

## Глава 4. Режимы работы усилительных элементов

### 4.1 Режим А

Этот режим характеризуется тем, что точка покоя выбирается в средней используемой для работы части нагрузочной ВАХ (нагрузочной прямой) усилительного элемента (УЭ). Положение точки покоя на нагрузочной прямой определяется минимально допустимым током покоя выходной цепи УЭ, который прямо пропорционален выходной мощности и обратно пропорционален КПД и напряжению питания. Крайнее положение точки покоя на нагрузочной прямой должны соответствовать выбранной амплитуде входного сигнала, чтобы обеспечивать эффективный энергетический режим УЭ. Верхнее положение точки покоя выбирается на изгибе выходной статической ВАХ при максимальной амплитуде сигнала. Если верхнее положение точки покоя отличается от указанного, ее передвигают и вновь проводят нагрузочную прямую через точку покоя и верхнее ее положение, что несколько изменяет сопротивление нагрузки по переменному току. Например, для биполярного транзистора выходные статические ВАХ которого изображены на рис 4.1, точка покоя  $A$ , показанная на нагрузочной прямой  $BC$  для переменного тока, определяется напряжением покоя  $U_{KЭ}$  и током покоя  $I_K$ . Прямая  $PQ$ , которая проходит через точку  $A$ , также является нагрузочной прямой, но для постоянного тока. Уровень коллекторного тока снизу ограничивается обратным током коллектора  $I_{КБЭ}$  (точка  $C$ ), а сверху – током насыщения коллектора (точка  $B$ ). Как видно из рис 4.1а, точка  $A$  делит отрезок  $BC$  нагрузочной прямой примерно на две равные части. В связи с этим в режиме  $A$  при нормальном уровне сигнала, когда  $I_{Kм} < I_K$ , не происходит отсечки тока коллектора и почти не наблюдается искажения синусоидальной формы коллекторного тока.

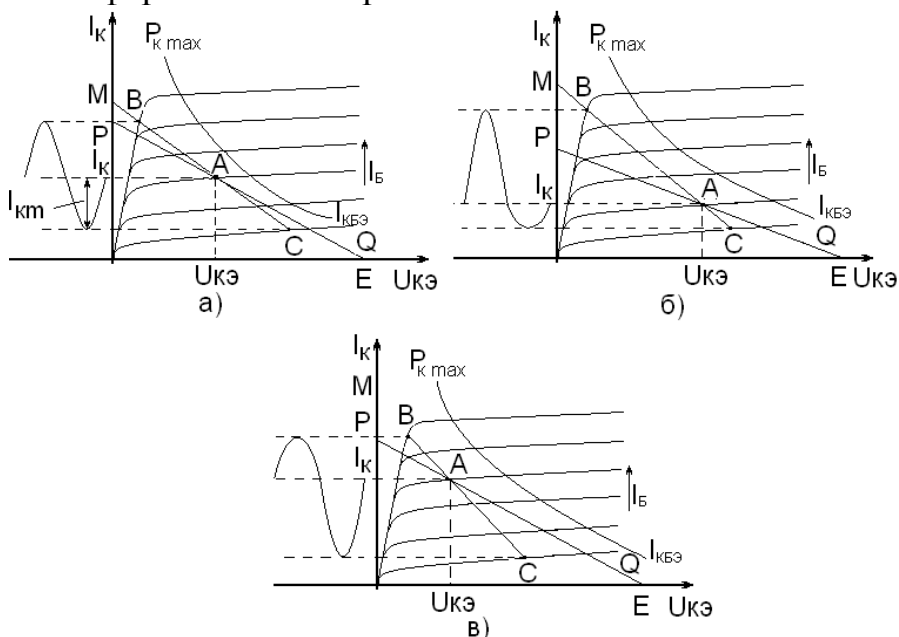


Рис. 4.1

Если под действием дестабилизирующих факторов (изменения температуры напряжения питания, радиации и др.) или в результате неправильно выбранного режима питания УЭ по постоянному току точка покоя  $A$  на отрезке  $BC$  нагрузочной прямой сместится вниз (рис. 4.1б), то форма отрицательной полуволны синусоидального тока коллектора исказится, так как ток покоя  $I_K$  окажется меньше амплитудного значения тока  $I_{Km}$ . В свою очередь, если точка покоя  $A$  на отрезке  $BC$  нагрузочной прямой под действием дестабилизирующих факторов сместится вверх (см. рис. 4.1в), произойдет искажение положительной полуволны тока за счет насыщения тока коллектора.

Таким образом, чтобы не допустить искажения усиливаемого сигнала, необходимо правильно выбрать и стабилизировать точку покоя на нагрузочной прямой, что равнозначно стабилизации режима питания по постоянному току транзистора. При этих условиях режим А обеспечивает малый уровень гармоник. Поэтому он широко применяется в несимметричных одноктных каскадах предварительного усиления, где амплитуда усиливаемого сигнала сравнительно небольшая и не требуется высокие энергетические показатели каскада.

Однако режим А в принципе не в состоянии обеспечить высокий КПД, так как независимо от уровня усиливаемого сигнала УЭ потребляет от источника питания все время примерно одинаковую мощность. Это связано с тем, что коэффициенты использования коллекторного тока и коллекторного напряжения в режиме А всегда меньше единицы ( $I_K > I_{Km}$ ,  $U_{KЭ} > U_{KЭm}$ ).

Отсюда КПД транзисторного усилительного каскада работающего в режиме А всегда меньше 0.5:

$$\eta_A = \frac{I_{Km} U_{KЭm}}{2I_K U_{KЭ}}. \quad (4.1)$$

По этой причине режим А в мощных оконечных каскадах где КПД играет определяющую роль, практически не применяется. Поскольку в режиме отсутствует отсечка коллекторного тока, то характеризовать этот режим углом отсечки не принято, хотя с определенной оговоркой можно считать угол отсечки в этом режиме равным  $\pi$ .

## 4.2 Режим В

В режиме В УЭ работает с отсечкой тока (полпериода пропускает ток, пол периода закрыт, как показано на рис. 4.2 Такой режим принято характеризовать углом отсечки  $\theta$ , который равен половине длительности импульса в угловом исчислении. В идеализированных условиях когда ВАХ УЭ аппроксимируется ломанной прямой, угол отсечки в режиме В равен  $\pi/2$ . Чтобы обеспечить режим В для электронных ламп, полевых транзисторов и биполярных транзисторов, у которых наблюдается неуправляемый обратный ток коллектора  $I_{КБО}$ , сильно зависящий от температуры, точку покоя не

следует выбирать на оси абсцисс. Она должна находиться на нагрузочной прямой несколько выше точки  $C$  (рис. 4.1), где пересекается нагрузочная прямая с характеристикой обратного тока коллектора.

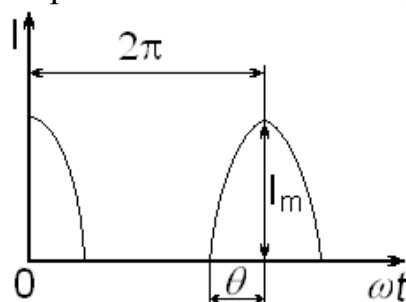


Рис. 4.2

Для идеализированного случая функция, описывающая косинусоидальные импульсы тока с углом отсечки  $\pi/2$ , раскладывается в ряд Фурье, с помощью которого определяется среднее значение тока, протекающего через УЭ:

$$i(\omega t) = I_m / \pi + 0.5 I_m \cos \omega t + 0.212 I_m \cos 2 \omega t + \dots \quad (4.2)$$

Из этого выражения следует, что среднее значение тока зависит от амплитуды усиливаемого сигнала. Когда сигнал отсутствует среднее значение тока равно 0 и УЭ не употребляет энергию от источника питания. В связи с этим потребляемая энергия УЭ в режиме В оказывается на порядок меньше, чем в режиме А. Кроме того, за счет лучшего использования тока (коэффициент использования тока  $I_{km} / I_k = \pi / 2 = 1.57$ ) предельное значение КПД для режима В  $\eta_B = 0.785$ . Естественно, что при более высоком КПД каскада в УЭ теряется меньшая мощность, он слабее нагревается. Кроме того, при одной и той же рассеиваемой на коллекторе (стоке) мощности полезная мощность на нагрузке может быть больше в пять раз, чем в режиме А.

В режиме В в несинусоидальном токе велика доля гармоник, что приводит к сильному искажению усиливаемого сигнала. Например, амплитуда второй гармоники в импульсах тока составляет 0.425 от первой. Для подавления значительных четных гармоник при работе УЭ в режиме В необходимо использовать специальные схемотехнические методы – симметричные двухтактные схемы. Они содержат идентичные плечи, УЭ которых открываются сигналом поочередно и соединены с нагрузкой таким образом, чтобы из двух токов с углом отсечки  $\pi/2$ , сдвинутых по фазе на  $\pi$  относительно друг друга, в нагрузке получается суммарный синусоидальный ток.

### 4.3 Режим АВ

Если угол отсечки больше  $\pi/2$ , но меньше  $\pi$ , то получается промежуточный режим АВ между режимами В и А. Если в режиме А нелинейные искажения возрастают с увеличением амплитуды усиливаемого сигнала, то в режиме В нелинейные искажения могут появляться и при малых уровнях сигнала за счет нелинейности начальных участков ВАХ УЭ.

Режим АВ используется для уменьшения нелинейных искажений усиленного сигнала, которые возникают из-за нелинейности начальных участков ВАХ УЭ.

При работе двухтактных каскадов в режиме АВ происходит перекрытие положительной и отрицательной полуволн тока плеч двухтактного каскада, что приводит к компенсации искажений, полученных за счет нелинейности начальных участков ВАХ УЭ. При использовании режима АВ в двухтактном каскаде помимо уменьшения нелинейных искажений можно упростить цепи питания УЭ, что имеет существенное значение для повышения надежности. Точка покоя на нагрузочной прямой в режиме АВ выбирается выше, чем в режиме В. При этом ток покоя УЭ должен составлять 0.2 ... 0.3 от его максимального значения.

#### 4.4 Режим С

В режиме С на УЭ подается сигнал большого уровня и такое напряжение смещения, при котором угол отсечки меньше  $\pi/2$ . Так как  $\theta < \pi/2$ , то ток покоя УЭ весьма мал. При малом угле отсечки КПД каскада приближается к 100%.

Однако с уменьшением угла отсечки в импульсе тока возрастают уровни высших гармоник по отношению к уровню первой гармоники. Поэтому режим С непригоден для электронных усилителей звукового диапазона частот. Этот режим дает высокие энергетические результаты и широко используется в одно- и двухтактных каскадах усилителей мощности радиочастот, которые, как правило, нагружаются на сложные избирательные LC – системы, способные эффективно отфильтровывать высшие гармоники и обеспечивать в нагрузке только ток первой гармоники.

#### 4.5 Режим Д

В режиме Д УЭ работает как электронный ключ, т.е. УЭ или закрыт или открыт. В закрытом состоянии через УЭ протекает незначительный ток, а падение напряжения на нем примерно равно напряжению источника питания. В открытом состоянии падение напряжения на УЭ мало, а ток велик. Поэтому и в закрытом, и в открытом состояниях потери в УЭ в режиме Д ничтожно малы и КПД каскада приближается к 100%.

Понятно что каскад, УЭ которого работают в ключевом режиме, гармонические сигналы усиливать не может. Их необходимо преобразовывать (модулировать) в прямоугольные импульсы постоянной амплитуды, но с длительностями, пропорциональными мгновенному значению напряжения сигнала. При этом частота следования импульсов должна быть постоянной и значительно превышать максимальную частоту сигнала. Таким образом, гармонические сигналы, прежде чем подаваться на

вход усилительного каскада класса *D*, модулируются. После усиления импульсов, промодулированных по ширине, осуществляется их обратное преобразование (демодуляция) в сигнал первоначальной формы.

В усилителях класса *D* используются два режима: *AD* (рис. 4.3а) и *BD* (рис. 4.3б).

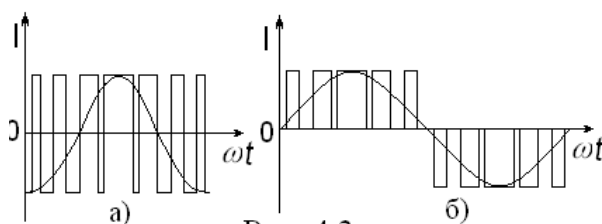


Рис. 4.3

Если для осуществления режима *AD* применяются сравнительно простые электрические схемы, как и для режима *A*, то режим *BD* реализуется с помощью сложных двухтактных схем с двойным управлением УЭ.

#### 4.6 Режим *E*

Режим *E*, как и режим *D*, позволяет получать высокий КПД (более 90%) в оконечном каскаде усилителя мощности при изменении уровня усиливаемого сигнала в широких пределах. Такой высокий КПД может быть обеспечен в режиме *E* только с помощью двухтактных схем, УЭ которых работают с углом отсечки  $\pi/2$  (режим *B*) или чуть больше  $\pi/2$  (режим *AB*). Таким образом, высокоэффективными режимами *E* могут быть режимы *BE* или *ABE*.

Сущность режимов *BE* или *ABE* заключается в том, что точка покоя УЭ не зафиксирована, а изменяет свое положение на ВАХ УЭ в зависимости от уровня усиливаемого сигнала, как это показано на рис. 4.4

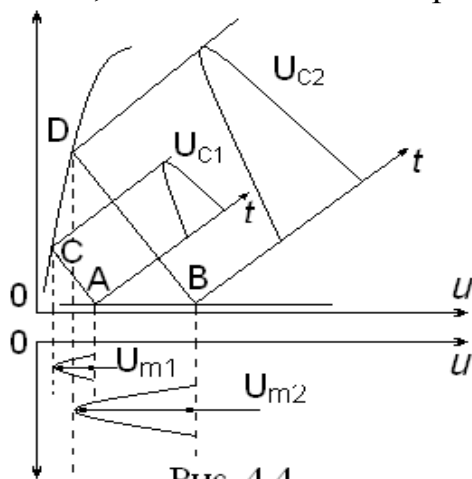


Рис. 4.4

Точки покоя *A* и *B* УЭ для двух уровней сигнала в режиме *E* благодаря изменению напряжения на выходе вторичного источника – регулируемого источника питания (РИП) – изменяют свое положение на ВАХ в соответствии с уровнем усиливаемого сигнала таким образом, что падение напряжения на УЭ получается минимальным для активного режима.

Предположим, на вход УЭ одного плеча оконечного каскада подается сигнал  $U_{c1}$ . Он воздействует не только на УЭ, но и на РИП. Постоянное

напряжение на выходе РИП, от которого питается УЭ, изменяется соответственно изменению сигнала, и точка покоя УЭ, перемещаясь, оказывается в точке  $A$ , а Амплитуда сигнала – в точке  $C$ , т.е. на границе области активного режима УЭ. В результате имеем минимальные потери напряжения в УЭ для активного режима, что позволяет получить примерно одинаковый коэффициент использования напряжения независимо от уровня сигнала, а следовательно, и высокий КПД. Поскольку УЭ работает в области активного режима, то искажения усиленного сигнала не столь значительны, как в режиме  $D$ .

В случае повышения уровня сигнала  $U_{C2}$  напряжение на выходе РИП увеличивается, точка покоя оказывается в точке  $B$ , а максимальный уровень сигнала – в точке  $D$ . Таким образом, коэффициент использования напряжения остается практически постоянным:

$$\frac{U_{m1}}{U_1} \approx \frac{U_{m2}}{U_2}, \quad (4.3)$$

хотя уровень положительной полуволны сигнала увеличивается.