменений аргумента от 0 до 2π при 18—20 диодах может составлять около 0,4—1,2%. Известно получение этим методом синус-косинусных характеристик, характеристик, где выходное напряжение пропорционально корню квадратному, квадратичных характеристик, параболических и др. [Л. 5, 9, 10, 11]. Этот способ благодаря возможности получения относительно высоких точностей порядка десятых долей процента, а также

устойчивости в работе находит применение в различного рода электронно-моделирующих и счетно-решающих устройствах. Кроме того, он позволяет путем перестройки сравнительно быстро и просто заменять в данном приборе одну функцию другой.

Однако диодные функциональные преобразователи для получения произвольных нелинейностей (универ-

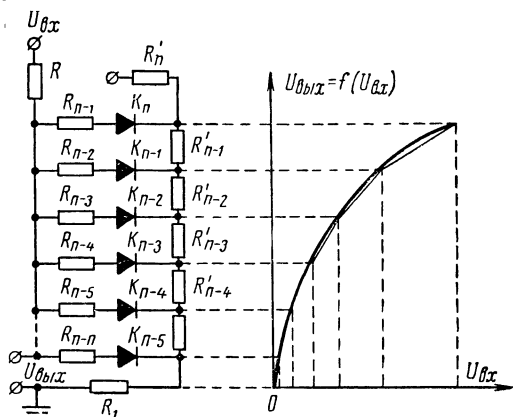


Рис. 12. Принципиальная схема способа получения линейно-кусочной аппроксимации.

сальные преобразователи) в некоторых случаях получаются чрезмерно сложными, и поэтому применение их нецелесообразно [Л. 9]. Кроме того, в качестве недостатков можно указать на наблюдающиеся скачки и колебания первой производной выходного напряжения при напряжениях, соответствующих переходному от одного линейного участка к другому, на невысокую точность воспроизведения кривых с большой крутизной [Л. 12], а также на ограниченные возможности получения большого входного сопротивления.

Электронные пассивные трехполюсники. Электронный трехполюсник определяется как элемент схемы (содержащий электронные лампы и имеющий три наружных вывода), подчиняющийся первому закону Кирхгофа и описываемый двумя функциями двух аргументов:

$$I_1 = f_1(U_1, U_2) \text{ и } I_2 = f_2(U_1, U_2),$$

где U_1 и U_2 — межполюсные напряжения, а I_1 и I_2 — токи двух полюсов.

Способ пассивных трехполюсников подробно рассмотрен в [Л. 13], где показано, что, пользуясь различными схемами включения одних только ламп, можно получить некоторые виды нелинейных характеристик. Способы включения ламп при этом отличаются от обычных и любой полюс в трехполюснике может быть анодом, сеткой или катодом (подразумеваем под этим электрод с нулевым потенциалом).

В схемах, в которых управляющее напряжение подается на сетки ламп, для получения соответствующих характеристик приходится подавать на них положительные напряжения по отношению к катоду, что вызывает расход мощности источника управляющего напряжения и приводит к уменьшению входного сопротивления данного устройства. При использовании же в качестве управляющего электрода анода требуются большие

напряжения управления порядка нескольких сотен вольт.

И. П. Степаненко были получены характеристики в виде параболы, направленные выпуклостью вниз, а также «несимметричного» вида с выпуклостью, направленной вверх, с «падающей» ветвью, не достигающей до нулевого значения анодного тока и имеющей искаженную форму (рис. 13). Были также получены характеристики линейризованного вида с различными параметрами.

Для характеристик, показанных на рис. 13 и 14, в статическом режиме были получены следующие данные: перепады токов выхода $\Delta I_{\text{вых}}$, соответствующие областям от максимума кривой до ее минимума порядка 13—18 мА и крутизна от 0,6 до 2 мА/в при напряжениях управления 8—22 в.

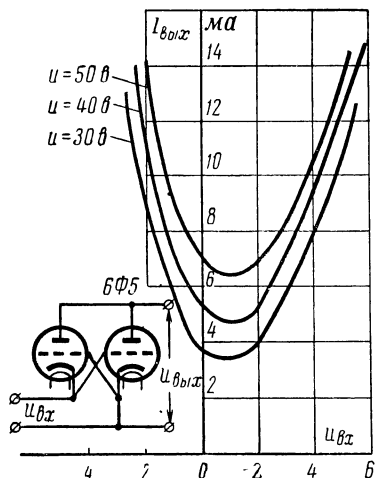


Рис. 13. Вогнутые вольт-амперные характеристики (вида параболы); Способ пассивных трехполюсников при различных напряжениях питания.

Точность воспроизведения кривых по отношению к эмпирическим формулам, по данным И. П. Степаненко, составляет в зависимости от типа характеристики от 3 до 13%. Приведенным здесь характеристикам свойственны точности аппроксимации в пределах 6—8%.

Способ электронных пассивных трехполюсников из-за относительно низких точностей аппроксимации, низкого входного сопротивления, а также трудностей получения заданного вида характеристик в настоящее время не нашел распространения.

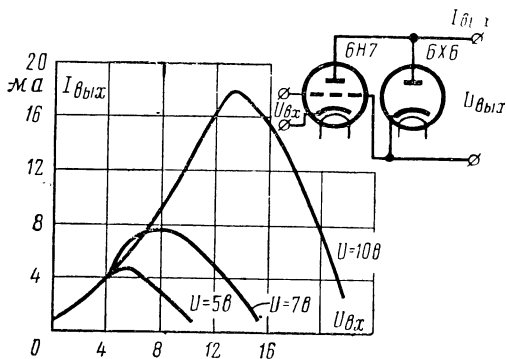


Рис. 14. Несимметричные вольт-амперные характеристики. Способ пассивных трехполюсников.

Второй способ применения специальных ламп, сложная конструкция которых определяет только одну наперед заданную характеристику. Они относятся к классу ламп, названных форматронами [Лабин Л. 3]. Форматронные лампы разделяются на два типа: лампы с масками, перехватывающими электронный пучок, и лампы со вторичной эмиссией электронов.

Лампы с маской. В лампах с масками управление электронным потоком, сфокусированным в плоскость или круглый пучок, происходит при помощи поперечных электрических полей. Если расположить на пути такого пучка диафрагму или электрод, имеющие круглое отверстие или вырез фигурной формы, то в зависимости от положения пучка будет перехватываться та или другая его часть. Этот электрод обычно располагают между электронным прожектором и анодом, задавая таким образом при перемещении пучка закон изменения тока, ко-

торый определяется формой выреза электрода, называемого «маской». Такой электровакуумный прибор, схематически показанный на рис. 15, дает возможность получать любую наперед заданную форму вольт-амперной характеристики. Представителем этого типа приборов могут служить: лампы, имеющие характеристику в виде параболы, выпуклостью направленные вниз, QK-256 и QK-329, разработанные в США фирмой Raytheon и описанные Soltes'ом [Л. 2]; лампа, дающая ступенчатую форму выходного тока, разработанная в США, и др. [Л. 14].

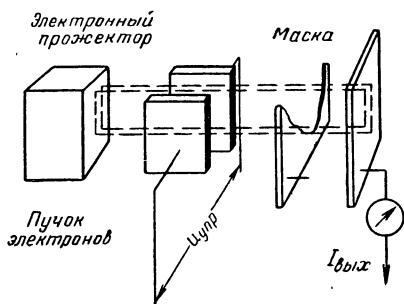


Рис. 15. Схема прибора с маской.

Е. Herold'ом и G. Mueller'ом были разработаны высокочастотные смесительные лампы с тремя видами характеристик: симметричной с выпуклостью, направленной вверх, симметричной с выпуклостью, направленной вниз, и характеристикой обычного вида (рис. 16). Эти лампы имеют малую входную емкость $C_{вх}$ (1,0—1,5 пф), высокую эффективность управления: $S_a/I_a=3,5 \text{ в}^{-1}$, разделение цепей сигнала и гетеродина и могут работать в диапазоне частот до 700—750 МГц [Л. 15]. Для симметричной характеристики с выпуклостью, направленной вниз, лампа имеет улучшенное отношение сигнала к шуму (рис. 16).

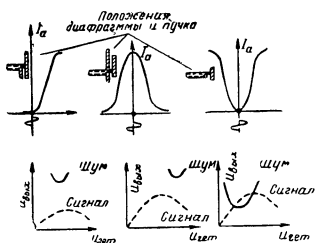


Рис. 16. Характеристики лампы Герольда и Мюллера.

Однако, несмотря на указанные положительные свойства, эти лампы вследствие большой конструктивной сложности и высоких требований к механической точности монтажа не вышли из стадии лабораторных разработок и об их практическом применении в настоящее время ничего неизвестно.

Для иллюстрации сложности конструкции этих типов смесительных ламп можно указать, что их электронно-

оптическая система формирует плоский пучок электронов шириной 6 и толщиной всего 10 *мк*. Расположенная вблизи анода проволока, при помощи которой перехватывается поток электронов и получается симметричная характеристика, направленная выпуклостью вниз, имеет диаметр 10 *мк*.

Однородность плотности электронов в пучке в пределах его активной части представляет собой для этих типов ламп одно из главных условий. От него зависят в значительной степени форма и точность соответствия характеристики той или иной функциональной зависимости. Большое же влияние пространственных зарядов электронов на формирование узкого и однородного пучка приводит к ограничению допустимого анодного тока. Для ослабления этого эффекта, а также для уменьшения влияния неоднородности эмиттера электронов и ряда других вредных влияний Soltes усложнил конструкцию лампы QK-329. Он применил катод цилиндрической формы с многократными параболической формы диафрагмами и этим довел анодный ток в лампах до 0,7 *ма*, а эффективность управления S_a/I_a до 0,07 *в*⁻¹ при $U_{\text{экв. шума}} = 0,374$ *в*. Лампа QK-329, судя по опубликованным данным, — наиболее отработанный и совершенный прибор подобного типа. Такая лампа находит применение в качестве функционального умножителя в электронных машинах непрерывного действия.

Точность воспроизведения этой лампой квадратичного закона в пределах напряжения управления (40 *в* пик.) составляет 1% и выше. В пределах напряжения управления, указанных фирмой, т. е. $U_{\text{вх. пик.}} = 65$ *в* и $U_{\text{вых}} = 55$ *в* пик., погрешность достигает 3,5%, а ток в аноде 0,7 *ма*. В статическом режиме $I_{a.\text{макс}} = 0,55$ *ма* при нагрузке в аноде 100 *ком*.

К положительным качествам подобных приборов отнести: возможность получения любой формы характеристики, относительно высокую точность воспроизведения закона, описываемого характеристикой, от нескольких десятых до 3—5%, низкую входную емкость (1,2—3,5 *пф*) и широкий частотный диапазон, в котором может работать лампа (например, в лампах Herold'a и Mueller'a).

К недостаткам этих ламп относятся: малая крутизна анодной характеристики (0,001—0,2 *ма/в*); низкая эффективность управления $S_a/I_a \approx 0,07—0,1$ *в*⁻¹ (кроме

ламп Herold'a и Mueller'a) при высоких управляющих напряжениях (12—65 в и более), низкий коэффициент усиления, сложная конструкция и высокие требования к точности изготовления.

Использование вторичной эмиссии. В этих лампах для получения функциональных характеристик используют свойство вторичной эмиссии электронов изменять свое значение при изменении угла падения первичных электронов. Мюллер [Л. 16] и др. [Л. 17], занимавшиеся подробным исследованием этого вопроса, установили, что изменение вторичной эмиссии в основном определяется природой эмиттера (отражателя) и подчиняется определенному закону, который воспроизводится с такой же точностью, как вторичная эмиссия вообще. Этот закон заключается в том, что вторичная эмиссия электронов с металла увеличивается при увеличении угла падения первичного потока электронов.

При этом было установлено, что изменение вторичной эмиссии достаточно точно подчиняется закону $R_{\Theta} = R_0 e^{p(1 - \cos \Theta)}$, где R_{Θ} — вторичная эмиссия при угле падения электронов Θ ; R_0 — то же при нормальном угле падения электронов, а p — коэффициент вторичной эмиссии, зависящий от материала эмиттера.

Таким образом, если применить той или иной формы электрод, служащий эмиттером вторичных электронов, то можно получить необходимый закон изменения тока на выходе прибора. Эти свойства вторично-электронной эмиссии и были использованы S. Smith [Л. 18] в приборе, названном подобно телевизионным трубкам «монокоп». На рис. 17 показана принципиальная схема действия этого прибора, имеющего характеристику в виде диаграммы направленности антенны радиолокационной станции, в котором управление электронным потоком, сформированным в узкий или плоский пучок, происходит при помощи поперечного электрического поля. Точность воспроизведения характеристики антенны в этом типе монокоскопа составляет $\pm 5\%$ (рис. 18).

Эти приборы, принцип действия их, а также возможности, которые они открывают в получении характеристик любых форм, рассмотрел E. Labin [Л. 3]. По принципу действия они относятся к специализированным преобразователям, использующим управление электронным потоком поперечными электрическими полями.

Им свойственны: низкая эффективность управления S_a/I_a порядка $0,1—0,5 \text{ в}^{-1}$, высокое напряжение на вторично-электронном эмиттере ($2\,000—4\,000 \text{ в}$), большое напряжение управления ($30—100 \text{ в}$), сложная конструкция, высокие требования

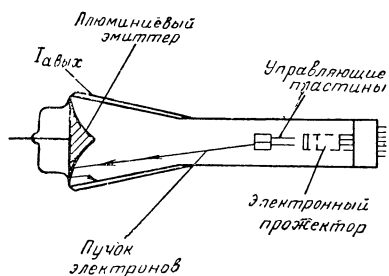


Рис. 17. Схема моноскопа.

к точности монтажа и точная обработка вторично-электронного эмиттера, поверхность которого должна приближаться к зеркальной. Точность воспроизведения закона, описываемого характеристикой находится в пределах нескольких процентов $\pm(2—5) \%$.

Известен также ряд других способов, в том числе предложенная В. Н. Жуком и А. М. Ставицким лампа, анод которой имеет форму, рассчитываемую по требуемой функциональной зависимости, а электронный луч обегает его под воздейст-

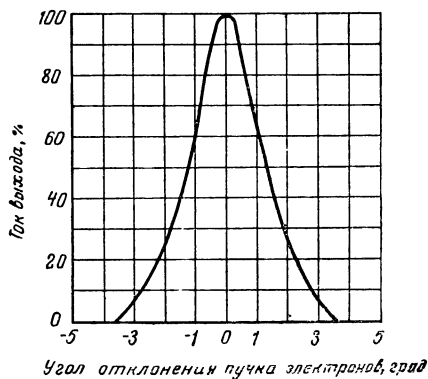


Рис. 18. Характеристика моноскопа.

вием входного напряжения. К достоинствам этих приборов следует отнести возможность получения любой наперед заданной формы характеристики.

Третий способ — применение электроннолучевых трубок — основан на том, что экрану придают свойства, которые при перемещении по нему пучка электронов

вызывают изменение тока или яркости свечения по требуемому закону. Для этого флуоресцирующий экран электроннолучевой трубки обычно заменяют материалами, имеющими различную вторично-электронную эмиссию, или на него накладывают экран-маску соответствующей формы [Л. 6, 7, 8].

Этот вид ламп относится в случае применения экрана-мишени с различными свойствами вторично-электронной эмиссии к разряду специализированных преобразователей, а в случае применения масок — к универсальным преобразователям.

Применение электроннолучевых трубок. В своей основе способ использует свойство флуоресценции экрана электроннолучевой трубки, на которую насаживают маску, воспроизводящую требующуюся зависимость изменения тока. Питая пластины горизонтальной развертки электроннолучевой трубки пилообразным напряжением, перемещают световое пятно по экрану в горизонтальной плоскости. При помощи фотоэлемента с соответствующей оптической системой регистрируется положение светового пятна на экране, которое через усилитель в виде напряжения подается на пластины вертикальной развертки.

Таким образом, перемещение светового пятна на экране в горизонтальной плоскости будет вызывать перемещение его также в вертикальной плоскости. Благодаря маске изменение тока электронного пучка в трубке будет копировать ее форму. Следовательно, используя маски различной формы, можно получить любые закономерности изменения выходного тока.

Точность воспроизведения требуемой закономерности зависит от линейности между отклоняющим напряжением, подаваемым на пластины горизонтальной развертки, и перемещением светового пятна в вертикальной плоскости. В преобразователе такого типа с применением обычного электронного осциллографа, описанного D. Sunstein'ом [Л. 6], эта точность составляет 0,5%. Принципиальная схема преобразователя приведена на рис. 19.

Из рассмотрения электронных приборов и устройств с использованием обычных электронных ламп и электроннолучевых трубок видно, что все они служат для получения вольт-амперных характеристик, предназначенных для преобразования входных сигналов в ту или

иную функциональную зависимость. Исключение составляет лишь одна разработка Herold'a и Mueller'a в США, электронная лампа которых имеет вогнутую и выпуклую характеристику анодного тока и предназначена для преобразования частоты на ультравысокой частоте.

В настоящее время отсутствуют электронные приборы с характеристикой такой формы, которая предназначалась бы для различного вида преобразований сигналов и могла бы заменить собой электронные приборы с характеристиками обычного вида.

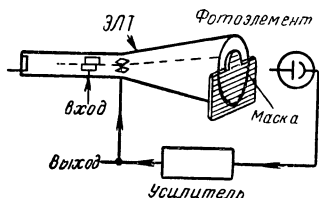


Рис. 19. Схема преобразователя с электроннолучевой трубкой.

Известные электронные приборы с функциональными характеристиками и схемные способы сложны, имеют низкие эффективность управления и коэф-

фициент усиления, плохую повторяемость, высокий уровень собственных шумов и в некоторых случаях низкое входное сопротивление. Все это не дает возможности эффективно применять их в качестве преобразователей сигналов в радиоэлектронике и заменить электронные лампы с обычными характеристиками.

Учитывая свойства, которыми обладают электронные приборы с выпуклыми характеристиками, представляет интерес рассмотреть возможность получения их в обычных многосеточных электронных лампах-пентодах.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПЕНТОД И ЕГО СВОЙСТВА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ НА ТРЕТЬЕЙ СЕТКЕ

1. ВИДЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОКОМ ЭЛЕКТРОНОВ В МНОГОСЕТОЧНЫХ ЛАМПАХ

Как известно, в электронных лампах управление движением электронов происходит при помощи сеток. При этом используют управление общим током и уп-

равление распределением тока между положительными электродами [Л. 19]. Для управления общим током и его распределением пользуются методом изменения напряжения на сетках, который определяет ток, проходящий через управляющий электрод, а следовательно, и изменение тока на других электродах лампы.

В зависимости от напряжения, приложенного к той или иной сетке, осуществляется управление вида $I_0 = f(U_{упр})$ общим током, либо $I_a/I_2 = f(U_{упр})$, т. е. токораспределением, где I_0 — ток общий (ток катода); I_a — ток анода, а I_2 — ток второго электрода.

В электронных лампах управление общим током происходит обычно первой управляющей сеткой, а для управления токораспределением необходимо, чтобы лампа имела еще не менее двух сеток, одна из которых служит для управления электронным потоком, а другая, как и анод, служит приемником электронов. Для последнего случая управления могут быть применены тетрод, пентод, частотно-преобразовательные или смесительные лампы.

В случае управления общим током отрицательное напряжение на первой сетке, если напряжение на других электродах примерно постоянно, определяет ток, проходящий через лампу, плотность пространственного заряда у катода и анодный ток. Пространственный заряд, понижая потенциал пространства у катода, вызывает изменение направления движения части электронов обратно к катоду, ограничивая при этом ток анода и уменьшая крутизну характеристики лампы. При таком способе управления анодно-сеточные характеристики лампы содержат нарастающую ветвь, которая в первом приближении аппроксимируется законом «трех вторых», а ее начальный участок — экспонентой. Схема включения пентода и анодно-сеточная характеристика для этого случая известны и поэтому не требуют пояснения.

Во втором случае управления (например, для пентода) отрицательное напряжение на третьей (антиднатронной) сетке может определять пространственный заряд между второй (экранирующей) и третьей сетками, вызывая перераспределение тока между анодом и второй сеткой. Форма анодно-сеточной характеристики в этом случае управления может отличаться от обычной, содержать область максимума и иметь вид, пока-

занный на рис. 20. Такая форма характеристики образуется, например, в частотно-преобразующих лампах в условиях, когда третья сетка имеет отрицательный потенциал и часть электронов изменяет направление своего движения. Это уменьшает ток анода, вызывая образование области максимума в характеристике анодного тока, нарушая тем самым нормальную работу приемного устройства [Л. 20].

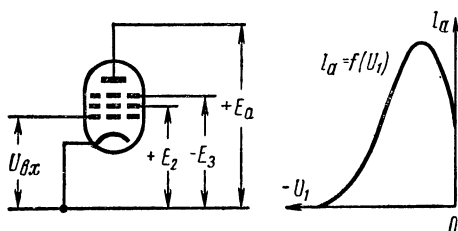


Рис. 20. Включение пентода и его характеристика при отрицательном потенциале на третьей сетке.

Появление максимума анодного тока и падающей ветви объясняется образованием эффективного катода перед третьей сеткой. Поэтому в таких лампах обычно выбирают режим работы, соответствующий только нарастающему участку характеристики.

Используя метод одновременного управления общим током электронов (по первой сетке) и распределением тока между положительными электродами при помощи третьей сетки, И. Ф. Некрасова получила в частотно-преобразующих и смесительных лампах некоторые виды функциональных характеристик выпуклой формы без образования между электродами эффективного катода.

Перераспределение тока между электродами лампы дает возможность получать также отрицательное сопротивление. Примерами этого могут служить схемы типа транзитрон и им подобные [Л. 20], в которых вторая и третья сетки пентода соединены так, что всякое изменение напряжения E_2 передается на третью сетку, вызывая такое перераспределение тока, при котором в цепи второй сетки образуется падающий участок тока, проявляющий свойства отрицательного сопротивления.

Приведенные примеры показывают, что применяемые в настоящее время в электронных лампах два вида управления сопровождаются перераспределением тока вызываемым, с одной стороны, явлениями перехвата тока положительными электродами, а, с другой — изменениями направления движения электронов, обусловленными образованием областей с пониженным потенциалом. В зависимости от того, в какой части лампы происходят эти явления, лампа может менять свои свойства и характеристики.

Современные многосеточные лампы обычно конструируют так, а режим работы задается таким, чтобы область с пониженным потенциалом пространства между отдельными ее электродами не образовывалась и не оказывала заметного влияния на их характеристики и параметры. При этом не имеются в виду лучевые тетроды, у которых для подавления вторичной эмиссии электронов с анода за второй сеткой специально образуется область с пониженным потенциалом, а также лампы с катодной сеткой.

2. УПРАВЛЕНИЕ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В ПЕНТОДАХ ПРИ ПОМОЩИ ТОКА

Пользуясь свойствами областей с пониженным потенциалом пространства изменять направление движения электронов и тем самым влиять на токораспределение, в пентодах можно получать анодно-сеточные характеристики выпуклых форм, в том числе отвечающие различным функциональным зависимостям. Для этого, как показали исследования, между второй и третьей сетками пентода должна быть создана область пониженного потенциала, т. е. образован соответствующей плотности пространственный заряд [Л. 21].

Образование пространственного заряда между этими двумя сетками может быть вызвано, если на третью сетку задать некоторый отрицательный потенциал по отношению к катоду. Тогда электроны, ускоренные положительным потенциалом на второй сетке, попадая в тормозящее поле третьей сетки, уменьшают свои скорости, образуя при этом значительный пространственный заряд, вызывающий перераспределение тока между электродами.

Плотность пространственного заряда ρ , как известно, зависит от плотности тока i и скорости электронов v и определяется отношением $\rho = i/v$. С другой стороны, согласно уравнению Пуассона $\nabla^2 U = -4\pi\rho$ и, следовательно, $\nabla^2 U = -4\pi \frac{i}{v}$.

Таким образом, плотность пространственного заряда ρ , задаваемая плотностью тока i и скоростью движения электронов v , определяет распределение и величину потенциала в пространстве, где он образуется, если, конечно, другие условия при этом не меняются. Следовательно, в рассматриваемом случае пентода, если напряжения на аноде и третьей сетке постоянны, условие токопрохождения через пространство вторая — третья сетка будет зависеть от двух причин. Во-первых, от тока I_{2-3} , поступающего в междусеточную область, и, во-вторых, от скорости электронов v , задаваемой напряжением на второй сетке.

Ток I_{2-3} , поступающий в междусеточное пространство, если напряжение на второй сетке постоянно, будет определяться напряжением на первой сетке, т. е. током катода, протекающим между электродами. Следовательно, этот метод управления токораспределением в отличие от приведенных выше может рассматриваться как метод управления токораспределением при помощи плотности тока.

Так как при работе лампы напряжение на первой сетке U_1 , а следовательно, и ток катода $I_{\text{кат}}$ могут изменяться в широких пределах, то на токораспределение в лампе основное воздействие будет оказывать плотность тока. С другой стороны, как будет показано ниже, изменяя напряжения на второй сетке и аноде, также можно влиять на токораспределение, а тем самым и на форму анодно-сеточной характеристики.

Характеристики анодного тока, которые образуются при изменении тока катода в лампе в соответствии со схемой (рис. 20), приведены на рис. 21. Эта характеристика имеет выпуклую форму и получена в пентоде 6Ж4 при постоянном отрицательном потенциале на третьей сетке и постоянных напряжениях на аноде и второй сетке. Напряжение на первой сетке равно нулю. По оси ординат отложен ток анода относительно анодного тока в точке максимума, т. е. $n = I_a/I_{a.\text{макс}}$, а по оси абсцисс — ток в лампе $I_{\text{кат}} =$

$=I_a + I_2$, который изменяется при помощи изменения напряжения накала.

Таким образом, сохраняя в лампе неизменными все условия, кроме тока эмиссии, можно управлять токо-распределением между анодом и второй сеткой, получая при этом характеристики выпуклых форм. Подобного же вида характеристика образуется и в случае, если ток в лампе изменяется при помощи напряжения на первой сетке. Эта характеристика, полученная для того же пентода 6Ж4 при постоянных напряжениях накала, анода, второй и третьей сеток, и приведена на рис. 21. Для сравнения по оси абсцисс и ординат этой характеристики отложены те же величины, что и для характеристики $n = I_a / I_{a.\text{макс}} = f(U_{\text{нак}})$. Сопоставление этих характеристик показывает, что в обоих случаях имеется одна и та же зависимость в изменении анодного тока и между ними наблюдается лишь различие в значениях и положении максимума анодного тока.

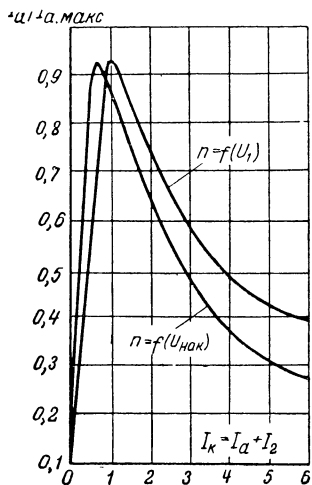


Рис. 21. Форма характеристики анодного тока пентода в случае управления плотностью тока.

В характеристике $I_a / I_{a.\text{макс}} = f(U_{\text{нак}})$ максимум наступает при меньшем токе катода, чем в случае характеристики, полученной при помощи изменения напряжения на первой сетке. Это объясняется тем, что на образование пространственного заряда, помимо тока, оказывают влияние и электронно-оптические свойства лампы.

Уолкер и Родда [Л. 22, 23], исследовавшие условия образования пространственного заряда между анодом и второй сеткой в лучевых тетрадах, установили, что электроны, отклоняющиеся от нормали, при прохождении второй сетки оказывают заметное действие на его плотность. При прохождении витков сетки отклонение электронов от нормали определяется как суммарный результат отклонения первой и второй сетками. Поэтому чем больше электроны отклоняются первой и второй сетками, под тем большим углом они входят в простран-

ство вторая — третья сетки и тем больше должны влиять на токораспределение. Родда также было установлено, что наибольшее отклонение электронов в тетрадах происходит тогда, когда первая сетка имеет нулевой потенциал [Л. 23]. Таким образом, можно предполагать, что этот фактор и определяет различие в характеристиках, показанных на рис. 21.

В пентодах по сравнению с лучевым и обычным тетрадами должны происходить большие угловые отклонения электронов, движущихся в пространстве за второй сеткой. Это объясняется тем, что в пространстве вторая сетка — анод расположена третья сетка (часто имеющая нулевой, а в рассматриваемом случае — отрицательный потенциал), вызывающая значительное искажение в однородности поля, через которое движутся электроны. Поэтому токи, обусловленные отклоняющимися от нормали электронами и влиянием их на пространственный заряд в пентоде, должны быть большими, чем это указывается Родда для лучевых ламп.

По мнению Булла [Л. 24], поле сетки, образующееся в условиях значительного отрицательного потенциала на третьей сетке, должно разделять электронный поток на большое число отдельных и отчасти независимых друг от друга частей, где по аналогии с потоком жидкости можно предполагать возникновение областей турбулентности. В этом предположении турбулентность тождественна возмущениям в условиях, когда электроны возле минимума потенциала имеют низкие скорости, что вызывает значительное искривление траекторий и возврат электронов, способствуя увеличению пространственного заряда. Это, в частности, видимо, и объясняет то, что в характеристике анодного тока пентода в рассматриваемом режиме его работы не возникают разрывы и гистерезисные явления. Такие явления иногда наблюдаются там, где происходит образование областей с пониженными потенциалами в условиях относительно однородных полей, например в лучевых тетрадах [Л. 25].

Зависимость пространственного заряда от тока, протекающего в пространстве вторая — третья сетки, и напряжений E_a и E_2 дает возможность влиять на токораспределение не только при помощи напряжения на первой сетке и тока катода, но также при помощи напряжений на аноде и второй сетке. Действительно, из условия обращения в нуль кинетической энергии элект-

тронов в плоскости минимума потенциала в пространстве вторая — третья сетки, определяемой как

$$\frac{mv^2}{2} + e(U_2 - U_{\text{мин}}) = 0$$

(для однородного поля), видно, что ток анода при этом может быть равен нулю. Здесь v — скорость электронов без учета разброса скоростей; e — заряд электрона; $U_{\text{мин}}$ — минимум потенциала в междусеточном пространстве; U_2 — потенциал на второй сетке.

Таким образом, при изменении напряжения на второй сетке, от которого зависит скорость электронов (и ток I_{2-3} в пространстве вторая — третья сетки), а следовательно, и значение $U_{\text{мин}}$ в междусеточном пространстве, условие обращения в нуль кинетической энергии может нарушаться, вследствие чего будет изменяться ток анода и второй сетки. С другой стороны, напряжение на аноде влияет на действующий отрицательный потенциал третьей сетки, т. е. на ее тормозящее действие, и тем самым на состояние пространственного заряда. Следовательно, напряжение на аноде также воздействует на условия прохождения тока I_{2-3} через междусеточное пространство, т. е. на токораспределение между анодом и второй сеткой.

Рассмотренные основные свойства пентода, возникшие в результате тормозящего действия третьей сетки, позволяют схематически описать его работу. Второй пространственный заряд, образующийся между второй и третьей сетками, разделяет лампу на две части: первую, эквивалентную триоду, которая содержит подогревный катод, первую и вторую сетки (вторая сетка в этом эквивалентном триоде выполняет функцию анода) вторую, которая содержит второй пространственный заряд, эквивалентный катоду (эффективный катод) и анод. Эту часть можно рассматривать как диод. Работа второго катода зависит от условий прохождения электронов через вторую сетку, которую условно можно представить для этой части лампы как подогреватель, от температуры которого зависит эмиссия эффективного катода, т. е. состояние второго пространственного заряда. В данном случае функцию температуры выполняют действующее напряжение на первой сетке, определяющее ток, который проходит ко второй сетке, и напряжение на второй сетке. Третья сетка, имеющая

отрицательный потенциал, по своему действию на поток электронов может рассматриваться как пространственный заряд. От значения отрицательного потенциала на ней и напряжения на аноде, так же как и в обычном диоде, будет зависеть ток, идущий к аноду.

3. ВЫПУКЛЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЕНТОДА В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

На рис. 22, 23 и 24 приведены типичные семейства анодно-сеточных характеристик пентода 6Ж4 при постоянном отрицательном потенциале на третьей сетке,

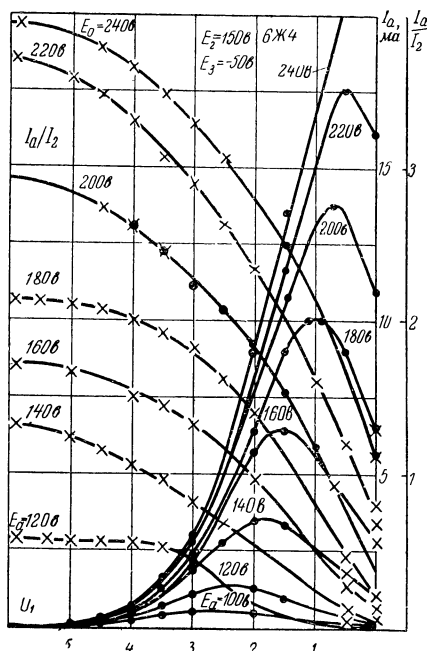


Рис. 22. Семейство выпуклых анодно-сеточных характеристик при постоянном E_2 и различных E_a .

которые, кроме нарастающих ветвей, содержат области максимума и падающие участки с отрицательной крутизной. Принципиальная схема, при помощи которой

получены эти семейства характеристик, приведена на рис. 25. Из этих рисунков видно, что образование выпуклых характеристик происходит в широких пределах изменений напряжения на аноде, первой, второй и третьей сетках, т. е. при различных плотностях тока

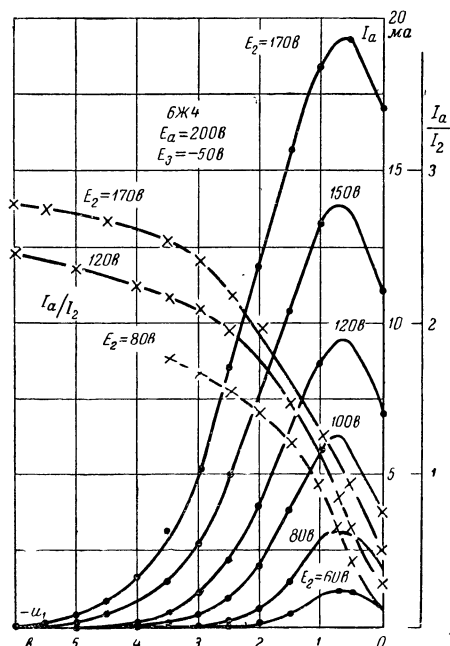


Рис. 23. Семейство выпуклых анодно-сеточных характеристик при постоянном E_a и различных E_2 .

I_{2-3} , протекающего через пространство вторая — третья сетки.

На рис. 22 приведены зависимости $I_a = f(U_1)$ для различных значений E_a , на рис. 23 — зависимости $I_a = f(U_1)$ для различных значений E_2 и на рис. 24 дано семейство характеристик $I_a = f(U_1)$ для различных значений отрицательного напряжения на третьей сетке. Семейства анодно-сеточных характеристик показывают, что на форму, особенно на область максимума, значительно влияет напряжение на аноде, второй и третьей сетках. Так, уменьшение напряжения на аноде, второй и третьей сетках изменяет форму области максимума, переме-

щая его падающую ветвь влево. При этом ток анода в максимуме и крутизна характеристики анодного тока падающих и нарастающих ветвей уменьшаются. При некоторых значениях напряжения на аноде и второй

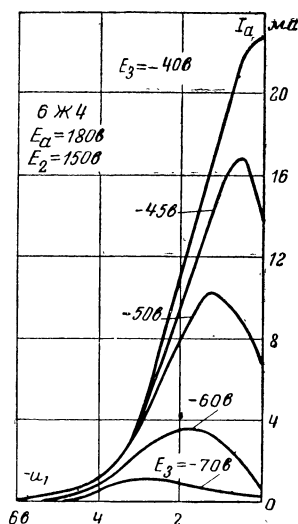


Рис. 24. Семейство выпуклых характеристик при различных E_3 .

сетке область максимума имеет симметричную форму, т. е. крутизна нарастающей ветви примерно равна крутизне падающей ветви.

На падающих участках анодно-сеточной характеристики действие пространственного заряда между сетками приводит к тому, что изменение напряжений питания E_a , E_2 и E_3 перемещает характеристики в сторону, противоположную аналогичным перемещениям при работе лампы в обычном режиме. На нарастающих же участках анодно-сеточные характеристики перемещаются при уменьшении напряжений E_a , E_2 и E_3 , как обычно, т. е. вправо, в область меньших напряжений на первой сетке.

Перемещение влево падающей ветви при уменьшении напряжения питания обуславливается тем, что пространственный заряд ρ_{2-3} соответствующей плотности образуется при меньшем токе I_{2-3} . Действительно, чем ниже напряжения E_a и E_2 и выше отрицательное напряжение E_3 , тем меньше скорость движения электронов v_{2-3} в междусеточном пространстве и тем выше должна быть плотность пространственного заряда ρ_{2-3} . Следовательно, падающая ветвь будет образовываться при меньших плотностях тока I_{2-3} , т. е. больших значениях отрицательного напряжения на первой сетке, чем в случае, когда E_2 и E_a имеют повышенные значения. Обычный же характер перемещения нарастающих ветвей при изменении напряжений питания E_a , E_2 и E_3 показывает, что на этих участках характеристики пространственный заряд между двумя сетками не оказывает большого влияния на свойства лампы.

Различное влияние напряжений E_a , E_2 и E_3 на па-

дающую и нарастающую ветви приводит к тому, что уменьшение напряжения питания сужает выпуклые характеристики, уменьшая область напряжений управлений по первой сетке или ее «основанию» $U_{o.x.}$, а также область максимума. Увеличение напряжений E_a , E_2 и E_3 , наоборот, расширяет выпуклую характеристику как по области максимума, так и по ее «основанию» $U_{o.x.}$, т. е. увеличивает область управляющих напряжений $U_{упр.}$. Эта особенность дает возможность получать в одной и

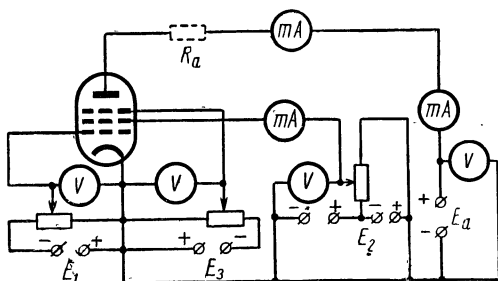


Рис. 25. Принципиальная схема пентодного каскада для получения выпуклых характеристик.

той же лампе выпуклые характеристики с различными параметрами и разными положениями максимума.

При низких напряжениях на аноде и второй сетке падающая ветвь выпуклой характеристики почти полностью может доходить до нулевого значения анодного тока и располагаться в отрицательной области потенциалов по первой сетке (см. рис. 22). Следовательно, изменяя токораспределение при помощи изменения напряжения на первой сетке, можно почти полностью прекратить попадание электронов на анод в области нулевых напряжений на первой сетке. Это свойство, как будет видно ниже, имеет большое значение при практическом использовании пентодов с выпуклыми характеристиками.

Значения параметров анодной цепи S_a , R_{ia} и μ_a в зависимости от режима пентода 6Ж4, соответствующего приведенным на рис. 22 анодно-сеточным характеристикам в статическом режиме, даны в табл. 1. Эти параметры анодной цепи на прямолинейных участках нарастающих и падающих ветвей имеют меньшие зна-

чения сравнительно с обычным режимом работы пентода. На нарастающих ветвях характеристики параметры имеют более высокие значения по отношению к параметрам на падающих ветвях и соответствуют параметрам триодов.

Т а б л и ц а 1

$E_a, \text{ в}$	$I_a, \text{ ма}$	$S_{a.\text{пад}}, \text{ ма/в}$	$S_{a.\text{нар}}, \text{ ма/в}$	$R_{i a.\text{пад}}, \text{ ком}$	$R_{i a.\text{нар}}, \text{ ком}$	$\mu_{a1 \text{ пад}}$	$\mu_{a1 \text{ нар}}$
240	8,0	—	8,0	—	35	—	280
220	17,6	3,2	7,0	2,8	37	9,0	130
200	13,8	4,6	5,8	4,2	52	19,5	135
180	10,0	5,0	5,4	5,0	39	25,0	125
160	6,4	2,8	3,8	9,3	56	26,0	80
140	3,5	1,6	1,8	11,2	33	18,0	65
120	1,4	0,6	0,9	21,8	71	13,0	38

При обычных режимах работы пентода достаточно знать параметры только одной анодной цепи, так как напряжение на второй сетке поддерживается постоянным. В рассматриваемом случае напряжения на второй и третьей сетках значительно влияют на параметры лампы, так как пространственный заряд перед третьей сеткой так ограничивает ток анода, что проницаемость анода по второй сетке $D_{a2} = \Delta U_2 / \Delta U_a$ может быть больше единицы.

В табл. 2 приведены для того же режима работы пентода 6Ж4 значения статического усиления анодной цепи по второй сетке μ_{a2} , цепи второй сетки по аноду μ_{2a} , анодной цепи по третьей сетке μ_{a3} и цепи второй сетки по третьей сетке μ_{23} .

Т а б л и ц а 2

Параметры	Напряжение на первой сетке — $U_1, \text{ в}$									
	Падающая ветвь		Нарастающая ветвь							
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,6
μ_{a2}	0,7	0,9	1,1	1,4	5,1	7,7	15,5	15,5	15,5	15,5
μ_{a3}	5,0	4,4	4,8	5,0	5,2	5,2	5,2	5,2	6,0	7,7
μ_{2a}	0,82	0,85	0,92	0,5	0,40	0,24	0,22	0,20	0,17	0,16
μ_{23}	4,0	2,7	4,0	2,9	2,10	1,30	1,0	0,91	0,84	0,82

Как видно из табл. 2, наибольшее действие на ток анода оказывает напряжение на второй сетке на нарастающей ветви, где μ_{a2} достигает 15. На падающей ветви влияние напряжения на второй сетке на ток анода значительно ослаблено пространственным зарядом. При этом коэффициент усиления μ_{21} и крутизна S_{21} на участке характеристик имеют более высокие значения, чем эти же параметры анодной цепи. Пониженное внутреннее сопротивление R_{ia} и усиление μ_{a1} объясняются действием пространственного заряда, расположенного между второй и третьей сетками.

Напряжение на аноде действует на ток второй сетки слабо, особенно на нарастающем участке характеристик, где пространственный заряд незначителен. Напряжение на третьей сетке на падающей ветви характеристики оказывает на ток второй сетки большее влияние.

Крутизна характеристик тока второй сетки по управляющей (первой) сетке S_{21} за счет электронов, возвращающихся от второй сетки, имеет повышенное значение и достигает для пентода 6Ж4 20 *ма/в*, а внутреннее сопротивление R_{i2} — пониженное. Коэффициент статического усиления цепи второй сетки по первой μ_{21} имеет значение от 10 примерно до 70 и зависит от напряжения на первой сетке, увеличиваясь при уменьшении — E_1 . Зависимость этих параметров от напряжения на первой сетке при $E_a=200$ *в*, $E_2=-(170-150)$ *в* для пентода 6Ж4 дана в табл. 3.

Таблица 3

Параметры	Напряжение на первой сетке — U_1 , <i>в</i>						
	Падающая ветвь		Нарастающая ветвь				
S_{21} , <i>ма/в</i>	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,4
	20,0	20,0	12,0	8,8	6,0	3,4	1,6
μ_{21}	12—63	7,0—30	8,0—30	15—35	12—45	20—50	30—50
R_{i2cp} , <i>ком</i>	1,25	0,63	1,0	1,25	3,7	4,4	6,3

Токораспределение между анодом и второй сеткой в большой степени зависит от напряжения на первой сетке и напряжения на аноде и второй сетке, т. е. от тока, протекающего в пространстве вторая — третья сетки. При этом наибольшее влияние тока катода на токо-

распределение соответствует области максимума, а также некоторой части нарастающей ветви (см. рис. 22 и 23).

На падающих участках характеристики и в области максимума анодного тока, а также при низких напряжениях на аноде большая часть тока, приходится на вторую сетку, а меньшая — на анод, т. е. отношение I_a/I_2 оказывается меньше единицы.

При больших отрицательных напряжениях E_1 на первой сетке, соответствующих начальным участкам нарастающих ветвей, т. е. там, где ток, попадающий в междусеточное пространство, а следовательно, и пространственный заряд малы, токораспределение I_a/I_2 изменяется менее значительно, чем на других участках характеристики. На форму характеристики анодного тока изменение тока катода в этой области оказывает меньшее влияние.

Если в этих условиях работы пентода одновременно с током в лампе изменять напряжения на аноде и второй сетке или только на второй сетке, то можно получить симметричные характеристики анодного тока, отвечающие различным функциональным зависимостям. *Для этого при линейном изменении напряжения на первой сетке и на аноде по заданному закону на вторую сетку необходимо задавать такие напряжения, чтобы ток анода соответствовал требуемой характеристике [Л. 26].*

На рис. 26 приведена симметричная анодно-сеточная характеристика пентода 6Ж4, полученная при условии, что напряжение на аноде изменяется по закону параболы, а на второй сетке — так, чтобы изменение тока анода также соответствовало параболе. На этом же рисунке дано семейство характеристик, показывающее влияние тока эмиссии на форму квадратичной характеристики. При уменьшении напряжения накала более чем на 3% форма характеристики изменяется: максимум анодного тока перемещается вправо, а его значение уменьшается.

В некоторой области, соответствующей падающим участкам анодно-сеточной характеристики, по мере уменьшения напряжения накала ток анода практически остается постоянным, затем увеличивается и только при значительном уменьшении $U_{\text{нак}}$ уменьшается. Такой характер влияния тока эмиссии подтверждает, что ток анода

ограничивается пространственным зарядом, образованным между второй и третьей сетками.

На рис. 26 даны также зависимости токораспределения от напряжения на первой сетке для различных напряжений накала. Эти характеристики в условиях одновременного изменения напряжения на аноде и второй

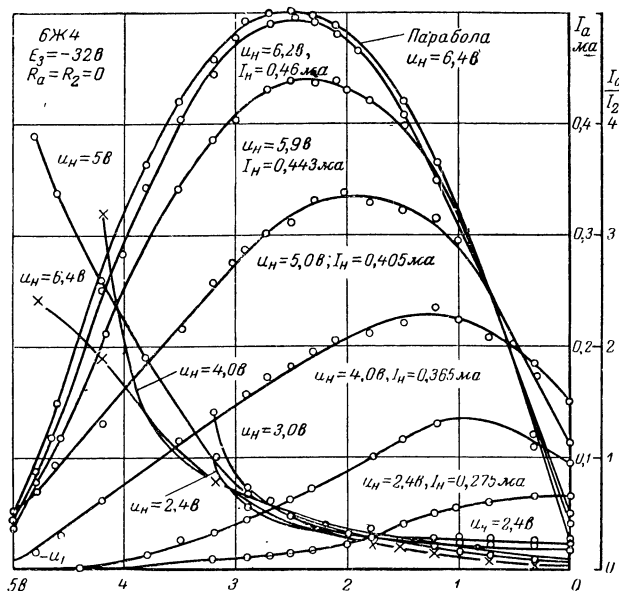


Рис. 26. Характеристика параболы в статическом режиме при различных напряжениях накала.

сетке нелинейны. В области характеристики анодного тока, соответствующей падающим участкам, отношение $I_a/I_2 < 1$ изменяется незначительно, тогда как на нарастающих участках это отношение меняется более резко.

Из такого характера токораспределения видно, что наиболее интенсивное образование пространственного заряда между сетками происходит на участках анодно-сеточной характеристики, соответствующих нарастающим. По мере уменьшения тока эмиссии (накала) соотношение между током, проходящим на анод, и током, попадающим на вторую сетку, уменьшается. Такое же влияние на токораспределение оказывает и уменьшение отрицательного напряжения на первой сетке. При зна-

чительном уменьшении тока эмиссии ($U_{\text{нак}} \leq 2,4$ в) область максимума и падающая ветвь не образуются и, следовательно, в этом случае пространственный заряд оказывает на токораспределение малое влияние.

4. МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ВЫПУКЛЫХ АНОДНО-СЕТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАДАННОЙ ФОРМЫ

Как было установлено, пространственный заряд, расположенный между второй и третьей сетками пентода, дает возможность управлять токораспределением при помощи напряжения на аноде, первой и второй сетках и получать различные

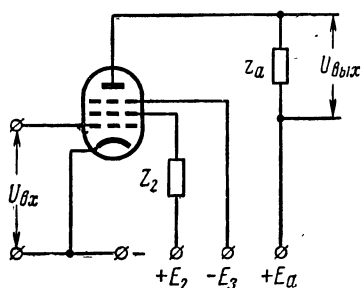


Рис. 27. Схема включения пентода для получения выпуклых характеристик анодного тока.

характеристики выпуклых форм. Для получения функциональных характеристик в этом случае необходимо, чтобы изменение напряжения на аноде происходило по заданному закону, а на второй сетке — так, чтобы изменение тока анода соответствовало требуемой характеристике (закону).

В практическом применении рассматриваемого метода получения функциональных характеристик необходимо, чтобы при изменении отрицательного напряжения на первой сетке соответствующие изменения напряжения на аноде и второй сетке происходили автоматически. Автоматическое изменение напряжений на аноде и второй сетке может быть получено при включении в их цепи соответствующих нагрузок Z_a и Z_2 . Схема такого включения пентода приведена на рис. 27. При помощи этой схемы в пентодах могут быть получены различные функциональные характеристики.

Таким образом, если напряжения источников питания E_a , E_2 , E_3 и нагрузки Z_a и Z_2 имеют соответствующие значения, то при линейном изменении напряжения на первой сетке можно получать изменение тока анода по заданному закону. Следовательно, методика получения функциональных характеристик должна сводиться к определению сопротивлений нагрузок и напряжений

источников питания E_a , E_2 и E_3 . Эта методика может быть разделена на две части: 1) получение анодно-сеточной характеристики заданной формы при нагрузке только в цепи анода и 2) определение нагрузки Z_2 , которая должна быть включена для этого в цепь второй сетки, а также напряжения источника питания цепи второй сетки E_2 .

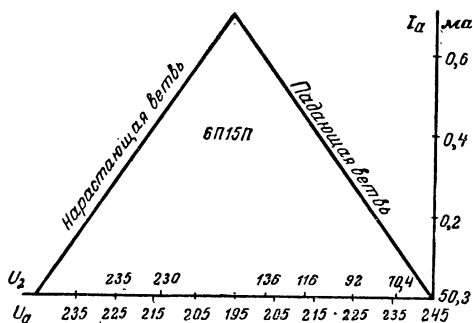


Рис. 28. Характеристика изменения анодного тока при одновременном изменении E_a , E_2 и E_1 .

Получение заданной характеристики при нагрузке в цепи анода. Так как вид функциональной характеристики задает закон изменения напряжения на аноде, требуемая форма характеристики анодного тока будет определяться соответствующими изменениями напряжения на второй сетке. Если же при этом между током анода и одновременными изменениями напряжения на аноде и второй сетке существует линейная зависимость, то функциональные характеристики могут быть получены при включении в цепь анода постоянной активной нагрузки R_a .

На рис. 28 приведена характеристика зависимости изменения анодного тока от одновременного изменения напряжения на аноде, второй и первой сетках для одного из режимов пентода 6П15П при условии, что напряжение и ток анода изменяются по параболическому закону (см. рис. 26). Эта характеристика $I_a = f(E_1, E_a, E_2)$ в первом приближении линейна как на нарастающем, так и на падающем участках.

Таким образом, получение функциональных характеристик при включении активного сопротивления R_a

в цепь анода сводится к выбору соответствующих напряжений на второй сетке, т. е. к определению напряжения источника питания E_a , E_2 и величины нагрузки $Z_2 = R_2$.

Основные параметры характеристики, определяющие ее свойства, следующие: вид характеристики, изменение

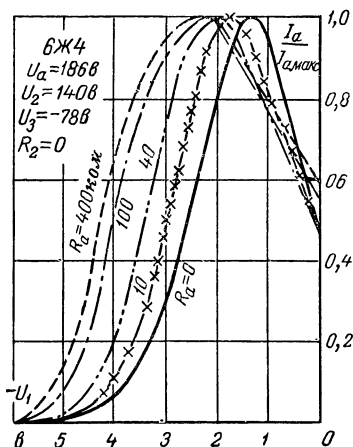


Рис. 29. Влияние сопротивления R_a на форму выпуклой характеристики.

выходного напряжения в точке, соответствующей максимуму анодного тока, т. е. $\Delta U_{a.макс}$, ток анода в максимуме $I_{a.макс}$ и область потенциалов на первой сетке $U_{o.x}$ в вольтах ($o.x$ — основание характеристики), в которой должна удовлетворяться заданная функция.

Первая часть методики получения анодно-сеточной характеристики заданной формы следующая:

1. Задаются основными параметрами характеристики и напряжением источника питания анода E_a .

2. Исходя из заданных значений $\Delta U_{a.макс}$ и $U_{o.x}$ (U_1), строят характеристику в виде графика $I_a = f(U_1)$.

3. Определяют нагрузку в цепи анода. Нагрузка в цепи анода, с которой снимается полезное напряжение, влияет также на форму характеристики. Поэтому при выборе сопротивления резистора R_a следует исходить не только из напряжения, которое должно быть получено на выходе лампы, но и из заданной формы характеристики.

Влияние активного сопротивления в цепи анода R_a на форму выпуклой характеристики анодного тока пентода 6Ж4, находящегося в режиме $E_a = 185$ в; $E_2 = 140$ в и $E_3 = -78$ в, приведено на рис. 29. Здесь по оси абсцисс отложены значения отрицательного напряжения на первой сетке U_1 , а по оси ординат — относительное изменение анодного тока, т. е. $I_a/I_{a.макс}$. Из этого семейства характеристик видно, что при $R_2 = 0$ увеличение сопротивления резистора R_a плавно расширяет область мак-

симула, перемещая ее и нарастающую ветвь в сторону увеличения отрицательного напряжения на первой сетке, и уменьшает крутизну падающей ветви. Начало нарастающей ветви при этом практически остается постоянным, а сопротивление резистора R_a не критично. Это дает возможность при выборе нагрузки исходить в основном из соображений заданного выходного напряжения.

Таким образом, сопротивление резистора R_a может быть определено по заданным значениям тока анода $I_{a.\text{макс}}$ и изменению напряжения на аноде $\Delta U_{a.\text{макс}}$, т. е. из соотношения $R_a = \Delta U_{a.\text{макс}} / I_{a.\text{макс}}$. При этом следует учитывать, что при широкой области максимума сопротивление резистора R_a должно иметь большее значение, чем в случае острой формы характеристики.

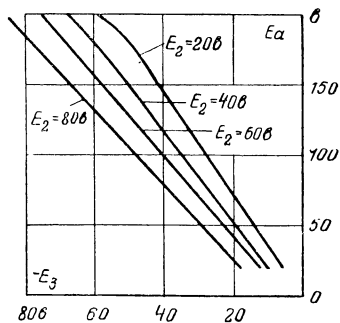


Рис. 30. Характеристики $E_3 = f(E_a, E_2)$ при $U_1 = 0$ и $I_a = 0$.

4. Определяют постоянный отрицательный потенциал на третьей сетке. Положение выпуклой характеристики, ее форма, значение тока анода и его «отсечка» на падающем участке зависят от напряжений на аноде, второй и третьей сетках. Это показано на рис. 30, где приведено семейство характеристик пентода 6Ж4 в статическом режиме $E_3 = f(E_a, E_2)$ при условии, что $U_1 = 0$, а ток анода отсутствует. Действительно, условия, при которых анодный ток может достигнуть нуля или заданной величины в области, соответствующей падающему участку, получаются в широком диапазоне изменений отрицательного потенциала на третьей сетке. Каждому его значению соответствуют свои напряжения на аноде и второй сетке.

Таким образом, если известно напряжение на аноде и второй сетке, то значение отрицательного потенциала на третьей сетке может быть найдено из этого семейства характеристик. Однако если напряжение на аноде $U_{a.\text{действ}}$ может быть определено, так как E_a и $I_{a.\text{макс}}$ заданы, то напряжение E_2 неизвестно.

Если, пользуясь схемой, приведенной на рис 25,

включить заданное напряжение источника питания E_a и резистор R_a в цепь анода (показано на схеме штриховой линией), то при некотором значении напряжения на второй сетке E_2 можно установить на третьей сетке такой отрицательный потенциал E_3 , при котором ток анода в максимуме будет соответствовать заданному. При этом положение $I_{a.\text{макс}}$ должно соответствовать середине характеристики, т. е. $|U_{o.x}/2$. Найденный таким способом потенциал на третьей сетке может быть принят (в первом приближении) за необходимый.

5. Определяют те напряжения на второй сетке и ток I_2 , при которых изменение тока анода соответствует заданной зависимости. Для этого при различных напряжениях на первой сетке устанавливают на второй сетке такие напряжения, при которых ток анода изменяется по заданной характеристике. При этом напряжение на второй сетке в точке максимума анодного тока должно соответствовать тому, которое было установлено при определении отрицательного потенциала на третьей сетке.

Используя первую часть методики, в пентоде 6Ж4 была получена функциональная характеристика $|\sin x|$ при условии, что $0 \leq x \leq \pi$, со следующими параметрами:

$$\Delta U_{a.\text{макс}} = 32 \text{ в}; U_{o.x} = 4 \text{ в}; \Delta I_{a.\text{макс}} = 0,4 \text{ ма};$$

$$I_{a.o} = 0,1 \text{ ма} \text{ и } I_{a.\text{макс}} = \Delta I_{a.\text{макс}} + I_{a.o} = 0,5 \text{ ма}$$

при

$$E_a = 120 \text{ в} \text{ и } E_3 = -33 \text{ в}.$$

При этом с помощью соотношения

$$I_a = \Delta I_{a.\text{макс}} \sin \left(180 \frac{U_1}{U_{o.x}} \right),$$

что соответствует изменению анодного тока в лампе по закону синуса при условии, что $0 \leq x \leq \pi$, определяются те значения тока I_a , которым должны соответствовать различные напряжения на первой сетке U_1 . Эта характеристика приведена на рис. 31 и при условии, что напряжения источников питания E_a , E_2 и E_3 поддерживались с точностью 10^{-2} в, полностью соответствовала расчетной.

С этим же экземпляром пентода 6Ж4 были также получены такие функциональные зависимости, как парабола, дуга окружности и гипербола, которые подобно характеристике $|\sin x|$ полностью совпадают с вычис-

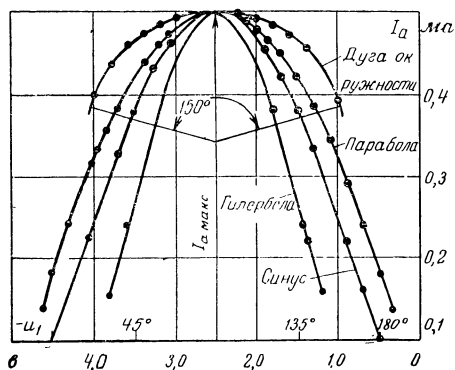


Рис. 31. Характеристики анодного тока, аппроксимирующиеся синусом, параболой, гиперболой и дугой окружности.

ленными. Эти характеристики имеют следующие параметры:

Парабола: $\Delta I_{a.\text{макс}} = 0,26 \text{ ма}$; $R_a = 110 \text{ ком}$.
 $\Delta U_{a.\text{макс}} = 26,5 \text{ в}$; $U_{o.x} = 3,5 \text{ в}$; $E_a = 125 \text{ в}$ и $E_3 = -33 \text{ в}$.

Дуга окружности: $\Delta I_{a.\text{макс}} = 0,12 \text{ ма}$; $R_a = 82 \text{ ком}$;
 $\Delta U_{a.\text{макс}} = 9,8 \text{ в}$; $U_{o.x} = 3,0 \text{ в}$; $E_a = 123 \text{ в}$ и $E_3 = -18 \text{ в}$.

Гипербола: $\Delta I_{a.\text{макс}} = 0,34 \text{ ма}$; $R_a = 24 \text{ ком}$;
 $\Delta U_{a.\text{макс}} = 80 \text{ в}$; $U_{o.x} = 2,6 \text{ в}$; $E_a = 90 \text{ в}$ и $E_3 = -34 \text{ в}$.

Характеристики тока и напряжения второй сетки, которые были получены для указанных функциональных зависимостей, приведены на рис. 32 и 33.

Таким образом, при условии, что напряжения источников питания E_a , E_2 и E_3 постоянны, с помощью установки соответствующих напряжений на второй сетке могут быть получены функциональные характеристики, точно соответствующие заданным.

При выборе основных параметров функциональной характеристики, т. е. $I_{a.\text{макс}}$, $\Delta U_{a.\text{макс}}$ и $U_{o.x}$, которые определяют напряжение на выходе каскада и область напряжений управления по первой сетке, задаются такими их значениями, которые могут быть практически по-

лучены в пентодах в режиме отрицательного потенциала на третьей сетке.

Получение заданной характеристики при нагрузке в цепи второй сетки. Во второй части методики определяются нагрузка R_2 и напряжение источника питания E_2 , которые должны быть включены в цепь второй сетки

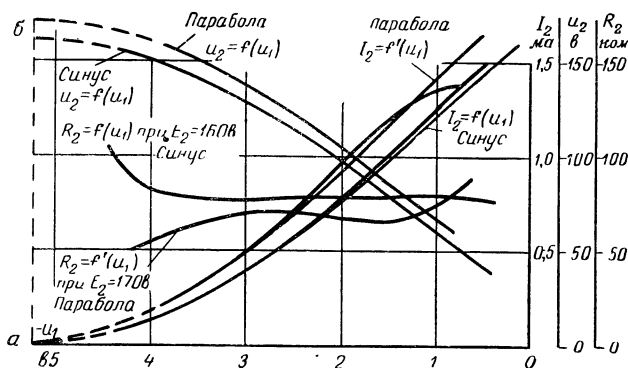


Рис. 32. Характеристики тока и напряжения второй сетки для синуса и параболы.

для того, чтобы характеристика анодного тока при данных значениях E_a , E_2 и E_3 соответствовала зависимости, полученной в первой части.

Значение активного сопротивления R_2 может быть определено из уравнения динамической характеристики лампы:

$$R_2 = \frac{E_2 - U_{2\text{действ}}}{I_{2\text{действ}}}.$$

Здесь значения действующего напряжения $U_{2\text{действ}}$ на второй сетке и тока $I_{2\text{действ}}$ для различных напряжений на первой сетке определены в первой части методики, а напряжение источника питания E_2 может быть найдено следующим путем.

1. Используя найденные в первой части методики значения напряжения на второй сетке и соответствующие им значения тока I_2 , строят графически зависимости $I_2=f(U_1)$ и $U_2=f(U_1)$, приведенные для случая характеристики $|\sin x|$ на рис. 32.

2. Экстраполируют характеристику $I_2=f(U_1)$ в сторону большего отрицательного потенциала на первой

сетке до пересечения ее с осью абсцисс (точка a), в которой восстанавливают перпендикуляр (рис. 32).

3. Экстраполируют характеристику $U_2=f(U_1)$ до пересечения ее с этим перпендикуляром (точка b). Значение напряжения U_2 , соответствующее точке пересечения перпендикуляра с характеристикой $U_2=f(U_1)$, мо-

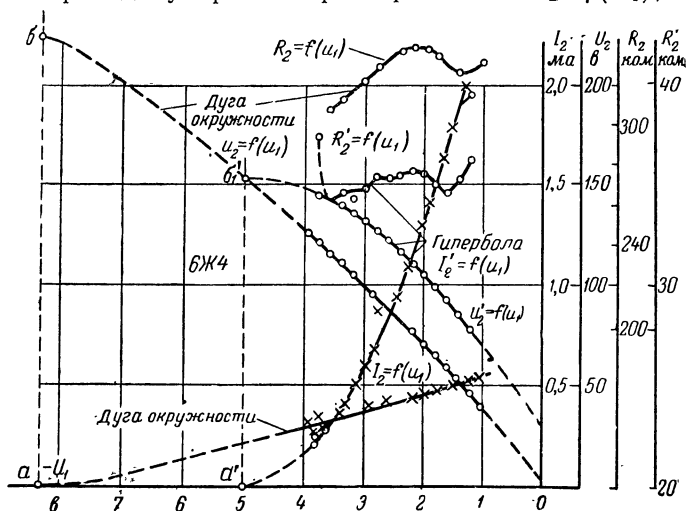


Рис. 33. Характеристики тока и напряжения второй сетки для дуги окружности и гиперболы.

жет быть принято в первом приближении за напряжение источника питания в цепи второй сетки E_2 .

По уравнению динамической характеристики лампы находят для различных напряжений на первой сетке ряд значений сопротивления резистора R_2 . Из найденного ряда сопротивлений определим сопротивление $R_{2\text{ср}}$, которое должно быть включено в цепь второй сетки,

$$R_{2\text{ср}} = \sqrt{\frac{R_{21}^2 + R_{22}^2 + \dots + R_{2n}^2}{n}},$$

где n — число значений сопротивлений R_2 , которое было найдено.

При расхождении характеристик анодного тока, полученных при включенных резисторах R_a и R_2 с расчетной добиваются наибольшего совпадения между ними путем изменения в небольших пределах напряжений питания E_2 , E_3 и E_a либо сопротивлений резисторов R_a и R_2 .

Характер влияния на форму анодно-сеточной характеристики активного сопротивления R_2 в цепи второй

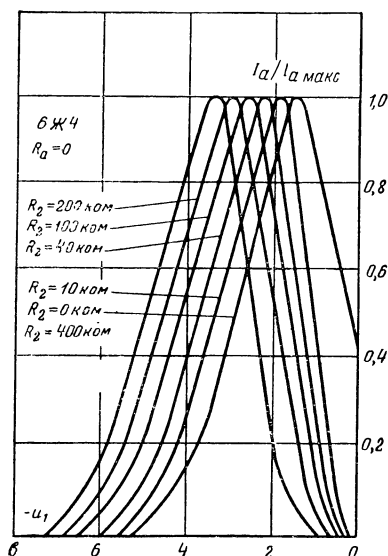


Рис. 34. Влияние сопротивления R_2 на форму выпуклой характеристики.

сетки виден на рис. 34. Из семейства характеристик, приведенных на этом рисунке для пентода 6Ж4, находящегося в режиме $E_a=185$ в; $E_2=140$ в и $E_3=-78$ в, видно, что если напряжения источников питания E_a , E_2 и E_3 постоянны, увеличение активного сопротивления R_2 вызывает: перемещение всей характеристики в левую область напряжений по первой сетке с отсечкой тока анода; уменьшение крутизны падающего и соответственно увеличение крутизны нарастающего участков с одновременным незначительным расширением области максимума и улучшения симметричности формы.

Если сопоставить семейства характеристик, показанные на рис. 29 и 34, то видно, что различие действий активных сопротивлений в цепи анода R_a и второй сетки R_2 заключается в том, что первое значительно расширяет область максимума, сдвигая ее влево, уменьшает крутизну падающего участка и увеличивает ток анода в точке, соответствующей нулевому значению напряжения U_1 .

Резистор R_2 сдвигает всю характеристику и падающую ветвь влево по оси OU_1 и преобразовывает ее в более симметричную форму.

Различие действий резисторов R_a и R_2 определяется тем, что уменьшение напряжения на первой сетке приводит на падающем участке к увеличению действующего напряжения на аноде $U_{a, \text{действ.}}$, а на второй сетке — к уменьшению напряжения $U_{2, \text{действ.}}$. Эта особенность действия напряжений на аноде и второй сетке, находя-

щихся в противофазе по отношению друг к другу, определяет на падающем участке различное влияние их на ток анода. Результат такого совместного действия напряжений $U_{a.действ}$ и $U_{2.действ}$ на форму анодно-сеточной характеристики пентода 6Ж4 (кривая 1) приведен на рис. 35. Характеристика приобретает правильную симметричную форму и расположена полностью в отрицательной области напряжений по первой сетке (кривая 4). На том же рисунке для сравнения показан также результат раздельного действия резисторов R_a (кривая 3) и R_2 (кривая 2) на форму характеристики.

Полученные по рассмотренной методике для того же экземпляра лампы 6Ж4 функциональные зависимости в виде параболы, гиперболы и дуги окружности, приведенные к общему максимуму анодного тока и его положению по напряжению на первой сетке, даны на рис. 31. На этих характеристиках приведены только области максимума, отвечающие функциональным зависимостям, а нижние участки нарастающей и падающей ветвей отсутствуют.

По сопротивлению резистора R_2 , определенному по уравнению динамической характеристики для таких линий второго порядка, как гипербола, парабола и дуга окружности, было установлено, что каждому значению отрицательного напряжения на первой сетке соответствует своя величина нагрузки в цепи второй сетки. Как видно из характеристик на рис. 32 и 33 и др., в большей части зависимости $R_2 = f(U_1)$ имеется относительно небольшое изменение сопротивления резистора R_2 . Наибольшая разница между найденными сопротивлениями наблюдается на начальных и конечных участках характеристики.

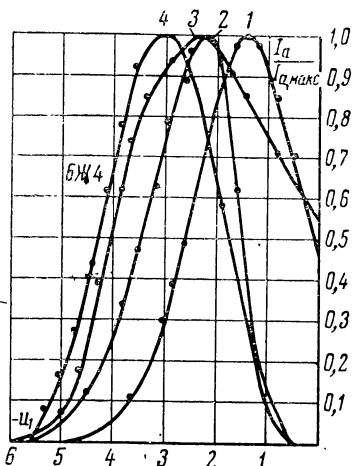


Рис. 35. Влияние совместного действия резисторов R_a и R_2 на форму выпуклой характеристики.

1 — $R_a = R_2 = 0$; 2 — $R_a = 0$, $R_2 = 30$ ком;
3 — $R_a = 0,1$ Мом, $R_2 = 0$; 4 — $R_a = 0,1$ Мом, $R_2 = 30$ ком.

Таким образом, для получения функциональной зависимости с большой точностью либо значение нагрузки R_2 , либо напряжение источника питания E_2 должно быть переменным, т. е. изменяться в зависимости от управляющего напряжения на первой сетке.

С другой стороны, относительно небольшие изменения в значениях нагрузки R_2 , наблюдающиеся в большей части характеристики, а также более резкие отклонения могут быть отнесены за счет погрешностей, возникающих при экспериментальных определениях напряжения U_2 и тока второй сетки I_2 . Эти погрешности при условии постоянства напряжения источников питания будут складываться из точности установки отрицательного потенциала на первой сетке, отсчетов тока и напряжений на электродах и случайных изменений тока в лампе.

Действительно, если нагрузку в цепи второй сетки принять постоянной и активной, то полученная в этих условиях характеристика в большей своей части достаточно удовлетворительно сходится с аналитической зависимостью. Так, при нагрузке $R_{2\text{ ср}}$, определяемой как корень квадратный из среднеарифметической суммы квадратов сопротивлений R_2 , найденных при различных напряжениях на первой сетке, наибольшее расхождение экспериментальной характеристики с расчетной наблюдается в ее начальной и конечной частях.

Например, функция $|\sin x|$, приведенная на рис. 31, имеет наибольшее расхождение с аналитической зависимостью при значении аргумента $x=0 \div 10^\circ$, где сопротивление резистора R_2 должно составлять соответственно 100,3 и 91 *ком*, тогда как в действительности нагрузка $R_{2\text{ ср}}$ в цепи сетки составляет 79 *ком*. В остальных областях характеристики погрешности не превышают 1,75%.

Другим примером может служить характеристика лампы 6Ж4, аппроксимирующаяся параболой, у которой, так же как и в случае функции $|\sin x|$, для большей части изменений аргумента наблюдается удовлетворительное совпадение с аналитической зависимостью. Наибольшие погрешности здесь также имеются в тех областях, где имеется большая разница между той нагрузкой, которая включена в цепь второй сетки, и той, которая должна быть.

В более узкой области напряжений управления

функциональные характеристики могут быть получены с более высокой точностью. Так, например, парабола в области напряжения управления $U_{упр}=2$ в имеет погрешность, не превышающую 0,35%, а гипербола — не более 2%.

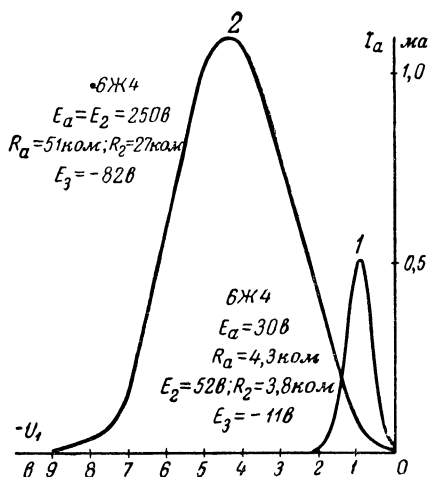


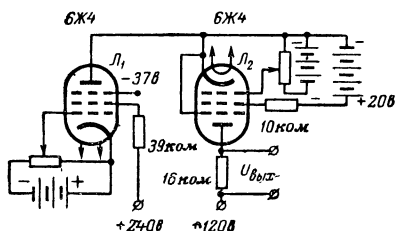
Рис. 36. Характеристики в виде треугольника.

Указанные точности соответствия экспериментальных характеристик расчетным были получены при условии, что в цепь второй сетки включается постоянное активное сопротивление $R_{2 \text{ ср}}$, значение которого отличается от ряда найденных не более чем на 25%.

При рассмотрении статических характеристик, приведенных на рис. 22 и 23, была установлена закономерность сужения области максимума и напряжения управления $U_{упр}$ при уменьшении напряжения питания E_a , E_2 и увеличении E_3 . Пользуясь этим, были получены выпуклые характеристики в пентоде 6Ж4, приведенные на рис. 36, одна из которых 1 имеет форму, приближающуюся к равнобедренному треугольнику, низкое напряжение управления $U_{упр}$, узкую область максимума и эффективность управления $S_a/I_a = 2,1 \text{ в}^{-1}$, а другая 2, наоборот, широкую область максимума и управляющих напряжений $U_{упр}$, достигнутую увеличением напряжения питания на аноде и второй сетке. Обе характери-

стики имеют падающую ветвь, доходящую до нулевого значения анодного тока.

Один из вариантов схемы, содержащей два пентода, приведен на рис. 37,а, а полученное семейство характеристик П-образной формы — на рис. 37,б. Меняя



напряжение на первой сетке лампы \mathcal{L}_2 , можно устанавливать различные пороги ограничения анодного тока пентода \mathcal{L}_1 , имеющего выпуклую характеристику. Недостаток такой схемы заключается в необходимости в отдельных источниках питания для первой и второй сеток лампы-ограничителя \mathcal{L}_2 .

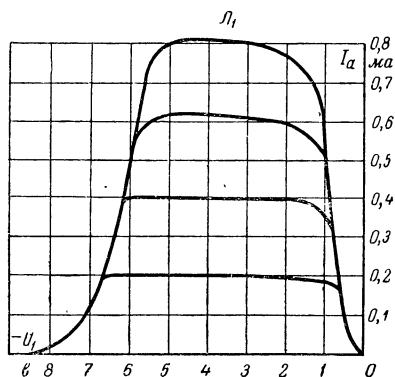


Рис. 37. П-образная характеристика.

Рассматриваемый метод получения выпуклых характеристик дает также возможность резкой отсечки анодного тока, которая может быть получена при несимметричной форме выпуклой характеристики в начале ее падающей ветви,

имеющей большую крутизну, чем нарастающая. Примеры подобных характеристик для ламп 6П9, 6Ж4, 6Ж7 приведены на рис. 38. Эти характеристики образуются при условии $R_2 > R_a$.

Эти характеристики имеют следующие особенности; нарастающая ветвь по сравнению с падающей сильно растянута; протяженность левой, нарастающей области. $U_{нар}$ может быть в несколько раз больше падающей и достигать $U_{нар} \geq (3 \div 4) U_{пад}$, а крутизна падающего участка может быть $S_{пад} \geq (2 \div 6) S_{нар}$.

Падающая ветвь вследствие резкой отсечки анодного тока имеет очень короткий начальный криволинейный участок, протяженность которого может составлять 0,03—0,05 в. Путем увеличения сопротивления рези-

стора R_2 или отрицательного напряжения E_3 начало падающего участка может быть перемещено влево. Так, например, при значениях R_2 порядка нескольких мегом падающая ветвь может резко отсекать анодный ток при отрицательном напряжении на первой сетке 1—2 в.

Область максимума несимметричных характеристик, как и симметричных, может быть получена либо растя-

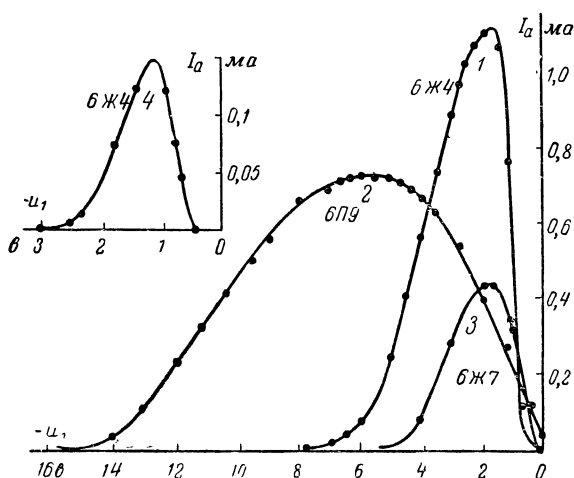


Рис. 38. Несимметричные выпуклые характеристики.

нутой (характеристики 2 и 3), либо острой (характеристика 1). При острой зоне максимума можно получить резкий переход с прямолинейного участка падающей ветви к точке максимума $I_{a, \text{макс}}$, который может составлять 0,05—0,1 в.

В табл. 4 приведены основные параметры и режимы пентодов 6Ж4, 6П9 и 6Ж7, несимметричные характеристики которых приведены на рис. 38. Из таблицы видно, что на падающей ветви эффективность управления анодным током S_a/I_a достигает 3,2 в⁻¹. Высокая эффективность управления (до 2,0 в⁻¹) может быть получена и при других формах характеристики (например, симметричной), при которых падающая и нарастающая ветви имеют примерно одинаковую крутизну.

Лампы с управлением электронным потоком при помощи одной сетки вследствие начального распределения скоростей электронов, вызванного условиями их

Таблица 4

Лампа	Номер лампы	Режим						$U_{o.x}, \text{ в}$	$S_a/I_a, \text{ в}^{-1}$ (падающий участок)
		$E_a, \text{ в}$	$E_2, \text{ в}$	$-E_3, \text{ в}$	$R_a, \text{ ком}$	$R_2, \text{ ком}$	$I_{a.макс}, \text{ ма}$		
6Ж4	1	40	180	—18	6	100	1,12	7,6	2,0
6Ж4	4	140	48	—28	40	110	0,144	2,6	3,2
6Г19	2	170	270	—220	47	200	0,716	15	0,2
6Ж7	3	120	120	—30	6	110	0,43	4,7	1,3

эмиссии с катода и прохождением через управляющие электроды, имеют ограниченную эффективность управления. Максимум возможной эффективности управления S_a/I_a , как показал Беллоу [Л. 27], определяется отношением e/kT , где e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, а T — температура катода, выраженная в градусах Кельвина. При температуре катода, равной 1000°K , теоретический максимум по Беллоу составляет $(10-12) \text{ в}^{-1}$, а практически $(2-3) \text{ в}^{-1}$. В действительности же эффективность управления в обычных электронных лампах составляет лишь $1,0-1,1 \text{ в}^{-1}$ *. Такая эффективность достигается при сеточном управлении и при больших токах анода.

При рассматриваемом методе управления электронным потоком возможна более высокая эффективность управления при меньшем токе анода. Это выгодно при усилении напряжения, а также при различных преобразованиях сигналов.

Более высокая эффективность управления определяется тем, что пространственный заряд, расположенный между второй и третьей сетками, во-первых, имеет большой объем, во-вторых, ограничивая ток анода, уменьшает распределение скоростей электронов, попадающих на анод. Кроме того, напряжения на аноде и второй сетке, влияя на пространственный заряд, также сильно влияют на токораспределение.

Исследование различных типов пентодов дает основание сделать заключение, что управление токораспределением при помощи тока, а следовательно, и выпук-

* При использовании теневой сетки в мощном экспериментальном пентоде в последнее время получена эффективность управления до $22,5 \text{ в}^{-1}$ [Л. 28].

лые характеристики могут быть получены при любых известных конструкциях ламп и видах катода. Так, например, выпуклые характеристики были получены в пентодах цилиндрической конструкции — лампы 6Ж7, 6Ж8 и 6К7, в пентодах плоскоэллиптической конструкции — лампа 6Ж4, пальчиковой серии — лампы 6Ж2П, 6Ж10П, 6Ж4П и 6Ж9П, в пентодах, предназначенных для усиления мощности, — лампы 6П9 и 6П15П и генераторных — лампа ГУ-50, в пентодах сверхминиатюрной конструкции с косвенным накалом — лампы 6Ж1Б и 6Ж5Б и др., с прямым накалом — лампа 2П19Б и стержневой конструкции — лампы 1Ж17Б и 1Ж24Б и т. п.

В табл. 5 приведены параметры типичных характеристик выпуклых форм, полученных в указанных пентодах, а также рассмотренных выше, при двух значениях сопротивлений резисторов в цепи анода: одного — низкого ($R_a = 6,2 \text{ ком}$), а другого — высокого ($R_a = 51 \text{ ком}$).

Вследствие ограничения анодного тока вторым пространственным зарядом в выпуклых характеристиках, полученных при помощи постоянного отрицательного потенциала на третьей сетке, ток анода в максимуме и крутизна нарастающих и падающих ветвей в статическом режиме имеют пониженные значения относительно обычного режима пентода ($I_{a, \text{макс}} = 7 \div 11 \text{ ма}$ и $S_a = 1,8 \div 3,3 \text{ ма/в}$ для лампы 6Ж4).

Но так как условия, необходимые для образования падающей и нарастающей ветвей, неодинаковы, можно получить более высокие значения крутизны S_a и тока $I_{a, \text{макс}}$. Действительно, нарастающая ветвь представляет собой часть обычной анодно-сеточной характеристики пентода и для ее образования нет необходимости в тормозящем поле, создаваемом третьей сеткой. Тормозящее поле приводит лишь к заметному уменьшению крутизны нарастающего участка характеристики. Образование же падающей ветви и области максимума — результат действия значительного пространственного заряда, вызванного большим тормозящим потенциалом третьей сетки. Следовательно, для получения выпуклой характеристики условие постоянства отрицательного потенциала на третьей сетке, очевидно, необязательно.

Таким образом, более выгодны были бы условия, когда отрицательный потенциал на третьей сетке уве-

Таблица 5

Лампа	$S_a/I_a, 6^{-1}$	$U_{0,x}, 6$	$R_a = 6,2 \text{ ком}$				$R_a = 51 \text{ ком}$				Примечание
			$S_{\text{п}}, \text{ма/с}$	$S_{\text{н}}, \text{ма/с}$	K_a	K_2	$S_{\text{п}}, \text{ма/с}$	$S_{\text{н}}, \text{ма/с}$	K_a	K_2	
1Ж17Б	0,8	8—12	0,35	0,40	2,4	—	0,25	0,26	11,8	12,3	Парабола Несимметричная характеристика $R_a = 33 \text{ ком}$ $R_a = 0$ Рис. 42 Рис. 36 Рис. 39
1Ж24Б	1,3	5,0	0,30	0,28	1,5	2,0	0,24	0,26	13,0	16,4	
6Ж1Б	0,8	4,0—5,0	0,60	0,48	3,6	2,0	0,30	0,25	14,3	10,5	
6Ж5Б	0,75	8,0—9,0	0,55	0,55	3,4	—	0,21	0,19	10,7	—	
6Ж2Б	1,0	7,0	0,40	0,32	2,4	—	—	—	—	—	
6Ж2П	1,3	6,0—7,0	0,39	0,31	2,4	9,6	0,2	0,175	10,2	10,2	
6Ж7	1,0	9,0—12	0,18	0,18	1,2	4,1	0,14	0,13	17,1	15,6	
6Ж8	0,45	9,0—14	0,30	0,26	1,8	13,2	0,27	0,27	13,8	16,4	
6П9	0,4	14—16	—	—	—	—	0,20	0,20	9,4	—	
6К3	1,0	40—50	0,35	—	2,0	—	0,06	—	3,0	—	
ГВ-50	0,2	70—80	0,26	0,26	1,6	—	0,09	0,09	19,8	—	$R_a = 0$ Рис. 42 Рис. 36 Рис. 39
6П15П	0,6	13,5	—	—	—	—	0,19	0,19	9,5	—	
6Ж9П	—	—	1,25	1,20	2,8	—	—	—	—	—	
6Ж4	1,25	5,0	1,0	0,95	3,0	—	0,38	0,42	20,8	—	
6Ж4	3,0	2,0—9,0	0,75	0,68	1,5	—	0,38	0,43	24	—	
6Ж4	0,7	8—9	1,45	1,35	8,0	—	0,85	0,75	9,0	—	

личивался бы по мере уменьшения отрицательного напряжения на первой сетке, т. е. увеличения тока катода. Включение в цепь катода постоянного резистора R_K , как это показано на рис. 39, позволяет получать на

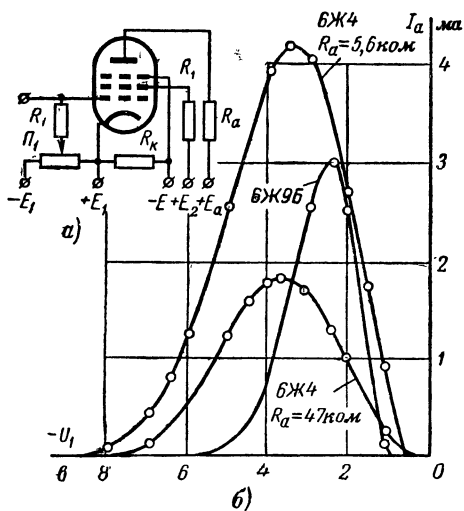


Рис. 39. Схема включения пентода и выпуклые характеристики при автоматическом смещении на третьей сетке.

третьей сетке отрицательный потенциал, значение которого автоматически зависит от действующего напряжения $U_{\text{действ}}$ на первой сетке, т. е. от тока катода.

На нарастающей ветви характеристики, что соответствует малым токам катода и большому напряжению смещения, отрицательный потенциал на третьей сетке будет мал. При малых же значениях смещения на первой сетке и больших токах катода, когда образуется падающая ветвь, на третьей сетке будет значительный отрицательный потенциал. При таком способе подачи отрицательного потенциала на третью сетку происходит увеличение анодного тока в максимуме характеристики и крутизны нарастающей и падающей ветвей по сравнению с режимом постоянного отрицательного напряжения на третьей сетке. Кроме того, при такой схеме отпадает необходимость в отдельном источнике питания.

Таким образом, этот способ включения пентода дает более оптимальные условия для образования выпуклой характеристики. На рис. 39,б приводятся выпуклые характеристики пентодов 6Ж4 и 6Ж9Б, полученные этим методом. Пентод 6Ж4 при включенном в цепь анода резисторе R_a имеет крутизну прямолинейного участка падающей и нарастающей ветви 1,5 ma/v , а ток в максимуме до 3,2—4 ma при $R_a=6,2 \div 5,6$ $ком$ и $S_a=0,75$ ma/v и ток $I_{a, макс}=1,85$ ma при $R_a=47$ $ком$.

Несимметричная характеристика пентода 6Ж9Б имеет падающую ветвь, сдвинутую в левую область с резкой отсечкой анодного тока при напряжении на первой сетке минус 1 v , т. е. при полном отсутствии сеточных токов. Крутизна характеристики падающей ветви $S_{пад}=2,5$ ma/v при $R_a \approx 0$, что может соответствовать условиям включения в цепь анода индуктивно-емкостной нагрузки. Однако такой способ включения пентода не всегда может быть использован, так как цепь управляющей сетки и общий минус схемы должны быть разобщены. Это может привести к возникновению разности потенциалов (по постоянному току) между цепью третьей сетки и общим минусом, которая при некоторых условиях может вызвать неустойчивость работы схемы.

5. ПОВТОРЯЕМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК И УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ПЕНТОДОВ

При использовании пентодов с выпуклыми характеристиками большое значение имеют повторяемость их при смене ламп, а также стабильность характеристик во времени и при изменениях напряжений источников питания. Исследования, проведенные с пентодом 6Ж4 в качестве функциональной лампы, показали устойчивость в работе и возможность сохранения характеристик во времени при изменениях напряжений питания и смене ламп. Так, полученные в пентоде 6Ж4 выпуклые характеристики симметричной формы могут быть повторены с другими экземплярами ламп без изменения данных схемы и режима питания. Результаты такого эксперимента приведены на рис. 40 в виде серии характеристик для 7 пентодов 6Ж4. При этом форма характеристик, ее положение и максимум анодного тока сохраняются.

Из табл. 6, в которой приведены основные параметры характеристик, следует, что наибольший разброс от

среднего значения (из семи ламп) составляет по току анода в максимуме $\Delta I_a = \pm 8,4\%$, по напряжению управления по первой сетке $\Delta U_{упр} = \pm 8,8\%$ и по крутизне характеристики $\Delta S_a = \pm 8,3\%$.

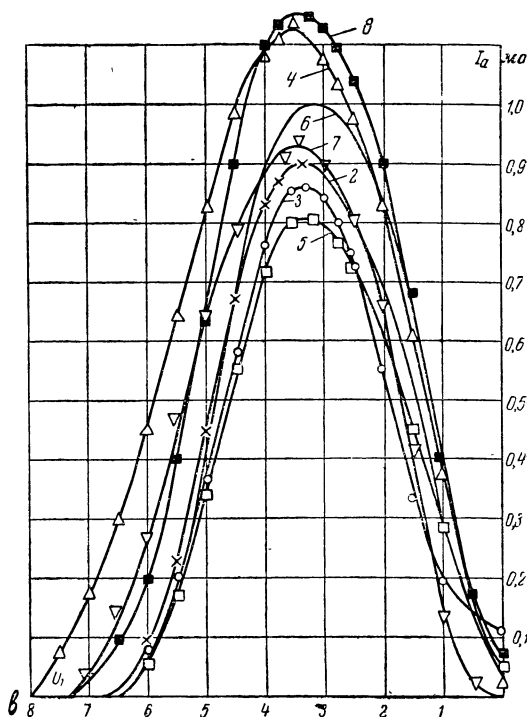


Рис. 40. Влияние смены ламп на форму выпуклых характеристик.

Таким образом, разброс по току анода и крутизне характеристики имеет тот же порядок, что и при обычных режимах работы пентода. Следовательно, в тех случаях, когда не требуется строгое соответствие выпуклых характеристик какому-либо закону, например при использовании пентода в схемах усиления, генерирования колебаний, образования импульсов и др. (см. гл. 4), вполне может быть допущена смена ламп без предварительного отбора.

Небольшое смещение положения максимума одной характеристики от положения другой по первой сетке

Таблица 6

Номер лампы	$U_{o.x}, \text{ в}$	$I_{a.макс}, \text{ ма}$	$S_{нар}, \text{ ма/в}$	$S_{пад}, \text{ ма/в}$	Положение максимума характеристики, в	Примечание
2	7,0	0,90	0,48	0,50	3,45	Лампа 6Ж4
3	6,6	0,86	0,44	0,40	3,30	$E_a = E_2 = 220 \text{ в}$
4	8,5	1,13	0,38	0,46	3,50	
5	6,4	0,8	0,38	0,34	3,35	$E_3 = -57 \text{ в}$
6	6,6	1,0	0,46	0,50	3,20	$R_a = 51 \text{ ком}$
8	7,6	1,15	0,48	0,49	3,45	
9	7,7	0,93	0,38	0,50	3,45	$R_2 = 43 \text{ ком}$

($\Delta U_1 = 0,3 \text{ в}$) позволяет заменять лампы при использовании пентода в режиме, когда рабочая точка соответствует максимуму анодного тока, например для двухполупериодного детектирования. В этом случае подводимое напряжение к первой сетке должно быть больше ΔU_1 . Если оно меньше, то необходима регулировка напряжения смещения на первой сетке.

Возможность повторения в пентодах функциональных зависимостей с заданными параметрами проверена на примере характеристики, аппроксимирующей функцией $|\sin^2 x|$, полученной для 2 экз. лампы 6Ж4. Данные режима питания и нагрузок в цепях анода и второй сетки приведены в табл. 7.

Таблица 7

№	$E_a, \text{ в}$	$E_2, \text{ в}$	$-E_3, \text{ в}$	$R_a, \text{ ком}$	$R_2, \text{ ком}$	$I_{a.макс}, \text{ ма}$	$U_{o.x}, \text{ в}$
Н—3	120	170	—40	37,0	12,4	0,525	6,0
2	106	147	—35	40,3	10,7	0,525	5,75

Из данных табл. 7 видно, что для совпадения характеристик с точностью порядка $\pm (5-8) \%$ необходимо изменение значений сопротивлений нагрузок R_a и R_2 соответственно на 10 и 14%, а напряжений питания E_a и E_2 — в пределах 12%. Таким образом, практически возможно повторение формы и параметров выпуклых характеристик в пентодах, а следовательно, и замена ламп. Наблюдающиеся при этом расхождения в форме и параметрах могут быть значительно уменьшены или устранены путем изменения напряжения на электродах лам-

пы, сопротивлений резисторов в цепях анода и второй сетки, а также методом подбора ламп.

Влияние одновременных изменений напряжений питания по накалу, аноду, второй и третьей сеткам на форму выпуклой характеристики и ее параметры показано на рис. 41 на примере пентода 6Ж4, находящегося в ре-

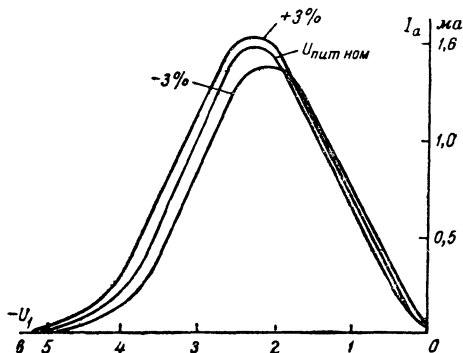


Рис. 41. Влияние изменения напряжения питания на форму выпуклой характеристики лампы 6Ж4.

жиме $E_a=40$ в; $E_2=140$ в; $E_3=-22$ в; $R_a=6,2$ ком и $R_2=2$ ком. Из этого рисунка видны изменения, происходящие в выпуклых характеристиках в части их «основания» $U_{0.х}$, максимума анодного тока $I_{a.макс}$, его положения, симметричности и крутизны нарастающего $S_{нар}$ и падающего $S_{пад}$ участков при совместном изменении напряжений источников питания на $\pm 3\%$.

Эти характеристики показывают, что изменение напряжения питания на $\pm 3\%$ не оказывает резкого влияния на деформацию формы выпуклой характеристики и изменение ее положения. При этом видно, что наибольшее влияние изменение напряжения питания оказывает на нарастающую ветвь характеристики и область максимума, тогда как на падающую ветвь оно воздействует значительно слабее. Очевидно, значение пространственного заряда между второй и третьей сетками пентода на падающем участке таково, что он ослабляет действие изменения напряжения питания на ток анода, стабилизируя его по отношению к нарастающему участку.

В табл. 8 приведены основные параметры выпуклых характеристик пентодов 6Ж4 и 6Ж9Б при номинальном

значении напряжения питания и изменении его на $\pm 3\%$. Для пентода 6Ж9Б влияние изменения напряжения питания на форму и параметры характеристики определялось для схемы с автоматическим смещением по третьей сетке, а для пентода 6Ж4 — при постоянном отрицательном напряжении на третьей сетке.

Таблица 8

Параметр	Лампа	Параметр при изменении напряжения питания на -3%	Начальное значение параметра	Параметр при изменении напряжения питания на $+3\%$
$S_{нар}$, <i>мА/в</i>	6Ж4	0,92	0,96	0,9
	6Ж9Б	1,6	1,7	1,7
$S_{пад}$, <i>мА/в</i>	6Ж4	0,78	0,82	0,8
	6Ж9Б	1,7	1,68	1,72
$I_{а, макс}$, <i>мА</i>	6Ж4	1,42	1,51	1,56
	6Ж9Б	3,08	3,2	3,3
$U_{о.х.}$, <i>в</i>	6Ж4	5,0	5,15	5,3
	6Ж9Б	5,7	5,5	5,35
Положение максимума	6Ж4	2,15	2,2	2,3
	6Ж9Б	2,25	2,35	2,5

Из данных этой таблицы видно, что как для пентода 6Ж4, так и для пентода 6Ж9Б изменение крутизны нарастающей и падающей ветвей $S_{нар}$ и $S_{пад}$ не превышает $6,2\%$, изменение тока анода в максимуме характеристики не превышает 6% , положение максимума по оси управляющих напряжений OU_1 меняется не более чем на $6,7\%$, а величина «основания» характеристики не более чем на 3% (рис. 41).

В случае, когда влияние изменения напряжения питания на форму заданной характеристики недопустимо или должно быть сведено к минимуму, необходима стабилизация источника питания. Требуемая стабильность зависит от точности соответствия анодно-сеточной характеристики заданной функциональной зависимости или сохранения ее первоначальной формы. Так, сохранение формы характеристики с точностью до десятых долей процента вызывает необходимость стабилизации источников питания со стороны высокого напряжения не хуже $0,1\%$, а со стороны низкого не хуже 1% . При более низких требованиях к сохранению точности формы характеристики требования к стабильности напряжения могут быть $1-2\%$.

Устойчивость работы пентода в исследованном режиме при активных нагрузках в цепях анода и второй сетки такая же, как и в обычном режиме. Так, при непрерывной работе пентода 6Ж4 в течение 18 ч и условия, что напряжение источников питания поддерживается с точностью до 10^{-2} в, устойчивость характеристик, аппроксимирующихся, например, гиперболой и параболой (см. рис. 31), такова, что в них не наблюдается заметных изменений формы.

Устойчивость и надежность работы пентода определяются также допустимыми мощностями рассеяния на его электродах и напряжениями, прикладываемыми к ним. В исследованном режиме работы пентода анодный ток имеет пониженное значение вследствие ограничения его пространственным зарядом, а ток второй сетки, наоборот, повышенное.

Токи в цепях анода и второй сетки в общем случае определяются теми требованиями, которые предъявляются к форме выпуклой характеристики, ее параметрами, а также видом нагрузок.

Из приведенных здесь данных для рассмотренных типовых динамических режимов работы пентода с выпуклыми характеристиками при активных нагрузках можно установить, что мощности рассеяния на аноде и второй сетке, а также прикладываемые к электродам напряжения находятся в допустимых пределах. Эти данные сведены в табл. 9, в которой указаны мощности рассеяния по наибольшему току, протекающему через данный

Таблица 9

Тип лампы и вид характеристики	Мощность рассеяния, <i>вт</i>				Напряжения, <i>в</i>			
	по аноду		по второй сетке		по аноду		по второй сетке	
	допустимая	фактическая	допустимая	фактическая	допустимые	фактические	допустимые	фактические
6Ж4, парабола	3,3	0,035	0,45	0,081	330	125	165	165
синус	3,3	0,040	0,45	0,055	330	120	165	160
гипербола	3,3	0,040	0,016	0,055	91	120	153	152
дуга окружности	3,3	0,046	0,016	0,038	91	123	153	126
синус квадратный	3,3	0,045	0,016	0,43	91	106	153	147
треугольная	3,3	0,013	0,016	0,163	91	30	153	52
6Ж1Б, симметричная	1,2	0,005	0,40	0,072	150	105	125	100
6П9, несимметричная	9,0	0,10	1,5	0,036	330	170	330	220

электрод; в точке максимума для цепи анода; при равном нулю напряжении на первой сетке для цепи второй сетки и допустимые напряжения на электродах лампы.

Если иметь в виду использование исследуемого режима работы пентода не только при активных, но при индуктивно-емкостных нагрузках, то токи покоя в цепи второй сетки могут быть больше допустимых. Поэтому целесообразно конструировать пентоды с такой экранирующей сеткой, которая допускает рассеяния более значительной мощности, чем в существующих лампах.

6. ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВТОРОЙ СЕТКЕ И ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ТРЕТЬЕЙ СЕТКЕ НА ВРЕМЯ ПРОЛЕТА ЭЛЕКТРОНОВ

В приемно-усилительных лампах предел усиления высоких частот в основном зависит от входного реактивного сопротивления лампы и времени пролета электронов.

Оценим возможное изменение предела усиления по частоте за счет составляющей времени пролета, на которую оказывают действие напряжения, прикладываемые к электродам лампы.

В обычных режимах работы ламп с сетками большая часть общего времени пролета электронов от катода к аноду затрачивается на движение от катода до первой сетки. Это обуславливается тем, что в плоскости первой сетки действует обычно небольшое ускоряющее поле, в то время как на других участках движения электронов ускоряющее поле значительно выше.

Пространственный заряд у катода вызывает нелинейное распределение потенциала по обеим сторонам, увеличивая время пролета электрона. Это увеличение времени пролета обычно составляет примерно 30% первоначального и определяется как

$$\tau = 0,51 \cdot 10^{-7} \frac{d_{к.с}}{U^{3/2}},$$

где $d_{к.с}$ — расстояние между катодом и первой сеткой.

Рассматриваемый режим работы пентода отличается от обычного тем, что, во-первых, напряжение на второй сетке при работе лампы изменяется в значительных пределах, во-вторых, отрицательный потенциал на третьей сетке вызывает торможение электронов и образование

пространственного заряда. Обе эти причины должны приводить к увеличению времени пролета электронов, а тем самым уменьшать предел усиления пентода на высоких частотах.

Изменение напряжения на второй сетке вследствие падения напряжения на резисторе R_2 будет вызывать следующее изменение времени пролета, выраженное через действующее напряжение на первой сетке:

$$n_1 = \frac{\tau'_{к1}}{\tau''_{к1}} = \frac{U_{1д2}^{3/2}}{U_{1д1}^{3/2}} = \frac{(U_{1.2} + D_{1.2}U_{2д2})^{3/2}}{(U_{1.1} + D_{1.2}U_{2д1})^{3/2}},$$

где $\tau'_{к1}$, $U_{1д1}$ и $U_{2д1}$ — соответственно время пролета электрона на пути катод — первая сетка, действующий потенциал на первой сетке и действующее напряжение на второй сетке, соответствующее отсечке анодного тока на падающей ветви характеристики, где $U_{1д1}$ и $U_{2д1}$ имеют наименьшее значение.

Началу нарастающего участка анодно-сеточной характеристики, где напряжение на второй сетке и действующий отрицательный потенциал на первой сетке имеют наибольшее значение, соответствуют $\tau''_{к1}$, $U_{1д2}$, $U_{2д2}$.

Изменение времени пролета электронов в пространстве вторая — третья сетки, где они испытывают торможение вследствие отрицательного напряжения на третьей сетке и пространственного заряда, определим по отношению к случаю, когда влиянием последнего можно пренебречь. Это изменение может быть приближенно найдено при помощи соотношения, обычно используемого в случае диода, имеющего отрицательный анод [Л. 29]:

$$n_2 = \frac{T_{п.з}}{T_0} = \frac{2(1 + \varphi_0)}{\sqrt{\gamma_0^2 + \frac{16}{9}\alpha + \gamma_0}},$$

где $T_{п.з}$ — время пролета электрона с учетом влияния пространственного заряда; T_0 — время пролета одиночного электрона при отсутствии пространственного заряда, а φ_0 , α и γ_0 для рассматриваемого режима работы пентода имеют величины

$$\varphi_0 = \frac{U_{мин}}{U_2} = 0; \quad \alpha = \frac{I_a}{I_2} = 0,1 \text{ и } \gamma_0 = 1.$$

Эти соотношения предполагают, что вторая сетка представляет собой идеальную сетку, совершенно свободно пропускающую электроны и создающую электрическое поле, как сплошной проводящий электрод. При этом полагаем, что поле однородно, а разброс электронов по скоростям и краевой эффект отсутствуют. Такая идеализация дает возможность оценивать ориентировочно время пролета электрона.

Для пентода 6Ж4, например, в случае изменения напряжения на второй сетке в 2,8 раза от наибольшего его значения время пролета электрона увеличивается в 3,6 раза, вследствие торможения электронов, вызванного отрицательным потенциалом на третьей сетке, равным 78 в, время пролета увеличивается в 1,4 раза.

Таким образом, больше всего на частотные свойства пентода влияет перепад напряжений, происходящий на второй сетке, вызванный резистором R_2 в результате изменения токораспределения. В тех случаях, когда время пролета электронов имеет большое значение, для уменьшения его целесообразно путем соответствующего режима работы второй сетки перепад напряжений ΔU_2 выбирать наименьшим.

7. СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПУКЛЫХ ФОРМ В ПЕНТОДАХ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ПОЛУЧАЕМЫМИ ДРУГИМИ СПОСОБАМИ

Сравним свойства пентодов с выпуклыми характеристиками с характеристиками и свойствами ламп специальных конструкций со схемными методами, предназначенными для получения функциональных зависимостей. Воспользуемся в этих целях данными лампы QK-329 [Л. 2] как наиболее отработанного прибора подобного типа, моноскопа [Л. 18] и смесительной лампы Герольда и Мюллера [Л. 15]. Из схемных методов возьмем метод линейно-кусочной аппроксимации, нашедший наибольшее распространение и имеющий преимущества перед другими методами благодаря универсальности (получение различных функциональных зависимостей), точности аппроксимации и устойчивости в работе [Л. 5, 9].

При сопоставлении с лампой QK-329, которая имеет вогнутую характеристику, возьмем ее параметры при

активной нагрузке в цепи анода $R_a = 100 \text{ ком}$, рекомендуемой фирмой.

Лампам с «масками» и вторичным эмиттером электронов свойственны большие напряжения управления порядка 30—50 в и больше, тогда как выпуклые характеристики в исследованных нами приемно-усилительных пентодах имеют напряжение управления от 1—2 до 8—12 в.

Данные некоторых пентодов с типичными выпуклыми характеристиками и сравниваемых с ними специальных ламп и других способов получения функциональных зависимостей приведены в табл. 10. Выпуклые характеристики генераторного пентода ГУ-50 благодаря его конструктивным особенностям имеют наибольшую из всех исследованных пентодов область напряжения управления $U_{упр}$ и значение тока анода в максимуме.

Из табл. 10 с приведенными основными данными и параметрами специальных функциональных ламп, пентодов с выпуклыми характеристиками, а также схем, воспроизводящих функциональные и специальные зависимости, можно установить следующее:

1. Из всех ламп с характеристиками специальных форм и способов их получения другими методами известна всего одна разработка Герольда и Мюллера, в которой лампа предназначена для преобразования частоты в радиоприемных устройствах на ультравысокой частоте. Однако вследствие большой сложности ее конструкции она не нашла применения, хотя обладает рядом положительных свойств.

Из других ламп и способов получения характеристик специальных форм известны лишь те, которые предназначены только для функциональных преобразований.

2. По универсальности способа получения характеристик, отвечающих различным функциональным зависимостям с различными параметрами, рассматриваемый метод имеет преимущества перед другими.

3. Точность воспроизведения функциональных зависимостей в рассматриваемом методе с пентодами, так же как и в лампах специальных конструкций, зависит от тех пределов, в которых изменяются напряжения управления. При малых напряжениях управления (до 1 в) могут быть получены точности соответствия порядка долей процента, а при больших — порядка нескольких процентов, т. е. примерно те же точности, что и при других методах.

Таблица 10

Лампы и схемы	Вид характеристики	$U_{0,x}$	$\Delta I_{a, \max}, \text{мА}$	$S_a / I_a, \text{В}^{-1}$	Точность соответствия, %	$K = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$
ГУ-50	Парабола	42	0,58	—	3,5	0,9
6Ж4	"	3	0,26	—	0,34—7,1	16,4
6Ж4	Синус при $0 \leq x \leq \pi$	4,0	0,4	—	0,3—7,5	16,0
6Ж4	Дуга окружности	3,0	0,16	—	0,3—1,85	8,8
6Ж4	Гипербола	2,6	0,34	—	0,6—4,4	12,6
QK-329	Парабола	100	0,7	—	0,5—3,5	1,3
6Ж4	Симметричная	2,2—8,0	0,12—4,5	0,8—2,0	—	2,9—12
6Ж9Б	"	5,5	3,2	1,1	—	9
Моноскоп	Диаграмма антенны РЛС	50	0,055	—	± 5	—
Смесительная лампа Ге-рольда	Симметричная	—	0,2	0,5	—	—
Линейно-кусочная аппроксимация	а) квадратичная б) пропорциональная корню квадратному в) синус при $0 \leq x \leq \pi$	13 24—100 100	— — —	— — —	— 5,0 0,4—1,2	3,2 0,4—2,0 0,054

При оценке точности соответствия функциональным зависимостям следует учитывать, что указанные результаты были получены с обычными лампами, предназначенными для усиления и генерирования, тогда как в специальных лампах предусматриваются особые меры для получения больших точностей. Поэтому если разработать специальную конструкцию пентода, то можно предположить возможность получения более высокой точности в больших диапазонах напряжений управления, а также большей эффективности управления S_a/I_a , в^{-1} . Кроме того, для получения больших точностей в более широких областях изменения напряжения возможно применение в цепях второй сетки и анода соответствующих нелинейных сопротивлений.

Требование соответствия характеристик лампы с большой степенью точности функциональным зависимостям существенно там, где лампы применяют для решения различного рода математических или специальных задач. В других случаях применения высокая точность (порядка десятых долей процента) воспроизведения той или иной зависимости не имеет решающего значения и возможность использования тех или иных ламп будет обуславливаться рядом других свойств.

К этим свойствам относятся: правильность формы характеристики, высокая эффективность управления, возможность усиления в широком диапазоне частот, низкий уровень флуктуаций, простота устройства, устойчивость работы, возможность получения характеристик с различными параметрами и их повторения. Этими свойствами обладает рассмотренный способ получения выпуклых характеристик в пентодах.

4. По эффективности управления параметром $S_a/I_{a,\text{ср}}$, где S_a и I_a определяются через средние значения их в падающих и нарастающих ветвях, способ получения выпуклых характеристик в пентодах оказывается наилучшим.

5. Из всех рассмотренных способов получения функциональных характеристик выпуклых форм способ получения их в пентодах наиболее прост, так как он использует обычные электронные лампы малых размеров, работающие при невысоких значениях напряжения на электродах, и содержит схему с минимумом элементов во внешних цепях.

6. Наибольшие значения входных сопротивлений $R_{вх}$ имеют специальные лампы и пентоды с выпуклыми характеристиками, работающие в режимах отсутствия сеточных токов, а также лампы двойного управления.

Функциональные преобразователи, построенные с помощью метода линейно-кусочной аппроксимации, имеют относительно небольшие входные сопротивления, так как схема входа представляет собой активный делитель напряжений. Схемы по методу четырехполюсников используют работу ламп в режимах входных токов и имеют низкие входные сопротивления.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПЕНТОДОВ С ВЫПУКЛОЙ ФОРМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

8. СВОЙСТВА ПЕНТОДА С ВЫПУКЛОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ КАК УСИЛИТЕЛЯ

Обычно пентоды работают в условиях, при которых напряжение на аноде не влияет заметно на ток анода, а напряжение на второй сетке поддерживается постоянным и также не влияет на режим работы лампы. Анодный ток в этом случае будет функцией напряжения на первой и третьей сетках (если пентод работает в режиме двойного управления), т. е. $I_a = f(E_1, E_3)$. Свойства пентода как усилителя в обычном режиме рассмотрены во многих работах [Л. 30]. В рассматриваемом же случае в пентоде возникают условия, при которых на анодный ток оказывает влияние напряжение на всех его электродах, а анодно-сеточная характеристика имеет выпуклую форму и содержит падающий участок. Поэтому те зависимости, которые известны и описывают свойства пентода как усилителя в обычных условиях его работы, в этом случае не могут быть использованы.

Предполагая в первом приближении, что нарастающие и падающие участки выпуклой характеристики в некоторой области линейны, напряжение на третьей сетке постоянно, а на анодный ток оказывают влияние напряжения на аноде, первой и второй сетках, рассмотрим условия, от которых зависит усиление каскада с таким пентодом.

Из общей теории многосеточных электронных ламп [Л. 32] известно, что в пентоде анодный ток и ток второй сетки представляют собой функцию напряжений на всех электродах, т. е.

$$I_a = f(E_a, E_2, E_3, E_1),$$

где E_a, E_2, E_3 и E_1 — соответственно напряжения на аноде второй, третьей и первой сетках.

В случае пентода, имеющего нагрузки в цепях анода и второй сетки и не имеющего нагрузки в цепи третьей сетки, т. е. при постоянстве напряжения на ней, теорема об эквивалентных цепях пентода в применении к переменным токам имеет вид [Л. 31]:

$$\Delta I_a = \frac{\mu_{a1} \Delta E_1 + \mu_{a2} \Delta E_2}{R_{ia} + Z_a}; \quad (1)$$

$$\Delta I_2 = \frac{\mu_{2a} \Delta E_a + \mu_{21} \Delta E_1}{R_{i2} + Z_2}; \quad (2)$$

$$\Delta I_1 = \frac{\mu_{a1} \Delta E_a + \mu_{12} \Delta E_2}{R_{i1} + Z_1}, \quad (3)$$

где μ_{a1}, μ_{a2} и μ_{1a} — статические коэффициенты усиления по первой, второй сеткам и аноду; μ_{2a} и μ_{21} — то же для цепей второй сетки по аноду и первой сетке; R_{ia}, R_{i2} и R_{i1} — внутренние сопротивления цепи анода, второй и первой сеток; Z_a, Z_2 и Z_1 — нагрузки в цепях анода, второй и первой сеток.

В случае, когда первая сетка работает управляющей, изменения напряжения на аноде ΔE_a и второй сетке ΔE_2 определяются изменениями напряжений на нагрузках Z_a и Z_2 , включенных в их цепи, т. е.

$$\Delta E_a = -Z \Delta I_a, \quad (4)$$

$$\Delta E_2 = -Z_2 \Delta I_2. \quad (5)$$

Сопоставляя эти уравнения с уравнениями (1) и (2) и рассматривая общий случай комплексных нагрузок в цепях анода и второй сетки, определяем:

$$\Delta I_a = \Delta E_1 \frac{\mu_{a1}(R_{i2} + Z_2) - \mu_{a2}\mu_{21}Z_2}{(Z_a + R_{ia})(Z_2 + R_{i2}) \pm \mu_{a2}Z_aZ_2}. \quad (6)$$

На падающем участке анодно-сеточной характеристики при уменьшении напряжения на первой сетке напря-

жение на аноде будет возрастать, т. е. выполняется условие $+\Delta E_a = \Delta I_a R_a$, из которого следует, что фаза напряжения на аноде совпадает с фазой напряжения на первой сетке.

В случае, если рабочая точка расположена в пределах нарастающего участка анодно-сеточной характеристики, фаза напряжения в анодной цепи будет противоположна фазе напряжения первой сетки, т. е. $-\Delta E_a = \Delta I_a Z_a$, сохранится как и при обычной форме характеристики лампы.

Группируя и преобразовывая уравнения (6), (4) и (5) и учитывая, что $\pm \Delta E_a = \Delta I_a z_a$, получим следующее соотношение, определяющее усиление $K_{a.в}$ в цепи анода для выпуклой характеристики:

$$K_{a.в} = \frac{\Delta E_a}{\Delta E_1} = Z_a \frac{\mu_{a1}(R_{i2} + Z_2) - \mu_{a2}\mu_{21}Z_2}{(R_{ia} + Z_a)(R_{i2} + Z_2) \pm \mu_{a2}\mu_{2a}Z_aZ_2} =$$

$$= \frac{\mu_{a1}}{1 + \sigma_a \pm \frac{K_c}{1 + \sigma_2}} - \frac{\mu_{a2}\mu_{21}}{(1 + \sigma_a)(1 + \sigma_2) \pm K_c}, \quad (7)$$

где

$$\frac{R_{ia}}{Z_a} = \sigma_a; \quad \frac{R_{i2}}{Z_2} = \sigma_2 \text{ и } \mu_{a2}\mu_{2a} = K_c. \quad (8)$$

Обозначим $\frac{\mu_{a1}}{\mu_{21}} = n$ и назовем n коэффициентом усиления системы. Перенеся μ_{a1} в левую часть, преобразуем уравнение (7) к виду:

$$\frac{K_{a.в}}{\mu_{a1}} = \frac{1 + \sigma_2 - \frac{\mu_{a2}}{n}}{(1 + \sigma_a)(1 + \sigma_2) \pm K_c}, \quad (9)$$

где отношение $K_{a.в}/\mu_{a1}$ характеризует относительное значение реального усиления в анодной цепи.

Итак, усиление в анодной цепи пентода определяется двумя составляющими и зависит, во-первых, от нагрузок в цепи анода и второй сетки, во-вторых, от того, на каком участке анодно-сеточной характеристики происходит работа. Для падающего участка характеристики коэффициент K_c , определяющий влияние анодной цепи и второй сетки друг на друга, больше нуля, что способствует стабилизации усилительного каскада. Наоборот, для нарастающего участка характеристики $K_c < 0$ и усиление в анодной цепи увеличивается.

Коэффициент K_c может рассматриваться как параметр, характеризующий взаимную связь между анодом и второй сеткой и влияющий на условия работы усиительного каскада. Этот коэффициент в пределах падающей ветви характеристики обычно меньше единицы и изменяется в зависимости от напряжения на первой сетке. На нарастающем участке характеристики коэффициент K_c имеет наибольшее значение, а на участке, где анодный ток падает, — наименьшее. При напряжениях на первой сетке, близких к нулю, K_c становится значительно меньше единицы и влияния его можно не учитывать.

В случае, если σ_a и σ_2 больше 6—8, влиянием коэффициента K_c , который обычно на падающем участке не превышает единицы, можно пренебречь. На нарастающем участке коэффициент K_c может быть больше единицы.

Так, для пентода 6Ж4 на нарастающем участке коэффициент K_c может иметь значение 0,1—2,5, а на падающем — соответственно 0,05—0,75. Коэффициент $n = \mu_{a1}/\mu_{a2}$ на падающей ветви имеет более низкое значение, чем на нарастающей, и может быть меньше единицы. При $n(1+\sigma_2) = \mu_{a2}$, т. е. при равенстве числителя в уравнении (9) нулю, усиление $K_{a.v}$ будет отсутствовать. Если $n(1+\sigma_2) > \mu_{a2}$, то в анодной цепи получится усиление и $K_{a.v}$ не превышает статического коэффициента усиления μ_{a1} , а фаза усиленного напряжения в анодной цепи совпадает с фазой напряжения первой сетки. Если $n(1+\sigma_2) < \mu_{a2}$, т. е. когда $\mu_{a2} > \mu_{a1}$, фаза напряжения в анодной цепи изменяется на 180° , что соответствует нарастающей ветви характеристики анодного тока.

Если n имеет на падающей ветви характеристики такое значение, при котором числитель уравнения (9)

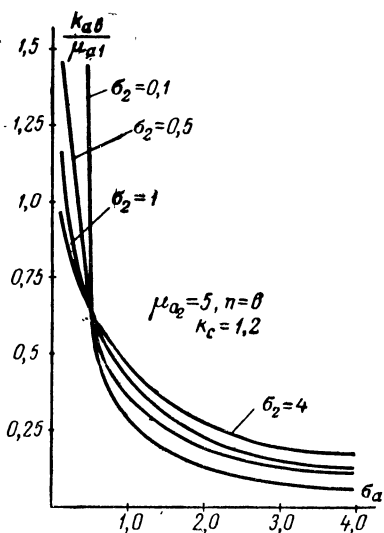


Рис. 42. Характеристики $K_{a.v}/\mu_{a1} = f(\sigma_a)$ для нарастающей ветви.

больше знаменателя, то в цепи анода усиление $K_{a,v}$ может превышать статический коэффициент μ_{a1} и меняется «знак» усиления.

Из семейства характеристик $K_{a,v}/\mu_{a1} = f(\sigma_a)$, вычисленных по соотношению (8) для различных значений n и σ_2 при $K_c < 0$ и постоянном значении μ_{a2} для нарастающего участка характеристики, можно установить

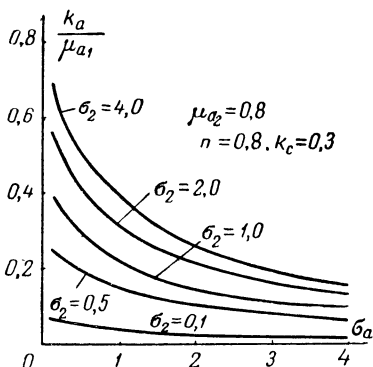


Рис. 43. Характеристики $K_{a,v}/\mu_{a1} = f(\sigma_a)$ для падающей ветви.

при малых величинах σ_a , усиление в анодной цепи превышает статическое.

В области больших значений σ_a усиление мало зависит от коэффициента σ_a и чем выше значение n , тем меньше его влияние.

На рис. 43 приведены семейства характеристик $K_{a,v}/\mu_{a1} = f(\sigma_a)$ для падающей ветви и таких значений коэффициентов K_c , μ_{a2} и n , кото-

рые характерны для пентода 6Ж4.

Если в цепи второй сетки имеется активная нагрузка R_a и влияние анодной цепи на вторую сетку и второй сетки на анод отсутствует ($\mu_{2a} = \mu_{a2} = 0$), то соотношение (9) принимает вид:

$$K_a = \frac{\mu_{a1}}{1 + \frac{R_{ia}}{R_a}}. \quad (10)$$

Таким образом, уравнение, описывающее работу усилительного каскада на пентоде при обычном режиме его работы, представляет собой частный случай соотношения (9), определяющего работу лампы при нагрузке в цепи анода и второй сетки.

Из уравнений (9) и (10), полагая, что μ_{a1} в обоих случаях одинаково, получим:

$$\frac{K_{a,v}}{K_a} = \frac{\left(1 + \sigma_2 - \frac{\mu_{a2}}{n}\right)(1 + \sigma_a)}{(1 + \sigma_a)(1 + \sigma_2) \pm K_c}.$$

Для падающей ветви можно принять $K_c \approx 0$; и тогда

$$\frac{K_{a.v}}{K_a} \approx \frac{1 + \sigma_2 - \frac{\mu_{a2}}{n}}{1 + \sigma_2}.$$

Отсюда видно, что усиление $K_{a.v}$ имеет меньшее значение, чем для каскада на лампе с обычной формой характеристики.

Для нарастающей ветви в случае, когда $K_c > 1$, усиление $K_{a.v}$ может быть больше, чем при обычной форме характеристики, если $\mu_{a2}/n < 1$. Следовательно, включение в цепь второй сетки активной нагрузки, не зашунтированной емкостью, может привести и на нарастающем участке к возникновению положительной обратной связи, увеличивающей усиление в системе.

Если рабочая точка соответствует максимуму анодного тока $I_{a, \max}$, то при изменении напряжения на первой сетке в сторону уменьшения отрицательного напряжения, а также в сторону увеличения его напряжения на аноде будет увеличиваться. Следовательно, в этом случае возможно парафазное выпрямление при помощи одного пентода.

Совпадение фаз на падающей ветви в цепях первой сетки и анода дает возможность получать самовозбуждение при обратной связи без переворачивания фазы. Используя эти свойства, можно построить одноламповые RC-генераторы, а также генераторы гармонических колебаний с одним контуром в цепи анода.

Из уравнений (1) и (2), учитывая (3) и (5), можно по аналогии с анодной цепью определить усиление в цепи второй сетки K_{2B} :

$$\Delta I_2 = \Delta E_1 \frac{\mu_{21}(R_{ia} + Z_a) - \mu_{a1}\mu_{2a}Z_a}{(R_{ia} + Z_a)(R_{i2} + Z_2) - \mu_{2a}\mu_{a2}Z_aZ_2}. \quad (11)$$

После соответствующих преобразований в уравнении (11), учитывая введенные ранее обозначения и то, что характеристика тока второй сетки имеет только нарастающую ветвь, находим:

$$-K_{2B} = \frac{\Delta E_2}{\Delta E_1} = \mu_{21} \frac{1 + \sigma_a \pm n\mu_{2a}}{(1 + \sigma_a)(1 + \sigma_2) \pm K_c}. \quad (12)$$

Уравнению (12) можно придать форму, удобную для сравнения с уравнением (8):

$$-K_{2B} = -\frac{\mu_{21}}{1 + \sigma_2 \pm \frac{K_c}{1 + \sigma_a}} \pm \frac{\mu_{a1}\mu_{2a}}{(1 + \sigma_a)(1 + \sigma_2) \pm K_c}. \quad (13)$$

Таким образом, усиление в цепи второй сетки определяется также двумя составляющими, которые подобны соответствующим членам уравнения (8) и зависят от того, какому участку анодно-сеточной характеристики соответствует рабочая точка.

При равенстве двух составляющих в уравнении (13), т. е. когда $\mu_{21}(1 + \sigma_a) = \mu_{a1}\mu_{2a}$ или $n\mu_{2a} = 1 + \sigma_a$, усиление в цепи второй сетки отсутствует. Так как μ_{2a} не может быть больше 1, то это возможно при условии, если коэффициент n больше 1, т. е. когда μ_{a1} больше μ_{21} . Это, например, может получиться для нарастающей ветви характеристики.

Для нарастающего участка характеристики $n\mu_{2a} > 1 + \sigma_a$ и $K_{2B} > 0$, а $n\mu_{2a} < 1 + \sigma_a$ и $K_{2B} < 0$, т. е. фаза усиленного в цепи второй сетки напряжения изменяется.

При больших значениях n , что справедливо для нарастающей ветви, усиление в цепи второй сетки K_{2B} при низких величинах σ_a может быть больше статического μ_{21} .

Так как в характеристике тока второй сетки отсутствует падающий участок, то $\Delta E_2 = -Z_2 \Delta I_2$ и фаза напряжения в цепи второй сетки в усилительном режиме не совпадает с фазой напряжения на первой сетке. Это дает возможность, используя падающий участок в характеристике анодного тока, получать в таком каскаде одновременно два напряжения, противоположные по фазе: в анодной цепи, совпадающее по фазе с сеточным напряжением, и в цепи второй сетки, не совпадающее.

На рис. 44 и 45 приведены семейства характеристик K_{2B}/μ_{21} в зависимости от параметра σ_a при различных значениях σ_2 и n для случаев $K_c > 0$ и $K_c < 0$ соответственно при $n < 1$ и $n > 1$.

Из равенства уравнений (9) и (12) определяем условия, при которых усиление напряжения в цепи анода и второй сетки будут равны:

$$n\sigma_2 - \mu_{a2} = 1 + \sigma_a - n(1 + \mu_{2a}), \quad (14)$$

или

$$n = \frac{\mu_{a1}}{\mu_{2,1}} = \frac{1 + \sigma_a + \mu_{a2}}{1 + \sigma_2 \pm \sigma_{2a}}. \quad (15)$$

Так как для заданного режима работы пентода статические коэффициенты усиления μ_{a1} , μ_{21} , μ_{2a} и μ_{a2} должны быть известны, равенство усиления в цепях анода и второй сетки $K_{a,в} = K_{2в}$ может быть достигнуто выбором соответствующих коэффициентов σ_a и σ_2 .

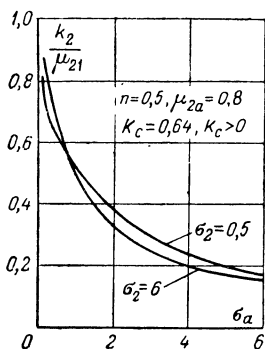


Рис. 44. Характеристики $K_{2в}/\mu_{2,1} = f(\sigma_2)$ для нарастающей ветви.

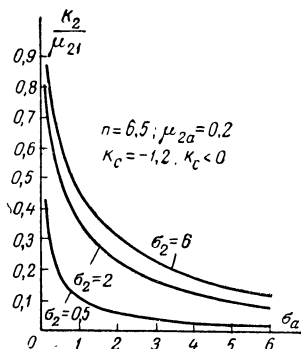


Рис. 45. Характеристики $K_{2в}/\mu_{2,1} = f(\sigma_2)$ для падающей ветви.

Используя уравнение (14), находим соотношение, по которому, задаваясь значением σ_2 , можно определить величину σ_a , т. е. нагрузку в цепи анода:

$$\sigma_a = n(1 + |\sigma_2 \pm \mu_{2a}|) - \mu_{a2} - 1.$$

Условия равенства $K_{a,в} = K_{2в}$ для нарастающей и падающей ветвей выпуклой характеристики различны. Действительно, значения коэффициентов μ_{a1} , μ_{21} , μ_{a2} и μ_{2a} , а также знак при коэффициенте μ_{a2} , находящемся в знаменателе уравнения (14), неодинаковы.

Из уравнений (9) и (12) находим соотношение между усилением в цепи анода и второй сетки:

$$\frac{K_{a,в}}{K_{2в}} = \frac{\Delta E_a}{\Delta E_2} = \frac{n(1 + \sigma_2) - \mu_{a2}}{1 + \sigma_a \pm n\mu_{2a}}. \quad (16)$$

Это уравнение дает возможность выбрать необходимое соотношение между усилением в цепи анода и второй сетки, а также выходными сопротивлениями в их

цепях. На падающем участке характеристики отношение усиления $K_{a.в}/K_{2в}$ меньше, чем на нарастающем, так как для последнего произведение μ_{2a} по своему абсолютному значению больше нуля.

На рис. 46 приведено семейство характеристик, показывающих зависимость соотношения усиления $K_{a.в}/K_{2в}$ от σ_a для случаев, когда $\mu_{2a} > 0$ и $\mu_{2a} < 0$ при постоянных μ_{2a} и μ_{a2} .

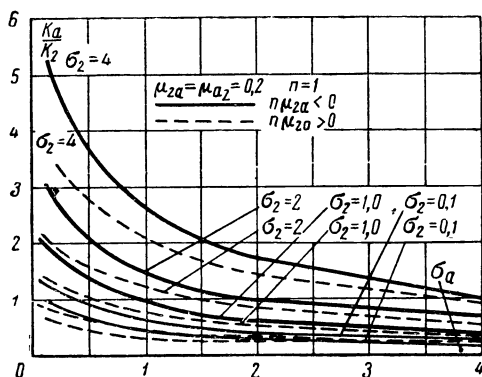


Рис. 46. Зависимость $K_{a.в}/K_{2в}$ от σ_a .

Ниже приведены фазовые соотношения, которые могут образовываться в пентоде с выпуклой характеристикой.

	Падающая ветвь	Нарастающая ветвь
Напряжение на аноде	В фазе с напряжением первой сетки и противофазе с напряжением второй сетки	В противофазе с напряжением первой сетки и фазе с напряжением второй сетки
Напряжение на второй сетке	В противофазе с напряжением первой сетки и напряжением анода	В противофазе с напряжением первой сетки и фазе с напряжением анода

Применение уравнений (9) и (12) ограничено условиями таких вариаций токов и напряжений в лампе, при которых значения μ_{21} , μ_{a2} , μ_{2a} , R_{i1} и R_{i2} были бы неизменными. Это условие в общем случае не соблюдается, так как параметры пентода при изменении напряжения на первой сетке изменяются в широких пределах. Однако если иметь в виду такие изменения напряжения на первой сетке, которые соответствуют линейным участ-

кам нарастающей и падающей ветви характеристики, то в первом приближении параметры пентода могут быть приняты постоянными.

Параметры пентода S , R_i и μ как для цепи анода, так и для цепи второй сетки на нарастающей и падающей ветвях характеристики, вообще говоря, различны, поэтому значения усиления $K_{a.v}$ и $K_{2в}$ следует определять отдельно для каждой из ветвей.

Если форма характеристики в динамическом режиме близка к симметричной, то усиление должно быть примерно одинаковым, т. е. $K_{a.пад} \approx K_{a.нар}$.

Практически может быть достигнута такая симметричность характеристики, при которой крутизна нарастающей и падающей ветвей отличаются друг от друга не более чем на 5—15%.

При несимметричной форме характеристики параметры падающих ветвей будут отличаться от параметров нарастающих ветвей и $K_{a.нар}$ и $K_{a.пад}$ также будут различны.

Для цепи второй сетки параметры S_{21} и R_{i2} имеют различное значение в зависимости от того, какому участку характеристики они соответствуют. Для падающей ветви крутизна S_{21} по первой сетке имеет повышенное значение по отношению к нарастающей, а R_{i2} , наоборот, пониженное.

Для пентодов и их режимов, данные которых здесь приводятся, значение усиления $K_{a.v}$ доходит при высоких величинах R_a ($R_a = 30 \div 100 \text{ ком}$) до 45. Соответственно усилие $K_{2в}$ в цепи второй сетки может составлять 20.

Низкое внутреннее сопротивление цепи анода R_{ia} и цепи второй сетки R_{i2} при значительном коэффициенте усиления K_v дает возможность использовать исследованный режим пентода для усиления при небольших значениях нагрузки Z . Тем самым этот режим работы пентода можно применить для усиления в широкой полосе частот.

Влияние нагрузки в цепи второй сетки Z_2 на усиление в цепи анода позволяет разделить цепь резонансного уси-

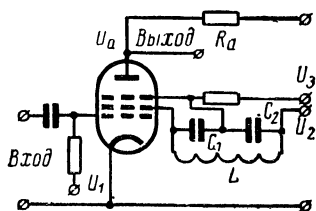


Рис. 47. Принципиальная схема каскада с резонансным контуром в цепи второй сетки.

ния и цепь нагрузки. В этом случае резонансный контур следует включить в цепь второй сетки, а нагрузка Z_a , с которой снимается полезное напряжение, включается в анодную цепь.

Одна из таких схем, рассмотренная Меликяном [Л. 32] и приведенная на рис. 47, имеет емкостную связь с третьей сеткой, потенциал на которой позволяет регулировать полосу пропускания резонансного контура L_2C_2 . При известных условиях это дает возможность превращать полосовой фильтр в режекторный.

9. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПЕНТОДОВ С ВЫПУКЛЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ В ИМПУЛЬСЫ

Ограничение. Ограничителем, как известно, называется такое нелинейное устройство, ток или напряжение на выходе которого не меняется, если напряжение на его входе будет выше или ниже заданного.

Ограничители находят широкое применение в импульсной, радиоприемной и измерительной технике и ряде других областей. Особенное распространение ограничители получили в импульсной технике, где они широко применяются в формирователях импульсов, селекции их по полярности, амплитуде и т. д.

Один из видов применяемых ограничителей представляют собой сеточные ограничители на электронных лампах, характеристики которых хорошо известны. Эти характеристики типичны для обычно применяемых в настоящее время ограничителей независимо от типа нелинейного элемента: электронная лампа (диод, одно- или многосеточная электронная лампа), полупроводниковый диод или транзистор [Л. 33].

Отсутствие в обычной характеристике ограничителя симметрии относительно оси OI_a сводит его функции в основном только к поддержанию на выходе некоторого заданного уровня. При помощи такой характеристики в электронных приборах возможно ограничение сверху, снизу, а также совмещение ограничения сверху и снизу (двустороннее ограничение). Таким ограничителем можно формировать прямоугольные импульсы с более крутыми фронтами, чем у подводимых к нему колебаний.

С увеличением амплитуды подводимого к ограничителю колебания продолжительность фронта нарастания импульса на выходе сокращается, а форма его приближается к прямоугольной.

Если максимальное значение ограниченного напряжения $U_{огр}$, а амплитуда подводимого синусоидального напряжения $U = U_m \sin \omega t = U_m$, то $U_{огр} = U_m \sin \frac{\tau_{ф.н}}{2}$ (рис. 48),

где ω — круговая частота;

$\tau_{ф.н}$ — продолжительность фронта нарастания.

Если $\tau_{ф.н} \ll \pi$, то и синус можно без больших погрешностей заменить его аргументом. Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} U_{огр} &\ll \frac{U_m \tau_{ф.н}}{2} \\ \tau_{ф.н} &\approx \frac{U_{огр}}{U_m} \frac{T}{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

чем меньше отношение $U_{огр}/U_m$, тем короче фронт нарастания $\tau_{ф.н}$ и тем ближе импульс к прямоугольной форме.

Однако пределы увеличения U_m определяются электрической прочностью схемы, а граница уменьшения $U_{огр}$ — необходимостью получения заданной амплитуды и длительностью фронта импульса на выходе [Л. 33, 34].

Как известно, при показанной на рис. 48 форме характеристики длительность ограниченного напряжения будет равна $\tau_{огр} \approx \pi - 2\tau_{ф.н}$, если предположить, что длительность фронта нарастания и спада одинакова. Заменяв $\tau_{ф.н}$ его значением, получим:

$$\tau_{огр} \approx \pi - \frac{U_{огр}}{U_m} \cdot \frac{T}{\pi}.$$

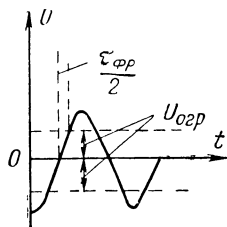


Рис. 48. Длительность фронта импульса при формировании импульса из синусоидального колебания.

Так как длительность фронта нарастания (спада) должна быть малой, длительность ограниченного напряжения будет близка к π . Это приводит к тому, что малая длительность $\tau_{огр}$ может быть получена в таких

ограничителях только за счет малой длительности периода подводимых колебаний.

Это вызывает необходимость применения достаточно высоких частот. В результате на выходе ограничителя образуются импульсы с высокой частотой повторения, которые не во всех случаях могут быть использованы в практических целях. Поэтому к таким ограничителям обычно подводятся остроконечные или прямоугольные импульсы малой длительности с частотой повторения, которая необходима.

При помощи одной ступени ограничения решить задачу получения коротких импульсов с большой крутизной фронта обычно не удастся. Поэтому приходится использовать несколько ступеней ограничения с промежуточным усилением между ними. В результате пределом крутизны фронта нарастания $\tau_{ф.н}$ и длительности $\tau_{огр}$ становятся паразитные емкости схемы [Л. 34].

Таковы вкратце основные свойства ограничителя с обычной формой характеристики.

Общие свойства. Пентоды с выпуклыми характеристиками как преобразователи-ограничители электрических колебаний в импульсы обладают рядом свойств, позволяющих упростить получение коротких импульсов с крутыми фронтами. Кроме того, при помощи такого преобразователя-ограничителя возможны формирование импульсов различных форм, умножение частоты импульсов, а также фазо-широтно-импульсная модуляция [Л. 36].

Рассматривая в дальнейшем свойства пентодного преобразователя-ограничителя с выпуклыми характеристиками, полагаем, что характеристики расположены в отрицательной области напряжения по первой сетке с падающей ветвью, доходящей до нулевого значения анодного тока.

На рис. 49 показано, как происходит образование импульсов при подаче на участок сетка — катод лампы синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$ в случае реальной характеристики, имеющей симметричную форму при выборе рабочей точки в начале нарастающего участка характеристики. При этом предполагается преобразование сигнала в режиме ограничения максимумом анодного тока.

Как видим, из-за выпуклой формы анодно-сеточной характеристики в анодной цепи пентода вместо одного

импульса образуются два. Образование первого импульса происходит на нарастающей части характеристики, тогда как на падающей части образуется второй импульс, отделенный от первого паузой. Величина паузы $\tau_{\text{пау}}$ может задаваться углом отсечки сверху $\phi_{0,\text{св}}$. Следовательно, при увеличении напряжения на сетке лампа один раз отпирается и один раз запирается ($U_a = E_a$ при

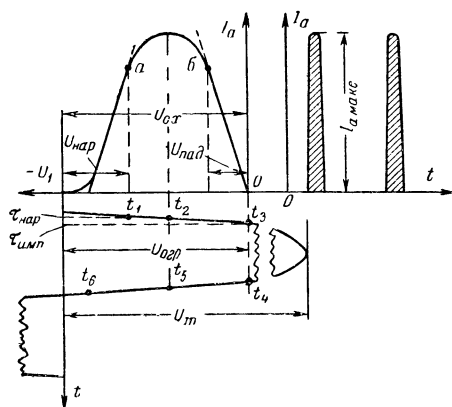


Рис. 49. Получение импульсов при выпуклой форме характеристики.

$t=t_0$, $U_a = E_{a,\text{мин}}$ при $t=t_1$ и $u_a = E_a$ при $t=t_3$). При уменьшении напряжения на сетке лампа также один раз отпирается и один раз запирается ($U_a = E_a$ при $t=t_4$, $U_a = E_{a,\text{мин}}$ при $t=t_5$ и $U_a = E_a$ при $t=t_6$).

Таким образом, выпуклая форма характеристики дает возможность разделения первичного колебания, поданного на вход лампы, на два новых, т. е. образования парных импульсов одной полярности на ее выходе. Таким образом, при изменении амплитуды подводимых колебаний U_m будут изменяться длительность парных импульсов и расстояния между ними. Это свойство преобразования импульсов постоянной длительности в импульсы переменной длительности и постоянной амплитуды позволяет одновременно модулировать импульсы по фазе и длительности, т. е. осуществлять фазо-широтно-импульсную модуляцию (ФШИМ).

Если полагать, что $\dot{U}_{0,x} = U_{\text{огр}}$, а $U_{0,x} = U_m \sin \omega \tau_{\text{имп}}$, то при $\tau_{\text{имп}} \ll \frac{2\pi}{\omega}$ синус можно заменить его аргументом (рис. 49). Тогда

$$\tau_{\text{имп}} \approx \frac{U_{0,x}}{U_m} \cdot \frac{T}{2\pi}.$$

Таким образом, выпуклая характеристика пентода ограничивает амплитуду подводимого колебания, а длительность импульса $\tau_{\text{и.в.х}}$ (в.х) — выпуклая характеристика) зависит от величины «основания» характеристики $U_{0,x}$. Чем меньше «основание» при заданном периоде T , тем короче может быть получен импульс. Это свойство пентодов с выпуклой характеристикой позволяет получать короткие импульсы без применения многокаскадных схем.

В ограничителе же с обычной характеристикой от ее протяженности зависит только время нарастания и спада импульса, но не его длительность.

Фронт нарастания ограниченного напряжения у пентода с выпуклой характеристикой будет определяться тем же соотношением, что и длительность импульса:

$$\tau_{\text{ф.в.х}} \approx \frac{U_{\text{нар}}}{U_m} \cdot \frac{T}{2\pi}.$$

Здесь, однако, $U_{0,x}$ заменено $U_{\text{нар}}$, так как время $\tau_{\text{ф.в.х}}$ определяется напряжением на первой сетке, которое соответствует нарастающему участку выпуклой характеристики $U_{\text{нар}}$. Таким образом, чем меньше протяженность нарастающего (падающего) участка выпуклой характеристики, тем короче будет фронт импульса.

В исследованных пентодах 6Ж4, 6Ж9Б, 6П9 и др. могут быть получены симметричные по форме анодно-сеточные характеристики с областью максимума, равной $0,5 U_{0,x}$, а при П-образной характеристике $0,8 U_{0,x}$.

Таким образом, если принять, что напряжение ограничения при обычной характеристике лампы $U_{\text{огр}} = U_{\text{нар}}$, то длительность фронта импульса, образуемого в пентоде с симметричной и П-образной характеристиками $\tau_{\text{ф.в.х}}$, может составлять по отношению ко всей длительности

$$\frac{\tau_{\text{ф.в.х}}}{\tau_{\text{имп}}} = \frac{U_{\text{нар}}}{U_{0,x}} = (0,1 \div 0,25).$$

В обычном сеточном ограничителе по максимуму прямоугольная форма анодного тока достигается в результате ограничения амплитуды подводимого колебания либо сеточными токами, либо током анода при условии, что напряжение на сетке становится положительным. В пентодном ограничителе с выпуклой характеристикой ограничение наступает благодаря ее форме, имеющей максимум анодного тока. Этот максимум, а следовательно, и ограничение тока анода получаются в отрицательной области напряжений по первой сетке, где отсутствуют сеточные токи. Сеточные токи возникают лишь там, где анодный ток незначителен или его нет.

Поэтому в рассмотренном пентоде-преобразователе сеточные токи будут ограничивать амплитуду подводимых колебаний только в той области, где они не оказывают влияния на ток анода, т. е. на форму импульса, возникающего в анодной цепи. В этом заключается одно из основных отличий в действии пентодного ограничителя от сеточного с обычной формой характеристики.

Следующая особенность преобразователей-ограничителей с выпуклой характеристикой заключается в возможности получения с их помощью импульсов различной формы. Действительно, если амплитуда подводимого колебания U_m значительно больше U_{0x} , то можно принять, что напряжение, определяющее ток лампы, изменяется по линейному закону. В этом случае ток на выходе лампы будет воспроизводить форму ее анодно-сеточной характеристики, если наибольшая постоянная времени анодной цепи $\tau_{a.макс} = C_a R_a$, состоящей из емкости C_a и сопротивления нагрузки R_a , мала по сравнению с интервалами коммутации напряжения на выходе лампы. Использование этого свойства рассматриваемого преобразователя-ограничителя может значительно упростить получение импульсов различных форм, сводя его в основном к получению нужной формы выпуклой анодно-сеточной характеристики.

В качестве примера ниже приведены импульсы, соответствующие различным формам выпуклой характеристики, реальной, П-образной (более строго—трапециевидной) и несимметричной. Так, на рис. 50 приведена форма прямоугольной характеристики.

При несимметричной форме характеристики, когда рабочая точка расположена в максимуме I_a , при $U_m > U_{нар}$ образуются импульсы, отличающиеся тем, что

первый импульс в зависимости от фазы колебаний на сетке может иметь либо крутые, либо пологие (рис. 51) фронты нарастания и спада.

В случае, когда амплитуда подводимых колебаний U_m имеет различное значение, импульсы будут иметь различную форму. Так, например, на рис. 51 приведены формы импульсов, которые соответствуют случаям:

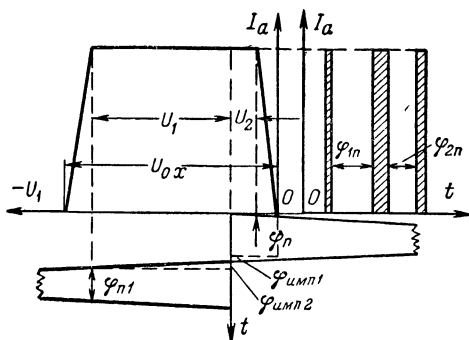


Рис. 50. Форма импульсов при прямоугольной форме характеристики.

а) $U_m = U_{\text{пад}}$; б) $U_m > U_{\text{пад}}$ и в) $U_m > U_{\text{нар}}$, когда рабочая точка расположена в максимуме анодного тока.

При рабочей точке, расположенной в начале нарастающего участка, импульсы будут иметь различные

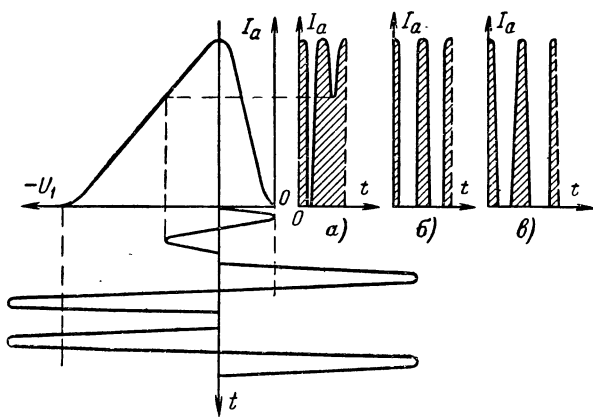


Рис. 51. Форма импульсов при несимметричной форме характеристики и рабочей точке, соответствующей $I_{a.\text{макс}}$.

фронты: первый — пологий передний и крутой задний, второй — наоборот, крутой передний и пологий задний (рис. 52).

При подаче на первую сетку лампы синусоидального напряжения наряду с импульсами, образующимися в цепи анода, одновременно будут возникать и импульсы в цепи второй сетки. Так как характеристика тока второй сетки содержит только нарастающую ветвь, форма импульса и его длительность в цепи этого электрода будут такими же, как в анодной цепи ограничителя с обычной характеристикой.

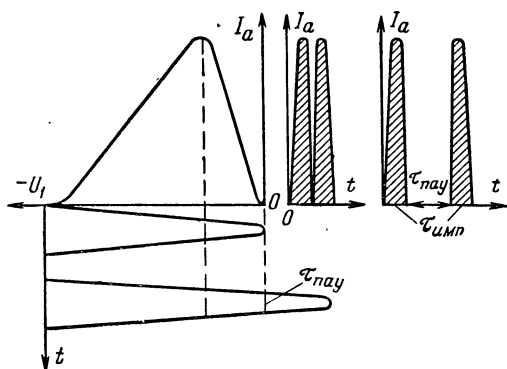


Рис. 52. Формы импульсов при несимметричной форме характеристики и рабочей точке, соответствующей $I_a \approx 0$.

Таким образом, в пентоде с выпуклой формой характеристики в случае, если рабочая точка расположена в начале нарастающей ветви, образуются одновременно два вида импульсов; в анодной цепи — короткие импульсы с удвоенной частотой повторения относительно частоты подводимых колебаний, а в цепи второй сетки — импульсы большой длительности и с частотой повторения, равной исходной (см. рис. 9).

Если форма импульсов в анодной цепи задается формой выпуклой характеристики, то в цепи второй сетки она будет приближаться к прямоугольной, если амплитуда подводимых к лампе колебаний достаточно велика.

В случае сеточного ограничения входного напряжения и рабочей точки, расположенной в начале нарастающей ветви, временное соотношение между импульсами в цепи анода и второй сетки будет таким, как показано

на рис. 9. Возникновение первого импульса в анодной цепи и импульса в цепи второй сетки происходит одновременно. Срезы второго импульса в цепи анода и импульса в цепи второй сетки будут также совпадать, если

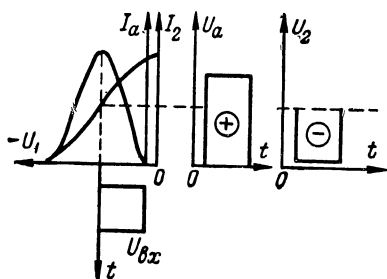


Рис. 53. Получение импульсов двух полярностей.

ограничение входного сигнала происходит токами сетки.

Когда ограничение входного сигнала токами сетки отсутствует, задний фронт импульса в цепи второй сетки опережает задний фронт второго импульса в анодной цепи.

Различие форм характеристик токов анода и второй сетки позволяет получать в пентодном

преобразователе одновременно импульсы различных полярностей. Для этого используются характеристики тока анода и второй сетки с различным наклоном, для чего рабочая точка должна располагаться в максимуме анодного тока или на падающей ветви. Пример такого режима работы пентода приведен на рис. 53, где видно, что при подаче на сетку лампы импульса напряжения положительной полярности в анодной цепи ток будет уменьшаться, а в цепи второй сетки — увеличиваться. Следовательно, на анодной нагрузке будет образовываться импульс напряжения положительной полярности, а на нагрузке в цепи второй сетки — отрицательной.

Если на вход пентода подается импульс напряжения отрицательной полярности, то в цепях анода и второй сетки будут возникать импульсы одинаковой положительной полярности.

Принципиальная схема пентодного преобразователя ограничителя с выпуклой характеристикой приведена на рис. 54.

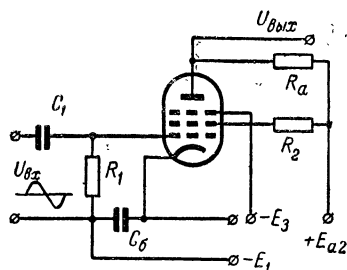


Рис. 54. Принципиальная схема пентодного преобразователя-ограничителя.

Подводя итог рассмотренных свойств пентода с выпуклой формой характеристики как преобразователя-ограничителя, можно установить следующие основные свойства его:

1. Получение импульсов в цепи анода, форма которых зависит от формы выпуклой характеристики.
2. Укорочение периода подводимых колебаний.
3. Изменение фазового положения импульсов.
4. Удвоение частоты подводимых колебаний.
5. Получение импульсов различной формы и частоты повторения в цепях анода и второй сетки.
6. Ограничение.
7. Отсутствие перегрузки в цепи анода.
8. Одновременное получение импульсов двух полярностей.

Образование импульсов в пентоде с выпуклой характеристикой. Определим, какая длительность импульса может быть получена и как она зависит от «основания» характеристики $U_{0,x}$, амплитуды подводимого напряжения U_m и угла отсечки Θ_0 при ограничении по максимуму и минимуму для случая синусоидального колебания $U = U_m \sin \omega t$. Обозначая (рис. 55) через $\varphi_{\text{имп}}$ угол, характеризующий длительность образованного импульса по его угловому основанию в градусах, получаем: $u_1 = U_m \sin \Theta_0$ и $U_2 = U_m \sin \varphi_2$. Как видно из рис. 55, $U_{0,x} = U_2 - U_1$; следовательно,

$$\frac{U_{0,x}}{U_m} = \sin \varphi_2 - \sin \Theta_0.$$

Так как $\varphi_2 = \Theta_0 - \varphi_{\text{имп}}$, то, заменив φ_2 в последнем соотношении, получим:

$$\frac{U_{0,x}}{U_m} + \sin \varphi_2 = \sin (\Theta_0 + \varphi_{\text{имп}}); \quad (18)$$

$$\varphi_{\text{имп}} = \arcsin \left(\frac{U_{0,x}}{U_m} + \sin \Theta_0 \right) - \Theta_0.$$

Отсюда, задавая различные значения $U_{0,x}/U_m$ и Θ_0 , найдем длительность импульса $\varphi_{\text{имп}}$, которая может, оче-

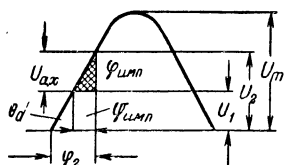


Рис 55. Получение импульсов из синусоидальных колебаний при выпуклой форме характеристики.

не будут образовываться импульсы необходимой формы и данные рассуждения теряют смысл.

На рис. 56 приведены характеристики $\varphi_{имп} = f(U_{0.x}/U_m, \theta_0)$, построенные в соответствии с соотношением (18) и показывающие, как изменяется длительность $\varphi_{имп}$ при изменении угла отсечки θ_0 . Эти зависимости даны для случаев, которые могут быть на практике в соотношениях между «основанием» характеристики $U_{0.x}$ и амплитудой подводимого колебания при условии, что $0 \leq \theta_0 \leq \theta_{0.пр}$. Из графиков (рис. 56) видно, что пентод с выпуклой характеристикой дает возможность использования малой части периода колебаний подводимого напряжения. Так, при $U_{0.x}/U_m = 0,05$ и $\theta_0 = 15^\circ$ длительность импульса будет составлять всего 3° .

Наиболее короткие импульсы получают при нулевом и малых углах отсечки, т. е. при использовании крутых участков подводимого колебания. При больших углах отсечки вследствие выхода на более пологие участки синусоиды происходит увеличение длительности основания импульса. С другой стороны, работа на крутых участках синусоиды при малых углах θ_0 и малых отношениях $U_{0.x}/U_m$ дает [вследствие выхода на пологую часть характеристики $\varphi_{имп} = F(\theta_0)$] более крутой фронт импульса и меньшую зависимость длительности его от изменения угла θ_0 и отношения $U_{0.x}/U_m$ (рис. 56).

При угле отсечки $\theta_0 = \theta_{0.пр}$ на выходе лампы будут образовываться два импульса, следующие друг за другом без перерыва. Форма импульса будет несколько ассиметричной, а $\varphi_{имп}$ окажется равным половине основания отсеченной части подводимого к сетке лампы синусоидального колебания, т. е.

$$\varphi_{имп} = \frac{\pi}{4} - \theta_{0.пр}.$$

видно, изменяться в пределах от нуля до некоторого предельного значения $\varphi_{пр}$, определяемого соотношением $U_{0.x}/U_m$. Предельно допустимый угол отсечки $\theta_{0.пр}$ находится из (18) в случае, когда первая составляющая в правой части равна 1, т. е. $\sin \theta_0 < 1 - U_{0.x}/U_m$. При превышении угла отсечки $\theta_{0.пр}$ в пентоде

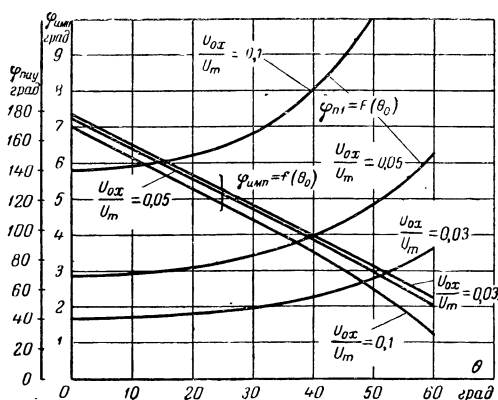


Рис. 56. Зависимость $\varphi_{\text{имп}}$ и $\varphi_{\text{пау}}$ от угла отсечки θ_0 .

При двустороннем ограничении (рис. 57), когда рабочая точка соответствует середине выпуклой характеристики, длительность импульса будет определяться как

$$\varphi_{\text{имп}} = \frac{\pi}{4} - \theta_{\text{о.пр}},$$

а пауза между двумя импульсами

$$\varphi_{\text{пау}} = \pi - 2\varphi_{\text{имп}}.$$

При этом способе ограничения на выходе образуются импульсы с постоянной частотой.

Когда рабочая точка не соответствует середине выпуклой характеристики, как это показано на рис. 50 для П-образной характеристики, длительность импульса $\varphi_{\text{имп}}$ определяется как сумма длительностей импульсов $\varphi_{\text{имп1}}$ и $\varphi_{\text{имп2}}$:

Если полагать $\varphi_{\text{имп1}}$ и $\varphi_{\text{имп2}} \ll \pi$,

то

$$U_1 \approx U_m \frac{\varphi_{\text{имп1}} \pi}{180^\circ}; \quad U_2 \approx U_m \frac{\varphi_{\text{имп2}} \pi}{180^\circ}$$

и

$$\varphi_{\text{имп}} \approx \varphi_{\text{имп1}} + \varphi_{\text{имп2}} \approx \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \frac{U_1 + U_2}{U_m} \approx 57,4 \frac{U_{\text{о.х}}}{U_m}. \quad (18)$$

Длительность пауз между двумя соседними импульсами будет различной и будет определяться положением рабочей точки на характеристике, т. е. соотношением между значениями U_1 и U_2 . Пауза, соответствующая положительной фазе колебаний, определяется как $\varphi_{п1} = \pi - 2\varphi_{имп1}$, а отрицательной — $\varphi_{п2} = \pi - 2\varphi_{имп2}$.

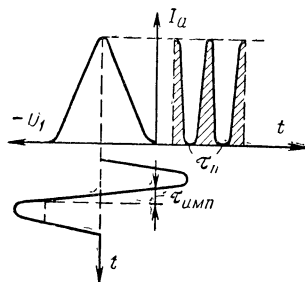


Рис. 57. Получение импульсов при двустороннем ограничении.

Изменение амплитуды подводимых колебаний будет вызывать не только изменение длительности импульсов, но и пауз между ними, т. е. приводит к фазо-широтно-импульсной модуляции (ФШИМ).

Низкие значения $U_{о.х.}$ (2—10 в) и возможность использования в связи с этим лишь небольших участков подводимых к лампе колебаний позволяют при относительно небольших амплитудах напряжения на входе (100—150 в) получать на выходе приемно-усилительных пентодов импульсы длительностью в несколько микросекунд. Для получения подобных же результатов в обычных схемах ограничения-усиления требуется в несколько десятков раз большее напряжение на входе или применение нескольких каскадов.

Частота следования импульсов. Использование только одной фазы подводимого к сетке лампы колебания дает на ее выходе парный импульс с паузой по отношению к следующей паре с длительностью $\pi + 2\theta_0$ т. е. большей чем полупериод, на двойной угол «отсечки». Если работа происходит без угла отсечки, но $U_m \gg U_{о.х.}$, то пауза между импульсами используемой фазы будет меньше паузы неиспользованной фазы на двойное значение длительности импульса: $\tau_{п.н} = \pi_{п.н} - 2\varphi_{имп}$.

Частота импульсов в паре вследствие симметричной формы выпуклой характеристики анодного тока в 2 раза

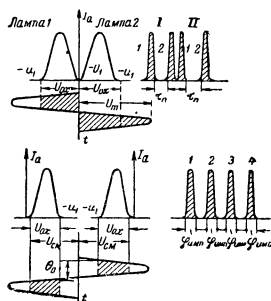


Рис. 58. Образование импульсов при помощи двухтактной схемы.

выше, чем частота следования полупериодов колебаний, поданных на сетку.

Часто бывает необходимо иметь одиночные импульсы, следующие друг за другом с равными интервалами между ними. В этом случае, кроме двустороннего ограничения, может быть использована двухтактная схема с лампами, имеющими идентичные характеристики.

На рис. 58 показано, как происходит образование импульсов при двухтактной схеме пентодного преобразователя-ограничителя, на выходе которого образуются четыре импульса. Для чередования импульсов через равные промежутки времени необходимо, чтобы работа лампы происходила с углом отсечки Θ_0 , удвоенное значение которого создавало бы паузу между импульсами от двух фаз колебаний, равную паузе между импульсами от одной фазы.

Следовательно, $\varphi_{II} = 2\vartheta_0$ и, учитывая, что $\varphi_{II} = \pi - 2(\Theta_0 - \varphi_{имп})$ (для одной фазы), получим:

$$\Theta_0 = \frac{\pi - 2\varphi_{имп} - \varphi_{II}}{2}.$$

Частота следования импульсов $f_{сл}$ в этом случае будет в 4 раза выше исходной частоты $f_{исх}$.

При работе без отсечки, т. е. без первоначального смещения, импульсы между первой и второй фазами колебания (парными импульсами I и II) будут следовать друг за другом без перерыва, тогда как между первым (1) и вторым (2) импульсами каждой пары будут интервалы (рис. 58). Величина интервала между ними задается (при прочих равных условиях) амплитудой напряжения, подаваемого на управляющие сетки ламп.

Принципиальная схема двухтактного пентодного преобразователя-ограничителя с выпуклыми характеристиками приведена на рис. 59.

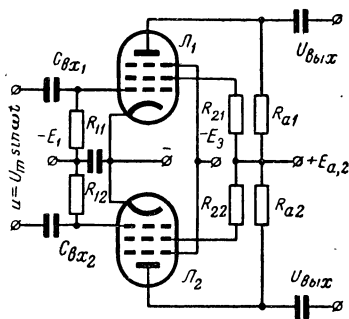


Рис. 59. Принципиальная схема двухтактного преобразователя-ограничителя.

Применяя несколько каскадов на пентодах с выпуклыми характеристиками, можно получить дальнейшее

увеличение частоты следования импульсов. Частота следования будет равна $2^n f_{исх}$ для однокатной схемы и $4^n f_{исх}$ для двухтактной, где n — число каскадов.

Этот способ умножения частоты импульсов в отличие от применяемых свободен от паразитной фазово-импульсной модуляции, так как он не требует применения специального генератора для умножения частоты.

Фазо-широтно-импульсная модуляция. Если изменять амплитуду подводимого к ограничителю колебания U_m (или угол отсечки Θ_0), то на его выходе будет происходить одновременное изменение длительности импульсов $\tau_{имп}$ и паузы между ними. Это свойство дает возможность получить фазо-широтно-импульсную модуляцию, используя один каскад на пентоде с выпуклой характеристикой.

В зависимости от того, каким способом изменять длительность колебания, возможно несколько видов фазо-широтно-импульсной модуляции (ФШИМ). Первый вид — когда рабочая точка расположена в начале нарастающей ветви характеристики при нулевом значении анодного тока. В этом случае изменение амплитуды подводимого колебания приводит к изменению фазового положения только второго импульса, тогда как первый не меняет своего положения. Таким образом, первый импульс может служить опорным (рис. 60).

Второй вид — когда рабочая точка расположена за пределами характеристики, левее нарастающего участка. В этом случае изменение амплитуды подводимого коле-

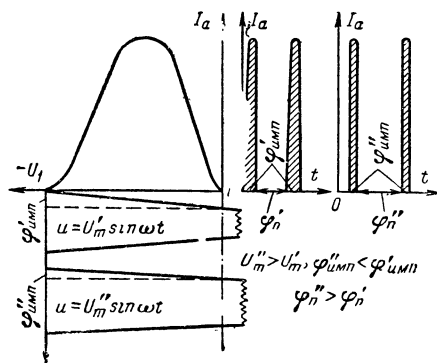


Рис. 60. Выпуклая характеристика для получения ФШИМ первого вида.

бания приводит к одновременному изменению фазового положения первого и второго импульсов; при этом первый импульс теряет свойства опорного. То же самое будет, когда вместо изменения амплитуды подводимого колебания изменяется положение рабочей точки путем изменения напряжения смещения на первой сетке E_1 (рис. 61).

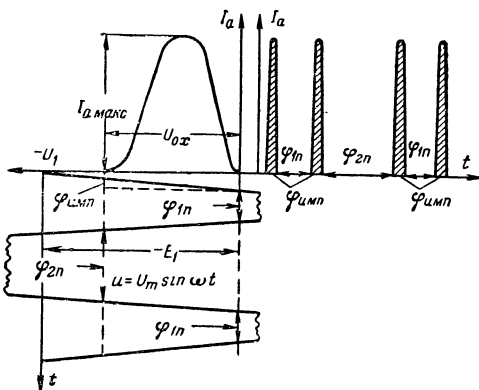


Рис. 61. Выпуклая характеристика для получения ФШИМ второго вида.

В случае первого вида ФШИМ, когда $\Theta_0 = \Theta$, длительность импульса (для синусоидального колебания на входе) будет определяться как

$$\varphi_{\text{имп}} \approx \arcsin \frac{U_{0x}}{U_m},$$

а пауза $\varphi_{\text{п}} \approx \pi - 2\varphi_{\text{имп}}$. Изменение длительности $\varphi_{\text{имп}}$ и паузы между импульсами в зависимости от U_{0x}/U_m приведены на рис. 62. Если $U_{0x}/U_m \leq 0,55$, зависимость длительности импульса от амплитуды синусоидального колебания близка к линейной.

Для определения зависимости длительности импульсов $\varphi_{\text{имп}}$ от угла отсечки при втором виде ФШИМ воспользуемся соотношением (18). При этом виде модуляции наблюдаются две паузы между импульсами: первая образуется от той части положительного полупериода, которая формирует импульсы и определяется как $\varphi_{\text{п1}} = \pi - 2(\varphi_{\text{имп}} + \Theta_0)$, а вторая задается той частью положительного полупериода, которая составляет угол отсечки

Θ_0 , и отрицательным полупериодом. Значение этой паузы $\varphi_{п2} = \pi + 2\Theta_0$ и, следовательно, $\varphi_{п2} > \varphi_{п1}$.

Результаты вычислений в виде зависимостей $\varphi_{имп} = f(\Theta_0)$ и $\varphi_{п1} = F(\Theta_0)$ приведены на рис. 56, из которого видно, что изменение угла отсечки Θ_0 приводит к изменению паузы между импульсами в более широких пределах, чем в случае модуляции первого вида.

Схема фазо-широтно-импульсного пентодного модулятора с выпуклой характеристикой будет такой же, как и для преобразователя-ограничителя, схема которого приведена на рис. 54. Для первого вида ФШИМ на первой сетке устанавливают постоянное отрицательное напряжение, соответствующее нулевому анодному току на нарастающем участке характеристики. При втором виде ФШИМ начальное напряжение смещения на первой сетке может соответствовать условиям первого вида ФШИМ.

Если рабочая точка расположена в пределах характеристики, как показано на рис. 63 для П-образной формы (случай двустороннего ограничения), то ее перемещение вызывает изменение фазового положения импульсов, т. е. фазо-импульсную модуляцию. В случае, когда положение рабочей точки постоянно, а изменяется амплитуда подводимых колебаний, возникает ФШИМ.

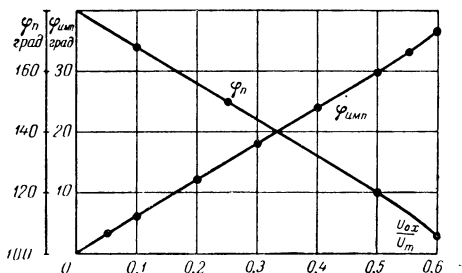


Рис. 62. Зависимость $\varphi_{имп}$ и $\varphi_{пав}$ от $U_{0.x}/U_m$ для первого вида ФШИМ.

В первом случае в зависимости от положения рабочей точки, т. е. от величин отношений $U_1/U_{0.x}$ и $U_2/U_{0.x}$ (см. рис. 51) соотношение между импульсами от положительной $\varphi_{имп1}$ и отрицательной $\varphi_{имп2}$ фаз будет

изменяться, а следовательно, будут изменяться и паузы между импульсами $\varphi_{п1}$ и $\varphi_{п2}$.

Соотношение между длительностью импульса $\varphi_{имп} = \varphi_{имп1} + \varphi_{имп2}$ и паузами между импульсами $\varphi_{п1}$ и $\varphi_{п2}$ определяется следующими зависимостями:

$$\frac{\varphi_{имп1}}{\varphi_{п1}} \approx \frac{U_{0,x}}{U_m \left(\pi - 2 \frac{U_1}{U_m} \right)};$$

$$\frac{\varphi_{имп2}}{\varphi_{п2}} \approx \frac{U_{0,x}}{U_m \left(\pi - 2 \frac{U_2}{U_m} \right)}.$$

Если рабочая точка расположена в начале нарастающей или падающей ветви при $I_a = 0$, то пауза от отсекаемого полностью полупериода будет наибольшей и импульсы будут образовываться только от действующего полупериода.

В условиях, когда рабочая точка расположена в середине характеристики,

$$U_1 = U_2 = \frac{U_{0,x}}{2};$$

и
$$\varphi_{имп} = \varphi_{имп2} \approx 57,4 \frac{U_{0,x}}{2U_m}$$

$$\varphi_{п1} = \varphi_{п2}.$$

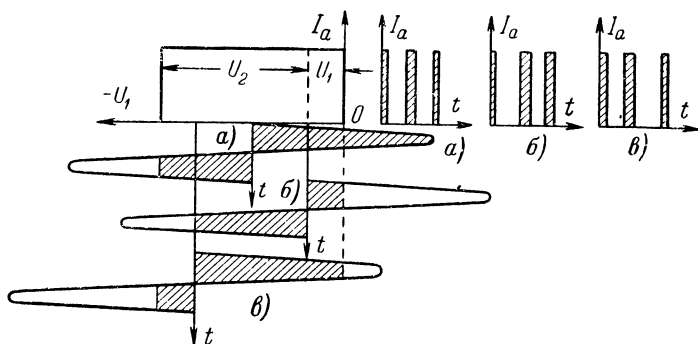


Рис. 63. Фазовая модуляция при прямоугольной форме характеристики.

Изменив при этом амплитуду подводимых колебаний \dot{U}_m и оставив рабочую точку неизменной, можно изменять длительность импульса и паузы между импульсами в широких пределах. В табл. 11 приведены изменения длительности импульса и паузы для различных значений $U_{o.x}/U_m$ при рабочей точке, соответствующей $U_{o.x}/2$.

Таблица 11

$U_{o.x}/U_m$	0,066	0,133	0,266	0,533	0,66	1,0
$\varphi_{имп} \approx \arcsin \frac{U_{o.x}}{U_m}$	3°45'	7°30'	15°20'	30°40'	41°20'	90°
$\varphi_{имп1} = \varphi_{имп2}$	1°54'	3°45'	7°40'	15°20'	20°40'	90°
$\varphi_{п}$	176°15'	172°30'	164°40'	149°20'	138°40'	0°

Для дальнейшего уменьшения длительности импульсов и умножения их частоты следования возможно применение нескольких каскадов на лампах с выпуклыми характеристиками. В этих случаях разделенный надвое импульс после первого каскада вновь разделяется надвое следующим каскадом и т. д. Необходимым условием для этого должно быть такое напряжение на втором каскаде U_{m2} , при котором $U_{m2} > U_{o.x}$. Если напряжение на сетке второго каскада недостаточно, то для увеличения его следует ввести между двумя преобразователями-ограничителями усилительный каскад.

Таким образом, при двухкаскадной схеме из одного импульса, поданного на вход, будут образованы четыре импульса, или две пары на выходе второго каскада. При этом длительность импульса соответственно уменьшается по сравнению с длительностью импульса в первом каскаде.

При изменении амплитуды подводимых на вход схемы колебаний на выходе будут изменяться длительность и расстояние между всеми четырьмя импульсами, т. е. будет получена фазо-широотно-импульсная модуляция.

Сравним рассмотренный способ получения ФШИМ при помощи пентода с выпуклой характеристикой с применяемыми в настоящее время.

В настоящее время для получения импульсов, модулированных по фазе, применяют два основных способа: один основан на использовании устройств, вырабатывающих переменную задержку с применением обычных

электронных ламп, другой — на применении электронно-лучевых трубок специальной конструкции [Л. 33, 34, 36].

Первый способ может быть выполнен, например, с помощью импульсов, модулированных по длительности. Спадающий фронт такого импульса модулирован по фазе. Для этого прямоугольные импульсы, модулированные по длительности, подаются на дифференцирующий контур. Напряжение на выходе дифференцирующего контура будет представлять собой чередующиеся импульсы двух полярностей, одни из которых модулированы по фазе, и могут быть выделены путем ограничения. Если необходимо иметь прямоугольную форму модулированных по фазе импульсов, возможно применение формирующих устройств других типов, например с контуром ударного возбуждения и последующим ограничением первого полупериода синусоидального напряжения. Таким образом, в состав фазового модулятора должны входить генератор переменной задержки, вырабатывающий модулированный по длительности импульс прямоугольной формы, и блок формирования коротких модулированных по фазе импульсов. Типичная блок-схема такого модулятора приведена на рис. 64. Для одновременной модуляции по длительности в схему устройства после блока формирования импульсов должен быть включен генератор модуляции импульсов по длительности.

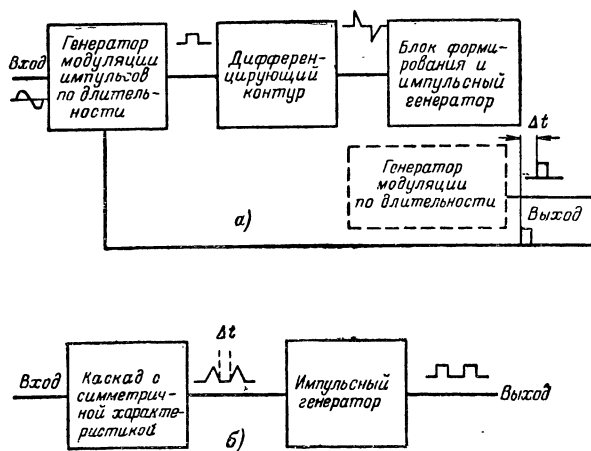


Рис. 64. Принципиальная схема получения ФШИМ при обычной форме характеристик электронных ламп (а) и выпуклой форме характеристики (б).

сти, в качестве которого обычно применяют устройство, работающее на принципе метода сравнения (рис 64,а).

В случае применения для фазо-широотно-импульсной модуляции ограничителя с выпуклой характеристикой схема модулятора значительно упрощается и состоит из каскада, содержащего пентод с характеристикой необходимой формы для получения импульсов заданного вида (рис. 64,б) и в случае необходимости импульсный генератор.

Влияние изменения напряжения питания пентода на параметры фазо-импульсного модулятора. При использовании пентода с выпуклыми характеристиками для получения различных импульсов и особенно для ФШИМ необходимо условие сохранения формы и параметров характеристики при возможных изменениях напряжения питания.

Используя данные влияния одновременного изменения питающих напряжения на $\pm 3\%$ на параметры симметричной характеристики пентода 6Ж9Б, приведенные в § 3-5, оценим действие их на работу фазо-широотно-импульсного модулятора.

В табл. 12 приведены процентные изменения параметров выпуклой характеристики пентода 6Ж9Б, влияющих на длительность импульсов, их фазовое положение, а также амплитуду.

Таблица 12

Параметры	Изменение напряжения питания			Примечание
	на + 3%	номинальное	на -3%	
$U_{0,x}/U'_{0,x}, \%$	-2,7%	—	+3,7%	По основанию характеристики
$I_{a,макс}/I'_{a,макс}, \%$	+3,1%	—	-3,7%	
Положение максимума $I_a, в$	-2,25	-2,35	-2,5 в	
$S_{пад}/S'_{пад}, \%$	+2,4%	0	+1,2%	
$S_{нар}/S'_{нар}, \%$	0	0	-6%	

Учитывая, что форма выпуклой характеристики при изменении напряжения питания на $\pm 3\%$ меняется незначительно, влиянием этого изменения на форму импульса пренебрегаем.

Если работа импульсного модулятора происходит в условиях, когда $U_{0,x}=5,5 в$; $U_{0,x}/U_m=0,05$ и $\Theta_0=0$, то

получаются изменения в длительности импульсов и расстояний между ними, которые приведены в табл. 13.

Таблица 13

Параметры	Изменение напряжения питания		
	на -3%	номинальное	на +3%
$U_{o,x}/U_m$	0,0518	0,05	0,0486
$\varphi_{\text{имп}}^{\circ}$	3°0'	2°53'	2°48'
$\Delta\varphi_{\text{имп}}^{\circ}, \%$	+4	0	2,9
$\varphi_{\text{п}}^{\circ}$	177°00'	177°07'	177°12'
$\Delta\varphi_{\text{п}}^{\circ}, \%$	+0,06	0	0,04
$I_{a,\text{макс}}, \text{ ма}$	3,08	3,20	3,30
$\Delta I_{a,\text{макс}}, \%$	-3,4	0	+3,1

Таким образом, можно полагать, что при стабилизации напряжения источника питания пентода с точностью $\pm 3\%$ может быть сохранена форма импульса, изменение длительности его не будет превышать $\pm 4\%$, а амплитуды $\pm 3,4\%$.

Определим, какими параметрами будет обладать импульс, сформированный преобразователем-ограничителем на пентоде 6Ж9Б с симметричной характеристикой, приведенной в табл. 9, при номинальном значении напряжения питания.

Данные выпуклой характеристики следующие: $U_{o,x} = 4,8 \text{ в}$ без учета начальных криволинейных участков нарастающей и падающей ветвей, которые не должны оказывать заметного влияния на форму импульса вследствие малого значения их; $I_{a,\text{макс}} = 3,2 \text{ ма}$; $U_{\text{нар}} = 1,7 \text{ в}$, считая по уровню 0,8 от максимального значения амплитуды импульса, и $R_a = 6,2 \text{ ком}$.

Задаемся $\frac{U_{o,x}}{U_m} = 0,05$, т. е. $U_m = 96 \text{ в}$, частотой подводимого к сетке лампы синусоидального колебания $f = 3,3 \text{ кгц}$ и выходной емкостью лампы вместе с емкостью монтажа $C_{\text{пар}} = 25 \text{ пф}$.

Выбираем режим работы преобразователя-ограничителя без отсечки, т. е. при рабочей точке, расположенной в начале нарастающего участка характеристики, при условии, что $I_a = 0$.

Находим длительность импульса, образующегося на выходе пентода:

$$\tau_{\text{имп}} \approx \frac{U_{0,x} T}{2U_m \pi} \approx 0,05 \cdot \frac{300 \cdot 10^{-6}}{2} \approx 2,4 \text{ мксек.}$$

Длительность фронта нарастания будет состоять из двух составляющих: первой, определяемой формой характеристики τ_x , и второй, вызванной действием постоянной времени цепи анода $\tau_a \approx R_a C_a$. Первая составляющая $\tau_x \approx \frac{U_{\text{нар}}}{U_m} \cdot \frac{T}{2\pi}$, а вторая, как известно, равна $\tau_{ф.н} \approx 2,3 R_a C_a$.

После подстановки получим:

$$\tau_{ф} \approx \tau_x + \tau_a \approx 0,84 + 0,155 \approx 0,84 + 0,155 \approx 1 \text{ мксек.}$$

Таким образом, фактическая длительность фронта $\tau_{ф.н}$ определяется в основном протяженностью нарастающего участка характеристики, составляющей в данном случае 40% ее основания $U_{0,x}$ а форма импульса будет приближаться к треугольной, амплитуда импульса будет равна $U_m = I_{a,\text{макс}} R_a = 20 \text{ в.}$

В заключение необходимо отметить, что в настоящее время промышленность не выпускает электронные лампы, в которых можно было бы получать выпуклые характеристики с параметрами, соизмеримыми с параметрами обычных характеристик. Надо надеяться, что промышленность сможет создать лампы с выпуклыми характеристиками, которые, по мнению автора, вполне перспективны. Если иметь в виду использование ламп с выпуклыми характеристиками, например, для формирования импульсов, то необходимо, чтобы ток анода в максимуме был возможно выше (10—20 ма), а «основание» характеристики было возможно меньшим (2—5 в). Допустимая мощность рассеяния на второй сетке должна быть увеличена и составлять не менее 3—5 вт. Междуэлектродные емкости должны быть наименьшими. Область максимума анодного тока такой лампы должна быть более растянутой, чтобы характеристика имела форму ближе к П-образной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов В. Ф. Электровакуумные приборы, Связьиздат, 1960.
2. Soltes A., A wide-band square-law circuit element, IRE Transactions-Electron Devices, April 1955.
3. Labin E., Le formation tube électronique avant une caractéristique quelconque préétablie, L'ond Electrique, 1954, v. 34, № 327, 328, p. 518—524, 614—621.
4. Dehlinger W., Space charge grid tube with variable Mu grid, Physics, 1934.
5. Итоги науки. Технические науки, т. I. Проблемы теории нелинейных систем автоматического регулирования и управления, Изд-во АН СССР, 1957.
6. Sunstein D., Photoelectric wave form generator electronics, February 1949, p. 100—103.
7. Munster A., The monofomer radio and television news, October 1950, p. 8A—9A.
8. Крылов Н. Н. Теоретические основы радиотехники, Изд-во «Морской транспорт», 1953.
9. Трапезников В. А. Математическое моделирование динамических систем, «Электричество», 1955, № 8.
10. Baxter J. A., A square boot-law circuit, Electronic Engineering, 1954, v. 26, № 313.
11. Niko foruk P. A., Technique for non-linear function, Elecronic Engineering, March 1955, p. 118.
12. Коган Б. Я., Электронные моделирующие установки Института автоматики и телемеханики АН СССР, Труды второго Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования, т. 3, Изд-во АН СССР, 1955.
13. Степаненко И. П. Электронные четырехполюсники, Труды Московского ордена Ленина энергетического института, вып. 4, Прикладная электроника, изд-во Москва, 1949.
14. Stone R., Mueller M. and Webster M., A time-sampling and amplitude-quantitizing tube, Proc. IRE, 1955, v. 8, № 8, p. 960—966.
15. Herold E. and Mueller G., Beam-deflection mixer tubes for UHF, Electronics, 1949, v. 22, № 4, p. 76—80.
16. Muller H., Die Abhängigkeit der Sekundärelektronenemission einiger Metalle von Einfallwinkel des primären Katodenstrales, Ztschr. f. Phys., 1937, Bd 104, S. 475—486.
17. Brüining, Phisica, 1938, v. 5, p. 813—901.

18. Smith S., A novel type of monoscope, Proc. IRE, 1952, v. 40, № 6, p. 666—669.
 19. Электронные лампы, т. 1 и 2, изд-во «Советское радио», 1953.
 20. Справочник по радиотехнике под редакцией Смиренина, изд-во «Советское радио», 1950.
 21. Аралов М. С. О свойствах пентода в режиме отрицательного потенциала на третьей сетке, «Радиотехника и электроника», 1958, т. 3, вып. 2.
 22. Wölker G., Space charge effects between a positive grid and anode of the beam tetrode, Wireless Engineer, v. XXII, № 259, 260 and 261.
 23. Rodda D., Space charge and electron deflections in beam tetrode theory, Electronic Engineering, 1945, v. 17, № 208, 209 and 210, p. 541—545, 580—592, 649—652.
 24. Bull, Space charge effect in beam tetrode and other valves, Journ. of the Inst. of Electr. Engin., 1948, v. 95, III, № 33.
 25. Rodda S., Beam tetrode characteristics, Wireless Engineer, May 1946, p. 140—145.
 26. Аралов М. С., Метод получения заданных характеристик в пентодах, «Радиотехника», т. 17, № 1, 1962.
 27. Pellow, Theory of space charge grid tubes, Ztschr. f. Fernmeldtechnik, 1928, Bd 9, S. 113—118, 136—142.
 28. Grantwein and Mc. Cood D., High sensitivity power pentode using the «shadow grid», Technique J. Audio Eng. Soc., 1961, v. 9, IV, № 2, p. 152—156.
 29. Гвоздовер С. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот, изд-во Физматгиз, 1956.
 30. Эрглис К. Э. и Степаненко И. П. Электронные усилители, Физматгиз, 1964.
 31. Цыкин Г. С. Электронные усилители, Связьиздат, 1960.
 32. Чеффи Э. Л. Теория электронных ламп, Связьиздат, 1937.
 33. Меликян Э. Г. К токораспределению в пентоде, Известия высших учебных заведений, «Радиотехника», июль — август 1962.
 34. Самойлов В. Ф. и Маковеев В. Г. Импульсная техника, изд-во «Связь», 1964.
 35. Меерович А. А. и Зеличенко П. Г., Импульсная техника, изд-во «Советское радио», 1954.
 36. Аралов М. С. Характеристики выпуклых форм в пентодах и их использование, «Радиотехника», т. 15, № 6, 1960.
 37. Харкевич А. А. Основы радиотехники, Госиздат по вопросам связи и радио, Москва, 1963.
-

Цена 29 коп.