

## РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ И УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

### § 9.1. Вводные замечания

При рассмотрении общей схемы радиосвязи и схемы радиолокатора (§ 1.1) было показано, что в радиопередатчиках и радиоприемниках почти всегда применяется усиление колебаний высокой частоты. Для такого усиления как модулированных, так и немодулированных колебаний обычно применяются так называемые *резонансные усилители*, содержащие резонансные контуры, а не усилители с активной нагрузкой в анодной цепи, рассмотренные в гл. 3.

Усилители, рассмотренные в гл. 3, на высоких частотах имеют небольшой коэффициент усиления из-за шунтирующего влияния паразитных емкостей. В резонансных усилителях проводимость этих емкостей компенсируется индуктивной проводимостью контуров, что повышает коэффициент усиления на частотах, близких к резонансу.

Резонансные усилители имеют большой коэффициент усиления для сравнительно узкой полосы частот вблизи резонансной частоты. Это позволяет с их помощью не только усиливать, но и выделять колебания с желаемыми частотами.

На рис. 9.1 и 9.2 приведены наиболее часто встречающиеся схемы резонансных усилителей. В них переменная составляющая напряжения на сетке вызывает колебания анодного тока и усиленные колебания напряжения на контурах (если их резонансные частоты близки к частоте колебаний, подаваемых на сетку).

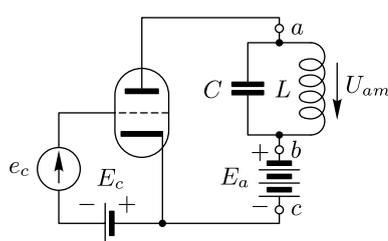


Рис. 9.1

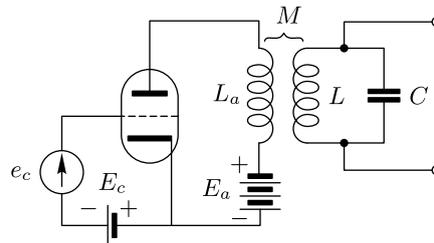


Рис. 9.2

### § 9.2. Резонансное усиление при малых колебаниях

Если амплитуда колебания, подаваемого на сетку резонансного усилителя, невелика, то для переменных составляющих токов и напряжений можно заменить лампу схемой замещения (§ 3.1). Тогда схема рис. 9.1 заменится эквивалентной схемой, изображенной на рис. 9.3. Последняя была рассмотрена в первой части настоящего курса (§ 5.6).

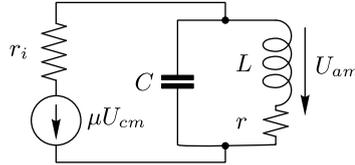


Рис. 9.3

Переменное напряжение на контуре для схемы рис. 9.3 на резонансной частоте выражается так:

$$U_{am} = \frac{\mu U_{cm}}{r_i + R_{\text{э}}} R_{\text{э}}, \quad (9.1)$$

где  $U_{cm}$  — комплексная амплитуда переменного напряжения на сетке,  $R_{\text{э}}$  — резонансное сопротивление анодного контура.

Отсюда коэффициент усиления схемы на резонансной частоте равен

$$K = \frac{U_{am}}{U_{cm}} = \frac{\mu R_{\text{э}}}{r_i + R_{\text{э}}} = \frac{SR_{\text{э}}}{1 + \frac{R_{\text{э}}}{r_i}}. \quad (9.2)$$

Из полученной формулы видно, что коэффициент усиления растет с увеличением  $R_{\text{э}}$  и стремится к  $\mu$ . С изменением частоты коэффициент усиления и  $U_{am}$  по модулю и аргументу изменяются по резонансным кривым, соответствующим добротности:

$$Q' = Q \frac{R_{\text{э}}}{r_i + R_{\text{э}}}, \quad (9.3)$$

где  $Q$  — добротность контура (см. § 5.6 ч. I).

Аналогично может быть рассмотрена схема рис. 9.2.

### § 9.3. Резонансное усиление при больших колебаниях

Для получения большого выходного напряжения от резонансных усилителей, рассмотренных в предыдущем параграфе, на их сетку дают такое переменное напряжение, что оно заходит в нелинейную часть характеристик, и в анодном токе появляются высшие гармоники. Однако, поскольку частота этих гармоник сильно отличается от резонансной частоты контура, настроенного на основную частоту, то напряжение, создаваемое ими на выходе усилителя, очень мало. Поэтому *высшие*

гармоники анодного тока практически не сказываются на выходном напряжении и не искажают его.

Отсюда следует, что выходное напряжение будет синусоидально и пропорционально первой гармонике анодного тока. Таким образом, для исследования зависимости напряжения на выходе от напряжения на входе необходимо знать зависимость амплитуды первой гармоники анодного тока от амплитуды напряжения на сетке, называемую *колебательной характеристикой лампы*.

Рассмотрим сначала эту зависимость для случая, когда влиянием изменения напряжения на аноде на анодный ток можно пренебречь (например, это может иметь место при использовании пентодов). Колебательная характеристика, полученная для постоянного напряжения на аноде, называется *статической* колебательной характеристикой. В этом случае зависимость анодного тока от напряжения на сетке определяется характеристикой лампы

$$i_a = f(u_c), \quad (9.4)$$

взятой для  $u_a = E_a$ .

Полагая

$$u_c = U_{c0} + U_{cm} \cos \alpha, \quad (9.5)$$

$$\alpha = \omega_0 t + \varphi,$$

в соответствии с ф-лой (8.4а) получим:

$$i_a = \frac{1}{2} F_0(U_{c0}, U_{cm}) + F_1(U_{c0}, U_{cm}) \cos \alpha + F_2(U_{c0}, U_{cm}) \cos 2\alpha + \dots \quad (9.6)$$

Интерес представляет только первая гармоника тока, так как лишь она вызывает падение напряжения на анодном контуре.

Если характеристика аппроксимирована степенным рядом, то амплитуда первой гармоники определяется ф-лой (8.16):

$$I_{a1} = F_1(U_{c0}, U_{cm}) = a_1 U_{cm} + \frac{3}{4} a_3 U_{cm}^3 + \frac{5}{8} a_5 U_{cm}^5 + \dots, \quad (9.7)$$

которая является уравнением статической колебательной характеристики.

Здесь

$$a_k = \frac{1}{k!} \left[ \frac{d^k}{du_c^k} f(u_c) \right]_{u_c} = U_{c0}.$$

Если характеристика (9.4) аппроксимирована ломаной прямой, то амплитуда первой гармоники определяется ф-лой (8.10):

$$I_{a1} = F_1(U_{c0}, U_{cm}) = \frac{S U_{cm}}{\pi} (\vartheta - \sin \vartheta \cos \vartheta). \quad (9.8)$$

Здесь  $S$  — крутизна характеристики,

$$\cos \vartheta = \frac{U_{сн} - U_{с0}}{U_{см}}, \quad (9.9)$$

$U_{сн}$  — значение  $u_c$ , при котором начинается анодный ток.

Амплитуда первой гармоники может быть определена также графически методом, изложенным в § 8.4.

Для получения пропорциональности  $I_{a1}$  амплитуде  $U_{см}$ , что необходимо для неискаженного усиления АМ колебаний, в случае степенной аппроксимации должно выполняться условие:

$$a_3 = a_5 = a_7 = \dots = 0. \quad (9.10)$$

В этом случае

$$I_{a1} = a_1 U_{см}.$$

Коэффициенты ряда (8.12)  $a_2, a_4, a_6, \dots$  могут быть любыми. Таким образом, пропорциональность между  $I_{a1}$  и  $U_{см}$  может соблюдаться и при работе на *криволинейном* участке характеристики.

Если характеристика аппроксимирована ломаной прямой, то пропорциональность имеет место в том случае, если выражение, стоящее в скобках ф-лы (9.8), не зависит от  $U_{см}$ . Это будет при

$$U_{с0} = U_{сн}, \quad (9.11)$$

когда  $\cos \vartheta = 0$ , угол отсечки  $\vartheta = 90^\circ$  и не зависит от  $U_{см}$ .

В этом случае

$$I_{a1} = \frac{S U_{см}}{2}. \quad (9.12)$$

Следовательно, для получения пропорциональности между  $I_{a1}$  и  $U_{см}$  при аппроксимации характеристики ломаной прямой необходимо выбирать рабочую точку в месте излома.

Учтем влияние изменения напряжения на аноде (*реакцию анода*) на первую гармонику анодного тока.

На рис. 9.4а приведена временная диаграмма напряжения  $u_c$  и три соответствующие ей временные диаграммы напряжения на аноде  $u_a$ .

Для первой кривой  $u_a = E_a$  — амплитуда переменной составляющей на аноде равна нулю. Это имеет место, если  $R_{э}$ <sup>1)</sup> анодного контура равно нулю. Кривая 1 на рис. 9.4б изображает соответствующую данному случаю временную диаграмму анодного тока.

Для второй кривой напряжения  $R_{э} \neq 0$ , и первая гармоника анодного тока, находящаяся в фазе с напряжением на сетке, создает на анодном контуре падение напряжения. Это напряжение практически синусоидально, так как высшие гармоники тока создают на контуре малое напряжение, и находится в фазе с первой гармоникой тока,

<sup>1)</sup> Для схемы рис. 9.2 вместо  $R_{э}$  контура надо брать сопротивление первичной обмотки трансформатора плюс сопротивление, вносимое в нее из контура (на частоте резонанса).

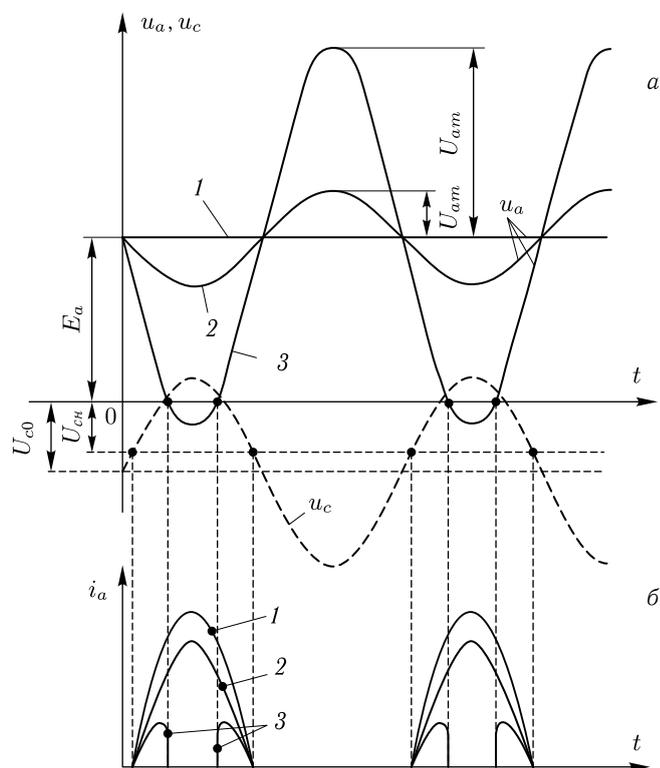


Рис. 9.4

поскольку контур настроен на ее частоту. Вычитая из  $E_a$  это напряжение, получим напряжение  $u_a$ , меняющееся во времени в противофазе с  $u_c$ .

Так как во время протекания анодного тока напряжение на аноде меньше, чем в первом случае, то анодный ток несколько уменьшится (кривая 2, рис. 9.4б).

Напряжение на аноде изменяется и в то время, когда анодный ток равен нулю. Это объясняется тем, что контур «раскачивается» импульсами анодного тока, и колебания продолжают существовать в промежутках между импульсами за счет запасенной в контуре электромагнитной энергии.

Кривые 3 для  $u_a$  и  $i_a$  соответствуют большему, чем во втором случае, значению  $R_{\text{эк}}$ . При достаточно большом  $R_{\text{эк}}$  амплитуда напряжения на контуре станет больше  $E_a$  и часть периода напряжение  $u_a$  будет отрицательным. При  $u_a < 0$  анодный ток протекать не может, в результате чего импульс тока будет иметь провал (кривая 3, рис. 9.4б).

Режим, когда импульсы анодного тока имеют провалы, вызванные сильным уменьшением напряжения на аноде, называется *перенапряженным*. Перенапряженный режим начинается еще до того момента, когда минимальное значение  $u_a$  становится равным нулю. На рис. 9.5 даны типичные характеристики триода, а на рис. 9.6 — пентода. На них отделены пунктиром и заштрихованы области, при заходе в которые наступает перенапряженный режим. В перенапряженном режиме анодный ток и его первая гармоника сильно уменьшаются. В триоде происходящее в перенапряженном режиме уменьшение импульса анодного тока сопровождается увеличением тока управляющей сетки, в пентоде — тока экранирующей сетки.

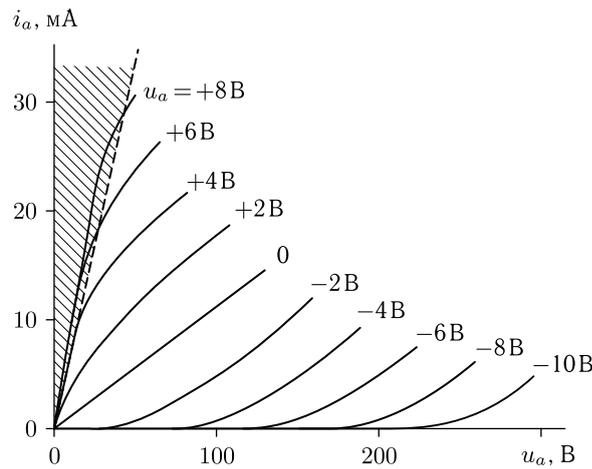


Рис. 9.5

На рис. 9.7 приведена зависимость первой гармоники анодного тока  $I_{a1}$  от амплитуды напряжения на контуре  $U_{am}$  при различных значениях  $U_{cm}$ .

Из этого рисунка видно, что сначала с ростом  $U_{am}$  ток  $I_{a1}$  медленно уменьшается. Затем, когда наступает перенапряженный режим (вблизи  $U_{am} = E_a$ )  $I_{a1}$  резко падает.

Колебательную характеристику с учетом реакции анода (*динамическую*) нетрудно построить, если учесть, что амплитуда первой гармоники анодного тока  $I_{a1}$  при данном  $U_{cm}$  должна соответствовать кривой рис. 9.7 для этого  $U_{cm}$  и уравнению:

$$I_{a1} = \frac{U_{am}}{R_{\text{эк}}}, \quad (9.13)$$

т. е. в точке пересечения кривой рис. 9.7 и нагрузочной прямой, определяемой уравнением (9.13).

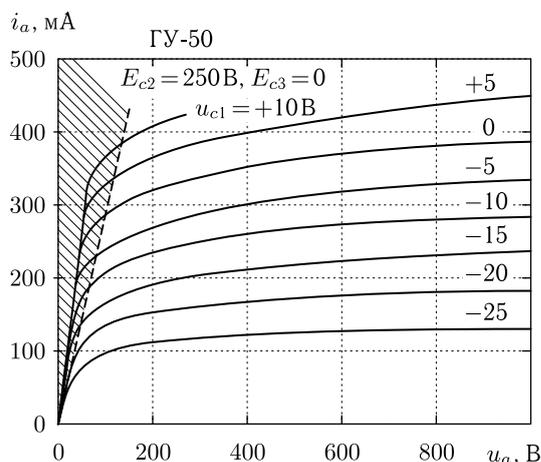


Рис. 9.6

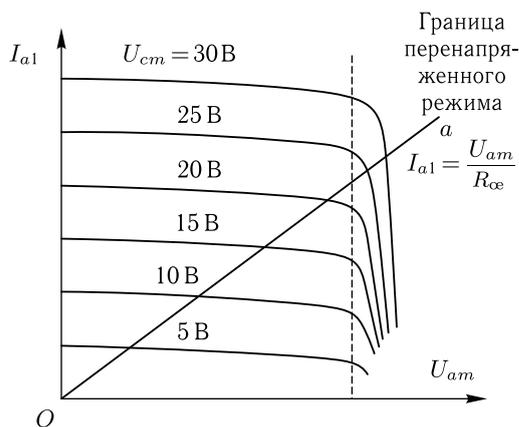


Рис. 9.7

Найденная таким образом зависимость  $I_{a1}$  от  $U_{cm}$ , которая является искомой динамической колебательной характеристикой, изображена на рис. 9.8. Как видно из рис. 9.7 и 9.8, вначале  $I_{a1}$  быстро растет с ростом  $U_{cm}$ , а потом, в перенапряженном режиме, когда  $U_{am} \approx E_a$  и  $I_{a1} = \frac{U_{am}}{R_{св}} \approx \frac{E_a}{R_{св}}$ , этот рост резко замедляется.

Динамическую колебательную характеристику в недонапряженном режиме можно получить также из статической колебательной характеристики.

В недонапряженном режиме, как известно, анодный ток может быть выражен так:

$$i_a = f(u_c + Du_a), \tag{9.14}$$

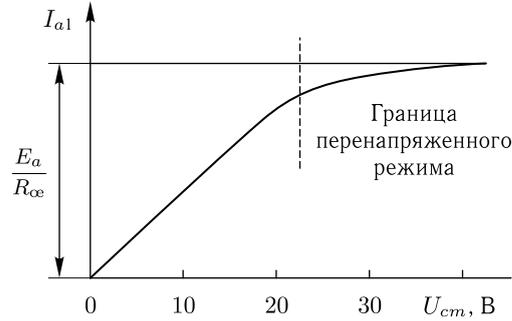


Рис. 9.8

где  $D = \frac{1}{\mu}$  — проницаемость лампы.

Полагая  $u_a = E_a - U_{am} \cos \alpha$  и учитывая (9.5), получим

$$i_a = f(U_{c0} + DE_a + (U_{cm} - DU_{am}) \cos \alpha). \quad (9.15)$$

Таким образом, переменное напряжение на аноде как бы уменьшает амплитуду напряжения на сетке на величину  $DU_{am} = DI_{a1}R_{ce}$ .

Пусть кривая 1 на рис. 9.9 является статической колебательной характеристикой, построенной для  $u_a = E_a$ . Чтобы сохранить значение  $I_{a1}$  при наличии нагрузки в аноде, следует к  $U_{cm}$  добавить величину  $DU_{am} = DI_{a1}R_{ce}$ . Добавляя к абсциссе каждой точки кривой 1 величину  $DI_{a1}R_{ce}$ , получим кривую 2, дающую зависимость  $I_{a1}$  от  $U_{cm}$  с учетом реакции анода. Кривая 2 справедлива, пока справедливо выражение (9.14), т. е. в области недонапряженного режима. В области перенапряженного режима  $I_{a1} \approx \frac{E_a}{R_{ce}}$ , поэтому зависимость  $I_{a1}$  от  $U_{cm}$  с учетом перенапряженного режима соответствует кривой 3 рис. 9.9. Для пентодов, у которых проницаемость  $D$  очень мала, статическая и динамическая характеристики в недонапряженном режиме совпадают.

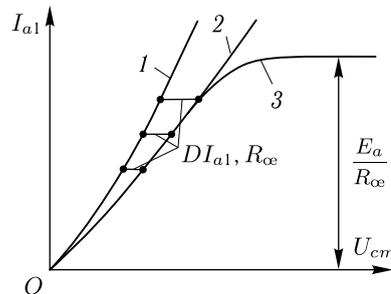


Рис. 9.9

Напряжение на анодной нагрузке лампы равно

$$U_{am} = I_{a1} R_{\text{э}}.$$

Оно зависит от  $U_{cm}$  так же, как  $I_{a1}$ , поэтому для неискаженного усиления АМ колебаний необходимо иметь линейную динамическую колебательную характеристику. Чтобы получить в недонапряженном режиме прямолинейную динамическую колебательную характеристику, необходимо, чтобы статическая колебательная характеристика была линейной, т. е. чтобы работа происходила на линейном участке характеристики лампы или на нелинейном при соблюдении условий (9.10) или (9.11). Поэтому для неискаженного усиления колебаний необходимо правильно выбирать рабочую точку.

При усилении ЧМ или ФМ колебаний, амплитуда которых не меняется, характер колебательной характеристики несущественен: любая характеристика не приводит к появлению искажений.

Чтобы отсутствовали искажения при усилении модулированных колебаний, необходимо также, чтобы анодный контур представлял примерно одно и то же сопротивление как для несущей, так и для боковых частот, для чего его добротность не должна быть чрезмерно высокой.

### Пример 9.1

В анодную цепь лампы резонансного усилителя включен контур с  $R_{\text{э}} = 10$  кОм. При какой амплитуде переменного напряжения на сетке  $U_{cm}$  наступит перенапряженный режим, если  $E_a = 100$  В;  $D = 0,05$ ;  $S = 2 \cdot 10^{-3}$  А/В.

Характеристика аппроксимирована ломаной прямой. Смещение на сетке лампы  $U_{c0}$  равно напряжению излома характеристики  $U_{cn}$ . Частота переменного напряжения на сетке равна резонансной частоте контура.

Решение

1. Перенапряженный режим наступит при  $U_{am} \approx E_a$  и

$$I_{a1} = \frac{E_a}{R_{\text{э}}} = \frac{100}{10 \cdot 10^3} = 10^{-2} \text{ А.}$$

2. При аппроксимации характеристики ломаной прямой и  $U_{c0} = U_{cn}$  угол отсечки  $\vartheta = 90^\circ$  и

$$I_{a1} = \frac{SU'_{cm}}{\pi} (\vartheta - \sin \vartheta \cos \vartheta) = \frac{SU'_{cm}}{2}$$

(без учета реакции анода).

Отсюда без учета реакции анода

$$U'_{cm} = \frac{2I_{a1}}{S} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ В.}$$

3. Из-за реакции анода

$$U_{cm} = U'_{cm} + DI_{a1}R_{\text{э}} = 10 + 0,05 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 10^3 = 15 \text{ В.}$$

### § 9.4. Энергетические соотношения в резонансном усилителе

Если через некоторый двухполюсник течет несинусоидальный ток с периодом  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ :

$$i = I_0 + I_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + I_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_2) + \dots \quad (9.16)$$

и на двухполюснике имеется падение напряжения

$$u = U_0 + U_1 \cos(\omega_0 t + \psi_1) + U_2 \cos(2\omega_0 t + \psi_2) + \dots, \quad (9.17)$$

то средняя за период мощность, передаваемая этому двухполюснику извне, равна

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} ui dt &= U_0 I_0 + \frac{1}{2} U_1 I_1 \cos(\psi_1 - \varphi_1) + \\ &+ \frac{1}{2} U_2 I_2 \cos(\psi_2 - \varphi_2) + \dots \end{aligned} \quad (9.18)$$

На основании этого мощность, отдаваемая источником анодного питания  $E_a$  ламповому усилителю, выражается так:

$$P_E = U_0 I_0 = E_a \frac{1}{2} F_0(U_{c0}, U_{cm}), \quad (9.19)$$

поскольку между точками  $b$  и  $c$  (рис. 9.1):

$$U_0 = E_a; \quad U_1 = U_2 = \dots = 0 \quad \text{и} \quad I_0 = \frac{1}{2} F_0(U_{c0}, U_{cm})^1).$$

Полезной мощностью является мощность, отдаваемая контуру, которая равна:

$$P_\kappa = \frac{U_1 I_1}{2} = \frac{U_{am} I_{a1}}{2} = \frac{U_{am} F_1(U_{c0}, U_{cm})}{2}, \quad (9.20)$$

поскольку между точками  $a$  и  $b$  рис. 9.1 (на контуре)

$$\begin{aligned} U_0 = U_2 = U_3 = \dots = 0, \quad U_1 = U_{am}, \quad \varphi_1 = \psi_1 \quad \text{и} \quad I_1 = I_{a1} = \\ = F_1(U_{c0}, U_{cm}) \end{aligned}$$

(напряжение на контуре практически создается лишь первой гармоникой анодного тока, на которую настроен контур, и оно в фазе с первой гармоникой).

<sup>1)</sup> Реакцию анода не учитываем.

Коэффициент полезного действия усилителя по анодной цепи определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_k}{P_E} = \frac{F_1(U_{c0}, U_{cm})}{F_0(U_{c0}, U_{cm})} \cdot \frac{U_{am}}{E_a}. \quad (9.21)$$

При этом мы не учитываем мощность накала лампы и мощность, затрачиваемую в цепи сетки. Последняя мощность может быть существенной, если усилитель работает с сеточными токами.

Из ф-лы (9.21) видно, что чем больше  $U_{am}$ , тем больше кпд. Максимального значения  $U_{am}$  достигает в перенапряженном режиме. В этом режиме и вблизи него

$$U_{am} \approx E_a \quad (9.22)$$

и

$$\eta \approx \frac{F_1(U_{c0}, U_{cm})}{F_0(U_{c0}, U_{cm})}. \quad (9.23)$$

В дальнейшем будем считать, что условие (9.22) соблюдается.

При линейно-ломаной аппроксимации характеристики лампы получим:

$$\eta \approx \frac{F_1(U_{c0}, U_{cm})}{F_0(U_{c0}, U_{cm})} = \frac{\alpha_1}{2\alpha_0}. \quad (9.24)$$

Из этой формулы и рис. 8.3 следует, что при угле отсечки  $\vartheta \rightarrow 0$   $\eta \rightarrow 1$ . Но при этом  $\alpha_1 \rightarrow 0$ ,  $I_{a1} \rightarrow 0$  и полезная мощность  $P_k$  стремится к нулю. Таким образом, с увеличением  $\vartheta$  полезная мощность  $P_k$  растет, а кпд  $\eta$  падает. При  $\vartheta = 90^\circ$   $\eta = 0,78$ . При увеличении угла отсечки до  $180^\circ$ , когда отсечки тока фактически нет (ток синусоидalen), кпд упадет до  $\eta = 0,5$ . Подразумевается, что в этом случае работа происходит на линейном участке характеристики с максимально большой амплитудой напряжения на сетке. При дальнейшем уменьшении амплитуды колебаний и сохранении положения рабочей точки величина  $F_0(U_{c0}, U_{cm})$  остается постоянной, а  $F_1(U_{c0}, U_{cm})$  и, следовательно,  $\eta$  стремится к нулю.

Мощность  $P_E - P_k$  нагревает анод лампы (в результате бомбардировки анода электронами).

### Пример 9.2

Найти мощность, отдаваемую контуру, мощность, выделяющуюся на аноде, и кпд для усилителя, рассмотренного в примере 9.1.

Решение

1. Из примера 9.1 имеем:

$$I_{a1} = 10^{-2} \text{ А}; \quad U_{am} \approx E_a = 100 \text{ В}; \quad \vartheta = 90^\circ.$$

2. Мощность, отдаваемая контуру, равна

$$P_k = \frac{I_{a1} U_{am}}{2} = \frac{10^{-2} \cdot 100}{2} = 0,5 \text{ Вт}.$$

3. Кпд согласно (9.24) для  $\vartheta = 90^\circ$ :

$$\eta = \frac{P_k}{P_E} = \frac{\alpha_1}{2\alpha_0} = \frac{0,5}{2 \cdot 0,319} = 0,78.$$

4. Мощность, отдаваемая анодной батареей:

$$P_E = \frac{P_k}{\eta} = \frac{0,5}{0,78} = 0,64 \text{ Вт.}$$

5. Мощность, рассеиваемая на аноде:

$$P_a = P_E - P_k = 0,64 - 0,5 = 0,14 \text{ Вт.}$$

### § 9.5. Влияние тока сетки

Для получения больших напряжений на анодном контуре на сетку лампы часто подают колебания с такой амплитудой, что лампа работает с сеточными токами.

Обычно напряжение на сетку подается с колебательного контура (рис. 9.10), который для сеточного тока является параллельным контуром, настроенным на основную частоту колебаний. При протекании через этот контур сеточного тока, состоящего из нулевой составляющей и различных гармоник, на контуре создается падение напряжения, вызываемое лишь первой гармоникой, так как для остальных гармоник контур представляет малое сопротивление.

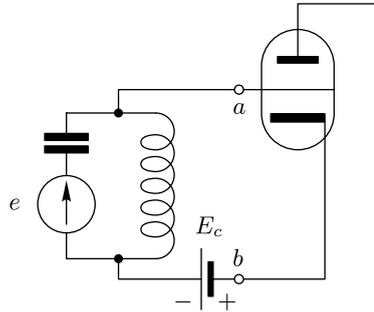


Рис. 9.10

Поэтому действие сеточного тока на контур (создание падения напряжения) эквивалентно подключению к контуру (к точкам  $ab$  рис. 9.10) сопротивления  $r_{c1}$ , равного

$$r_{c1} = \frac{U_{cm}}{I_{c1}}, \quad (9.25)$$

где  $U_{cm}$  — амплитуда напряжения на сетке,  $I_{c1}$  — амплитуда первой гармоники сеточного тока.

Сопротивление  $r_{c1}$  активно, поскольку первая гармоника сеточного тока находится в фазе с напряжением на сетке.

К этому можно прийти и на основании энергетических соображений. Действительно, если через сопротивление  $r_{c1}$  протекает ток, равный первой гармонике сеточного тока, то мощность, отдаваемая

этому сопротивлению, равна мощности, отдаваемой сеточной цепи. Следовательно, их действие на контур одинаково.

Следует помнить, что величина сопротивления  $r_{c1}$  может меняться с изменением напряжения  $U_{cm}$ , и тем самым вносить искажения в АМ колебание.

### § 9.6. Умножение частоты

При воздействии синусоидального напряжения с большой амплитудой на нелинейное сопротивление протекающий через последнее ток содержит составляющие высших гармоник. Этим свойством нелинейного сопротивления можно воспользоваться для умножения частоты колебаний в целое число раз.

Действительно, если контур в анодной цепи лампы резонансного усилителя, изображенного на рис. 9.1 или 9.2, настроить на частоту  $n\omega_0$ , где  $n$  — целое число,  $\omega_0$  — частота напряжения, поданного на сетку, то только ток частоты  $n\omega_0$  создаст на контуре значительное падение напряжения. На практике обычно используют лишь удвоение и утроение частоты, так как амплитуды гармоник уменьшаются с увеличением их номера.

Если мы обратимся к графикам коэффициентов разложения анодного тока (рис. 8.3), то заметим, что максимальное значение второй гармоники анодного тока получается при угле отсечки  $\vartheta = 60^\circ$ , третьей — при  $40^\circ$ .

Умножением частоты часто пользуются для увеличения частотного отклонения и индекса модуляции при ЧМ и ФМ. Пусть частота напряжения на сетке изменяется в пределах от  $\omega_{мин}$  до  $\omega_{макс}$ . Тогда частотное отклонение

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{макс} - \omega_{мин}}{2}.$$

В результате умножения максимальное и минимальное значения частоты увеличиваются в  $n$  раз, что приводит к  $n$ -кратному увеличению частотного отклонения, которое равно

$$\Delta\omega_n = \frac{n\omega_{макс} - n\omega_{мин}}{2} = n\Delta\omega.$$

При умножении частоты в  $n$  раз в  $n$  раз увеличивается индекс модуляции, так как сдвиг фаз  $n$ -й гармоники получается в  $n$  раз больше сдвига фаз подаваемого напряжения.

Для случая умножения частоты статическая колебательная характеристика, дающая зависимость амплитуды  $n$ -й гармоники анодного тока  $I_{an}$  от напряжения  $U_{cm}$ , может быть получена методами, изложенными в гл. 8. Реакцию анода в недонапряженном режиме для пентодов можно не учитывать. При перенапряженном режиме, когда амплитуда напряжения на аноде  $U_{an} = I_{an}R_{\text{вн}} \approx E_a$ , можно приближенно считать, как и в резонансных усилителях, что  $I_{an}$  не зависит от  $U_{cm}$ .

**Пример 9.3**

Анодный контур резонансного усилителя, рассмотренного в примерах 9.1 и 9.2, настроен на третью гармонику напряжения, подаваемого на сетку, и имеет  $R_{\text{э}} = 10$  кОм.

Найти  $U_{c0}$  и  $U_{cm}$ , если известно, что  $U_{cn} = -5$  В, напряжение третьей гармоники на контуре должно быть равно  $U_{am} = 20$  В, а угол отсечки  $\vartheta = 40^\circ$ . Реакцию анода не учитывать.

Решение

1. Находим амплитуду третьей гармоники анодного тока:

$$I_{a3} = \frac{U_{am}}{R_{\text{э}}} = \frac{20}{10 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

2. Максимальное значение анодного тока равно

$$I_m = \frac{I_{a3}}{\alpha_3} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,185} = 10,8 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

С другой стороны

$$I_m = S U_{cm} (1 - \cos \vartheta),$$

откуда

$$U_{cm} = \frac{I_m}{S(1 - \cos \vartheta)} = \frac{10,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}(1 - 0,766)} = 23 \text{ В.}$$

3. При  $\vartheta = 40^\circ$ :

$$\cos \vartheta = \frac{U_{cn} - U_{c0}}{U_{cm}} = 0,766,$$

откуда

$$U_{c0} = U_{cn} - U_{cm} \cos \vartheta = -5 - 23 \cdot 0,766 = -22,6 \text{ В.}$$