

Занятие 3

Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих между собой p - n перехода.

В зависимости от последовательности чередования областей с различным типом проводимости различают n - p - n транзисторы и p - n - p транзисторы.

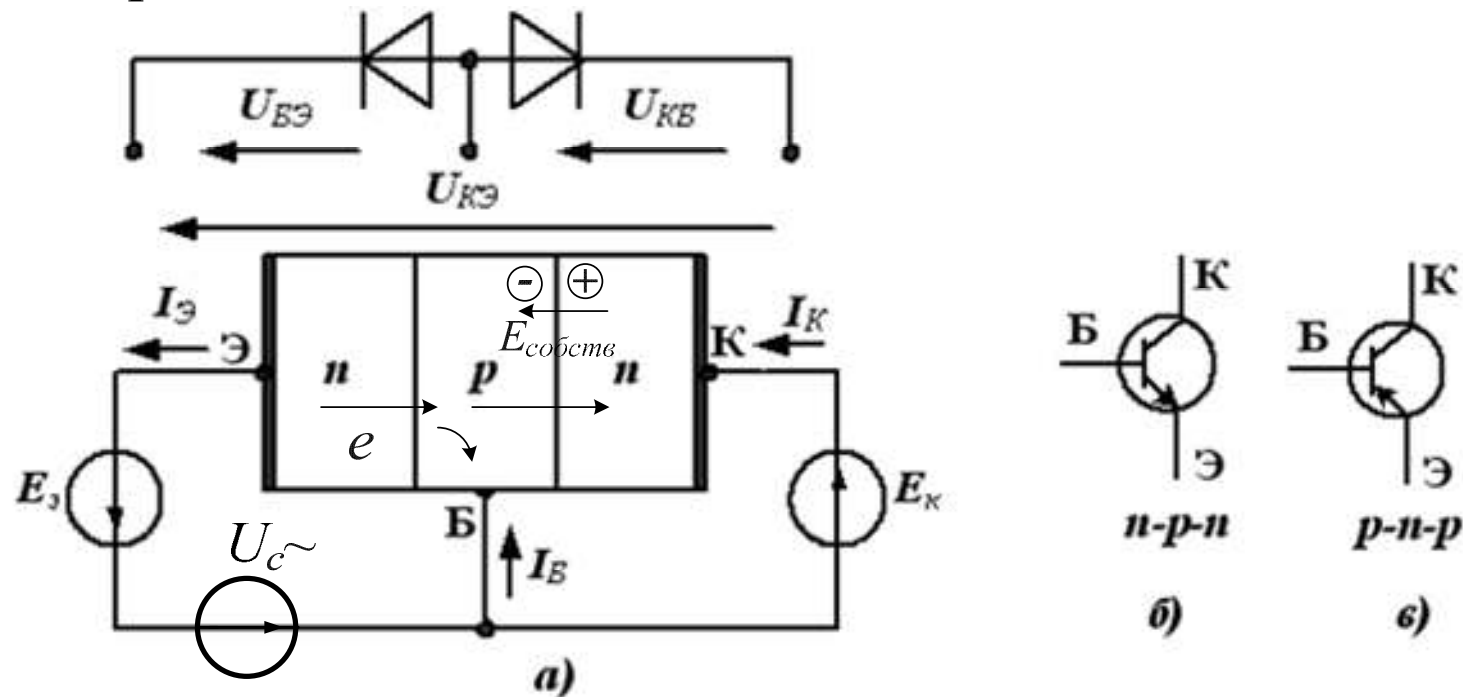


Рис.3.1. Схема с общей базой

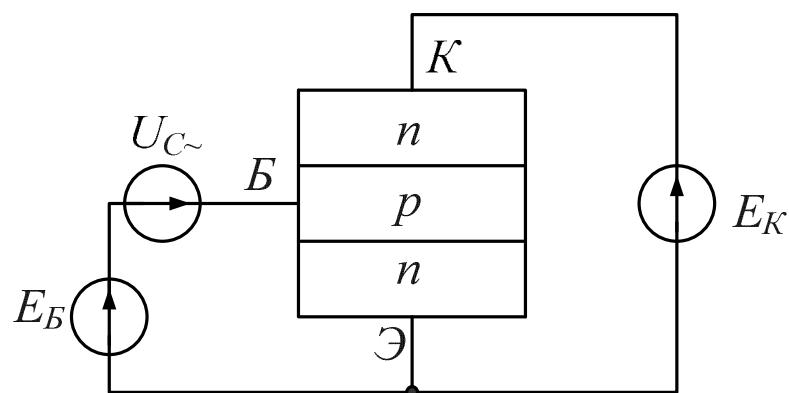
Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей обоих знаков (свободных дырок и электронов).

Трехслойная структура n - p - n транзистора показана на рис. 3.1а.

На рис. 3.1б показано условное обозначение n - p - n транзистора, на рис. 3.1в – условное обозначение p - n - p – транзистора.

Средний слой биполярного транзистора называют базой **Б**, один крайний слой называют коллектором **К**, другой крайний слой называют эмиттером **Э**.

В схеме с общей базой (ОБ) – база это общий электрод входной и выходной цепи (рис.3.1а).



В схеме с общим эмиттером (ОЭ) общий электрод – эмиттер.

Рис.3.2. Схема с общим эмиттером

В зависимости от полярности напряжений, приложенных к электродам транзистора различают следующие режимы его работы: линейный (усилительный), насыщения, отсечки, инверсный.

- В линейном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном.
- В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении.
- В режиме отсечки оба перехода смещены в обратном направлении.
- В инверсном режиме коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный в обратном.

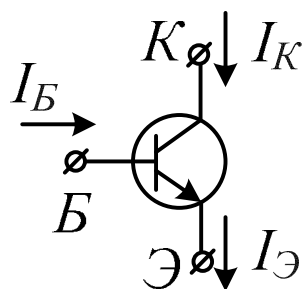


Рис.3.3

Работа транзистора основана на управлении токами электродов путем изменения напряжений, приложенных к переходам транзистора.

В линейном режиме приложенное к базе напряжение $U_{БЭ}$ (для $n-p-n$ транзистора $U_{БЭ} > 0$) открывает переход база-эмиттер. Свободные электроны инжектируются из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера $I_Э$ в цепи эмиттера.

Большая часть электронов, инжектированных из эмиттера в базу, втягивается сильным электрическим полем p - n перехода между базой и коллектором, образуя ток коллектора I_K в цепи коллектора. Незначительная часть свободных электронов, инжектированных из эмиттера в базу, образует ток I_B

В схеме рис.3.3 $I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B$.

$I_K = \alpha I_{\mathcal{E}}$, $\alpha = 0,95 - 0,99$ - коэффициент передачи тока эмиттера.

$$I_B = I_{\mathcal{E}} - I_K = \frac{I_K}{\alpha} - I_K = I_K \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) = I_K \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right).$$

Получим: $\frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$ - коэффициент передачи тока базы.

$\beta \approx 20 - 200$ - определяет усиление транзистора.

$$I_{\mathcal{E}} = I_K + I_B = \beta I_B + I_B = (\beta + 1) I_B.$$

Работу транзистора в схеме ОЭ рассчитывают по входным и выходным ВАХ.

Входная ВАХ – зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер $I_B(U_{БЭ})_{U_{КЭ}=const}$.

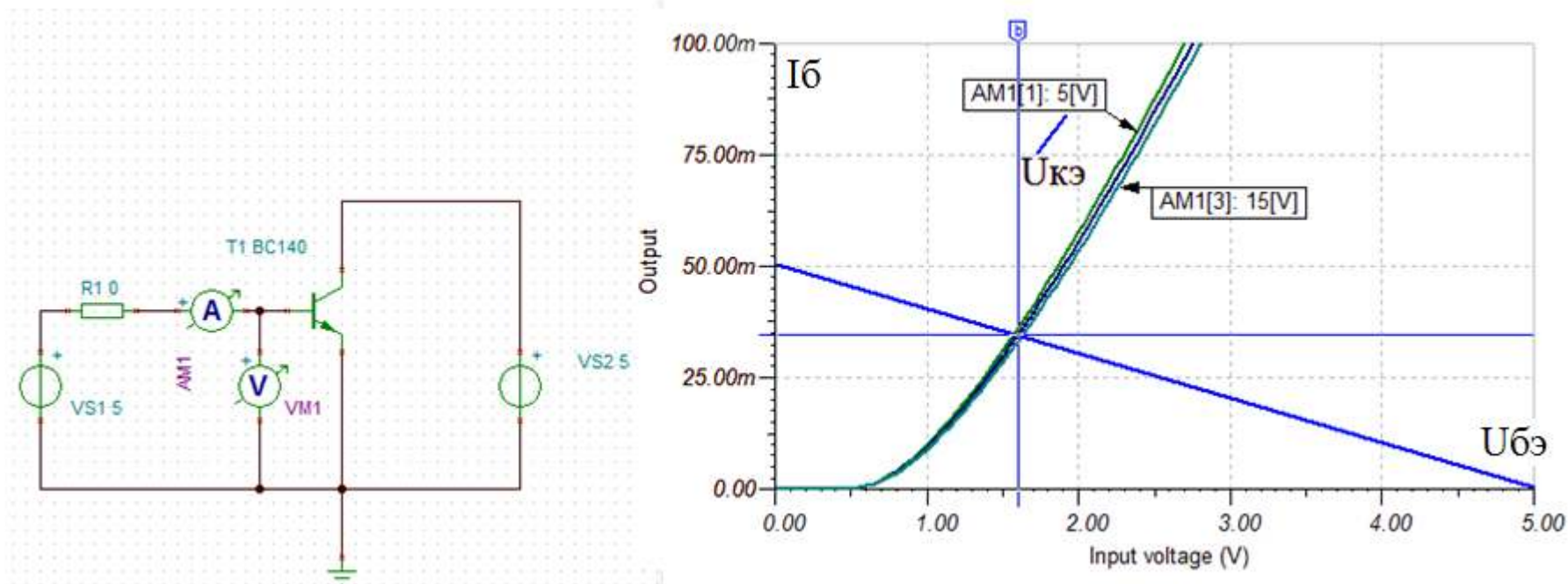


Рис.3.4

Выходные ВАХ – зависимости тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при различных значениях тока базы.

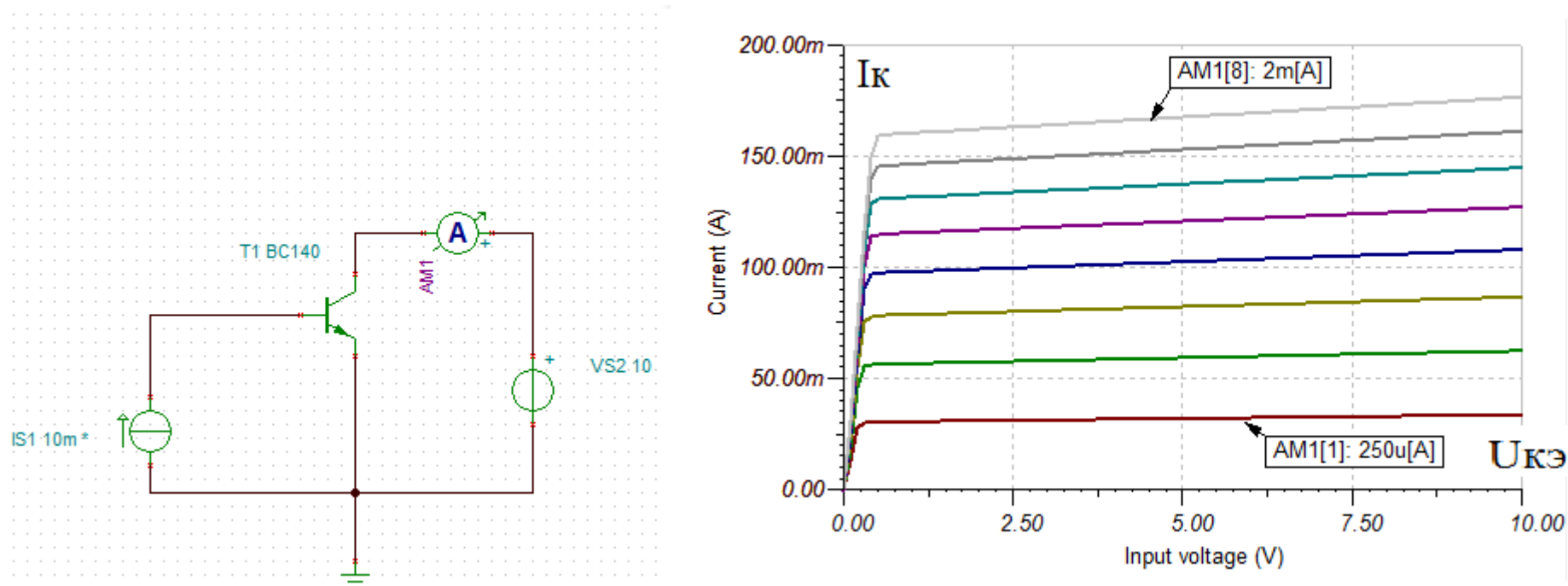


Рис.3.5

Биполярные транзисторы применяются в схемах усилителей, генераторов и преобразователей электрических сигналов, изготавливаются из кремния, германия или арсенида галлия и делятся на низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (до 30 МГц), высокочастотные (до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (более 300 МГц). По мощности транзисторы бывают маломощные (до 300 мВт), средней мощности (до 1,5 Вт) и большой мощности (более 1,5 Вт).

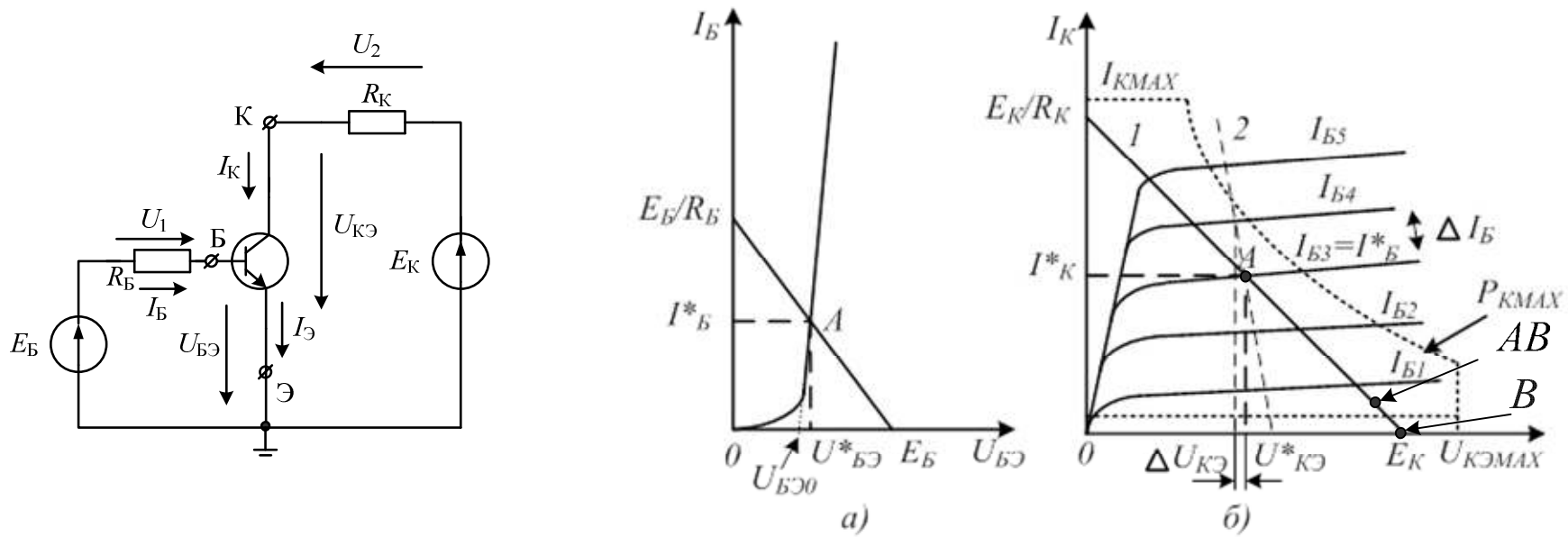


Рис.3.6. Схема усилителя с общим эмиттером
Входная (а) и выходные (б) характеристики
биполярного транзистора

$U_{БЭ0}$ - напряжение отсечки, $I_B \approx 0$.

Проводят графический расчет входной и выходной цепи.

На входной ВАХ находим $U_{БЭ}^*$ и ток базы I_B^* .

На выходных ВАХ строим нагрузочную прямую для заданных E_K , R_K . На графике для I_B^* находим рабочую точку А. В рабочей точке $U_{КЭ}^* \approx \frac{E_K}{2}$.

Классы работы усилителя:

Класс А – линейный режим для малого сигнала (большой постоянный ток – недостаток);

Класс В – для большого сигнала (искажения малых амплитуд);

Класс АВ – для большого сигнала.

Область рабочих режимов транзистора отмечена пунктирными линиями и ограничивается максимальными допустимыми значениями тока коллектора $I_{КМАХ}$, напряжения $U_{КМАХ}$, мощности рассеяния $P_{КМАХ} \approx U_{КЭ} I_{КЭ}$ и нелинейными искажениями при малых значениях тока коллектора.

В линейном режиме усиления малого сигнала биполярный транзистор описывают системой уравнений четырехполюсника в H - параметрах:

$$u_{БЭ} = h_{11} \cdot i_B + h_{12} \cdot u_{КЭ}$$

$$i_K = h_{21} \cdot i_B + h_{22} \cdot u_{КЭ}$$

$$\text{где } h_{11} = \left. \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_B} \right|_{u_{КЭ}=\text{const}}, \quad h_{12} = \left. \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta u_{КЭ}} \right|_{i_B=\text{const}},$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} \right|_{u_{КЭ}=\text{const}}, \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta i_K}{\Delta u_{КЭ}} \right|_{i_B=\text{const}}$$

H -параметры биполярного транзистора можно рассчитать по вольтамперным характеристикам и определить экспериментально. Их типовые значения находятся в пределах:

$$h_{11} = 10^3 - 10^4 \text{ Ом}, \quad h_{12} = 2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3},$$

$$h_{21} = 20 - 200, \quad h_{22} = 10^{-5} - 10^{-6} \text{ См}.$$

Схема замещения биполярного транзистора на постоянном токе и низких частотах

Если не учитываем емкости переходов и инерционность транзистора, получим схему замещения биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, в режиме малого сигнала.

В этой схеме:

$h_{11} = R_{вх}$, $1/h_{22} = R_{вых}$ - входное и выходное сопротивления;

$h_{21} \cdot i_B$ - источник тока, управляемый током базы i_B .

Биполярный транзистор представляет собой источник тока, управляемый током.

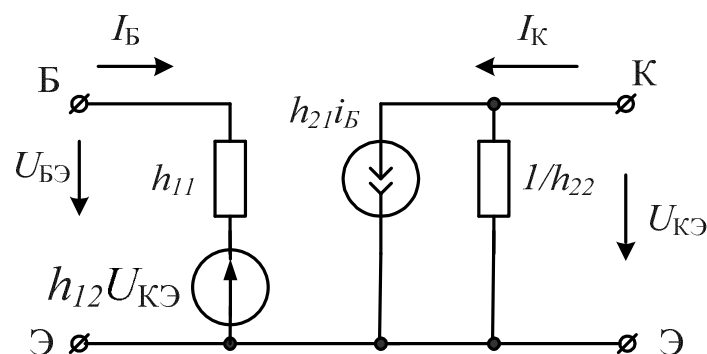


Рис.3.7

На высоких частотах применяют более точные модели транзисторов. Наиболее распространенными являются модели, основанные на схеме замещения Джаколетто, в которой:

r_b - распределенное сопротивление базы, g_e и C_e - полная

проводимость эмиттерного перехода, g_k и

C_k - учитывают влияние коллекторного

перехода, проводимость, $g_{kэ}$ учитывает

связь между эмиттером и коллектором.

Усиительные свойства транзистора

учтены крутизной S .

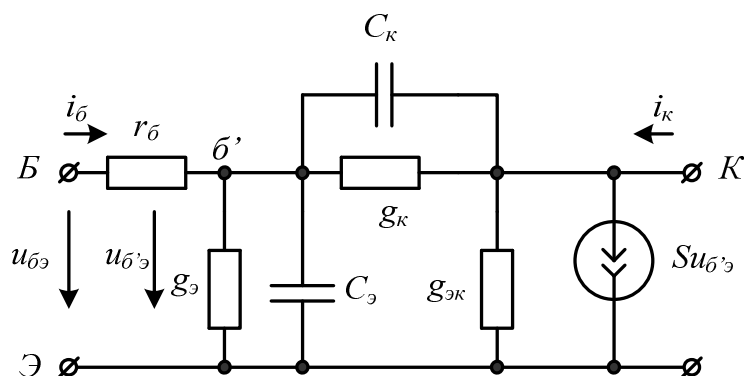
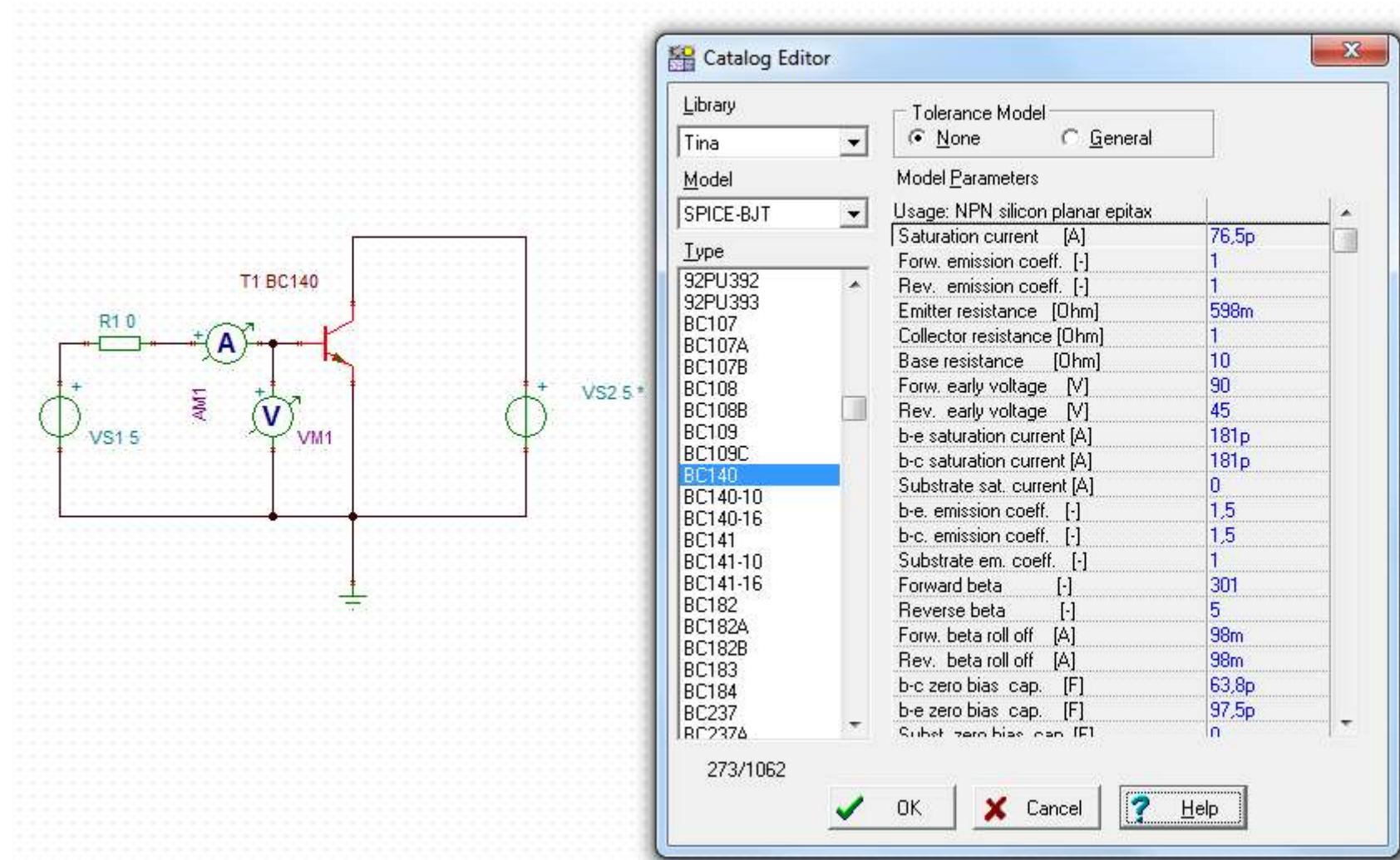


Рис.3.8

SPICE – модель применяют в программах моделирования

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – программа моделирования интегральных схем – 1973 г.

Л.О. Чуа, Пен-Мин-Лин. Машинный анализ электронных схем. Москва, Энергия. 1980 г. 638 с.

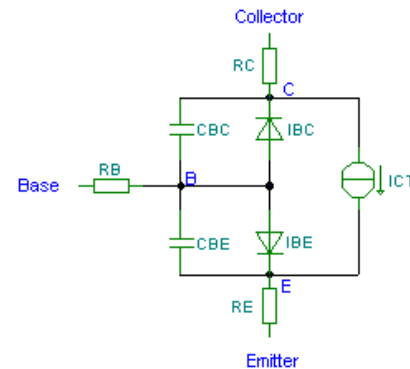


SPICE - BJT model

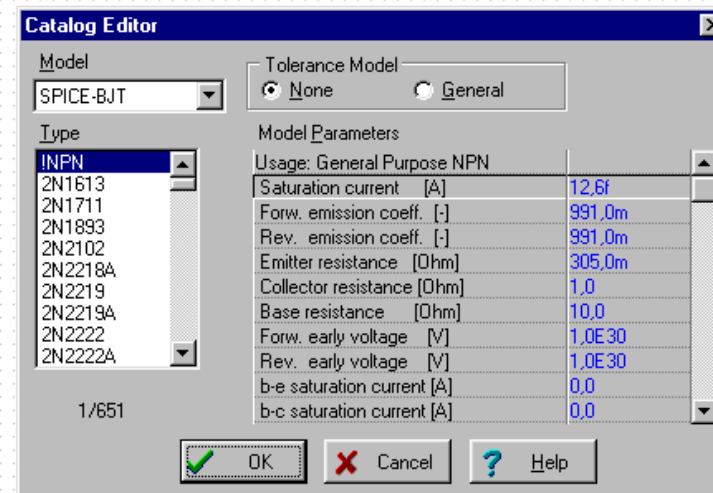
Symbol



Equivalent circuit



Parameters:



I_S	Saturation current
N_F	Forward emission coefficient
N_R	Reverse emission coefficient
R_E	Emitter resistance
R_C	Collector resistance
R_B	Base resistance
I_{KF}	Forward beta roll off
I_{KR}	Reverse beta roll off
C_{JC}	Base-collector zero bias capacitance
C_{JE}	Base-emitter zero bias capacitance
V_{JC}	Base-collector built-in potential
V_{JE}	Base-emitter built-in potential

Equations of the temperature effects

- $V_T = \frac{kT}{q}$
- $I_S(T) = I_S \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{E_G \cdot q}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$
- $I_{SE}(T) = I_{SE} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{N_E}} \cdot \exp\left[\frac{E_G \cdot q}{N_E \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$
- $I_{SC}(T) = I_{SC} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{N_C}} \cdot \exp\left[\frac{E_G \cdot q}{N_C \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$
- $B_F(T) = B_F \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^3$
- $B_R(T) = B_R \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^3$

Current equations

- $Q1 = \frac{1}{1 - \frac{V_{BC}}{V_{AF}} - \frac{B_{VE}}{V_{AR}}}$
- $Q2 = \frac{I_S(T) \cdot \left(e^{\frac{V_{BE}}{N_F V_T}} - 1\right)}{I_{KF}} + \frac{I_S(T) \cdot \left(e^{\frac{V_{BC}}{N_R V_T}} - 1\right)}{I_{KR}}$
- $Q_B = Q1 \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot Q2}}{2}$
- $I_{CT} = \frac{I_S(T) \cdot \left(e^{\frac{V_{BE}}{N_F V_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{N_R V_T}}\right)}{Q_B}$

Constants

- q electron charge
- k Boltzmann's constant
- T_0 27 ° C

Equations

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$B_F = B_{F0} + (T - T_0) \cdot \mathcal{G}_B$$

$$I_S = I_{S0} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{E_G \cdot q}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

$$I_{CC} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1\right]$$

Расчет усилителя на биполярном транзисторе

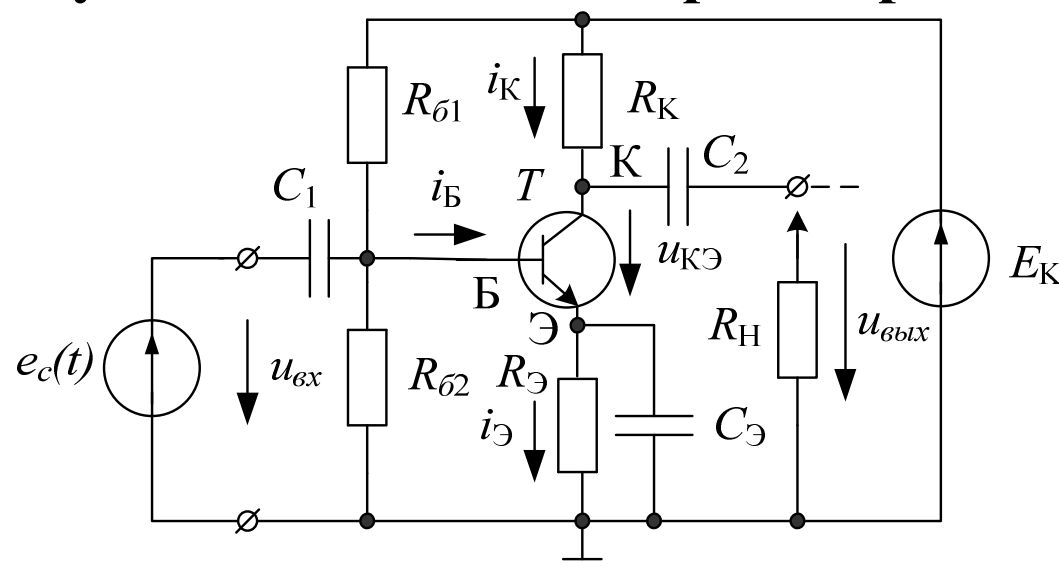


Рис.3.9

Схема усилительного транзисторного каскада с общим эмиттером

Исходные данные: транзистор BC140, $R_{Б1}=R_{Б2}=100\text{кОм}$, $R_K=400\text{Ом}$, $R_Э=100\text{Ом}$, $R_H=2\text{кОм}$, $E_K=10\text{В}$.

Для стабилизации рабочей точки в линейных усилительных каскадах обычно применяют схему с общим эмиттером и отрицательной обратной связью (рис. 10.5).

Резисторы $R_{Б1}$, $R_{Б2}$ задают номинальный ток базы I_B^* .

Резистор $R_Э$ создает отрицательную обратную связь по постоянному току и служит для стабилизации режима транзистора.

Емкость $C_Э$ называется блокировочной, устраняет отрицательную обратную связь по переменной составляющей и увеличивает усиление.

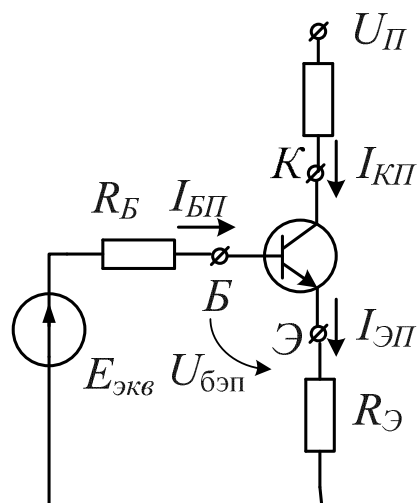
Входной переменный сигнал через разделительную емкость C_1 поступает на базу транзистора и усиливается.

Усиленный выходной сигнал с резистора $R_К$ через разделительную емкость C_2 поступает на нагрузку $R_н$, которой может быть следующий усилительный каскад.

Если напряжение входного сигнала $u_{вх}$ невелико, то работу усилительного транзисторного каскада можно представить в виде наложения режима покоя с постоянным источником ЭДС $E_К$ и с постоянными составляющими тока базы $I^*_Б$, тока коллектора $I^*_К$ и тока эмиттера $I^*_Э$, соответствующими точке А на рабочей характеристике, и режима малого сигнала с переменными составляющими $i_Б$, $i_К$, $u_{вх}$, $u_{вых}$.

Расчет режима покоя

1. Строим эквивалентную схему.



$$E_{\text{экв}} = \frac{U_{\text{п}} R_{\text{с}2}}{R_{\text{с}1} + R_{\text{с}2}} \quad R_{\text{с}} = \frac{R_{\text{с}1} R_{\text{с}2}}{R_{\text{с}1} + R_{\text{с}2}}.$$

$$E_{\text{экв}} = 5\text{В}, \quad R_{\text{с}} = 50 \text{ кОм}$$

Рис.3.10

2. Для входной цепи по второму закону Кирхгофа:

$$E_{\text{экв}} = I_{\text{бп}} R_{\text{с}} + U_{\text{бэп}} + I_{\text{эп}} R_{\text{э}}.$$

$$\text{Но: } I_{\text{эп}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}} = I_{\text{б}} + h_{21\text{э}} I_{\text{б}}.$$

Получим уравнение нагрузочной прямой для входной характеристики:

$$E_{\text{экв}} = I_{\text{бп}} R_{\text{с}} + U_{\text{бэп}} + (1 + h_{21\text{э}}) I_{\text{бп}} R_{\text{э}}$$

$$U_{xx} = E_{\vartheta} = 5\text{В}, \quad I_{K3} = \frac{E_{\vartheta}}{(R_B + (1 + h_{21\vartheta})R_{\vartheta})} = \frac{E_{\vartheta}}{R_{\text{вх}}}.$$

3. Определяем h_{21} :

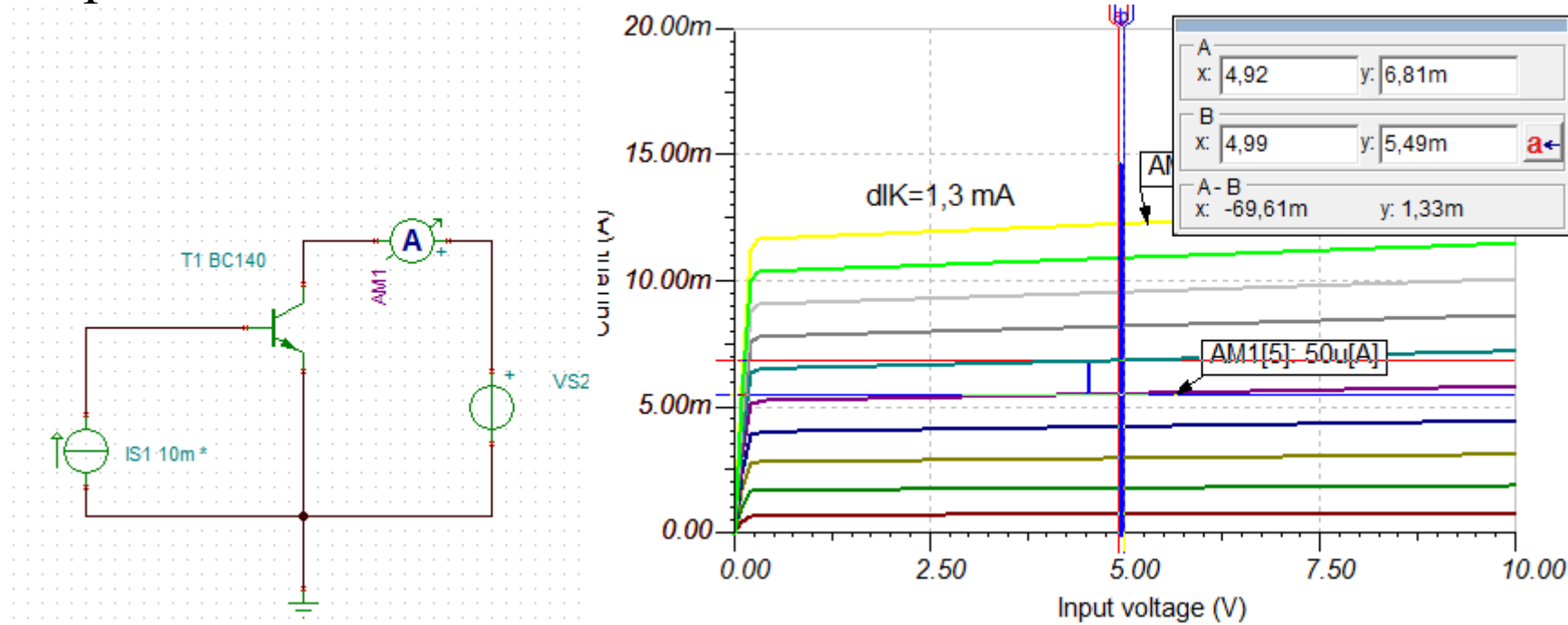


Рис.3.11

Снимаем ВАХ для токов базы 10 мкА – 100мкА. Находим для

$$U_K = E_K / 2 = 5V : h_{21э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{1,3mA}{10\mu A} = 130 = \beta.$$

$$I_{K3} = \frac{5}{(50 \cdot 10^3 + (1 + 130)100)} = \frac{5}{63100} = 79\mu A.$$

4. На входной ВАХ находим рабочую точку:

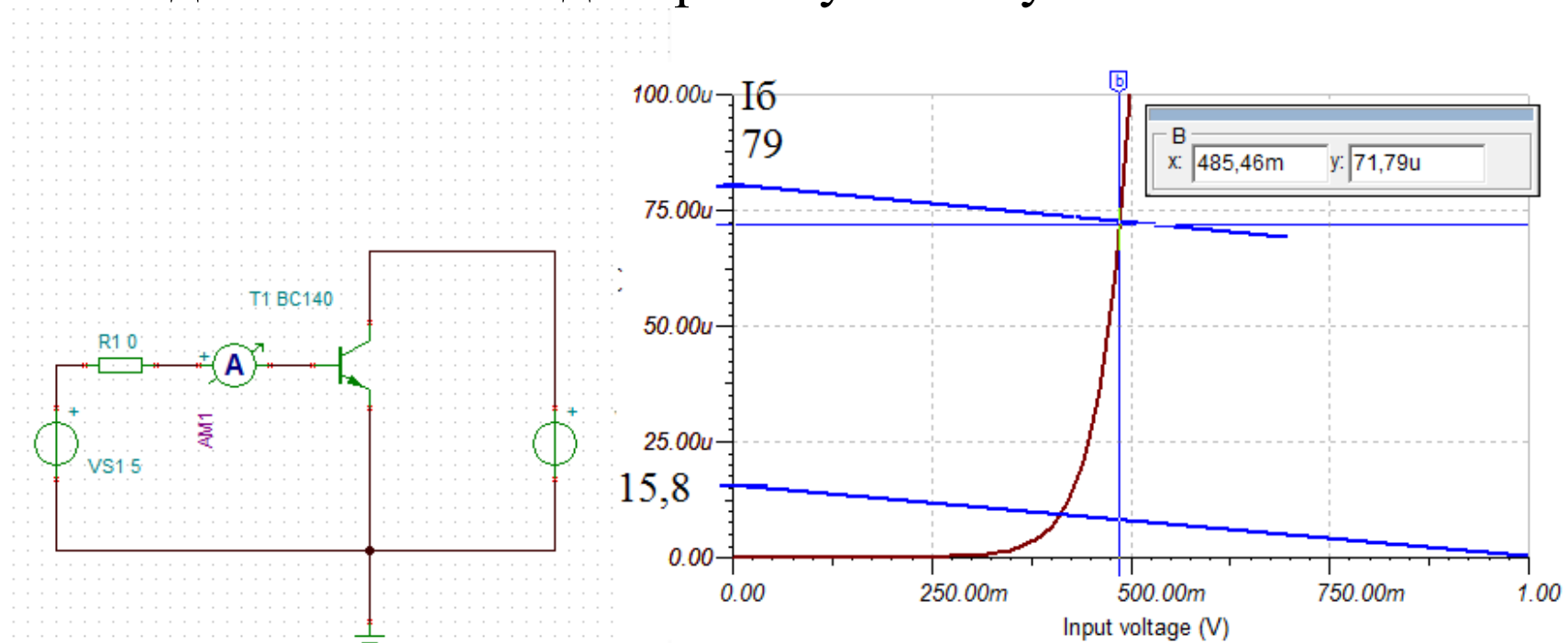
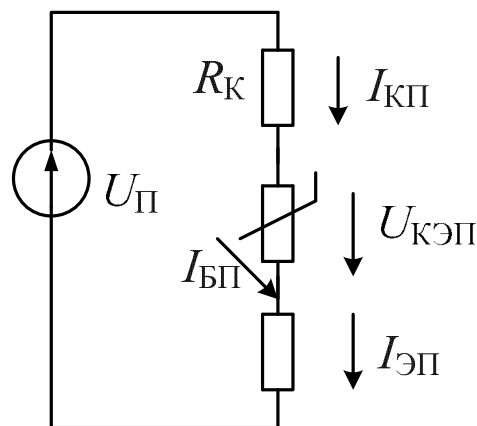


Рис.3.12

Напряжение $U_{БЭП}=485$ мВ, $I_{БП}=72$ мкА.

5. Расчет выходной цепи



По второму закону Кирхгофа:

$$U_{\Pi} = I_{КП} R_K + U_{КЭП} + I_{ЭП} R_{\mathcal{E}}.$$

Уравнение нагрузочной прямой:

$$U_{КЭП} = U_{\Pi} - I_{КП} R_K - \left(I_{КП} + \frac{I_{КП}}{h_{21\mathcal{E}}} \right) R_{\mathcal{E}} \approx \\ \approx U_{\Pi} - I_{КП} (R_K + R_{\mathcal{E}}).$$

Точки пересечения нагрузочной прямой с осями:

$$U_{XX} = U_{\Pi} = 10\text{В}, I_{K3} = \frac{U_{\Pi}}{R_K + R_{\mathcal{E}}} = \frac{10}{500} = 20\text{мА}.$$

6. Моделируем выходные ВАХ

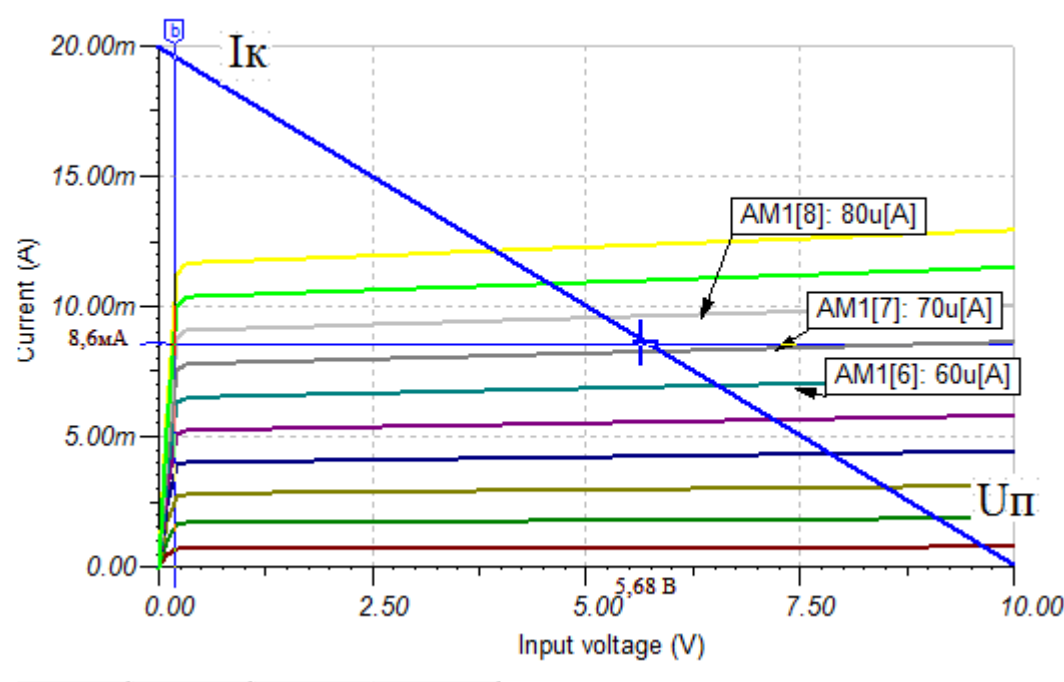
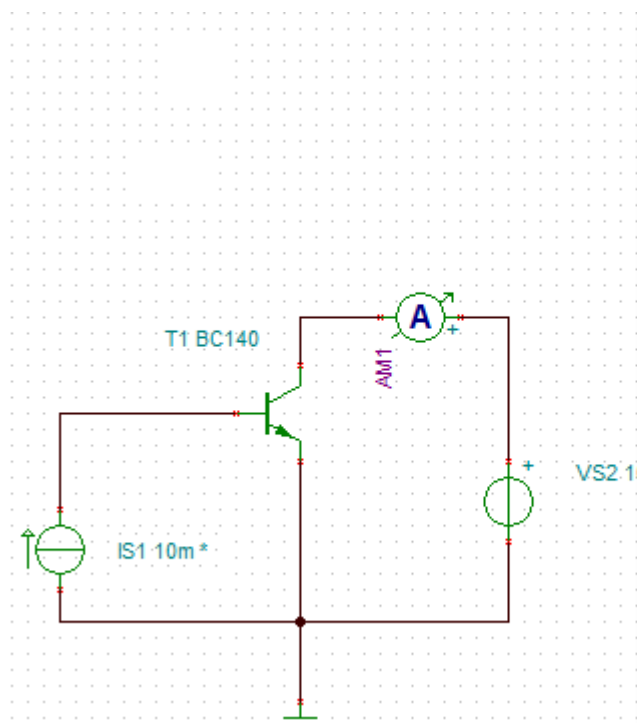


Рис.3.13

Получили в точке В: $U_{\text{Кэ}}=5,68$ В, $I_{\text{Кп}}=8,6$ мА
 7. Проводим моделирование схемы усилителя

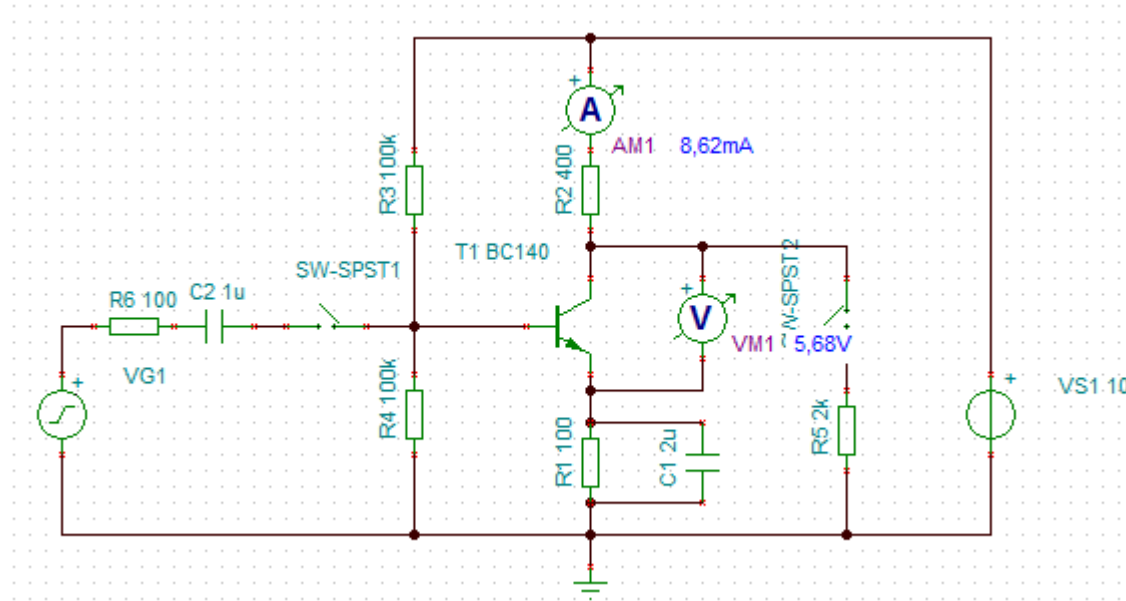


Рис.3.14

Результаты совпадают !

Расчет амплитуд переменных составляющих

Задан переменный входной сигнал $u(t) = E_m \sin 2\pi ft$,
 $E_m = 50 \text{ мВ}$, $f = 1 \text{ кГц}$.

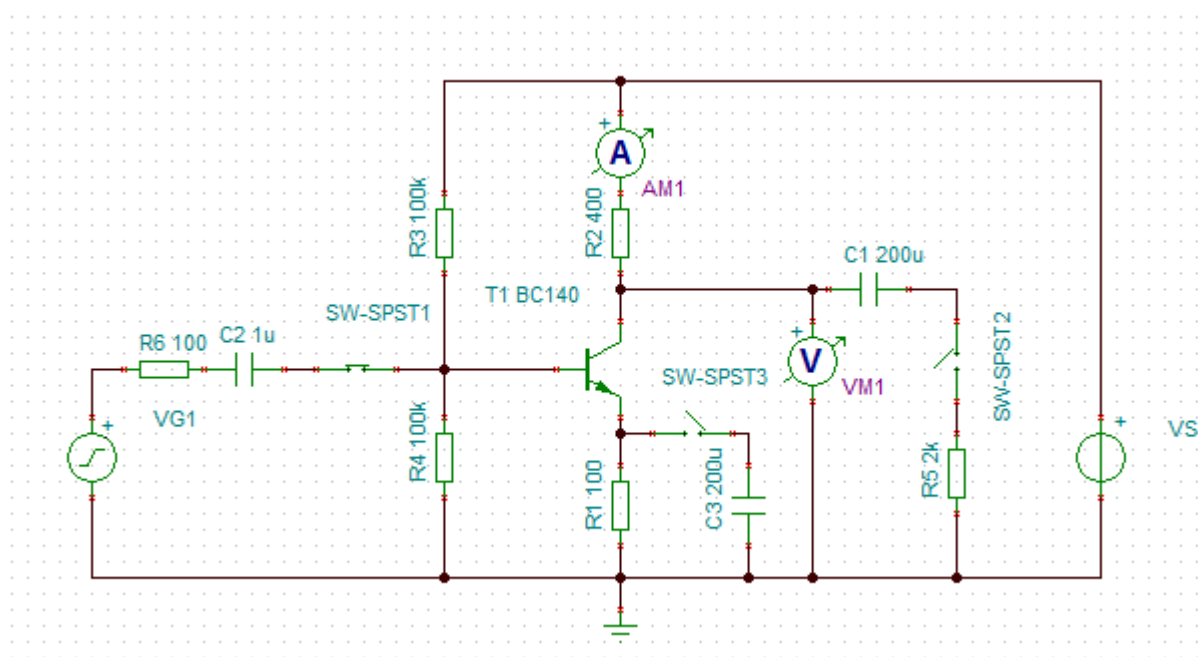
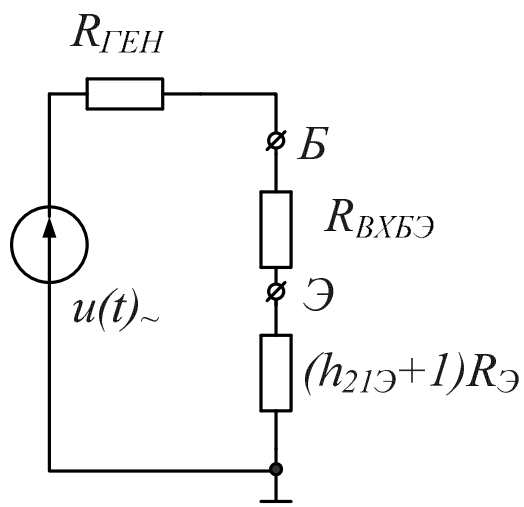


Рис.3.15

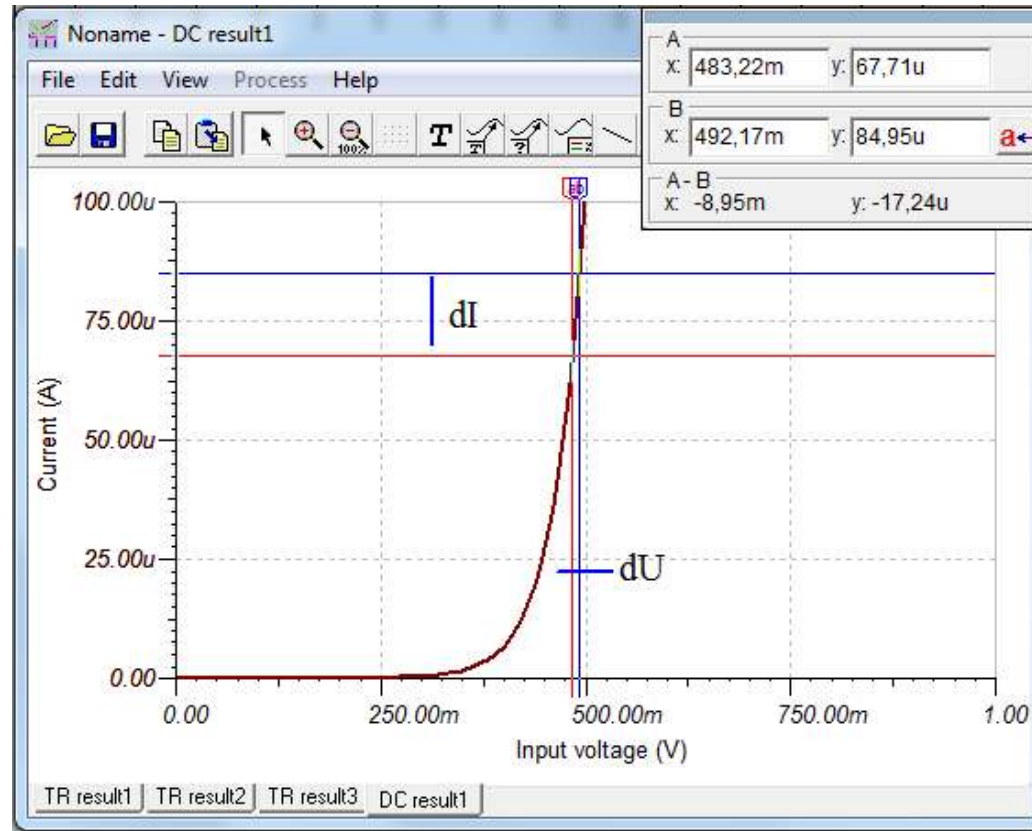
Эквивалентная схема базовой цепи для малой переменной составляющей

1. По входной ВАХ находим:

$$R_{ВХБЭ} = h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{БЭ}} = \frac{(492 - 483)10^{-3}}{(85 - 68)10^{-6}} = 529 \text{ Ом.}$$



$R_B = 50 \text{ кОм}$ не учитываем.



$$2. R_{B\Sigma} = R_{ГЕН} + R_{ВХБЭ} + (h_{21Э} + 1)R_Э = \\ = 100 + 529 + (130 + 1)100 = 13729 \text{ Ом}.$$

Отрицательная обратная связь: $(h_{21Э} + 1)R_Э = 13100 \text{ Ом}.$

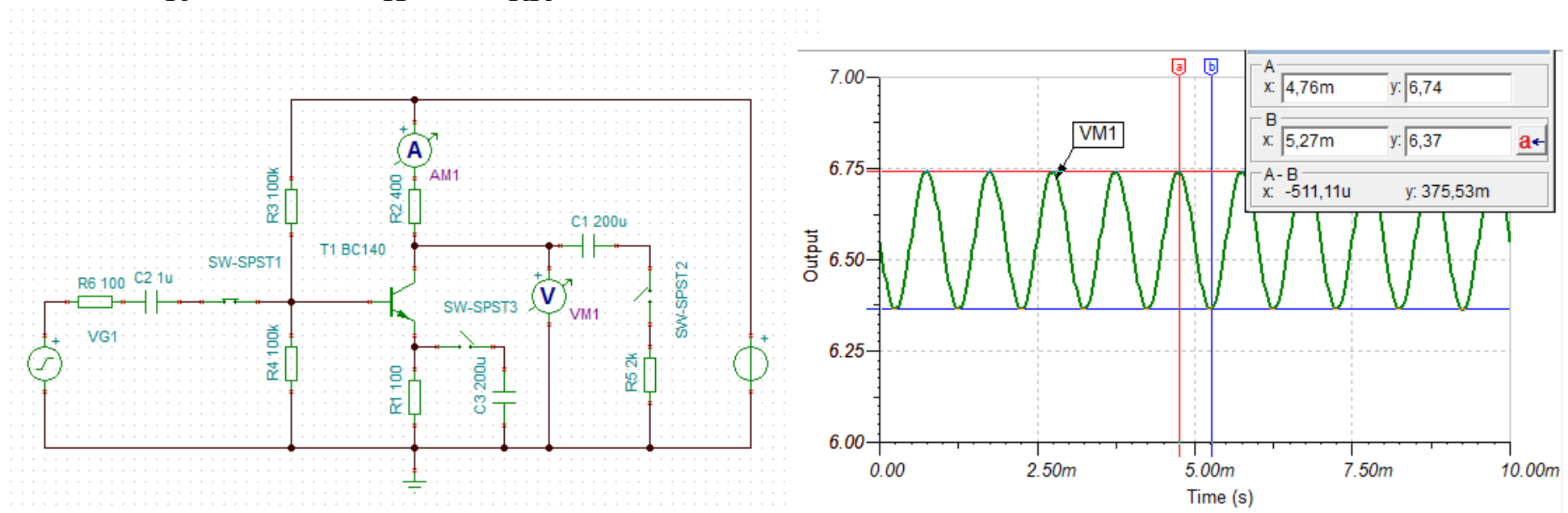
$$3. I_{Em} = \frac{E_m}{R_{B\Sigma}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{13729} = 3,64 \mu A.$$

$$4. I_{Km} = I_{Em} h_{21Э} = 3,64 \cdot 10^{-6} \cdot 130 = 473 \mu A.$$

$$5. U_{Km} = I_{Km} R_K = 473 \cdot 10^{-6} \cdot 400 = 189280 \cdot 10^{-6} = 189 \mu B.$$

$$6. u_{RK}(t) = i_K(t) R_K = (8,6 + 0,473 \sin 2\pi f t) \cdot 10^{-3} 400 = 3,44 + 0,189 \sin 2\pi f t \text{ В.}$$

$$7. u_K(t) = E_K - u_{RK}(t) = 6,56 - 0,189 \sin 2\pi f t \text{ В.}$$

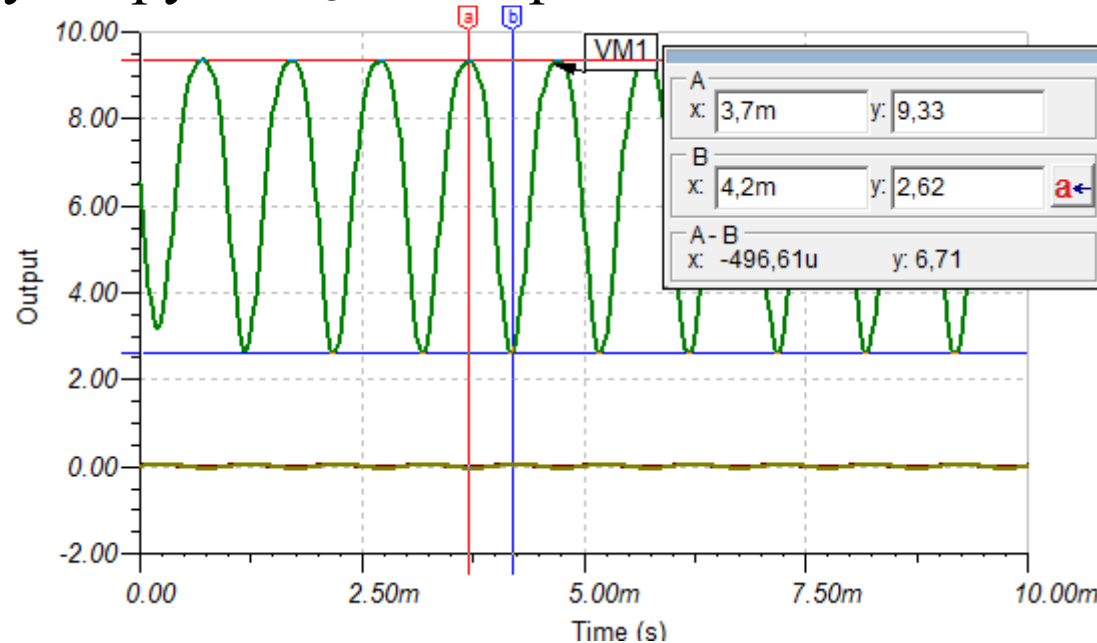


В схеме рис.3.15 коэффициент усиления с обратной связью:

$$K_U = \frac{U_{Km}}{E_m} = \frac{95 \text{ мВ}}{50 \text{ мВ}} = 1,9.$$

$$K_{U(\text{дб})} = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 20 \lg 1,9 = 5,57 \text{ дб}$$

Шунтируем R_3 блокировочной емкостью C_3 .

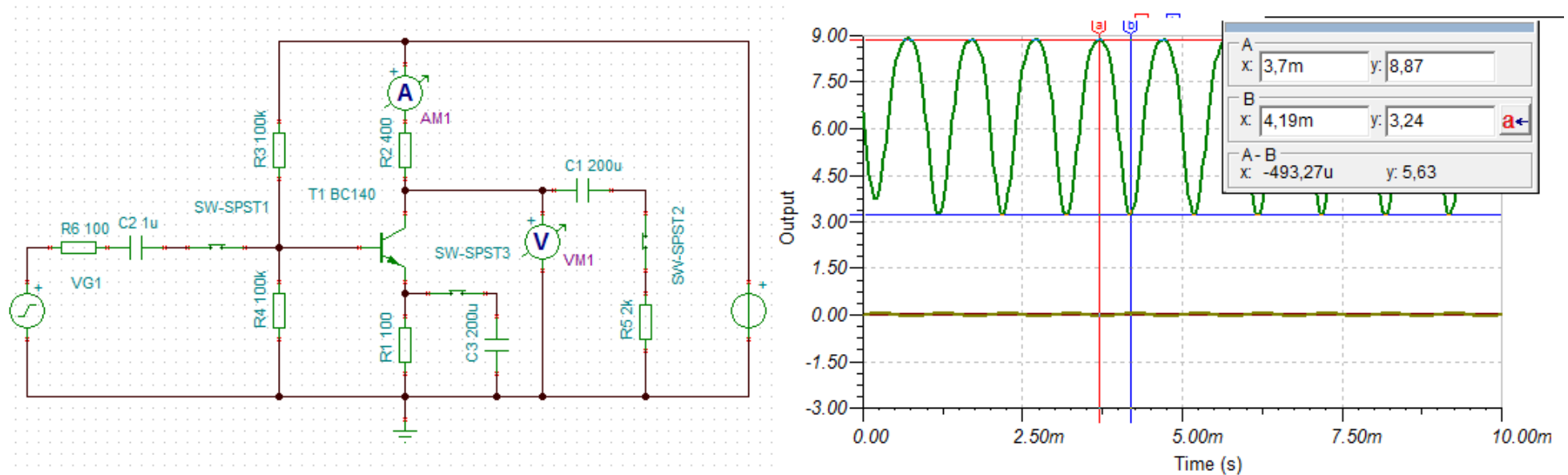


Размах (двойная амплитуда, peak-to-peak) равен 6,71

$$K_U = \frac{U_{Km}}{E_m} = \frac{3,36}{50 \text{ мВ}} = 67.$$

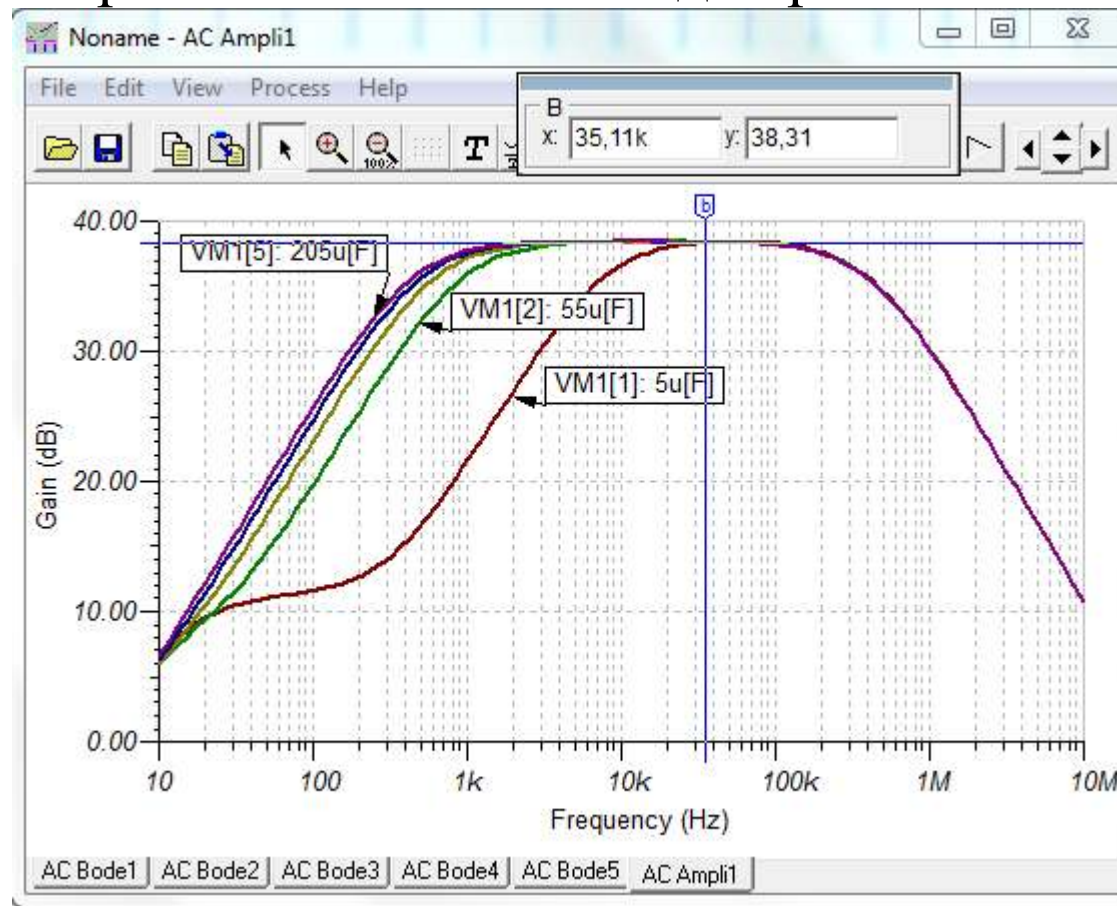
$$K_{U(\partial\delta)} = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 20 \lg 67 = 36,52 \text{ дБ}$$

В схеме рис.3.15 включаем нагрузку:



$$K_U = \frac{U_{Km}}{E_m} = \frac{2,81}{50 \text{ мВ}} = 56. \text{ (34,9 дБ)}$$

АЧХ в режиме холостого хода при изменении C_3



Выбор блокировочной емкости:

На нижней частоте f_H должно быть:

$$X_{CЭ} = \frac{1}{2\pi f_H CЭ} \leq \frac{RЭ}{5 \sim 10} = \frac{100}{10} = 10 \text{ Ом}.$$

$$\text{Для } f_H = 100 \text{ Гц получим: } CЭ > \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 10} = 159 \text{ мкФ}.$$