

# Лекция №2

## Усилитель низких частот (УНЧ).

([1] стр. 153-156)

### 1. Принципиальная схема УНЧ

Принципиальная схема усилителя низких частот приведена на рисунке 2.1

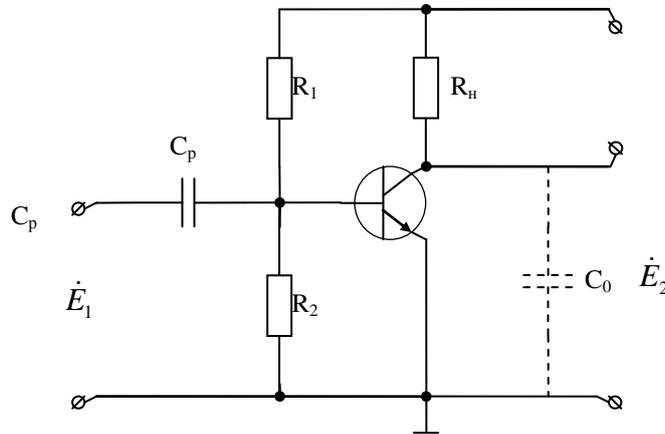


Рис.2.1.

Назначение элементов:

$C_p$  – разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую входного сигнала на базу транзистора. Усилитель, содержащий разделительный конденсатор, называется усилителем с закрытым входом.

$R_1, R_2$  – делитель напряжения, обеспечивающий необходимое постоянное напряжение на базе (линейный режим работы транзистора).

$R_n$  – сопротивление нагрузки

$C_0$  – паразитная емкость промежутка коллектор-эмиттер транзистора (единицы пФ).

### 2. Основные характеристики УНЧ с закрытым входом.

Рассчитаем основные характеристики УНЧ. Заменяем принципиальную схему усилителя на схему замещения. При построении схемы используем схему замещения транзистора через  $h$ -параметры (см. рис. 2.2).

#### 1) Комплексно-частотная характеристика (КЧХ).

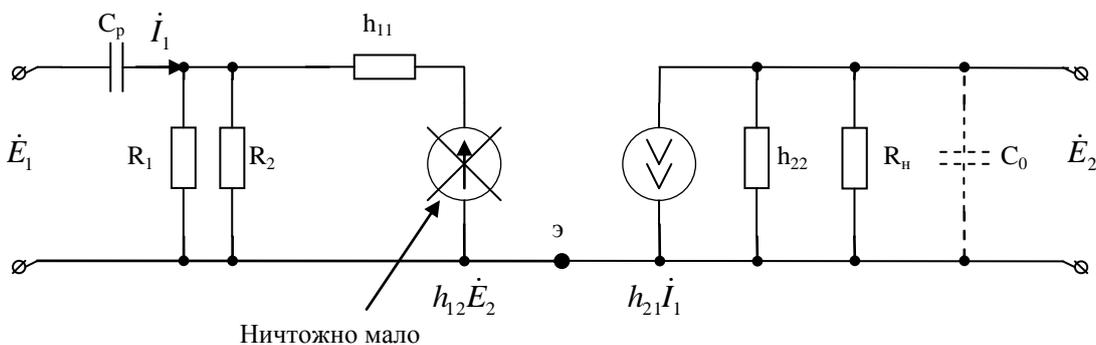


Рис.2.2.

Пренебрежем источником напряжения  $h_{12}\dot{E}_2$ , управляемым напряжением  $\dot{E}_2$  (см.рис.2.2). Тогда схема замещения упростится и примет вид (см. рис.2.3)

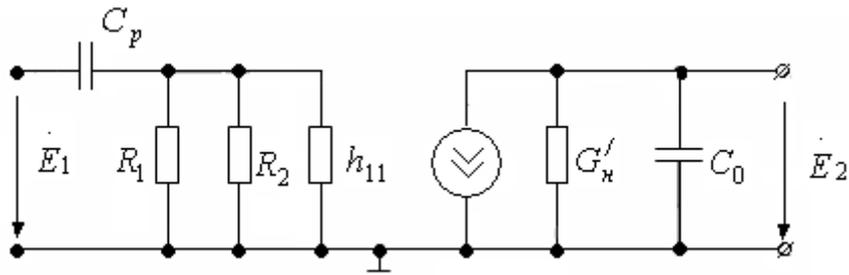


Рис.2.3

В этой схеме  $G'_н = h_{22} + \frac{1}{R_н} \approx \frac{1}{R_н}$ ,  $h_{11} = R_{\sigma_3}$ . Учитывая, что  $R_{\sigma_3} \ll R_1$  и  $R_{\sigma_3} \ll R_2$ , получим еще более простой

вариант схемы замещения (см. рис. 2.4), где  $\dot{I} = \dot{I}_1 \cdot \beta = \dot{I}_1 \cdot S \cdot R_{\sigma_3} = \dot{I}_1 \cdot R_{\sigma_3} \cdot S = \dot{U}_1 S$ .

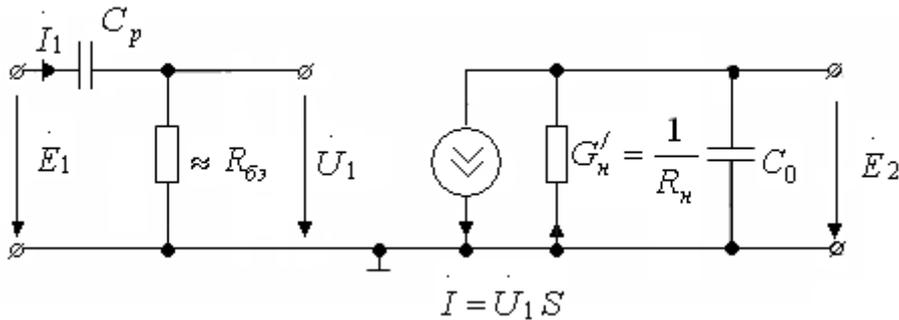


Рис.2.4

Тогда КЧХ усилителя  $K(j\omega) = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{E}_1} \cdot \frac{\dot{E}_2}{\dot{U}_1} = K_1(j\omega) \cdot K_2(j\omega)$ , где

$$K_1(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{E}_1} = \frac{R_{\sigma_3}}{R_{\sigma_3} + \frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{j\omega\tau_p}{1 + j\omega\tau_p}, \text{ где } \tau_p = C_p \cdot R_{\sigma_3}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot R_{\sigma_3} \Rightarrow \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{R_{\sigma_3}}; \dot{I} = \frac{\dot{U}_1 \cdot \beta}{R_{\sigma_3}} = \dot{U}_1 \cdot S \text{ (смотри предыдущую лекцию)}$$

$$\dot{E}_2 = -\dot{I} \left( \frac{1}{G_н + j\omega C_0} \right) = -\dot{U}_1 \cdot S \left( \frac{1}{\frac{1}{R_н} + j\omega C_0} \right) = -\frac{\dot{U}_1 \cdot S \cdot R_н}{1 + j\omega C_0 R_н}$$

$$\dot{E}_2 = -\frac{\dot{U}_1 \cdot S \cdot R_н}{1 + j\omega\tau_0}, \text{ где } \tau_0 = C_0 \cdot R_н; \tau_0 \ll \tau_p$$

$$K_2(j\omega) = \frac{\dot{E}_2}{\dot{U}_1} = -\frac{S \cdot R_н}{1 + j\omega\tau_0}$$

$$K(j\omega) = K_1(j\omega) \cdot K_2(j\omega) = -\frac{j\omega\tau_p}{1 + j\omega\tau_p} \cdot \frac{k_{\max}}{1 + j\omega\tau_0}, \text{ где } k_{\max} = S \cdot R_н - \text{максимальный коэффициент усиления.}$$

## 2) Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

$$AЧХ = |K(j\omega)| = \frac{|\omega\tau_p|}{\sqrt{1+(\omega\tau_p)^2}} \cdot \frac{k_{max}}{\sqrt{1+(\omega\tau_0)^2}}$$

Низкие частоты:  $\omega < \frac{1}{\tau_p}; \frac{1}{\tau_p} = \omega_{Нзр} \Rightarrow AЧХ \approx \omega\tau_p \cdot k_{max}$

Средние частоты:  $\frac{1}{\tau_p} < \omega < \frac{1}{\tau_0}; \frac{1}{\tau_0} = \omega_{Взр} \Rightarrow AЧХ \approx k_{max}$

Высокие частоты:  $\omega > \frac{1}{\tau_0} = \omega_{Взр} \Rightarrow AЧХ \approx \frac{k_{max}}{\omega\tau_0}$

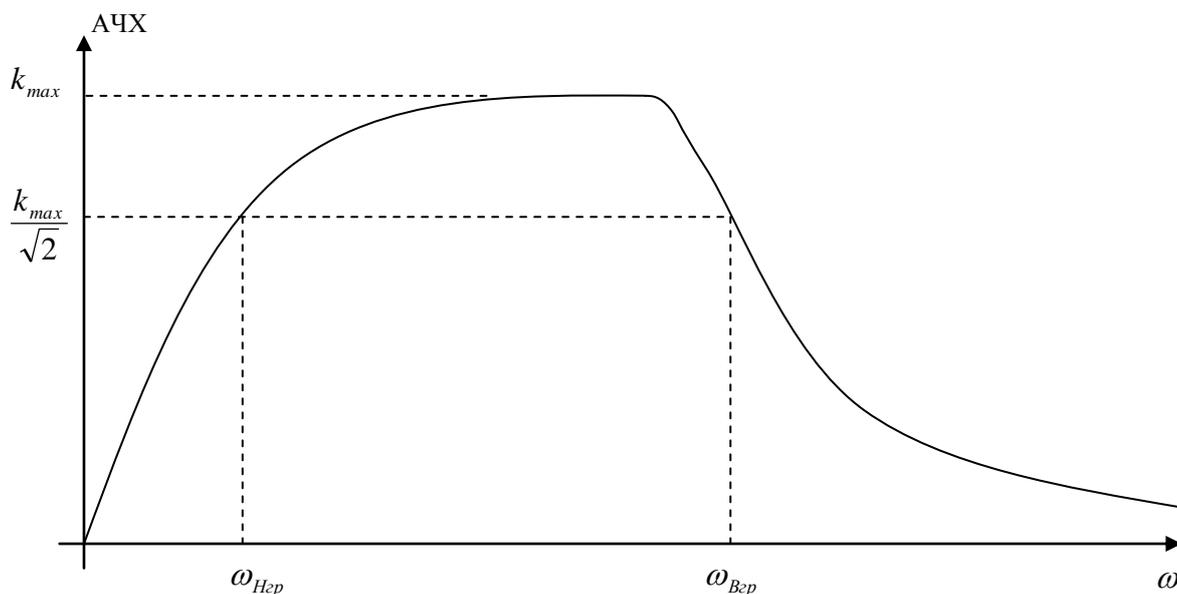


Рис.2.5.

На рисунке 2.5 изображена АЧХ усилителя. На низких частотах сопротивление ёмкости  $C_p$  велико, и на нулевой частоте  $\rightarrow \infty$ , т.е.  $C_p$  не пропускает постоянную составляющую, так как для нее цепь разорвана.

С увеличением частоты сопротивление ёмкости  $C_p$  уменьшается, и все большая часть входного напряжения поступает на базу транзистора. Когда  $\omega > \omega_{Нзр}$

На средних частотах сопротивление разделительного конденсатора  $C_p$  практически равно нулю и не влияет на работу схемы. Сопротивление ёмкости  $C_0$  на средних частотах очень велико, и поскольку она включена параллельно нагрузке, то по переменной составляющей она не влияет на  $U_{вых}$ .

На высоких частотах сопротивление паразитной емкости уменьшается и она начинает шунтировать нагрузку ( $R_n$ ), снижая напряжение на выходе ( $E_2$ )

С увеличением  $R_n$  максимальный коэффициент усиления  $k_{max}$  увеличивается, а верхняя граничная частота  $\omega_{Взр}$  уменьшается.

## 3) Фазочастотная характеристика (ФЧХ)

$$\PhiЧХ = \arg(k(j\omega)) = -\pi + \frac{\pi}{2} - \arctg \omega\tau_p - \arctg \omega\tau_0$$

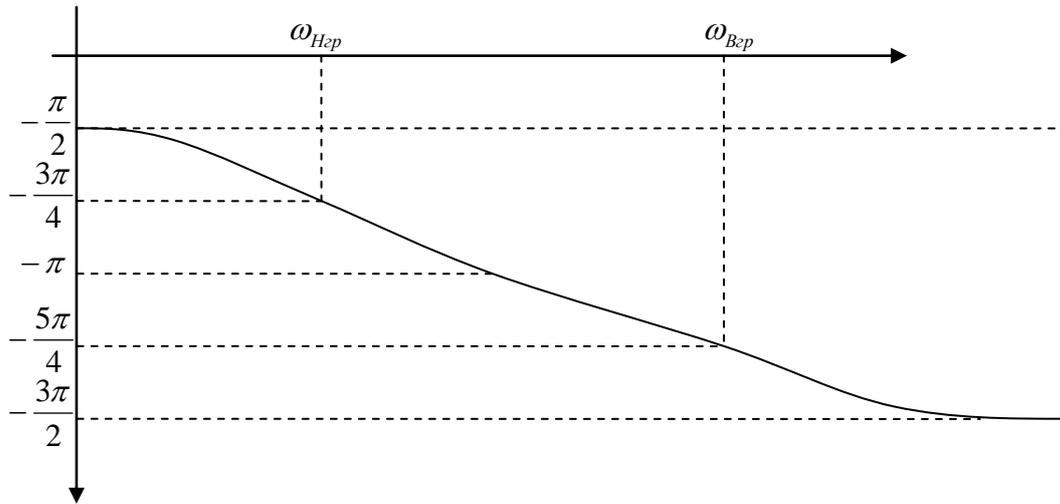


Рис.2.6

На рисунке 2.6 изображена ФЧХ усилителя.

4) Передаточная функция

$$K(p) = -\frac{p\tau_p}{1+p\tau_p} \cdot \frac{k_{\max}}{1+p\tau_0} \quad \tau_0 \ll \tau_p$$

5) Импульсная характеристика (Обратное преобразование Лапласа от  $K(p)$ )

$$P_{II1} = -\frac{1}{\tau_p}; \quad P_{II2} = -\frac{1}{\tau_0}; \quad g(t) = res_1 + res_2$$

$$res_1 = \lim_{p \rightarrow -\frac{1}{\tau_p}} \left( \frac{p\tau_p \cdot k_{\max} \cdot \left( p + \frac{1}{\tau_p} \right) \cdot e^{pt}}{(1+p\tau_p)(1+p\tau_0)} \right) = \frac{k_{\max} \cdot \left( -\frac{\tau_p}{\tau_p} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}}}{1 + \frac{\tau_0}{\tau_p}} = \frac{k_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}}}{\tau_p - \tau_0} \approx \frac{k_{\max}}{\tau_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \cdot 1(t)$$

$$res_2 = \lim_{p \rightarrow -\frac{1}{\tau_0}} \left( \frac{p\tau_p \cdot k_{\max} \cdot \left( p + \frac{1}{\tau_0} \right) \cdot e^{pt}}{(1+p\tau_p)(1+p\tau_0)} \right) = -\frac{k_{\max}}{\tau_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \cdot 1(t)$$

$$g(t) = \left( \frac{k_{\max}}{\tau_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} - \frac{k_{\max}}{\tau_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \cdot 1(t)$$

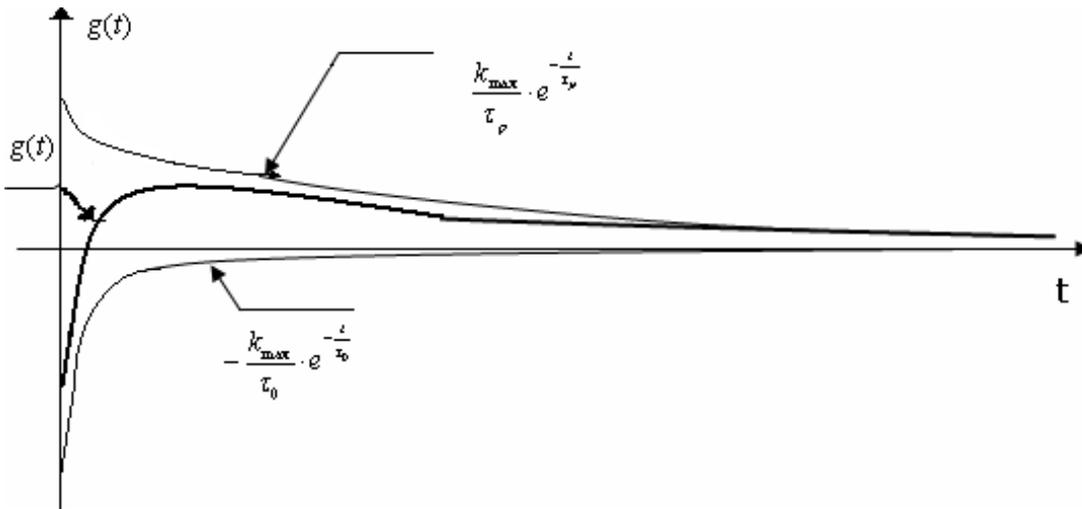


Рис.2.7

На рисунке 2.7 изображена импульсная характеристика усилителя  $g(t) = \left( \frac{k_{\max}}{\tau_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} - \frac{k_{\max}}{\tau_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \cdot 1(t)$

б) Переходная характеристика  $h(t) = \int_0^t g(v)dv = k_{\max} \left( e^{-\frac{t}{\tau_0}} - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right)$

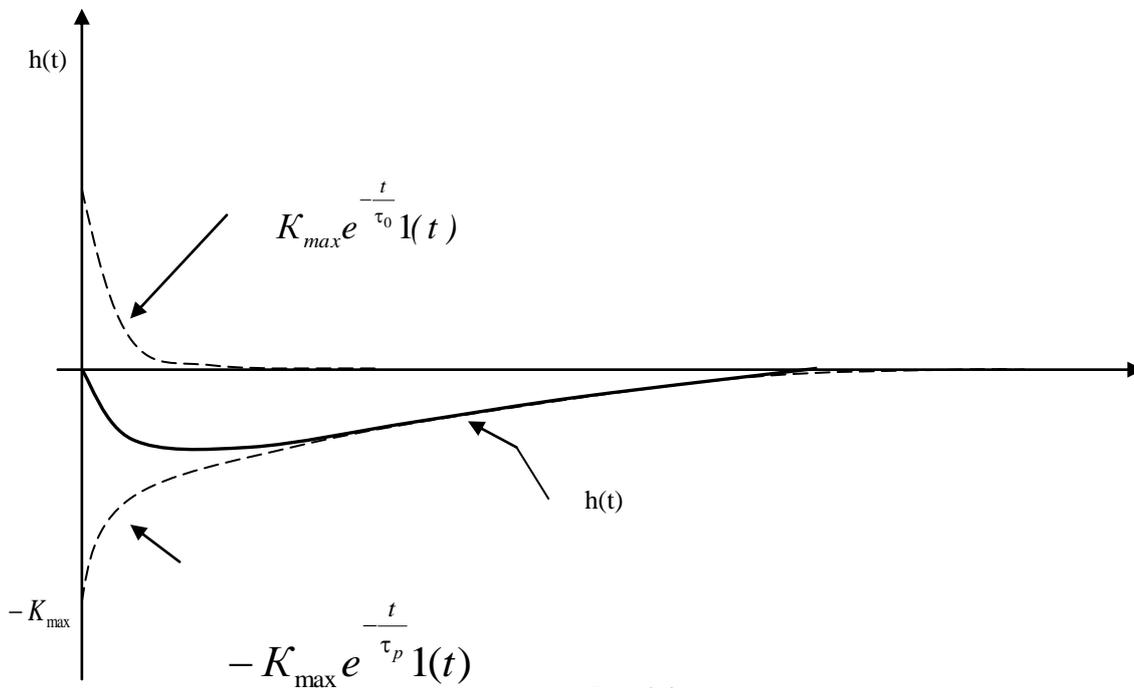


Рис. 2.8.

На рисунке 2.8 изображена переходная характеристика усилителя  $h(t) = k_{\max} \left( e^{-\frac{t}{\tau_0}} - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \cdot 1(t)$

### 3. Основные характеристики УНЧ без разделительной ёмкости $C_p$

Рассмотрим, как будут выглядеть характеристики усилителя в отсутствие разделительной ёмкости  $C_p$

На рисунке 2.9 изображена схема замещения усилителя низких частот без разделительного конденсатора

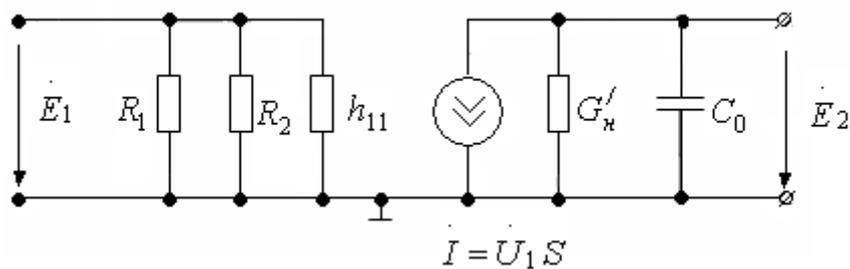


Рис.2.9

Используя эту схему, рассчитайте КЧХ, АЧХ, ФЧХ, передаточную функцию, импульсную и переходную характеристики УНЧ. Проверьте правильность предложенных ниже материалов.

### КЧХ

$$K(j\omega) = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{E}_1} \cdot \frac{\dot{E}_2}{\dot{U}_1} = K_1(j\omega) \cdot K_2(j\omega) \quad K_1(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{\dot{E}_1} = \frac{R_{\sigma_2}}{R_{\sigma_1}} = 1$$

$$\dot{E}_2 = -\dot{I} \left( \frac{1}{G_n + j\omega C_0} \right) = -\dot{U}_1 \cdot S \left( \frac{1}{\frac{1}{R_n} + j\omega C_0} \right) = -\frac{\dot{U}_1 \cdot S \cdot R_n}{1 + j\omega C_0 R_n}$$

$$K_2(j\omega) = \frac{\dot{E}_2}{\dot{U}_1} = -\frac{S \cdot R_n}{1 + j\omega \tau_0}, \text{ где } \tau_0 = C_0 R_n \quad \text{Тогда } K(j\omega) = K_1(j\omega) \cdot K_2(j\omega) = -\frac{k_{max}}{1 + j\omega \tau_0}$$

### АЧХ

$$AЧХ = |K(j\omega)| = \frac{k_{max}}{\sqrt{1 + (\omega \tau_0)^2}} \text{ график АЧХ приведен ниже на рисунке 2.10}$$

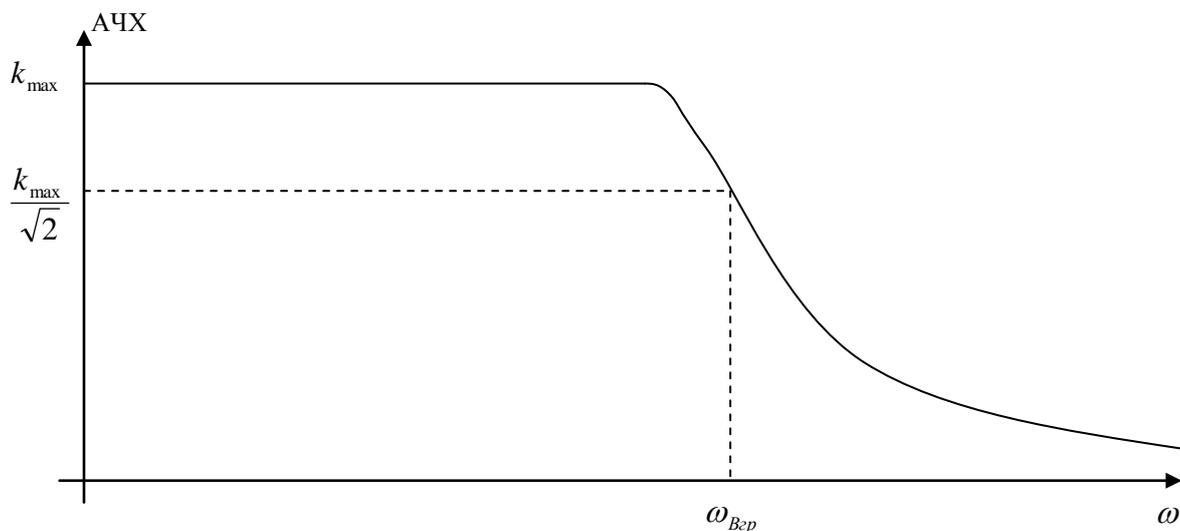


Рис. 2.10

## ФЧХ

$$\Phi_{\text{ЧХ}} = \arg(K(j\omega)) = -\pi - \operatorname{arctg} \omega\tau_0.$$

График ФЧХ приведен ниже на рисунке 2.11

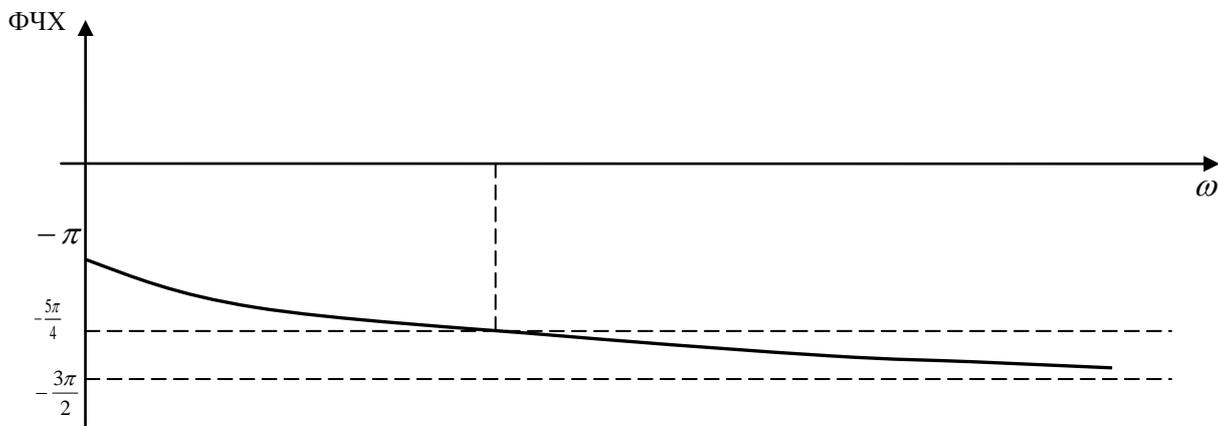


Рис.2.11

Передаточная функция  $K(p) = -\frac{k_{\max}}{1 + p\tau_0}.$

Импульсная характеристика  $g(t) = -\frac{k_{\max}}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \cdot 1(t).$  График импульсной характеристики приведен ниже

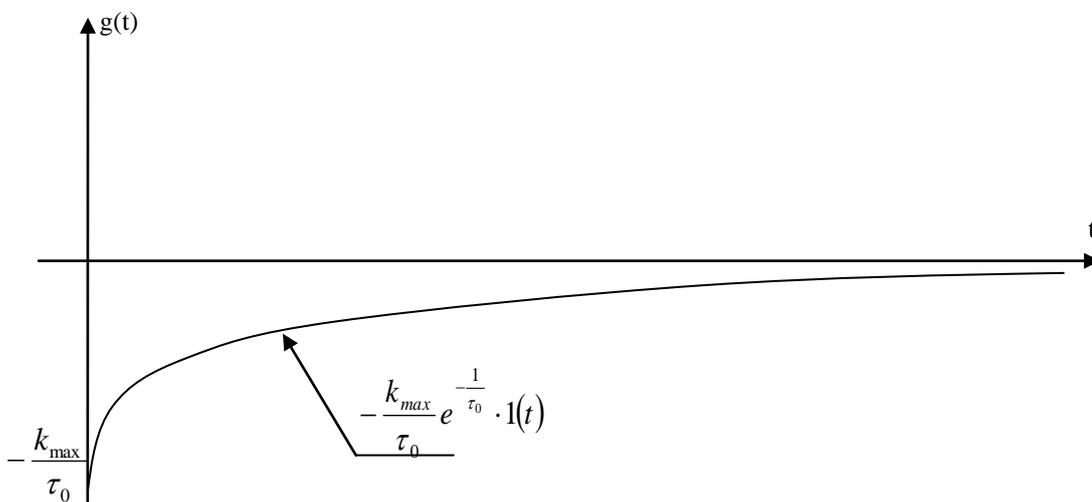


Рис. 2.12

График импульсной характеристики  $g(t) = -\frac{k_{\max}}{\tau_0} e^{-\frac{t}{\tau_0}} \cdot 1(t)$  приведён на рисунке 2.12.

Переходная характеристика  $h(t) = \int_0^t g(v)dv = -\frac{K_{\max}}{\tau_0} \int_0^t e^{-\frac{v}{\tau_0}} dv = -K_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \cdot 1(t).$

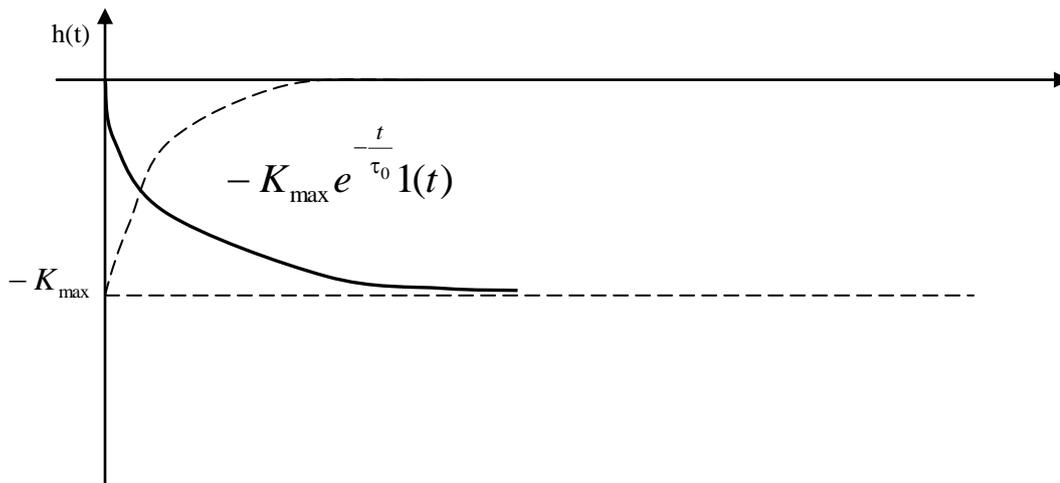
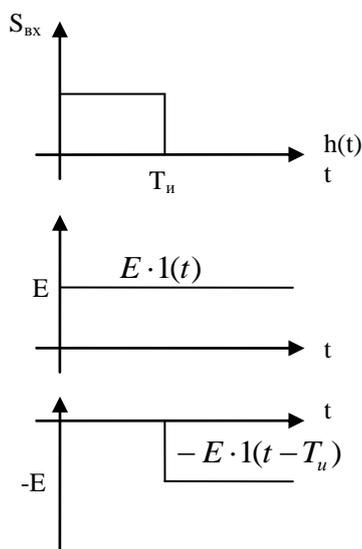


Рис. 2.13

График переходной характеристики  $h(t) = -K_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \cdot 1(t)$  приведён на рисунке 2.12.

#### 4. Прохождение прямоугольного импульса через УНЧ с разделительной ёмкостью $C_p$ :

Исследуем прохождение прямоугольного импульса через УНЧ с разделительной ёмкостью  $C_p$ :



Используем для решения этой задачи временной метод, основанный на переходной характеристике. Входной сигнал можно аналитически описать в виде  $S_{\text{вх}}(t) = E \cdot 1(t) - E \cdot 1(t - \tau_u)$ .

Тогда выходной сигнал

$$S_{\text{вых}}(t) = E \cdot h(t) - E \cdot h(t - \tau_u), \text{ где}$$

$$h(t) = \int_0^{\infty} g(t) dv = k_{\max} \left( e^{-\frac{t}{\tau_0}} - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \cdot 1(t), \text{ } h(t) \text{ - переходная характеристика}$$

УНЧ.

$$k_{\max} = S \cdot R_H; \tau_0 = C_0 \cdot R_H; \tau_p = C_p \cdot R_{\text{оэ}};$$

$$S_{\text{вых}}(t) = k_{\max} \left( e^{-\frac{t}{\tau_0}} - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) \cdot 1(t) \cdot E - k_{\max} \left( e^{-\frac{(t-\tau)}{\tau_0}} - e^{-\frac{(t-\tau)}{\tau_p}} \right) \cdot 1(t - \tau) \cdot E$$

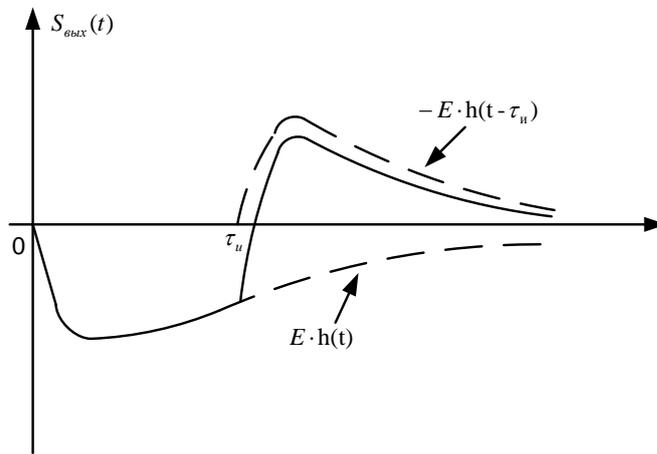


Рис. 2.14

На рисунке 2.14 изображен график выходного сигнала

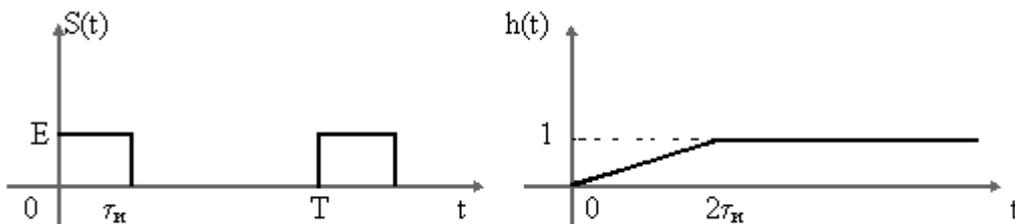
Попробуйте самостоятельно нарисовать график выходного сигнала и объяснить как он будет меняться при изменении  $R_n$  и при устранении  $C_p$

Контрольные вопросы

1. Укажите назначение основных элементов схемы УНЧ.
2. Для чего нужен УНЧ?
3. Как изменятся характеристики УНЧ при увеличении разделительной емкости  $C_p$ ?
4. Объясните с физической точки зрения изменение этих характеристик.
5. Какой усилитель вы бы выбрали с большей или с меньшей разделительной емкостью и почему?
6. Как изменятся характеристики УНЧ при увеличении сопротивления нагрузки  $R_n$ ?
7. Объясните с физической точки зрения изменение этих характеристик.
8. Какой усилитель вы бы выбрали с большим или с меньшим сопротивлением нагрузки и почему?
9. Какими будут основные характеристики УНЧ в отсутствие разделительной емкости?
10. Почему АЧХ усилителя стремится к нулю на высоких частотах?

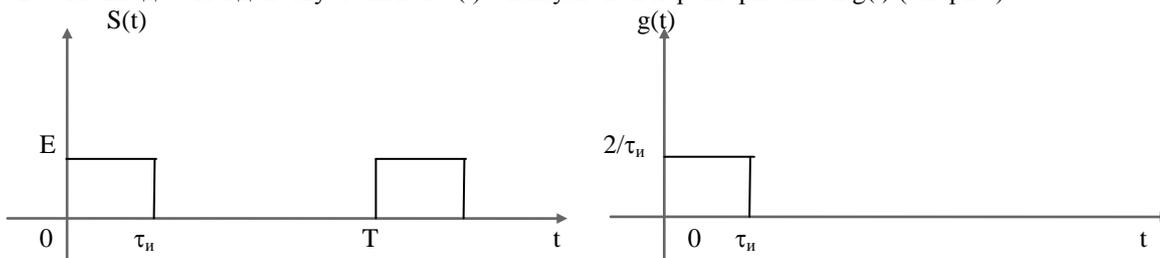
Типовые задачи к экзамену

1. На входе УНЧ действует сигнал  $S(t)$  с переходной характеристикой  $h(t)$  (см.рис.)



Определите сигнал на выходе усилителя, если  $T=4\tau_n$ .

2. На входе УНЧ действует сигнал  $S(t)$  с импульсной характеристикой  $g(t)$  (см. рис.)



Определите сигнал на выходе усилителя, если  $T=5\tau_n$ .

3. На входе усилителя низких частот с открытым входом (без разделительной емкости  $C_p$ ), сопротивлением нагрузки  $R_n$  действует прямоугольный импульс с амплитудой  $E$  и длительностью  $\tau_n$ . Кроме того, известны паразитная емкость  $C_0$  и крутизна переходной характеристики транзистора  $S$ .
- Определите и изобразите амплитудно-частотную и переходную характеристику усилителя;
  - Используя результаты п.п. а), определите аналитическое выражение сигнала  $S_{\text{вых}}(t)$  на выходе усилителя, если  $\tau_n = 2R_n C_0$ .