

**Конспект лекций по курсу «Основы теории цепей»  
Для групп 2086-2096. Лектор Ручьёв М.К.**

Литература:

[1] Гоноровский И.С. – «Радиотехнические цепи и сигналы», М.: Радио и связь, 1986

[2] Гоноровский И.С., Дёмин М.П. – «Радиотехнические цепи и сигналы», М.: Радио и связь, 1994

[3] Голованов В.В., Яковлев А.О. Проектирование аналоговых и цифровых фильтров, М.: Издательство МАИ, 1993

[4] Тронин Ю.В., Гурский О.В. Синтез фильтров, М.: Издательство МАИ, 1990

# Лекция №1

## Анализ активных линейных цепей.

### Схемы замещения транзистора.

([1] стр. 142-152, [2] стр. 141-151)

#### 1. Свойства активных линейных цепей.

Активные линейные цепи обладают всеми свойствами линейных цепей и для их анализа используются все методы анализа линейных цепей. В свою очередь активные линейные цепи описываются 6 характеристиками. Это комплексно-частотная характеристика (КЧХ), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), фазочастотная характеристика (ФЧХ), передаточная функция, переходная и импульсная характеристики. Вспомните их определение и связь между ними.

Основное свойство линейных цепей – принцип суперпозиции.

*Активными* называются линейные цепи, для которых мощность выходного сигнала больше мощности входного.

Назначение – усиление и фильтрация сигналов.

Усиление осуществляется за счёт преобразования энергии источников питания в энергию полезного сигнала.

#### 2. Транзистор в режиме усиления слабого сигнала.

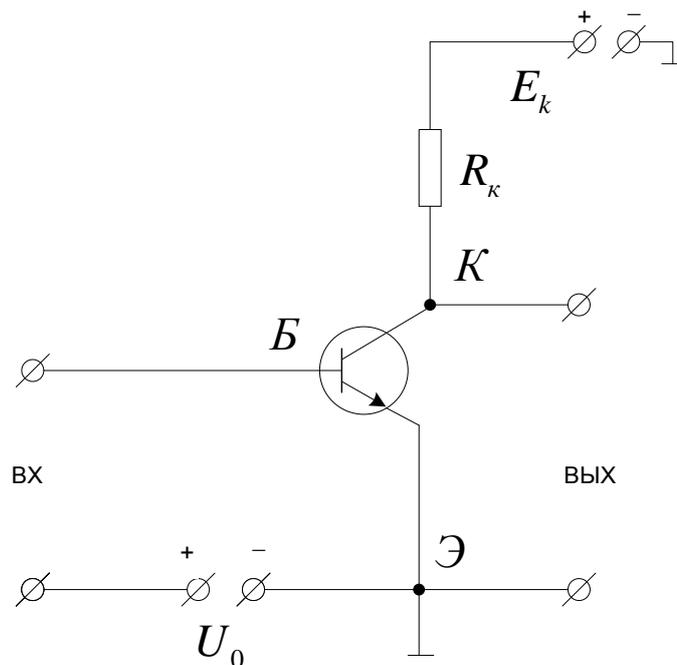
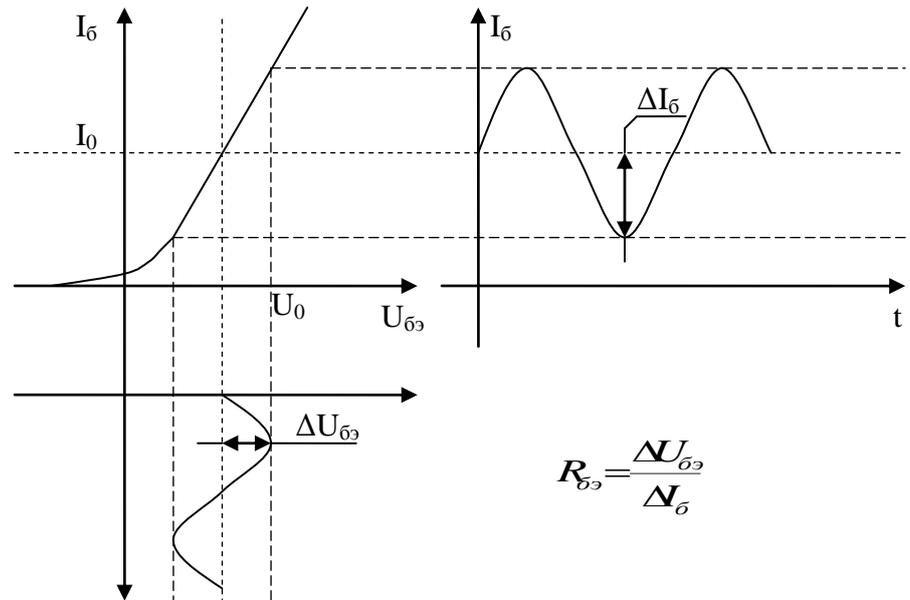


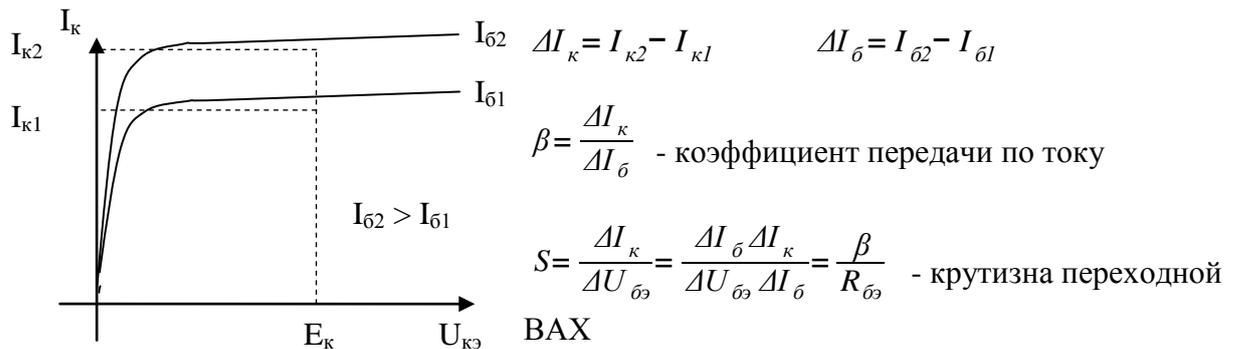
Рис.1.1

На рисунке 1.1 изображен транзистор с нагрузкой, подключенный к источникам питания по схеме с общим эмиттером. Напомним основные характеристики транзистора .

### Входная характеристика транзистора



### Выходная характеристика транзистора

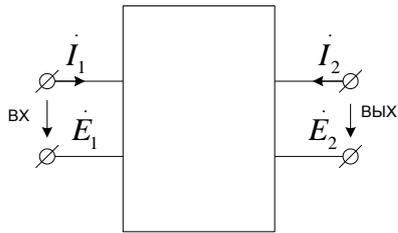


### 3 Основные схемы замещения активных линейных четырехполюсников.

Схема замещения нужна для расчета основных характеристик линейных цепей

Для расчета схемы замещения четырехполюсника будем использовать комплексные амплитуды токов и напряжений. Схема замещения формируется по переменной составляющей, т.е. при переходе от реальной схемы к схеме замещения источники питания ( $U_0$  и  $E_к$ ) закорачиваются.

### Схема замещения через Z-параметры



Для схемы замещения через Z-параметры известными считаются токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ . Все Z-параметры имеют размерность сопротивлений.

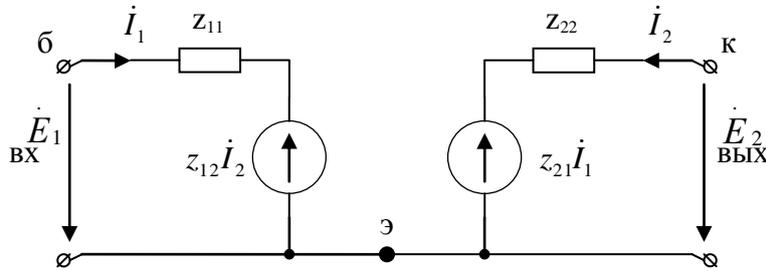


Рис.1.2

На рисунке 1.2 изображена схема замещения транзистора через Z-параметры. Найдем соотношения, из которых определяются эти параметры. Для этого составим систему из

двух уравнений  $\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_1 z_{11} + \dot{I}_2 z_{12} \\ \dot{E}_2 = \dot{I}_1 z_{21} + \dot{I}_2 z_{22} \end{cases}$ . Тогда

$\dot{z}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1}$ , при условии  $\dot{I}_2 = 0$ , т.е. холостой ход выхода.

$\dot{z}_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_2}$ , при условии  $\dot{I}_1 = 0$ , т.е. холостой ход входа.

$\dot{z}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_1}$ , при условии  $\dot{I}_2 = 0$ , т.е. холостой ход выхода.

$\dot{z}_{22} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2}$ , при условии  $\dot{I}_1 = 0$ , т.е. холостой ход входа.

### Схема замещения через Y-параметры [1] стр.144

В этой схеме известными считаются напряжения  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$ , а неизвестными считаются токи.

Этот вопрос изучите самостоятельно.

### Схема замещения через Н-параметры.

В этой схеме известными считаются напряжения  $\dot{E}_2$  и ток  $\dot{I}_1$ , а неизвестными напряжением  $\dot{E}_1$  и ток  $\dot{I}_2$

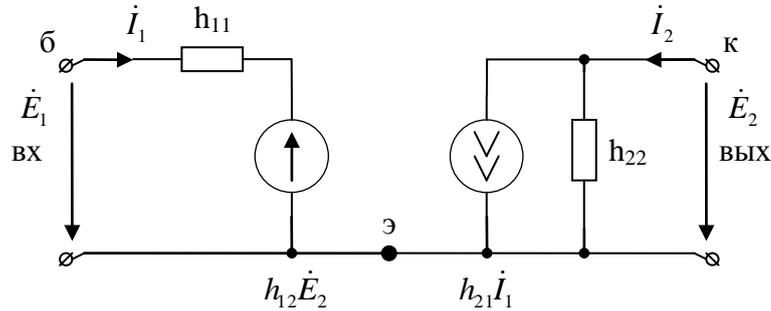


Рис.1.3

На рисунке 1.3 изображена схема замещения транзистора через Н - параметры. Найдем соотношения, из которых определяются эти параметры. Для этого составим систему из

двух уравнений 
$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_1 h_{11} + \dot{E}_2 h_{12} \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_1 h_{21} + \dot{E}_2 h_{22} \end{cases}.$$

Тогда

$$h_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1}, \text{ при } \dot{E}_2 = 0 \text{ (короткое замыкание на выходе) – входное сопротивление } R_{бэ}$$

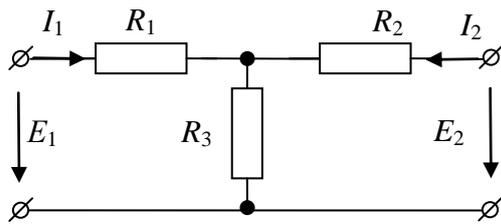
$$h_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2}, \text{ при } \dot{I}_1 = 0 \text{ (холостой ход на входе) – коэффициент передачи по напряжению с выхода на вход.}$$

$$h_{21} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}, \text{ при } \dot{E}_2 = 0 \text{ (короткое замыкание на выходе) – коэффициент передачи по току со входа на выход}$$

$$h_{22} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{E}_2}, \text{ при } \dot{I}_1 = 0 \text{ (холостой ход на входе) – выходная проводимость.}$$

Пример

Для предложенного четырёхполюсника найдём схему замещения через Н-параметры.



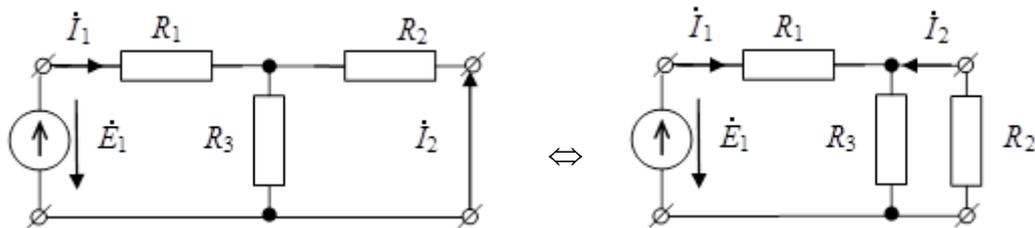
Дано:  $R_1, R_2, R_3$ .  
Найти:  $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ .

При определении схемы замещения через Н-параметры заданными считаются  $\dot{E}_2$  и  $\dot{I}_1$  и надо выразить  $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$  через  $R_1, R_2, R_3$ . По определению

$$h_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1}, \text{ при } \dot{E}_2 = 0 \text{ (короткое замыкание на выходе) – входное сопротивление } R_{вх}$$

$$h_{21} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}, \text{ при } \dot{E}_2 = 0 \text{ (короткое замыкание на выходе)}$$

Нарисуем схему замещения при коротком замыкании на выходе

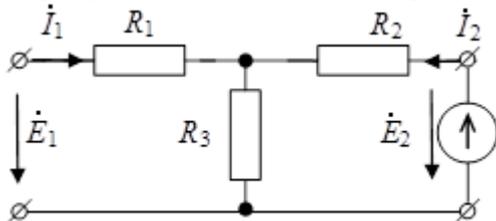


$$\text{Тогда } h_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad h_{21} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = -\frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

$h_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2}$ , при  $\dot{I}_1 = 0$  (холостой ход на входе) – коэффициент передачи по напряжению с выхода на вход.

$$h_{22} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{E}_2}, \text{ при } \dot{I}_1 = 0 \text{ (холостой ход на входе) – выходная проводимость.}$$

Нарисуем схему замещения при холостом ходе на входе



$$\text{Тогда } h_{12} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_2} \quad h_{22} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{E}_2} = \frac{1}{R_2 + R_3}$$

$$\text{Таким образом } h_{11} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}; \quad h_{12} = \frac{R_3}{R_3 + R_2}; \quad h_{21} = -\frac{R_3}{R_1 + R_3}; \quad h_{22} = \frac{1}{R_2 + R_3}.$$

### Смысл h-параметров для транзисторов.

Пусть  $\dot{E}_1 = \Delta U_{\text{бэ}}$ ;  $\dot{E}_2 = \Delta U_{\text{кэ}}$ ;  $\dot{I}_1 = \Delta I_{\text{б}}$ ;  $\dot{I}_2 = \Delta I_{\text{к}}$ , тогда

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{б}}} = R_{\text{бэ}} - \text{входное сопротивление транзистора (от 100 Ом до 3 кОм)}$$

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} - \text{коэффициент передачи по напряжению с выхода на вход } (\approx 0,001)$$

$$h_{21} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} = \beta - \text{коэффициент передачи по току со входа на выход (от 40 до 300)}$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} - \text{выходная проводимость } (10^{-5} - 10^{-6} \text{ 1/Ом})$$

$$S = \frac{\beta}{R_{\text{бэ}}} = \frac{h_{21}}{h_{11}}$$

### **4. Схема замещения транзистора, как активного линейного четырехполюсника.**

На рисунке 1.4. приведена принципиальная схема транзистора с нагрузкой  $\dot{Z}_k$ .

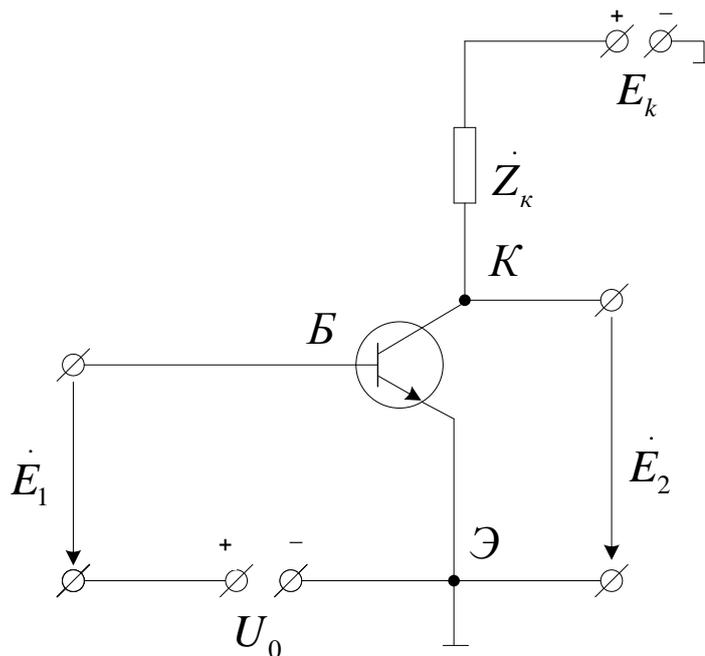


Рис. 1.4.

Рассмотрим схему замещения этого транзистора (см. рис. 1.5.), который благодаря нагрузке может работать в активном режиме, то есть усиливать сигнал.

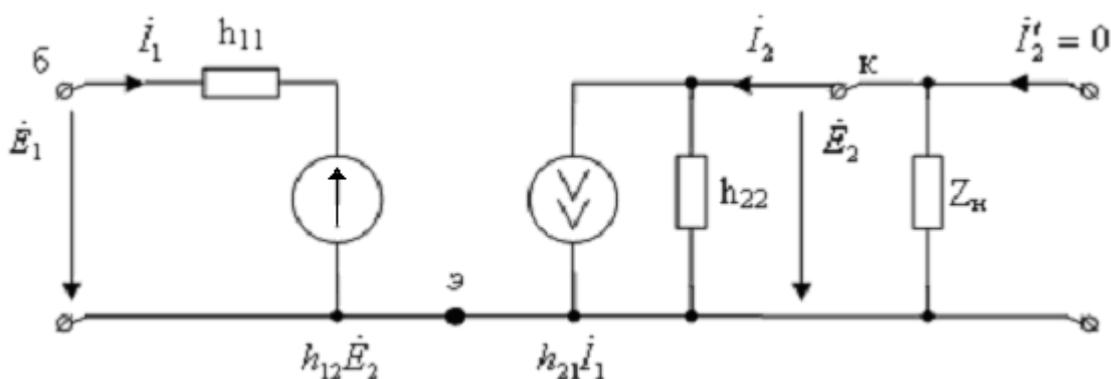


Рис.1.5.

Введем новые параметры  $G_n = \frac{1}{Z_n}$ ,  $h'_{22} = h_{22} + G_n$  и внесем изменения в систему

уравнений 
$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{I}_1 h_{11} + \dot{E}_2 h_{12} \\ \dot{I}'_2 = \dot{I}_1 h_{21} + \dot{E}_2 h'_{22} \end{cases}$$

Из решения системы получим формулу для КЧХ (с учетом того, что  $\dot{I}'_2 = 0$ )

$$K(j\omega) = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = \frac{h_{21}}{h_{12}h_{21} - h'_{22}h_{11}}$$

Формула комплексно-частотной характеристики  $K(j\omega)$ , полученная нами, позволяет определять остальные характеристики линейной цепи, по схеме из прошлого семестра. Эти характеристики используют для анализа линейных цепей различными методами: АЧХ и ФЧХ в спектральном методе,  $K(p)$  в операторном,  $g(t)$  в методе интеграла свертки.

### Контрольные вопросы к лекции 1

1. Какие цепи называются линейными?
2. Какие цепи называются активными?
3. Зачем нужны активные линейные цепи?
4. Перечислите основные схемы замещения активных линейных четырехполюсников.
5. Зачем нужны схемы замещения?
6. При каких ограничениях, накладываемых на входной сигнал и схему цепи, формируется схема замещения?
7. Какой физический смысл имеют h-параметры в схеме замещения транзистора с заземленным эмиттером?

Типовые задачи к экзамену

1. На рисунке 1.6 приведена принципиальная схема замещения усилителя низких частот

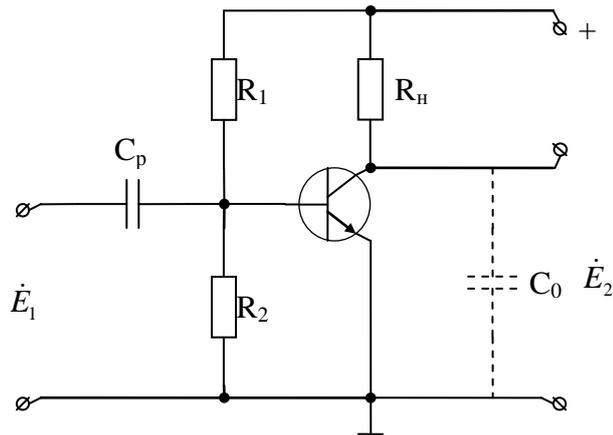


Рис.1.6.

Изобразите его схему замещения, используя схему замещения транзистора через Z-параметры и через H – параметры.

2. Сравните полученные схемы замещения и сделайте вывод о том, какая схема удобнее для расчета КЧХ.