

## 5.7. АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ УСИЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Анализ частотных свойств усилителей переменного напряжения с реостатно-емкостными связями, именуемых в дальнейшем усилителями напряжения, заключается в получении выражений, используемых для построения их частотных характеристик: АЧХ и ФЧХ. Исходным материалом для такого анализа является эквивалентная схема усилителя по переменному току. Для упрощения вычислений и получения более наглядных формул анализ проводят отдельно для области средних, верхних и нижних частот.

Область средних частот. В данной области сопротивления емкостей  $C_1$  и  $C_2$  оказываются значительно большими, чем сопротивления элементов  $R'_H$  и  $R''_H$ , и эти емкости из эквивалентной схемы (см. рис. 5.16) можно исключить. Емкость разделительного конденсатора  $C_{p2}$  выбирается достаточно большой, и в области средних частот его сопротивление переменному току близко к нулю. С учетом этого эквивалентную схему усилителя в области средних частот можно представить в виде, показанном на рис.

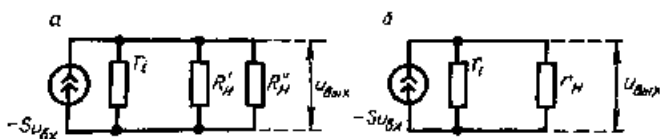


Рис. 5.17. Эквивалентные схемы усилителя для области средних частот

5.17, а. В соответствии с этой схемой коэффициент усиления в области средних частот определяется выражением

$$K_{\text{ср}} = \frac{u_{\text{Вых}}}{u_{\text{Вх}}} = \frac{-Su_{\text{Вх}}R}{u_{\text{Вх}}} = -SR, \quad (5.15)$$

где

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_i} + \frac{1}{R'_H} + \frac{1}{R''_H}. \quad (5.16)$$

Так как  $R'_H$  и  $R''_H$  образуют нагрузку усилителя по переменному току  $r_H = R'_H R''_H / (R'_H + R''_H)$ , то эквивалентную схему, изображенную на рис. 5.17, а, можно представить в ином виде (рис. 5.17, б). Из этой схемы следует:

$$K_{\text{ср}} = \frac{u_{\text{Вых}}}{u_{\text{Вх}}} = \frac{S r_i r_H}{r_i + r_H} = - \frac{S}{1 + r_H/r_i} r_H = -S_{\text{д}} r_H$$

$$K_{\text{ср}} = \frac{u_{\text{Вых}}}{u_{\text{Вх}}} = \frac{S r_i r_H}{r_i + r_H} = - \frac{S}{1 + r_H/r_i} r_H = -S_{\text{д}} r_H$$

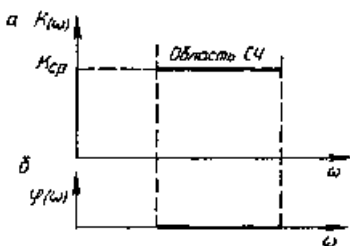
или

$$K_{\text{ср}} = \frac{S r_i r_u}{r_i + r_u} = \frac{S r_i}{1 + r_i/r_u} = \frac{\mu}{1 + r_i/r_u}$$

Полученные выражения для  $K_{\text{ср}}$  совпадают с выражениями (5.8) и (5.9).

Таким образом, в области средних частот коэффициент усиления можно считать постоянной вещественной величиной. Вследствие малого влияния емкостей  $C1$ ,  $C2$  и  $C_{p2}$  (см. рис. 5.16) в области средних частот фазовым сдвигом между входным и выходным напряжениями можно пренебречь, т. е. считать  $\varphi(\omega) = 0$  (рис. 5.18).

Рис. 5.18. Частотные характеристики в области средних частот:  
а — АЧХ; б — ФЧХ



**Область верхних частот.** В области верхних частот сопротивления элементов  $C1$  и  $C2$  (см. рис. 5.16) уменьшаются и могут стать сравнимыми с сопротивлениями элементов  $R'_H$  и  $R''_H$ . При этом эквивалентная схема усилителя приобретает вид, показанный на рис. 5.19. В этой схеме  $C = C1 + C2 = C_{\text{вых}} + C_M + C_{\text{вх.д.сл.}}$ .

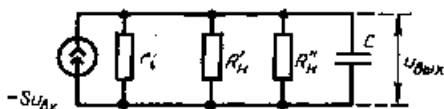


Рис. 5.19. Эквивалентная схема усилителя для области верхних частот

Коэффициент усиления, полученный на основании данной эквивалентной схемы, определяется выражением

$$\dot{K}_в = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = S \left( R \parallel \frac{1}{j\omega C} \right) = \frac{SR}{1 + j\omega CR} = \frac{K_{\text{ср}}}{1 + j\omega\tau_в}, \quad (5.17)$$

где

$$\tau_в = CR \quad (5.18)$$

называется *постоянной времени усилителя в области верхних частот*.

Выражение (5.17) показывает, что в области верхних частот коэффициент усиления усилителя имеет комплексный характер и может быть представлен в виде

$$\dot{K}_n = \frac{K_{ср}}{1 + (\omega\tau_n)^2} - j \frac{K_{ср}\omega\tau_n}{1 + (\omega\tau_n)^2} = \text{Re}\dot{K}_n - j\text{Im}\dot{K}_n.$$

Модуль выражения (5.17)

$$K_n(\omega) = \frac{K_{ср}}{\sqrt{1 + (\omega\tau_n)^2}} \quad (5.19)$$

может быть использован для построения АЧХ (рис. 5.20, а), а аргумент

$$\varphi_n(\omega) = \text{arctg} \frac{\text{Im}\dot{K}_n}{\text{Re}\dot{K}_n} = -\text{arctg} \omega\tau_n \quad (5.20)$$

для построения ФЧХ в области верхних частот (рис. 5.20, б).

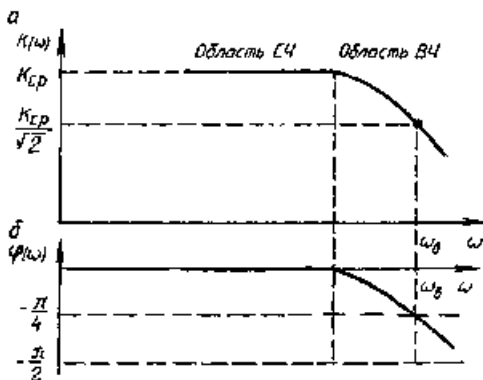


Рис. 5.20. Частотные характеристики усилителя в области верхних частот: а — АЧХ; б — ФЧХ

Частота  $\omega = \omega_0 = 1/\tau_n$ , на которой  $K_n(\omega) = K_{ср}/\sqrt{2}$ , является верхней граничной частотой усилителя. Ей соответствует частота

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_n} = \frac{1}{2\pi CR}. \quad (5.21)$$

В резисторных УН на БТ коэффициент усиления в области верхних частот изменяется не только под влиянием емкости  $C$ , но и вследствие частотной зависимости крутизны транзистора. С учетом этого для усилителя на БТ

$$\dot{K}_R = \frac{K_{ср}}{(1 + j\omega\tau_{y21})(1 + j\omega\tau_n)},$$

где  $\tau_{y21} = 1/\omega_{y21} = 1/(2\pi f_{y21})$ ;  $f_{y21} = f_{rp} r'_e / r'_b$  — предельная частота проводимости прямой передачи, или крутизна, биполярного транзистора.

**Область нижних частот.** В области нижних частот сопротивления элементов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_{p2}$  увеличиваются по сравнению с их значениями на средних частотах. При этом в эквивалентной схеме можно пренебречь влиянием емкостей  $C_1$  и  $C_2$ , но следует учесть емкость разделительного конденсатора  $C_{p2}$  (рис. 5.21). Коэффициент уси-

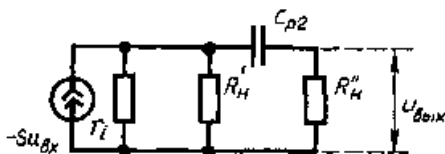


Рис. 5.21. Эквивалентная схема усилителя для области нижних частот

ления в области нижних частот в соответствии с эквивалентной схемой определяется выражением

$$K_H = \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = \frac{K_{ср}}{1 + 1/(j\omega\tau_H)}, \quad (5.22)$$

где

$$\tau_H = C_{p2} \left( \frac{r_i R'_H}{r_i + R'_H} + R''_H \right) - \quad (5.23)$$

постоянная времени усилителя в области нижних частот. Выражение для  $\tau_H$  легко получается непосредственно из эквивалентной схемы.

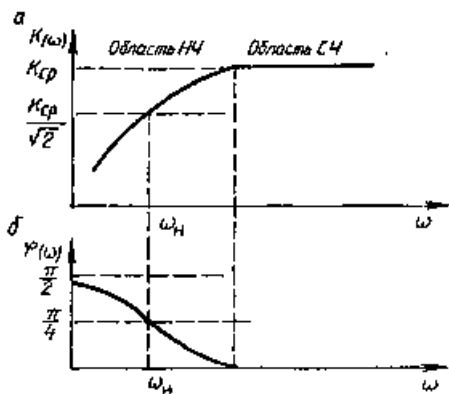


Рис. 5.22. Частотные характеристики усилителя в области нижних частот:  
а — АЧХ; б — ФЧХ

Для построения АЧХ и ФЧХ на основании выражения (5.22) определяют модуль

$$K_n(\omega) = \frac{K_{cp}}{\sqrt{1 + 1/(\omega\tau_n)^2}} \quad (5.24)$$

и фазу

$$\varphi_n(\omega) = \text{arctg } 1/(\omega\tau_n)$$

коэффициента усиления в области нижних частот. Вид АЧХ и ФЧХ, построенных на основании этих выражений, приведен на рис. 5.22.

Частота  $\omega = \omega_n = 1/\tau_n$ , на которой  $K_n(\omega) = K_{cp} \sqrt{2}$ , соответствует нижней граничной частоте

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_n}. \quad (5.25)$$