

В. С. МАЙОРОВ, С. В. МАЙОРОВ

# УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ЛАМПАХ, ТРАНЗИСТОРАХ И МИКРОСХЕМАХ



БИБЛИОТЕКА КИНОМЕХАНИКА

БИБЛИОТЕКА КИНОМЕХАНИКА

M-14

В. С. МАЙОРОВ, С. В. МАЙОРОВ

**УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
НА ЛАМПАХ, ТРАНЗИСТОРАХ  
И МИКРОСХЕМАХ**



МОСКВА  
«ИСКУССТВО»  
1982

3

ББК 37.95  
М 14

Рецензент  
Константинов В. П.

Майоров В. С., Майоров С. В.  
М 14 Усилительные устройства на лампах, транзисторах и микросхемах. — М.: Искусство, 1982. — 168 с., ил.

В книге рассматриваются усилительные каскады, собранные на электронных лампах, транзисторах, микромодулях и интегральных микросхемах. Рассмотрены принципиальные схемы и работа усилительных устройств, которые находят применение в кинотехнике: звуковоспроизводящей, измерительной аппаратуре и различных промышленных установках. Книга иллюстрирована. Рассчитана на работников кино-сети, учащихся кинотехникумов и профтехучилищ.

М  $\frac{4910030000-164}{025(01)-82}$  98-82

ББК 37.95  
778

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

## § 1. Введение

Усилителями называются устройства, в которых малые изменения входной величины вызывают значительно большие изменения выходной величины.

Электронными усилителями называются устройства, предназначенные для усиления слабых электрических сигналов, подаваемых на их вход, в более мощные выходные сигналы, снимаемые с их выхода в подключенной нагрузке.

Следует иметь в виду, что усиление мощности, выделяемой в нагрузке усилителя, по сравнению с мощностью датчика как источника входных сигналов, осуществляется за счет расхода электроэнергии источников питания преимущественно постоянного тока. При этом маломощный входной электрический сигнал управляет процессом передачи, то есть преобразования электрической энергии, отбираемой от источника питания, в полезную выходную мощность усиленного сигнала без существенных искажений его формы.

Кроме электронных усилителей на практике применяются также магнитные, электромашинные, пневматические, гидравлические, механические и другие усилительные устройства (не рассматриваются в данной книге).

Однако электронные усилители обладают несравнимо более высокой чувствительностью к слабым входным сигналам, например по напряжению до  $10^{-8}$  —  $10^{-12}$  вольт, а по току до  $10^{-12}$  —  $10^{-16}$  ампер; быстродействием, дающим возможность усиливать электрические и электромагнитные колебания в очень широкой полосе частот (от нуля до десятков, сотен и тысяч мегагерц); они имеют небольшие габариты и массу. Сравнительно простое конструктивное оформление электронных усилителей дает возможность изготавливать их при массовом производстве на автоматизированных линиях, конвейерах.

Поэтому усилительные устройства широко применяются как ведущие блоки в технической, то есть в промышленной электронике, на которой базируются все киноусилители; звуко-видеозаписывающая и воспроизводящая аппаратура; радио-телевизионная техника; узлы и блоки современных автоматических устройств и контрольно-измерительных приборов в различных производственных процессах, не только киноаппаратах, но и всего сложного комплекса разнообразного автоматизируемого кинотехнического производства на за-

водах и фабриках, киностудиях и кинопрокатных базах и т. п. Известно также, что аналогичные усилительные устройства применяются и во всех других областях промышленности, транспорта, сельского хозяйства, в спектроскопии, в медицинской и бытовой электронной аппаратуре, в экспериментальной физике, в сложных устройствах ЭВМ, АСУ и т. д. и т. п.

Такое широкое применение электронных усилителей объясняется еще и тем, что практически в электрический сигнал можно преобразовать почти любой неэлектрический сигнал (звуковой; электромагнитный по всему спектральному диапазону, включая световое, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение; изменение индуктивности и емкости; давление, изгиб, удар, растяжение и сжатие материалов; биологические сигналы; изменение прозрачности, цветности жидкой и газообразной среды; изменение уровней, размеров, расстояний и т. п.). При этом в качестве датчиков, преобразующих неэлектрические сигналы в сигналы электрические применяются фотографические и магнитные фонограммы; микрофоны; магнитофонные и перфорационные ленты и диски с соответствующими преобразовательными устройствами; терморпары и терморезисторы; разнообразнейшие фотоэлектронные приборы; индуктивные и емкостные индикаторы; тензорезисторы; тахогенераторы; пьезоэлектрические, сцинтилляционные и многие другие преобразователи.

В качестве приемников усиленных электрических сигналов, то есть исполнительных механизмов, включаемых на выходе усилителей в качестве нагрузки, могут применяться, например, громкоговорители различной мощности: от долей ватта до десятков и сотен ватт; распределительные фидерные и абонентские радиовещательные линии большой мощности; линии связи; электродвигатели постоянного и переменного тока, реверсивные электродвигатели; шаговые искатели; контактные и бесконтактные релейные устройства; различные блоки ЭВМ, АСУ, АСУП и других автоматических устройств; отклоняющие системы электронно-лучевых осциллографических и телевизионных трубок; электрозаписывающие механизмы; всевозможные радиотехнические, регулирующие, контролирующие, индикаторные и другие устройства.

Из вышесказанного ясно, насколько важно глубокое изучение различных усилительных устройств.

## § 2. Классификация электронных усилительных устройств

Условно усилительные устройства можно различать по следующим признакам:

1. По структуре, то есть по количеству усилительных каскадов (однокаскадные, двух-трех и более каскадные усилители).

2. По типу применяемых в усилительных каскадах активных элементов (на электровакуумных усилительных лампах-триодах, пентодах, лучевых тетрадах, гептодах и др.; на транзисторах биполярных и полевых униполярных; на тиристорах, туннельных диодах; на тиратронах дугового и тлеющего разряда и т. п.)

3. По месту включения и виду нагрузки (с анодно-коллекторной либо с катодной — эмиттерной активной  $R_n$ , индуктивной  $X_L$ , емкостной  $X_C$ , комплексной  $Z_n$  нагрузкой). В многокаскадных усилителях нагрузкой предыдущего каскада является входное сопротивление последующего каскада.

4. По режимам работы усилительных каскадов (в классе усиления А, В, С, АВ, Д).

5. По назначению усилительных каскадов в усилительном устройстве (выходной каскад усиления мощности, на который работают все остальные предварительные каскады усиления напряжения или тока, включая первый входной каскад).

6. По диапазону частот усиливаемых сигналов: усилители напряжения низкой частоты УННЧ, работающие в звуковом диапазоне частот от 16—20 Гц до 12—16 кГц; усилители напряжения ультразвуковой частоты — УЗК в пределах 20—30 кГц; усилители напряжения высокой частоты — УНВЧ от 30 кГц до 30 МГц; усилители напряжения сверхвысокой частоты УНСВЧ при частоте выше 30 МГц; усилители постоянного тока УПТ (или усилители медленно меняющегося напряжения и тока); импульсные усилители и т. п.

7. По виду входного сигнала различают: а) аperiodические усилители, то есть неизбирательные усилители, обеспечивающие усиление синусоидальных колебаний в широком диапазоне частот, включая широкополосные усилители импульсных сигналов прямоугольной, треугольной, трапецидальной, пилообразной и др. формы; б) резонансные (избирательные) усилители, усиливающие сигналы в узкой полосе частот; в) усилители постоянного тока.

8. По виду связи между каскадами различают усилители с RC-связью, LC-связью, трансформаторной, резонансной и гальванической связями.

9. По виду применяемой обратной связи (обычно отрицательной).

Кроме того, изготавливаются фазочувствительные усилители, а также операционные (решающие — суммирующие, интегрирующие, дифференцирующие и др.) усилители, широко используемые в аналоговых электронных вычислительных машинах и других устройствах автоматики.

### § 3. Динамический режим работы усилительных каскадов в различных классах усиления

Динамический, то есть рабочий режим усилительной лампы (или транзистора) в усилительном каскаде характеризуется: наличием в его выходной цепи нагрузочного сопротивления; постоянным напряжением источника питания  $E_a$  (или  $E_n$ ); постоянной величины отрицательного напряжения смещения ( $-U_{c0}$ ) на сетке усилительной лампы (или  $U_{бэ0}$  на базе транзистора); допустимой величиной амплитуды ( $\pm U_{mвх}$ ) входного сигнала, изменяющегося по закону  $u_{вх} = U_{mвх} \sin \omega t$ .

Различают следующие классы усиления: А, В, С, АВ1, АВ2, Д, которые определяются в первую очередь положением рабочей точки

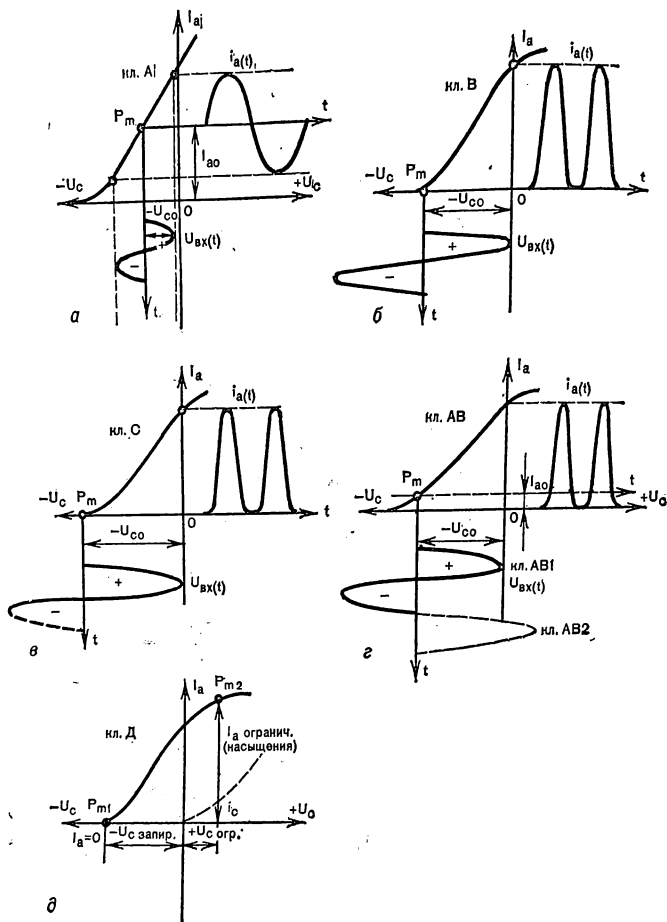


Рис. 1. Классы усиления А, В, С, АВ, Д

на входной динамической характеристике лампового (или транзисторного) каскада.

При этом входной динамической анодно-сеточной характеристикой называется зависимость изменяющейся величины анодного тока от величины напряжения на сетке при постоянной величине напряжения источника анодного питания  $E_a$  и неизменной величине сопротивления нагрузки  $R_a$ , то есть

$$I_a = f(U_c) \text{ при } E_a = \text{const}, R_a = \text{const}.$$

Режим работы в классе А (рис. 1, а) характеризуется положением рабочей точки при необходимой величине  $-U_{c0}$  и  $U_{вх} = 0$  на се-

редине прямолинейного участка динамической анодно-сеточной характеристики. При этом амплитуда входного сигнала  $\pm U_{m_{вх}}$  не должна выходить за пределы линейного участка динамической входной характеристики, то есть  $|\pm U_{m_{вх}}| \leq |-U_{c0}|$ .

В этом режиме работы при отсутствии входного сигнала в выходной цепи каскада течет анодный ток покоя  $I_{a0}$ , который по величине превышает наибольшую амплитуду выходного тока в динамическом режиме.

Поэтому электрический КПД лампового каскада в классе А не превышает

$$\eta_a = \frac{P_{\sim \text{вых}}}{P_0} \cdot 100\% \leq 15 \div 25\%,$$

где  $P_{\sim \text{вых}}$  — полезная мощность выходного сигнала,  $P_0$  — мощность, потребляемая от источника питания.

Режим работы в классе А отличается малыми нелинейными искажениями, при которых усиленное напряжение выходного сигнала достаточно точно повторяет форму кривой напряжения входного сигнала. Поэтому этот режим работы применяется во всех предварительных, предоконечном и однотактном выходном усилительных каскадах, собранных на электровакуумных усилительных лампах и на транзисторах.

Режим работы каскада в классе В характеризуется положением рабочей точки при соответствующей величине  $-U_{c0}$  и  $U_{вх} = 0$  в начале линеаризованной динамической анодно-сеточной характеристики (рис. 1, б). В этом режиме при подаче  $u_{вх} = U_{m_{вх}} \cdot \sin \omega t$  усиливаются только положительные полупериоды входного напряжения, а отрицательные полупериоды срезаются, так как лампа запирается. Угол отсечки анодного тока составляет  $\pi/2$ , т. е.  $90^\circ$ , а ток покоя  $I_{a0} \approx 0$ . Поэтому усилительный каскад в режиме класса В может иметь КПД  $\eta_a$  до  $30 \div 60\%$ .

Вследствие больших нелинейных искажений режим класса В используется только в двухтактных каскадах усиления мощности, где эти искажения взаимно устраняются. Так как в режиме класса В ток покоя  $I_{a0} \approx 0$ , то в ламповых каскадах для смещения рабочей точки применяется дополнительный источник питания —  $E_{\text{смеш}} = -U_{c0}$ .

Режим работы в классе С характеризуется положением рабочей точки левее начала динамической анодно-сеточной характеристики, когда  $|-U_{c0}| > | -U_{c, \text{зап. л}}|$  (рис. 1, в). При этом не полностью усиливаются даже положительные полупериоды напряжения входного сигнала. Хотя КПД каскада увеличивается до  $60 \div 70\%$ , но из-за больших нелинейных искажений этот режим работы в усилителях не используется. Режим класса С может использоваться в высокочастотных электронных автогенераторах с LC-контуром и в релейных устройствах.

Режим работы в промежуточном классе АВ характеризуется положением рабочей точки на нижней загиба динамической анодно-сеточной характеристики (рис. 1, г). При этом ток покоя  $I_{a0} > 0$ , КПД может достигать  $30 \div 50\%$ . При подаче входного сигнала анод-

ный ток проходит в течение всего положительного полупериода и некоторой части отрицательного полупериода, то есть угол отсечки  $\theta > \pi/2$ . Режим работы в классе АВ широко применяется в двухтактных каскадах усиления мощности (УМ).

Различают класс АВ1, когда  $|U_{mвх}| \approx |-U_{с0}|$  и усилительная лампа работает без сеточного тока, а также класс АВ2, когда  $|U_{mвх}| > |-U_{с0}|$  и усилительная лампа работает с сеточным током.

Режим в классе Д называется ключевым режимом и характеризуется работой усилительной лампы в одном из двух состояний: либо в режиме отсечки выходного тока, когда усилительная лампа заперта, либо в режиме ограничения или насыщения, когда выходной ток усилительной лампы достигает определенной величины, которая не увеличивается при дальнейшем увеличении амплитуды входного сигнала, то есть при увеличении положительного напряжения на сетке лампы (рис. 1, д).

Рассмотренные выше режимы работы в классах А, В, С, АВ, Д используются как в ламповых, так и в транзисторных усилительных каскадах.

Примечание. Если во входную цепь лампового усилительного каскада не включать постоянной величины отрицательного напряжения смещения  $-E_{смещ} = -U_{с0}$ , то рабочая точка будет находиться на пересечении оси ординат с динамической входной характеристикой (рис. 2).

При таком режиме работы, когда на вход каскада подается входное напряжение  $u_{вх} = U_{mвх} \sin \omega t$ , входное сопротивление его будет иметь максимальную величину в отрицательный полупериод, когда лампа работает без сеточного тока, и минимальную величину, когда на сетку лампы поступает положительный полупериод напряжения, и лампа работает с сеточным током во входной цепи. Известно, что при подаче положительного потенциала на сетку лампы внутреннее сопротивление в промежутке сетка — катод уменьшается до значения  $R_{гс-к} \approx 1$  кОм, что зачастую меньше внутреннего сопротивления источника входного сигнала  $r_i$ . При отрицательном же потенциале на сетке лампы  $R_{гс-к}$  имеет величину десятки-сотни МОм, т. е. стремится к бесконечно большой величине, и лампа работает без сеточного тока во входной цепи. Поэтому

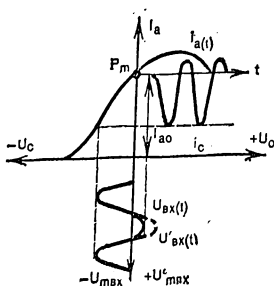


Рис. 2. Режим усиления без напряжения смещения

при одной и той же амплитуде входного сигнала  $\pm U_{mвх}$  на вход каскада будет поступать значительно меньшая амплитуда положительного полупериода  $+U_{mвх} = +U_{mвх} - I_{сет} \cdot r_i$ , чем в отрицательный полупериод, когда  $U_{mвх} \approx -U_{mвх}$ , а сеточный ток  $I_c = 0$ .

Вследствие этого, а также из-за нелинейности динамической анодно-сеточной характеристики в области положительного сеточного напряжения при таком режиме работы возникают недопустимо большие нелинейные искажения, то есть сильные

искажения формы усиленного выходного сигнала по сравнению с формой усиливаемого входного сигнала, при котором в выходном сигнале появляется ряд высокочастотных гармоник, отсутствующих во входном сигнале.

## II

### РАЗНОВИДНОСТИ ОДИНОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЛАМПАХ

#### § 4. Устройство, характеристики и основные параметры усилительных ламп

Для усиления, генерирования и других преобразований электрических сигналов применяются электровакуумные электронные лампы с сетками. Их устройство, принцип действия, характеристики и параметры подробно описаны в литературе [9, 30, 15, 18, 21, 40, 31 и др.]. Поэтому укажем лишь некоторые данные об этих приборах.

К усилительным лампам, на базе которых создавалась электронная техника, относятся триоды, тетроды, пентоды, лучевые тетроды, гептоды и др.

Триоды — это трехэлектродные лампы, в электровакуумных баллонах которых между термокатодом и анодом расположена управляющая сетка (рис. 3, а). Катод прямого или косвенного накала, питаемый постоянным или переменным напряжением накала от 2 до 30 В, а в большинстве случаев 6,3 В, предназначен для непрерывного создания электронной эмиссии, то есть потока свободных электронов, при помощи которых осуществляется токопрохождение через вакуумное пространство катод — анод.

Анод в виде цилиндра или другой формы с охлаждающими ребрами предназначен для собирания электронов, движущихся от катода под действием напряженности электрического поля, создаваемого источником анодного напряжения  $U_a$ , создавая анодный ток  $I_a$  во внешней анодной цепи.

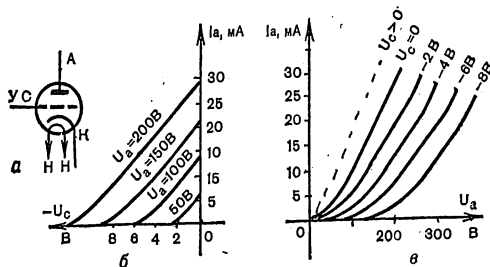


Рис. 3. Условное графическое обозначение триода (а); семейство анодно-сеточных вольт-амперных характеристик триода (б); семейство анодных вольт-амперных характеристик триода (в)

Управляющая сетка, выполненная в форме спирали или штырей, расположенных вокруг катода, вблизи его, управляет величиной потока электронов, то есть величиной анодного тока от нуля до максимального значения. Эта функция выполняется управляющей сеткой под воздействием приложенного к ней относительно катода изменяющегося по величине сеточного отрицательного, а иногда и положительного напряжения. При отрицательном напряжении на сетке в сеточной цепи ток отсутствует, а при положительном напряжении появляется сеточный ток, отнимая из электронной эмиссии часть потока свободных электронов. Таким образом триод преобразует энергию источника постоянного тока в энергию переменного тока, изменяющегося по закону изменения сигнала, подаваемого на сетку лампы. При этом величина анодного тока является функцией двух переменных, то есть сеточного и анодного напряжений:

$$I_a = f(U_c; U_a) \text{ при } U_{\text{нак}} = \text{пост.}$$

Этому уравнению соответствуют два вида вольт-амперных характеристик: а) анодно-сеточные  $I_a = f(U_c)$  при  $U_a = \text{пост}$  и б) анодные  $I_a = f(U_a)$  при  $U_c = \text{пост}$ . Если брать по несколько значений  $U_a$  и  $U_c$ , то получим семейства статических анодно-сеточных и анодных вольт-амперных характеристик (рис. 3б, в).

Пользуясь семействами этих характеристик, можно определить основные параметры триодов, характеризующих их свойства и пригодность для работы в той или иной схеме. К основным статическим параметрам как триодов, так и других нижеуказанных усилительных ламп относятся:

а) крутизна вольт-амперной характеристики  $S = \Delta I_a / \Delta U_a$  при  $U_a = \text{пост}$ , равная для триодов от  $1 \div 7$  и более мА/В;

б) внутреннее сопротивление переменному току  $Ri = \Delta U_a / \Delta I_a$  при  $U_c = \text{пост}$  (от 0,5 до 100 кОм);

в) статический коэффициент усиления по напряжению  $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$  при  $I_a = \text{пост}$  (от 4 до 100 и более).

Эти внутренние (статические) основные параметры усилительных ламп связаны соотношением, называемым внутренним уравнением параметров лампы  $\mu = S \cdot Ri$ . Зная два из этих параметров, можно определить и третий.

Величина этих параметров усилительных ламп одного и того же типа может отклоняться от номинала до 20—30%, что зависит от геометрического расположения и величины электродов внутри лампы, эмиссионной способности катода, режима работы и количества отработанных часов. Однако такое колебание основных параметров обеспечивает нормальную взаимозаменяемость однотипных усилительных ламп.

Кроме основных параметров усилительные лампы характеризуются еще и другими важными параметрами: допустимой мощностью, рассеиваемой анодом лампы  $P_{\text{адоп}} = I_a \cdot U_a$ ; номинальными значениями  $I_a$ ,  $U_a$ ,  $U_{\text{нак}}$ ; максимально допустимыми значениями  $I_{a \text{ мако}}$ ,  $U_{a \text{ мако}}$ , а также величиной паразитных межэлектродных емкостей  $C_{\text{ск}}$ ,  $C_{\text{ак}}$ ,  $C_{\text{са}}$ , влияющих на частотные свойства ламп.

Наиболее вредное действие на усилительные свойства ламп оказывает проходная емкость  $C_{ca}$ , большое значение которой может нарушить нормальную работу усилительного каскада на ВЧ, превратив его в генератор электрических колебаний.

Чтобы уменьшить паразитную проходную емкость и одновременно увеличить коэффициент усиления, выпускаются тетроды — четырехэлектродные лампы, которые отличаются от триода тем, что между управляющей сеткой и анодом введена еще вторая экранирующая сетка, имеющая напряжение  $U_{\text{экр}} = (0,5 \div 1) \cdot U_a$ . Однако в результате перехвата экранной сеткой вторичных электронов, выбиваемых из анода первичными электронами (явление динаatronного эффекта), получается завал анодной характеристики вблизи  $U_{\text{экр}} \approx U_a$ . Поэтому для устранения этого дефекта стали выпускать пентоды и мощные лучевые тетроды.

Пентод отличается от тетрода тем, что между анодом и экранной сеткой введена третья сетка, которая называется защитной, или антидинаatronной. Защитная сетка, имея редкие витки, соединена внутри или снаружи лампы с катодом. Поэтому она имеет нулевой потенциал относительно катода и не пропускает вторичные электроны на экранную сетку, возвращая их обратно на анод (рис. 4, а).

Таким образом, у ВЧ пентодов, обозначаемых буквой К или Ж, проходная емкость сведена до сотых и тысячных долей пикофарад, а внутреннее сопротивление  $R_i$  и коэффициент усиления  $\mu$  на один-два порядка больше, чем у триодов.

Густая экранирующая сетка у пентодов перехватывает часть первичных электронов, летящих от катода, образуя в ее внешней цепи ток экранной сетки  $I_{\text{э}} = (0,2 \div 0,3) \cdot I_a$  при  $U_{\text{экр}} = (0,4 \div 1) \cdot U_a$ . Эти улучшенные свойства пентодов дали возможность широко использовать их в каскадах усиления не только НЧ, но ВЧ, а также в ВЧ генераторах и других устройствах.

Высокочастотные пентоды с буквой Ж (6Ж1 и др.) имеют короткую, а с буквой К (6К4 и др.) — удлиненную анодно-сеточную характеристику.

Анодные характеристики пентодов имеют в начале координат большую крутизну, а затем, достигнув насыщения, идут почти горизонтально, параллельно оси абсцисс (рис. 4 в, г).

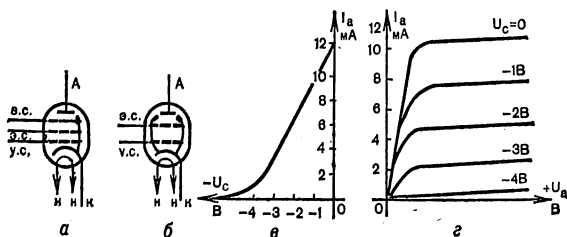


Рис. 4. Условные графические обозначения: а — пентода; б — лучевого тетрода. Вольт-амперные характеристики пентода: в — анодно-сеточная; г — анодная

У мощных НЧ пентодов, обозначаемых буквой П (6П9, 6П18П и др.), анодные характеристики идут с некоторым подъемом относительно оси абсцисс. В качестве мощных усилительных ламп широкое применение получили в каскадах усиления мощности и в генераторах электрических колебаний лучевые тетроды (6П6С, 2П2П, Г807 и др.), у которых динаatronный эффект устранен без дополнительной защитной сетки посредством соответствующей фокусировки электронного потока, проходящего через промежутки витков управляющей и экранирующей сеток от катода к аноду. Эта фокусировка создается при помощи двух встроенных в лампу лучеобразующих пластин, соединенных с катодом (рис. 4, б).

Анодные характеристики и основные параметры лучевых тетродов примерно такие же, как у мощных пентодов, но они мощнее последних.

В качестве смесительных и преобразовательных ламп используются гептоды — пятисеточные лампы (6А10С, 6А2П, 6И2П и др.). Они имеют две управляющие сетки, две соединенные вместе с одним выводом экранирующие сетки и одну защитную сетку. Подавая на две управляющие сетки сигналы от двух источников, можно, смешивая их, получить на выходе в анодной цепи и выделить при помощи настроенного колебательного контура сигнал промежуточной частоты  $f_{\text{ПР}} = f_1 - f_2$ .

Усилительные лампы оформляются в стеклянном или металлическом корпусе. Обычные лампы имеют октальный цоколь, а серии пальчиковых миниатюрных ламп выпускаются без цоколя с октально расположенными проволочными выводами. Для уменьшения габаритов и улучшения параметров выпускаются комбинированные лампы, состоящие из двух или трех ламп в одном корпусе.

Система маркировки усилительных ламп осуществляется согласно ГОСТ 13393—67, а их условное графическое обозначение в схемах — согласно ГОСТ ЕСКД.

Номенклатура выпускаемых усилительных ламп и их вольт-амперные характеристики и параметры приведены в справочниках [10, 40, 32 и др.].

**§ 5. Типовой усилительный каскад на триоде с активным сопротивлением анодной нагрузки  $R_a = R_n$ , с цепочкой  $R_n \parallel C_k$  автоматического смещения рабочей точки, с одним источником питания  $E_a$ .**

Принципиальная электрическая схема такого усилительного каскада, работающего в режиме класса А, показана на рис. 5, а. Принцип работы усилительного каскада состоит в следующем. При отсутствии входного сигнала, то есть в режиме покоя, в анодной цепи проходит только постоянный величины ток покоя  $I_{a0}$ , который создает на резисторе  $R_n$  постоянной величины отрицательное напряжение смещения  $U_{c0} = I_{a0} \cdot R_n$ , которое минусом подается на сетку лампы. При этом выходное напряжение, снимаемое с анода лампы, имеет величину  $U_{a0} = E_a - I_{a0} \cdot R_a$ .

При подаче на вход каскада  $U_{вх} = U_{\text{мвх}} \cdot \sin \omega t$  малой величины в анодной цепи проходит пульсирующий анодный ток, имеющий

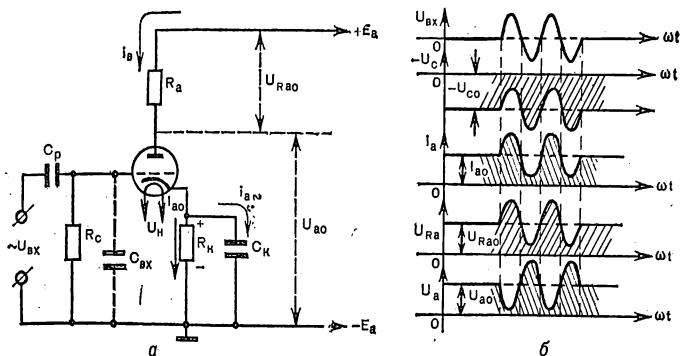


Рис. 5. Усилительный каскад на триоде (а); графическое изображение процесса усиления (б)

постоянную и полезную переменную составляющие, т. е.  $i_a = I_{a0} + I_{ma} \sin \omega t$ , который создает на резисторе  $R_a$  усиленное пульсирующей формы напряжение

$$U_{R_a} = i_a \cdot R_a = I_{a0} \cdot R_a + R_a \cdot I_{ma} \cdot \sin \omega t = U_{R_{a0}} + U_{m_{R_a}} \cdot \sin \omega t.$$

Одновременно, но противофазно изменяется и анодное, то есть выходное, напряжение каскада, равное

$$U_a = E_a - U_{R_a} = E_a - i_a \cdot R_a = U_{a0} + U_{ma} \sin(\omega t - \pi).$$

При этом  $|\pm U_{m_{вых}}| > |\mp U_{m_{вх}}|$ .

Рассмотренный процесс усиления входного сигнала, который осуществляется за счет расхода энергии источника питания  $E_a$ , графически поясняется на рис. 5, б.

Теперь поясним назначение каждого элемента схемы усилительного каскада.

$L$  — лампа как активный усилительный прибор. Резистор  $R_a$  — активное сопротивление анодной нагрузки, предназначенное для выделения на нем усиленного полезного сигнала, а также для подачи через него на анод необходимой величины анодного напряжения  $U_{a0}$ .

Резистор  $R_K$  — активное сопротивление смещения, на котором автоматически создается постоянной величины напряжение смещения за счет прохождения через него постоянной составляющей анодного тока  $I_{a0}$ . При этом напряжение смещения, минусом подаваемое на сетку лампы относительно ее катода, равно  $U_{смещ} = U_{c0} = I_{a0} \cdot R_K$ . Отсюда величина  $R_K = \frac{U_{c0}}{I_{a0}} \approx$  десятки Ом  $\div$  единицы кОм.

Конденсатор  $C_K$ , шунтируя  $R_K$ , пропускает только переменную составляющую анодного тока. Для этого необходимо, чтобы на самой низкой частоте  $f_H$  емкостное сопротивление конденсатора составляло

$$X_{C_k} = \frac{1}{\omega_n C_k} \ll \left( \frac{1}{10} \div \frac{1}{20} \right) \cdot R_k.$$

Отсюда если  $R_k$  в омах, а частота  $f_n$  в герцах, то емкость конденсатора берется в микрофарадах:

$$C_k \approx \frac{10^7}{2 \cdot 3,14 f_n \cdot R_k} \text{ (мкФ)}.$$

Резистор  $R_c$  называется сопротивлением утечки. Он предназначен: во-первых, для стекания электронов, захваченных сеткой; во-вторых, для подачи через него снимаемого с  $R_k$  отрицательного напряжения смещения на сетку лампы; в-третьих, этот резистор входит составной частью в величину входного сопротивления каскада. Поэтому обычно берут  $R_c = (0,1 \div 1,5)$  МОм.

Разделительный, или переходной, конденсатор  $C_p$  предназначен для свободного пропускания переменной составляющей входного сигнала и непропускания на сетку лампы постоянной его составляющей. Для этого берут емкость его

$$C_p \approx \frac{10^7}{2 \cdot 3,14 f_n \cdot R_c} \text{ (мкФ)},$$

если  $R_c$  в омах,  $f_n$  в герцах. Для ламповых схем при высоких значениях  $E_a$  требуются конденсаторы с малой утечкой, т. е. с малым саморазрядом, например типа КБГ и т. п., с емкостью  $C_p \approx (0,03 \div 0,25)$  мкФ.)

Для расчета параметров усилительного каскада составляется эквивалентная схема, то есть схема замещения его по переменной составляющей напряжения или

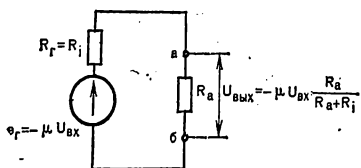


Рис. 6. Эквивалентная схема усилительного каскада на триоде

тока. При этом усилительную лампу обычно замещают эквивалентным генератором напряжения с ЭДС  $E_g = -\mu U_{вх}$  и с внутренним сопротивлением его  $R_g = R_i$  лампы, а источник питания  $E_a$  и конденсатор  $C_k$  по переменной составляющей усиливаемого сигнала закорачиваются.

Из упрощенной схемы замещения, показанной на рис. 6, можно определить:

а) действующее значение переменной составляющей анодного тока и действующее значение выходного напряжения на сопротивлении анодной нагрузки, т. е.

$$I_a = \frac{\mu U_{вх}}{R_a + R_i} \text{ и } U_{вых} = -\mu U_{вх} \frac{R_a}{R_a + R_i};$$

б) из предыдущего уравнения можно получить коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_u = K = -\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{\mu R_a}{R_a + R_i} \approx (0,6 \div 0,8) \mu.$$

Минус в этой формуле указывает на противофазность выходного напряжения относительно фазы входного напряжения;

в) приведенное выходное сопротивление каскада по переменной составляющей анодного тока

$$R_{\text{вых}} \approx R_a \parallel R_i = \frac{R_a \cdot R_i}{R_a + R_i} \text{ (десятки кОм)}.$$

В триодной схеме усилительного каскада принимают величину сопротивления анодной нагрузки, равную  $R_a = (2 \div 4)R_i$ .

Входное сопротивление каскада

$$R_{\text{вх}} = R_c \parallel X_{C_{\text{вх}}} = \frac{R_c X_{C_{\text{вх}}}}{\sqrt{R_c^2 + X_{C_{\text{вх}}}^2}},$$

где  $C_{\text{вх}} = C_0 = C_{\text{монт}} + C_{\text{ск}} + C_{\text{а.с.}}(1 + K) \approx 50 \div 200$  пФ. Динамическая крутизна анодно-сеточной характеристики

$$S_d = \frac{S \cdot R_i}{R_a + R_i} \text{ (мА/В)}.$$

Мощность, выделяемая на аноде лампы в классе А,

$$P_{a0} = I_{a0} \cdot U_{a0} < P_{a \text{ доп}} \text{ (Вт)}.$$

Мощность, выделяемая на резисторе  $R_a$ ,

$$P_{Ra0} = I_{a0}^2 \cdot R_a \text{ (Вт)}.$$

Полезная мощность усиленного выходного сигнала в нагрузке

$$P_{\text{полезн}} = P_{\sim \text{вых}} = I_a \cdot U_a = \frac{I_{\text{ма}} \cdot U_{\text{ма}}}{2} = 0,5 \cdot I_{\text{ма}}^2 \cdot R_a \text{ (Вт)}.$$

Мощность, расходуемая на накал катода лампы,  $P_{\text{нак}} = I_{\text{нак}} \cdot U_{\text{нак}}$  (Вт), берется по справочнику. Полная мощность, потребляемая от источника питания, а) без учета  $P_{\text{нак}}$  равна  $P_{01} = P_{a0} + P_{Ra0} = I_{a0} \cdot E_a$  (Вт); б) с учетом  $P_{\text{нак}}$   $P_{02} = P_{01} + P_{\text{нак}}$  (Вт).

Электрический КПД усилительного каскада, рассчитываемый без учета  $P_{\text{нак}}$ , равен отношению полезной колебательной мощности, выделяемой на сопротивлении анодной нагрузки  $R_a$ , к мощности, потребляемой от источника питания, т. е.

$$\eta_9 = \frac{P_{\text{полезн}} \cdot 100\%}{P_{01}} \text{ \%}.$$

Промышленный КПД каскада, рассчитываемый с учетом  $P_{\text{накала}}$ , равен

$$\eta_{\text{п}} = \frac{P_{\text{полезн}} \cdot 100\%}{P_{01} + P_{\text{нак}}} \text{ \%}.$$

## § 6. Графоаналитический метод исследования усилительных каскадов

Этот метод дает возможность наиболее просто и наглядно выбрать режим работы, уяснить принципы усиления каскада и определить необходимые расчетные параметры его. При этом обычно выбираются или задаются: тип усилительной лампы; ее основные параметры  $S$ ,  $R_i$ ,  $\mu$ ,  $P_a$  доп,  $U_a$  предельное,  $I_a$  предельное;  $-U_{co}$  и  $\pm U_{m\text{вх}}$  в режиме класса А; семейство анодных характеристик лампы;  $R_a$  и  $E_a$ .

Требуется построить график и определить все необходимые параметры каскада ( $I_{a0}$ ,  $I_{a\text{ макс}}$ ,  $I_{a\text{ мин}}$ ,  $I_{ma}$ ;  $U_{a0}$ ,  $U_{a\text{ макс}}$ ,  $U_{a\text{ мин}}$ ,  $U_{ma}$ , а также  $K = U_{ma}/U_{m\text{вх}}$ ,  $\eta_a$  и  $\eta_p$  и др.).

Приведем ориентировочный ход решения этой задачи.

1. На листе миллиметровой бумаги построить семейство анодных характеристик выбранной лампы, взяв их из справочника или каталога (рис. 7).

2. Если не задана величина  $R_a = R_n$ , то для триодных схем выбрать  $R_a = (2 \div 4) R_i$ .

3. Построить линию нагрузки в координатах анодных характеристик. Нагрузочная линия, описываемая уравнением  $U_a = E_a - I_a R_a$ , представляет собой прямую линию, которую можно построить в отрезках на осях координат по двум точкам:

- приняв  $I_a = 0$ , получим  $U_a = E_a$  (В);
- приняв  $U_a = 0$ , получим  $I_a = E_a/R_a$  (мА).

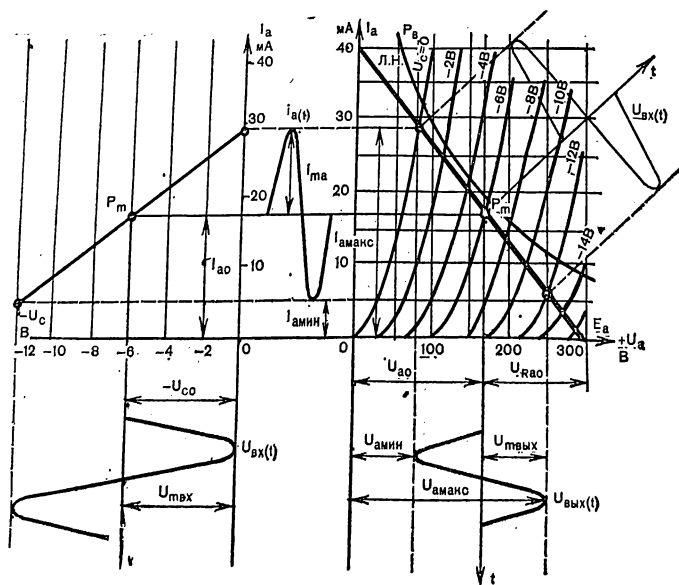


Рис. 7. Графический анализ работы усилительного каскада на триоде в режиме усиления в классе А

Через эти две точки провести прямую нагрузочную линию, которая при одном  $R_a$ , т. е. ( $R_a = R_n$ ), сольется как для постоянной, так и для переменной составляющих анодного тока. Причем угловой коэффициент наклона нагрузочной линии равен  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{R_a}$ .

4. Построить гиперболическую кривую допустимой мощности, рассеиваемой анодом лампы, т. е.  $P_a = I_a \cdot U_a = \text{const}$ . Для этого, задавшись несколькими значениями анодного напряжения, определить соответствующие значения анодного тока.

Из формулы  $I_a = P_0 / U_a$  определяют:

при $U_a$	$U_{a1}$	$U_{a2}$	$U_{a3}$	$\dots U_{an}$
$I_a$	$I_{a1}$	$I_{a2}$	$I_{a3}$	$\dots I_{an}$

5. Отметить положение рабочей точки в режиме класса А при пересечении нагрузочной линии со статической анодной характеристикой, соответствующей заданному или выбранному значению  $-U_{c0}$ .

6. Исходя из значений величин  $-U_{c0}$  и  $\pm U_{m \text{ вх}}$ , отметить на линии нагрузки рабочий участок ( $ab$ ). При этом в классе А обычно нельзя выходить в область положительных напряжений на сетке  $+U_{c0}$ , а также на нижние загибы анодных характеристик и в область  $P_a > P_{a \text{ доп}}$ , иначе появятся большие нелинейные искажения усиленного сигнала.

7. Из рабочей точки провести три временные оси и построить в пределах рабочего участка кривые входного напряжения  $U_{\text{вх}} = f(t)$ , выходного анодного тока  $i_a = f(t)$  и выходного напряжения  $U_a = f(t)$ .

8. Положение рабочей точки и рабочий участок ( $ab$ ), соответствующий данному значению  $\pm U_{m \text{ вх}}$ , дают возможность графически определить и записать полученные значения всех искомых токов и напряжений ( $I_{a0}$ ,  $I_{a \text{ макс}}$ ,  $I_{a \text{ мин}}$ ,  $I_{ma}$ ;  $U_{a0}$ ,  $U_{a \text{ макс}}$ ,  $U_{a \text{ мин}}$ ,  $U_{ma} = U_{m \text{ вх}}$ ).

Для более точного определения взять среднеарифметические значения:

$$I_{ma} = 0,5 (I_{a \text{ макс}} - I_{a \text{ мин}}) \text{ (мА)};$$

$$U_{ma} = U_{m \text{ вх}} = 0,5 (U_{a \text{ макс}} - U_{a \text{ мин}}) \text{ (В)}.$$

9. Пользуясь линией нагрузки, построить динамическую анодно-сеточную характеристику  $I_a = f(U_c)$  при  $E_a = \text{const}$  и  $R_a = \text{const}$ .

Для этой цели необходимо перенести ординаты токов из координат анодных характеристик при соответствующих значениях сеточных напряжений в координаты анодно-сеточной характеристики. Из рабочей точки динамической входной характеристики провести вниз ось времени и построить относительно ее кривую входного напряжения  $U_{\text{вх}} = f(t) = U_{c0} + U_{m \text{ вх}} \cdot \sin \omega t$ .

10. Графически определить коэффициент усиления каскада по напряжению  $K = -U_{m\text{ вых}}/U_{m\text{ вх}}$ , а затем аналитически проверить по формуле

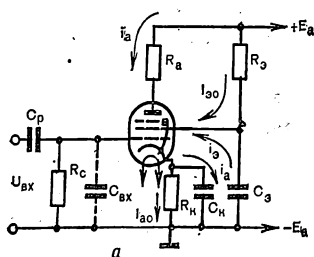
$$K = -\frac{\mu R_a}{R_a + R_l}$$

11. Пользуясь ранее приведенными формулами, определить  $P_{a0}$ ,  $P_{Ra0}$ ,  $P_{\text{полезн}}$ ,  $P_{\text{накала}}$ ,  $P_{01}$ ,  $P_{02}$ ,  $\eta_{\text{в}}$ ,  $\eta_{\text{п}}$ , а также величины  $R_R$ ,  $C_R$ ,  $R_C$ ,  $C_C$ .

Следует отметить, что подобный графоаналитический метод применяется для исследования любых усилительных каскадов, собранных и на пентоде, и на лучевом тетроде, и на транзисторе.

При этом графики будут отличаться в основном только видом (формой) входных и выходных характеристик активных усилительных элементов.

### § 7. Усилительный каскад на пентоде с активной анодной нагрузкой $R_a$ , с одним источником питания $E_a$ , с цепочкой автоматического смещения $R_K \parallel C_K$ , работающий в классе А



Усилительные каскады на пентодах широко применяются для усиления высокочастотных сигналов, а также и для усиления низкочастотных сигналов, так как они обладают по сравнению с триодами значительно меньшей проходной емкостью  $C_{ac}$ , а также более высоким коэффициентом усиления. На рис. 8, а приведена схема усилительного каскада на

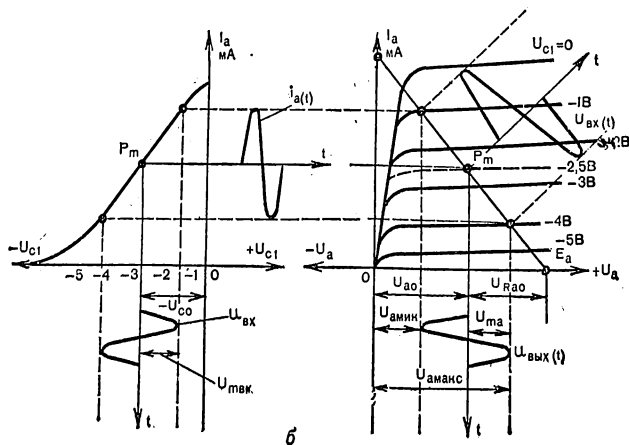


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема усилительного каскада на пентоде (а); графический анализ работы его в классе А (б)

пентоде с анодной нагрузкой. Рабочий режим в классе А обеспечивается, как и в триодной схеме, цепочкой автоматического смещения  $R_k \parallel C_k$ .

Конструктивно пентодный усилительный каскад отличается от триодного каскада наличием дополнительной цепи экранирующей сетки. В эту цепь включены: а) резистор  $R_a$ , предназначенный для пропускания постоянной составляющей тока экранной сетки  $I_{a0}$  и для подачи через него необходимой величины постоянного напряжения  $U_{a0}$  на экранную сетку; б) конденсатор  $C_a$ , который, свободно пропуская только переменную составляющую тока экранной сетки и поддерживая постоянно величины  $U_{a0}$  на ней, устраняет отрицательную обратную связь по напряжению экранной сетки, увеличивая этим коэффициент усиления каскада.

Иногда для лучшей стабилизации величины  $U_{a0}$  параллельно конденсатору  $C_a$  подключают дополнительный резистор или стабилитрон, у которого  $U_{\text{стаб}} = U_{a0}$ .

Практически в схемах пентодных усилительных каскадов принимают следующие параметры:

1) сопротивление анодной нагрузки в пределах

$$R_a \approx (0,05 \div 0,2) R_i,$$

так как внутреннее сопротивление высокочастотных пентодов достигает сотен и тысяч килоом. Желательно брать величину  $R_a$  побольше, но чтобы в рабочем диапазоне нагрузочная линия  $U_a = E_a - I_a \cdot R_a$  пересекала пологие, т. е. линейные, участки статических анодных характеристик пентода;

2) номинальное сопротивление резистора смещения при необходимой величине  $-U_{c0}$  определяют по формуле

$$R_k = \frac{|-U_{c0}|}{I_{a0} + I_{a0}}$$

3) номинальное сопротивление резистора  $R_a$  будет равно

$$R_a = \frac{E_a - U_{a0}}{I_{a0}},$$

где  $U_{a0} \approx (0,4 \div 1) \cdot U_{a0}$ , а величина  $I_{a0}$  обычно указывается в справочниках или выбирается проектировщиком.

$$I_{a0} \approx (0,1 \div 0,3) I_{a0}$$

4) номинальное значение емкости конденсатора  $C_a$  рассчитывают на самой низкой частоте усиливаемого сигнала. Если взять  $R_a$  в омах, а частоту  $f_H$  в герцах, то

$$C_a \approx \frac{10^7}{(1 \div 2) 2 \cdot 3,14 f_H R_a} \text{ (мкФ);}$$

5) коэффициент усиления пентодного каскада

$$K = - \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = - \frac{U_{m \text{ вых}}}{U_{m \text{ вх}}} = - \frac{\mu R_a}{R_a + R_i} \approx S \cdot R_a,$$

так как при  $R_a \ll R_i$ , то величина  $\frac{\mu}{R_a + R_i} \approx \frac{\mu}{R_i} = S$ .

Поэтому чем больше  $S$ , тем больше  $K$ .

У пентодов статический коэффициент усиления  $\mu$  составляет сотни и тысячи. Поэтому коэффициент усиления каскада на пентоде, равный  $K \approx (0,05 \div 0,2)\mu$ , может достигать нескольких сот, т. е. значительно больше, чем у триодных каскадов;

б) величина входной емкости каскада на пентоде имеет малую величину  $C_{вх} \approx C_{монт} + C_{ск}$ , что обеспечивает возможность работы не только в области НЧ, то и в области ВЧ. (Низкочастотные мощные пентоды обозначаются буквой П, так же, как и мощные лучевые тетроды, например 6ПП, а высокочастотные пентоды буквой К или Ж, например 6ЖП.)

Графоаналитический метод расчета усилительного каскада на пентоде с анодной нагрузкой аналогичен ранее рассмотренному методу для триодного каскада (рис. 8, б).

### § 8. Избирательный (резонансный, узкополосный) усилительный каскад на пентоде с последовательным питанием

На рис. 9, а приведена схема этого усилительного каскада, работающего в режиме класса А с автоматическим смещением.

На схеме видно, что резонансный (избирательный) усилительный каскад на пентоде отличается от выше рассмотренного пентодного каскада тем, что в его анодную цепь вместо активного сопротивления  $R_a$  включен в качестве анодной нагрузки параллельный колебательный контур  $L \parallel C$ .

Для переменной составляющей анодного тока сопротивление контура  $Z_{(a-b)}$  зависит от частоты, что показано в виде резонансной кривой на рис. 9, б. При этом максимальное, то есть резонансное, сопротивление контура, равное

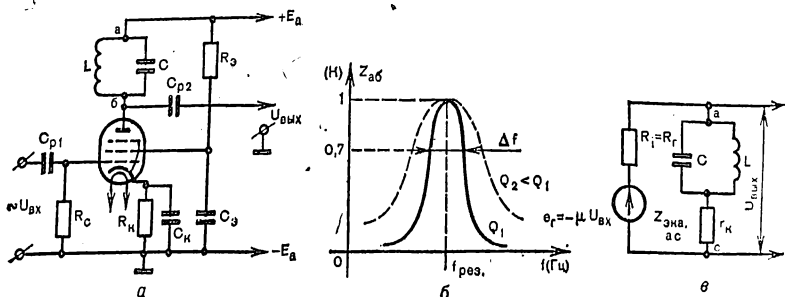


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема резонансного усилительного каскада на пентоде с последовательным питанием (а); резонансная кривая колебательного контура (б); эквивалентная схема этого каскада (в)

$$z_{\text{макс}} = z_{\text{рез}} = \frac{X_L \cdot X_C}{r_a} = \frac{L}{C \cdot r_a} = \theta X_L,$$

получается при резонансе токов, когда при малой величине активной составляющей сопротивления контура  $r_n \ll X_L$  можно принять  $X_L \approx X_C$ , то есть при  $\omega_{\text{рез}} L \approx 1/\omega_{\text{рез}} C$  на резонансной частоте, равной

$$f_{\text{рез}} \approx \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{L \cdot C}} \text{ (Гц),}$$

если  $L$  в Гн, а  $C$  в Ф. В этом случае выходное напряжение, снимаемое с анода лампы, будет равно, как показывает эквивалентная схема этого каскада на рис. 9, в,

$$U_{\text{вых}} = -\mu U_{\text{вх}} \frac{z_{\text{рез}}}{z_{\text{рез}} + R_i}.$$

Максимальный коэффициент усиления получается на резонансной частоте и определяется по формуле

$$K = -\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{\mu \cdot z_{\text{рез}}}{z_{\text{рез}} + R_i} \approx -S \cdot z_{\text{рез}}.$$

Следовательно, максимальное усиление получается, когда  $f_{\text{сигн}} = f_{\text{рез}}$ , а более узкая полоса частот  $\Delta f = f_{\text{верх}} - f_{\text{ниж}}$  граничных усиливаемого сигнала на уровне

$$\frac{K_{\text{рез}}}{K_n} = \frac{K_{\text{рез}}}{K_v} = \sqrt{2}$$

получается при более высоких значениях добротности контура

$$\theta = \frac{X_L}{r_a} = \frac{X_C}{r_a} = \frac{f_{\text{рез}}}{\Delta f} \approx 50 \div 400.$$

При этом частота сигнала может быть от десятков кГц примерно до 5 МГц. Наибольшая добротность контура получается при использовании ферритовых сердечников.

Полезная колебательная мощность усиленного сигнала, выделяемая в контуре, определяется выражением

$$S_{\text{полезн}} = 0,5 \cdot I_{\text{та}}^2 \cdot z_{\text{рез}}.$$

Коэффициент полезного действия этого каскада равен

$$\eta_0 = (S_{\text{полезн}}/S_0) \cdot 100\%.$$

Недостаток этой схемы резонансного усилительного каскада состоит в том, что через колебательный контур проходят не только

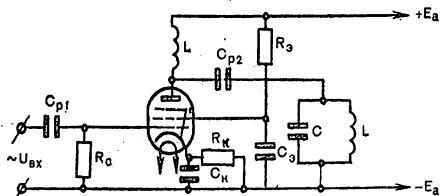


Рис. 10. Схема резонансного каскада с параллельным питанием

переменная, но и постоянная составляющие анодного тока, вызывая энергетические потери в контуре и снижая КПД каскада. Для устранения этого недостатка применяют резонансные усилительные каскады с параллельным питанием лампы и контура, как это показано на рис. 10. В этой схеме резонансного каскада постоянная составляющая анодного тока  $I_{a0}$  не пропускается через колебательный контур при помощи разделительного конденсатора  $C_p$ , но свободно пропускается его переменная составляющая, так как  $X_{C_p} = 1/\omega C_p$ . В свою очередь заградительный дроссель  $L_a$ , свободно пропуская постоянную составляющую анодного тока  $I_{a0}$ , преграждает путь через источник питания  $E_a$  его переменной составляющей, так как  $X_L = \omega L$ .

### § 9. Усилительный каскад на триоде (или пентоде) с катодной нагрузкой (катодный повторитель)

Простейшая схема катодного повторителя на триоде приведена на рис. 11, а, а его эквивалентная схема на рис. 11, б.

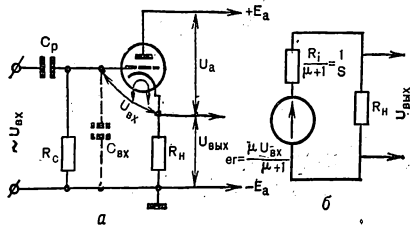


Рис. 11. Принципиальная электрическая схема катодного повторителя на триоде (а); его эквивалентная схема (б)

По сравнению с усилительным каскадом с анодной нагрузкой катодный повторитель имеет следующие особенности.

1. Нагрузочное сопротивление  $R_N$  включено в катодный участок выходной цепи. В таком варианте схемы на резисторе  $R_N$  в режиме покоя создается отрицательное напряжение смещения постоянной величины  $U_{c0} = I_{a0} \cdot R_N$ , обеспечивающее выбор положения рабочей точки.

2. При подаче на вход каскада переменного входного напряжения  $u_{вх} = U_m \sin \omega t$  вследствие 100%-ной последовательной отрицательной обратной связи все выходное напряжение подается на сетку усилительной лампы противофазно входному напряжению.

Поэтому результирующая величина переменной составляющей входного напряжения  $u'_{вх}$ , поступающая на сетку, будет значительно уменьшена и равна

$$u'_{вх} = u_{вх} - u_{вых}$$

3. Учитывая действие отрицательной обратной связи и пользуясь эквивалентной схемой катодного повторителя, получим коэффициент усиления его по напряжению, равный

$$K_u = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = \frac{\frac{\mu}{1+\mu} \cdot R_{\text{H}}}{R_{\text{H}} + \frac{R_i}{1+\mu}} = \frac{\mu R_{\text{H}}}{R_i + (1+\mu) R_{\text{H}}}$$

Разделив числитель и знаменатель этого выражения на  $R_i$ , получим  $K_u \approx \frac{S \cdot R_{\text{H}}}{1 + SR_{\text{H}}} < 1$ , так как  $\frac{1+\mu}{R_i} \approx \frac{\mu}{R_i} = S$ .

Следовательно, катодный повторитель не дает усиления по напряжению, почти повторяя на выходе входной сигнал по величине и по фазе.

4. Входная межэлектродная емкость значительно меньше, чем в триодных каскадах с анодной нагрузкой, и равна  $C_{\text{ВХ}} = C_0 = C_{\text{МОТТ}} + C_{\text{ас}} + C_{\text{кн}}(1 - K_u) \approx C_{\text{М}} + C_{\text{ас}}$  (единицы ПФ). Это дает возможность резко уменьшить частотные искажения в области высоких частот и значительно расширить полосу пропускания  $\Delta f = f_{\text{в гр}} - f_{\text{н гр}}$  усиливаемых сигналов.

5. Входное сопротивление катодного повторителя вследствие действия последовательной отрицательной обратной связи увеличивается по сравнению с усилительным каскадом с анодной нагрузкой в  $(1 + \beta K_u)$  раз, достигая единиц и десятков МОм, то есть  $R_{\text{ВХ к-да}} \approx (R_c \parallel X_{C_p}) \cdot (1 + \beta K_u)$ . Учитывая, что в области низких и средних частот емкостное сопротивление  $X_{C_p} > R_c$ , а коэффициент передачи напряжения отрицательной обратной связи  $\beta = U_{\text{ос}}/U_{\text{ВЫХ}} = 1$ , то

$$R_{\text{ВХ к-да}} \approx R_c (1 + \beta K_u) \approx R_c (1 + K_u),$$

где  $K_u$  ... коэффициент усиления каскада.

На высоких частотах  $R_{\text{ВХ к-да}}$  несколько уменьшается из-за влияния входной паразитной емкости  $C_{\text{ВХ}}$ .

6. Выходное сопротивление переменному току при нулевом сопротивлении источника входного сигнала  $R_{\text{Г}} = 0$  имеет небольшую величину (десятки Ом, единицы кОм) и определяется по формуле  $R_{\text{ВЫХ}} \approx 1/S$ , где  $S$  — крутизна статической вольт-амперной характеристики лампы.

7. Коэффициент усиления по току имеет большую величину (десятки, сотни и тысячи), так как

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{к-да}}}{I_{\text{ВХ}}} \approx \frac{R_c}{R_{\text{H}}}$$

8. Катодный повторитель дает большое усиление сигнала по мощности  $K_p = K_i \cdot K_u \approx K_i$ .

9. Фаза напряжения на выходе каскада не меняется, повторяя фазу входного сигнала. Поэтому этот каскад и называется катодным повторителем.

Учитывая все указанные особенности, каскад катодного повторителя широко применяется, во-первых, в качестве согласующего каскада между высокоомным датчиком входного сигнала и низкоом-

ной нагрузкой с соответствующим усилением сигнала по мощности (рис. 12, а); во-вторых, он применяется в широкополосных усилителях в качестве согласующего каскада (без трансформатора), включаясь между предыдущим усилительным каскадом (I) с высоким выходным сопротивлением и последующим каскадом (II) с малым вход-

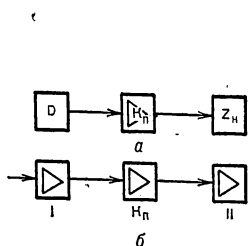


Рис. 12. Две блок-схемы включения катодного повторителя

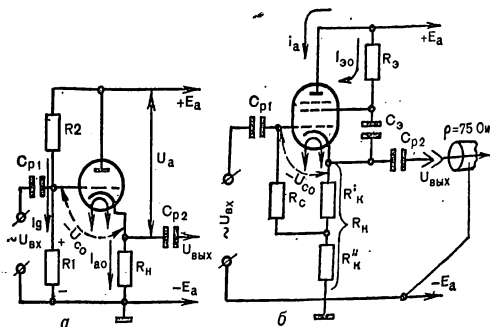


Рис. 13. Схемы включения катодного повторителя: а — с делителем напряжения; б — с секционированной нагрузкой

ным сопротивлением. При этом одновременно усиливается сигнал по току, то есть по мощности (рис. 12, б).

На практике применяются и более совершенные схемы катодных повторителей (на триодах, пентодах, транзисторах), в которых используются другие, независимые от величины  $R_H$  способы подачи напряжения смещения по постоянному току.

На рис. 13, а приведена схема катодного повторителя с делителем напряжения  $R_1$  и  $R_2$ , при котором напряжение смещения  $U_{c0} = (I_{дел} \cdot R_1 - I_{a0} \cdot R_H) < 0$ . Однако в этой схеме уменьшается  $R_{вх\ к-да} = \{(R_1 \parallel R_2) \parallel X_{C_{вх}}\} \cdot (1 + K_u)$ .

На рис. 13, б показана схема катодного повторителя с секционированной нагрузкой  $R_H = R'_H + R''_H$ , дающей возможность снимать напряжение смещения только с резистора  $R''_H$ , то есть  $U_{c0} = (I_{a0} + I_{a0}) \cdot R''_H$ , а полезный выходной сигнал снимать с суммарной величины  $R_H = R'_H + R''_H$ .

При этом увеличивается входное сопротивление каскада

$$R_{вх\ к-да} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{R_c}{1 - \frac{R'_H \cdot K_u}{R'_H + R''_H}} \approx (2 \div 10) \cdot R_c,$$

достигая величины единицы-десятки МОм, так как  $R_c = (0,5 \div 2)$  МОм, а  $K_u = 0,7 \div 0,99$ .

Зачастую катодный повторитель применяется в многокаскадных усилителях в качестве выходного каскада, согласующего высокоом-

ный выход предыдущего каскада с низкоомным волновым сопротивлением коаксиального кабеля, имеющего  $\rho = 75 \text{ Ом}$ . При этом условием согласования будет равенство

$$\rho = R_{\text{вых к-да}} = \frac{R_{\text{н}}}{1 + S \cdot R_{\text{н}}} \approx \frac{1}{S}, \text{ откуда}$$

$$R_{\text{н}} = \frac{\rho}{1 - \rho \cdot S}.$$

## § 10. Каскады усиления мощности (УМ)

В многокаскадных усилителях последний (выходной или оконечный) каскад является каскадом усиления мощности, выделяемой в полезной нагрузке. При этом выходная мощность каскада УМ должна быть достаточной для приведения в действие нагрузки, подключенной в его выходную цепь. Выходной каскад УМ должен максимально усиливать мощность усиливаемого сигнала при допустимом коэффициенте нелинейных искажений и более высоком КПД.

Различают однотактные или двухтактные выходные каскады УМ, которые могут собираться на мощных усилительных лампах, или на транзисторах, или на газоразрядных тиратронах.

**Однотактные каскады усиления мощности.** Такие УМ, работающие в режиме класса А, дают возможность отбирать в нагрузку выходную мощность полезного сигнала от долей ватта до  $3 \div 5$  Вт при электрическом КПД до  $10 \div 30\%$  и минимально допустимых уровнях нелинейных искажений в заданной полосе частот.

При этом оптимальная величина сопротивления нагрузки, включенной непосредственно в выходную цепь мощного каскада, выбирается, исходя из соотношений  $R_{\text{а}} = R_{\text{н}} = (2 \div 4) \cdot R_{\text{г}}$  — для триодных схем и  $R_{\text{н}} = R_{\text{а}} \approx (0,1 \div 0,5) \cdot R_{\text{г}}$  — для каскадов УМ на мощном пентоде или лучевом тетраде. При этом схемы таких каскадов УМ и методы их графоаналитического расчета подобны ранее приведенным схемам усилительных каскадов напряжения (см. рис. 5, 7 и 8). Такие простейшие каскады УМ дают возможность усилить сигнал по мощности с минимальными нелинейными искажениями в широком диапазоне частот.

Существенным недостатком таких бестрансформаторных схем УМ является прохождение через нагрузку не только полезной переменной составляющей анодного тока, но и его постоянной составляющей, значительно уменьшая КПД каскада и требуя более высокого напряжения источника питания  $E_{\text{а}}$ . Кроме того, для максимального использования полезной выходной мощности, которую может передать бестрансформаторный оконечный каскад во внешнюю нагрузку, необходимо соблюдать равенство оптимальной величины выходного сопротивления выходной цепи каскада УМ с величиной сопротивления внешней нагрузки  $R_{\text{н}}$ , включенной непосредственно в эту цепь, то есть  $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$ .

Однако на практике в большинстве случаев сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}}$  бывает меньше указанной выше оптимальной величины анод-

ного сопротивления  $R_a$ . Это объясняется тем, что в качестве внешней нагрузки в выходную цепь каскада УМ зачастую включается обмотка электродинамического громкоговорителя, электромагнитного реле, электродвигателя, электроконтактора, шагового искателя, самописца, звукозаписывающей и звуковоспроизводящей головки, двухпроводная абонентская или фидерная линия и т. п., которые обладают небольшим сопротивлением (единицы, десятки, сотни Ом, единицы кОм).

Поэтому если  $R_n < R_{\text{вых к-да}}$ , то внешняя нагрузка включается в выходную цепь каскада УМ при помощи выходного трансформатора, согласующего величину  $R_n$  с оптимальной величиной выходного сопротивления каскада  $R_{\text{вых к-да}}$ . При этом сопротивление внешней нагрузки, включенной во вторичную обмотку трансформатора, пересчитывается в приведенное сопротивление его первичной обмотки, включенной в выходную цепь каскада, по следующей формуле:

$$n^2 \cdot R_n = R_{\text{вых к-да}} = R_{\text{ЭНВ}},$$

где коэффициент трансформации

$$n = \frac{W_1}{W_2} = \sqrt{\frac{R_{\text{ЭНВ}}}{R_n}}.$$

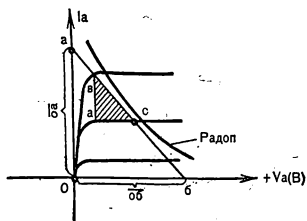


Рис. 14. График для определения эквивалентного выходного сопротивления каскада УМ

Более точно величину оптимального значения эквивалентного сопротивления каскада УМ можно определить графическим методом, пользуясь наиболее приемлемой нагрузочной линией на семействе анодных характеристик (рис. 14) выбранной мощной усилительной лампы, то есть отрезками  $об$  и  $оа$  в соответствующих единицах измерения:

$$R_{\text{ЭНВ}} = R_{\text{вых к-да}} = \frac{об}{оа} \left( \frac{В}{А} \right).$$

Таким образом, по переменной составляющей анодного тока оптимальная величина приведенного сопротивления анодной нагрузки  $R_{\text{вых к-да}}$  может достигать от единиц до десятков и сотен килоом.

Пользуясь этим же графиком, по треугольнику  $abc$  можно определить и полезную мощность в нагрузке

$$P_{\text{полезн}} = 0,5 \cdot I_{\text{ма}} \cdot U_{\text{ма}} = 0,5 \cdot I_{\text{ма}}^2 \cdot R_{\text{ЭНВ}}.$$

Коэффициент полезного действия у мощных трансформаторных каскадов УМ выше, чем у бестрансформаторных, так как ток покоя  $I_{a0}$  течет только через малое активное сопротивление первичной обмотки, минуя  $R_n$ . При этом

$$\eta_s = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_0} \cdot 100\%,$$

где  $P_0 = I_{a0} \cdot E_a$  — полная мощность в режиме класса А, расходуемая от источника питания.

Следует иметь в виду, что у однотактных трансформаторных каскадов УМ более узкая полоса частот, больше габариты, масса, выше стоимость, что отражает их недостатки.

На рис. 15 приведены типовые схемы однотактных трансформаторных каскадов УМ на мощном триоде (а) и лучевом тетроде (б), работающие в режиме класса А с автоматическим смещением рабочей точки.

В этих схемах назначение каждого элемента каскада УМ аналогично рассмотренным ранее схемам усилительных каскадов. напряжения с анодной нагрузкой (рис. 6 и 8).

Как видно из графиков на рис. 16, для получения оптимальной величины полезной выходной мощности

$$P_{\text{полезн}} = 0,5 \cdot I_{ma} \cdot U_{ma} = 0,5 \cdot I_{ma}^2 \cdot R_{\text{ЭКВ}}, \text{ где}$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = n^2 \cdot R_{\text{н}}, \text{ а } n = \frac{W_1}{W_2},$$

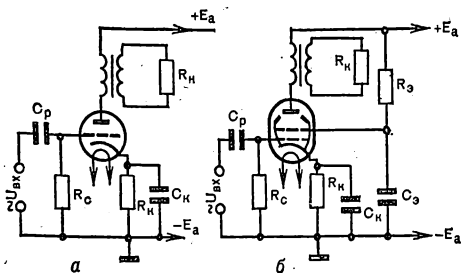


Рис. 15. Схемы каскадов УМ: а — на триоде; б — на лучевом тетроде

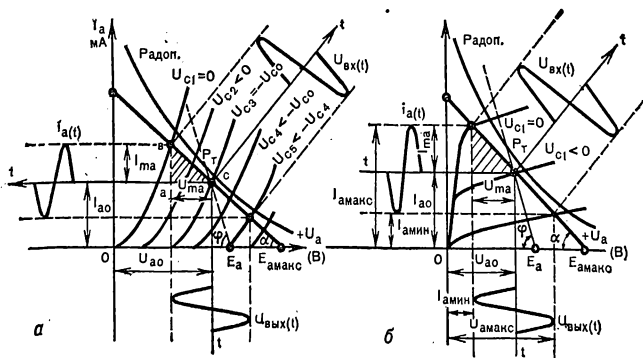


Рис. 16. Графический анализ работы каскада УМ: а — на триоде; б — на лучевом тетроде

необходимо на вход каскада УМ подавать входное напряжение с амплитудой  $|\pm U_{\text{мвх}}| \approx |-U_{\text{col}}|$ , снимаемое с предварительного усилительного каскада или с датчика входного сигнала. При этом нагрузочная линия должна проходить почти касательно к кривой допустимой мощности  $P_{\text{а доп}}$ , не пересекая ее.

Поскольку в режиме класса А рабочая точка находится на середине прямолинейного участка входной динамической характеристики каскада, то этим обеспечивается условие работы с минимальными нелинейными искажениями сигнала.

У триодных каскадов УМ нелинейные искажения меньше, чем у каскадов УМ на пентодах или лучевых тетрадах.

Однако в большинстве случаев электрический КПД каскада УМ в режиме класса А практически не превышает  $10 \div 15\%$  для триодных схем и  $15 \div 30\%$  для мощных пентодных и лучевых тетродных схем.

Нужно иметь в виду, что в каскадах УМ с трансформаторным выходом при малой величине активного сопротивления его первичной обмотки ( $r_{1\text{тр}} = \text{десятки} \div \text{сотни Ом}$ ) анодное напряжение в режиме покоя лишь немного меньше напряжения источника питания  $E_{\text{а}}$ , то есть

$$U_{\text{а0}} \approx E_{\text{а}} - I_{\text{а0}}(r_{1\text{тр}} + R_{\text{к}}) \dots \text{для триодных схем,}$$

$U_{\text{а0}} = E_{\text{а}} - (I_{\text{а0}} + I_{\text{э0}}) \cdot R_{\text{к}} - I_{\text{а0}} \cdot r_{1\text{тр}} \dots$  для схем на пентодах или лучевых тетрадах, имеющих дополнительную цепь экранной сетки.

Поэтому линия нагрузки по постоянному току на семействе статических анодных характеристик (рис. 16) идет очень круто, под большим углом  $\varphi = \text{arctg} \frac{1}{R_{\text{к}} + r_{1\text{тр}}}$ .

В динамическом же режиме работы при подаче на вход трансформаторного каскада УМ синусоидального (гармонического) входного сигнала при оптимальном значении приведенной нагрузки  $R_{\text{экв}}$  наибольшее напряжение  $E_{\text{а макс}}$  между выходными электродами увеличивается почти в два раза (а иногда и более) по сравнению с  $U_{\text{а0}}$ . Это явление объясняется тем, что при убывании выходного тока к величине  $E_{\text{а}}$  добавляется противоЭДС индуктивности первичной обмотки трансформатора, задерживающей процесс убывания анодного тока. Поэтому в динамическом режиме работы такого каскада УМ нагрузочная линия по переменной составляющей анодного тока определяется величиной  $R_{\text{экв}}$  и  $E_{\text{а макс}} > E_{\text{а}}$  и, проходя через ту же рабочую точку, через которую проходит линия нагрузки по постоянному току, имеет значительно меньший угол наклона (рис. 16)

$$\alpha = \text{arctg} \frac{1}{R_{\text{экв}}}.$$

При расчете максимальной выходной мощности трансформаторного каскада УМ, учитывая КПД трансформатора, определяют по заданной величине необходимой полезной мощности в нагрузке  $P_{\text{полезн}}$  необходимую величину выходной мощности каскада, а именно:

$$P_{\text{вых к-да}} = P_{\text{полезн}} / \eta_{\text{тр}}$$

Затем выбирают усилительную лампу, у которой допустимая мощность, рассеиваемая анодом,  $P_{\text{а доп}} \geq 6P_{\text{вых к-да}}$  для триода и  $P_{\text{а доп}} \geq 4P_{\text{вых к-да}}$  для пентода или лучевого тетрода. При этом напряжение на аноде в режиме покоя принимают равным  $U_{\text{а0}} = (0,7 \div 0,8) \cdot U_{\text{а доп}}$ , а величину тока покоя берут равным

$$I_{\text{а0}} = \frac{(0,8 \div 0,9) \cdot P_{\text{а доп}}}{U_{\text{а0}}}$$

Полезная мощность, выделяемая в нагрузке, будет равна  $P_{\text{полезн}} = \eta_{\text{тр}} \cdot P_{\text{вых к-да}} = 0,5 \eta_{\text{тр}} \cdot I_{\text{та}} \cdot U_{\text{та}} = 0,5 \eta_{\text{тр}} \cdot I_{\text{та}}^2 R_{\text{экв}}$ . Отсюда можно определить коэффициент трансформации

$$n_{\text{оптим}} = \frac{W_1}{W_2} = \sqrt{\frac{\eta_{\text{тр}} \cdot R_{\text{экв}}}{R_{\text{н}}}}$$

Коэффициент усиления каскада УМ по напряжению

$$K_u = \frac{\mu R_{\text{экв}}}{R_{\text{экв}} + R_t} \quad \text{и по мощности } K_p = \frac{P_{\text{полезн вых}}}{P_{\text{вх}}}$$

$$\text{где } P_{\text{вх}} = 0,5 \cdot I_{\text{твх}}^2 \cdot R_{\text{вх к-да}}$$

Для учета потерь полезной мощности в выходном трансформаторе принимают величину его КПД в пределах, указанных в табл. 1.

Таблица 1

$P_{\text{тр-ра}}, \text{ Вт}$	до 1	1 ÷ 10	10 ÷ 100	100 ÷ 1000	$10^3 \div 10^4$ и >
$\eta_{\text{тр}}$	0,6 ÷ 0,7	0,7 ÷ 0,8	0,8 ÷ 0,93	0,9 ÷ 0,95	0,95 ÷ 0,98

**Двухтактные каскады усиления мощности.** Для получения больших мощностей (от десятков-сотен Вт до десятков-сотен кВт) усиленных сигналов в полезной нагрузке, а также для улучшения некоторых качественных параметров выходных каскадов применяются различные схемы двухтактных каскадов УМ:

- а) двухтактные каскады УМ с переходным фазоинвертирующим и выходным согласующим трансформаторами;
- б) двухтактные каскады с дополнительным фазоинверсным каскадом с разделенной нагрузкой и с трансформаторным выходом;
- в) бестрансформаторные двухтактные каскады УМ на транзисторах и др.

Каждая из этих схем имеет свои особенности. Они могут собираться на мощных усилительных, или генераторных, или газоразрядных лампах, или на транзисторах.

Двухтактные каскады УМ представляют собой два симметрично расположенных плеча из одинаковых однотактных каскадов, соеди-

ненных общими проводниками, с общим источником питания и общим выходом, работающим на общую нагрузку.

Для увеличения полезной выходной мощности в каждое плечо могут включаться по две одинаковых параллельно соединенных мощных усилительных лампы или по два транзистора.

Двухтактные каскады могут иметь трансформаторную или бестрансформаторную резистивно-емкостную связь с предоконечным усилительным каскадом.

Они могут работать в любом режиме усиления, то есть в классах А, В, АВ и соответственно с малым или большим КПД (до  $10 \div 40\%$ ). В двухтактных каскадах увеличивается полезная выходная мощность, отдаваемая в нагрузку, соответственно режиму работы и количеству усилительных ламп или транзисторов в плече примерно в два, четыре, восемь и более раз по сравнению с однократным каскадом УМ. При-

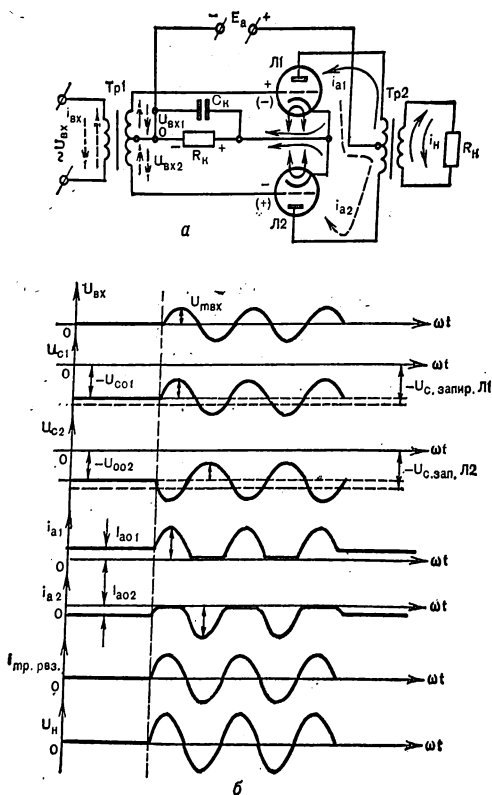


Рис. 17. Принципиальная электрическая схема двухтактного каскада УМ, работающего в классе АВ1 (а); временные диаграммы токов и напряжений в его цепях (б)

менение мощных генераторных ламп в двухтактных схемах УМ дает возможность получить полезную выходную мощность до десятков и сотен кВт.

Кроме того, симметричные трансформаторные схемы (рис. 17, а) двухтактных каскадов УМ не имеют заземленной точки как для симметричной входной, так и для выходной цепей, что зачастую является очень важным их преимуществом.

Напряжение смещения на сетки усилительных ламп обоих плеч снимается с одного общего резистора  $R_R$  или подается от специального дополнительного источника. При этом резистор  $R_R$ , через который протекают одинаковые токи обеих ламп  $I_{R0} = I_{a01} + I_{a02}$ , иногда при хорошей симметрии плеч может не шунтироваться конденсатором  $C_R$ .

На графике временных диаграмм (рис. 17, б) показано, что при отсутствии входного сигнала, когда  $u_{вх} = 0$ , на сетки обеих ламп через вторичные полуобмотки переходного трансформатора подаются одинаковые по величине отрицательные напряжения смещения  $-U_{c01} = -U_{c02} = -I_{R0} \cdot R_R$ . (Это в режиме класса А или класса АВ.) При этом в анодных цепях каждого плеча схемы, показанной на рис. 17, текут одинаковые по величине постоянные составляющие анодных токов  $I_{a01} = I_{a02}$ , которые при прохождении через первичные полуобмотки выходного трансформатора имеют противофазные направления.

Вследствие этого их магнитные потоки взаимно компенсируются, а сердечник трансформатора работает, не подмагничиваясь постоянной составляющей анодных токов, а также четными гармониками усиливаемого сигнала. Это явление даёт возможность уменьшить габариты, массу, стоимость трансформатора, а также позволяет осуществлять усиление сигналов на линейном участке кривой намагничивания сердечника трансформатора с меньшими нелинейными и частотными искажениями. Уменьшаются также фон переменного тока и влияние внешних помех.

В схеме двухтактного каскада УМ (рис. 17) входной сигнал  $u_{вх} = U_{m вх} \cdot \sin \omega t$ , подаваемый на первичную обмотку переходного трансформатора  $Tr1$ , трансформируется во вторичные его полуобмотки, с которых снимаются равные по амплитуде, но противофазные входные напряжения  $+u_{вх1} = -u_{вх2}$ , и подаются одновременно на сетки ламп обоих плеч. При этом результирующие напряжения, одновременно подаваемые на сетки ламп, будут равны:

$$u_{c1} = -U_{c01} + U_{m вх1} \cdot \sin \omega t,$$

$$u_{c2} = -U_{c02} - U_{m вх2} \cdot \sin \omega t.$$

При работе в режиме класса АВ1 лампы в плечах двухтактной схемы работают поочередно, как это иллюстрируется на графике временных диаграмм (рис. 17, б).

Когда в анодной цепи лампы Л1 протекает анодный ток  $i_{a1} = I_{a01} + I_{ma} \sin \omega t$ , лампа Л2 другого плеча запирается, т. е.  $i_{a2} = 0$ .

В следующий полупериод входного напряжения лампа Л1 запи-

рается ( $i_{a1} = 0$ ), а в анодной цепи лампы Л2 протекает анодный ток  $i_{a2} = I_{a02} + I_{ma} \cdot \sin \omega t$ .

Суммированный, т. е. результирующий переменный анодный ток обеих ламп, протекающий через две первичные полуобмотки выходного трансформатора ( $W1/2$ ), вызывает намагничивающую силу трансформатора  $F = (i_{a1} + i_{a2}) \frac{W_1}{2}$ , создающую синусоидальный магнитный поток, индуктирующий во вторичной обмотке  $W_2$ , в которую включена нагрузка, синусоидальное выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{л. вых}} \cdot \sin \omega t.$$

**Двухтактный каскад УМ с предварительным парафазным, т. е. фазоинверсным каскадом с разделенной нагрузкой.** Схема такого усилителя (рис. 18, а) дает возможность исключить переходной трансформатор в двухтактном каскаде УМ, что уменьшает габариты, массу, стоимость и обеспечивает работу усилителя в более широком диапазоне частот.

В предварительном фазоинверсном каскаде, собранном на лампе Л1, в качестве нагрузки включены два резистора  $R_{a1} = R_{a2}$ , один из них в анодный участок, а другой — в катодный участок выходной цепи каскада. (Обычно сопротивление этих резисторов берут по несколько килоом.)

Для выбора режима работы этого каскада в классе А может быть включен делитель напряжения из резисторов  $R_1$  и  $R_2$ , работающий вместе с резистором  $R_{к1}$ , который зашунтирован конденсатором  $C_{к1}$ .

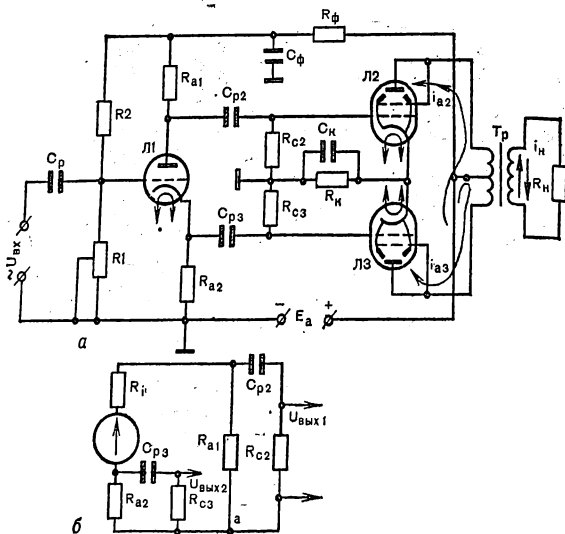


Рис. 18. Схема двухтактного каскада УМ с фазоинверсным предварительным каскадом (а); его эквивалентная схема (б)

Из эквивалентной схемы этого каскада (рис. 18, б) видно, что по переменной составляющей усиливаемого сигнала точка «а» заземлена через источник питания. Вследствие этого на сетки ламп Л2 и Л3 обонх плеч оконечного двухтактного каскада УМ через цепочки  $C_{p2}$  и  $R_{c2}$ ,  $C_{p3}$  и  $R_{c3}$  одновременно подаются одинаковые по величине, но противофазные переменные напряжения. Для их уравнивания можно последовательно с  $R_{a2}$  включить переменный резистор.

Наличие в катодном участке резистора  $R_{a2}$ , не зашунтированного конденсатором, создает последовательную отрицательную обратную связь по выходному напряжению, снимаемому с резистора  $R_{a2}$ . Поэтому работа этого каскада по катодному выходу переводится в режим катодного повторителя, при котором не происходит усиления сигнала по напряжению, т. е.  $K_u < 1$ , так как при наличии отрицательной обратной связи коэффициент усиления каскада по направлению равен:

$$K_u = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{\mu R_a}{R_i + (1 + \mu) R_a} \approx \frac{S \cdot R_a}{1 + S R_a} < 1,$$

где  $R_a = R_{a1} = R_{a2}$ ;  $\beta = U_{oc}/U_{вых} = 1$ ;  $S = \mu/R_i$ .

Такой же величины коэффициент усиления и по анодному выходу.

Для получения более высокого коэффициента усиления каскада с разделенной нагрузкой можно использовать видоизмененную его схему, приведенную на рис. 19, в которой устранена отрицательная обратная связь по переменной составляющей катодного тока усилительной лампы. На этой схеме видно, что режим работы фазоинверсного каскада на лампе Л1 в классе А обеспечивается цепочкой  $R_K \parallel C_K$ , а нагрузочный резистор в катодной цепи  $R_{a2}$  не входит в состав входного сопротивления каскада; поэтому выходное напряжение, снимаемое с него, не подается обратно на вход каскада, устраняя отрицательную обратную связь. Однако эта схема имеет тот недостаток, что входная цепь каскада не должна подключаться к корпусу, то есть к минусу источника питания, что не всегда возможно в многокаскадных усилителях, питающихся от одного источника питания.

Коэффициент усиления по напряжению с обоих выходов каскада в этой схеме равен

$$K_u = \frac{\mu R_a}{2R_a + R_i}, \text{ где } R_a = R_{a1} = R_{a2}.$$

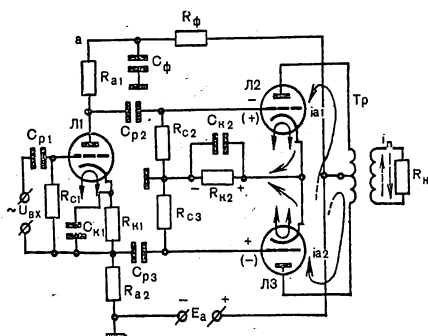


Рис. 19. Вариант схемы двухтактного каскада УМ с предварительным фазоинверсным каскадом