



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ (ИУ6)

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ 09.03.01 Информатика и вычислительная техника

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе № 2

Вариант 12

Название: Три схемы включения транзистора

Дисциплина: Электроника

Студент

ИУ6-43Б

(Группа)

(Подпись, дата)

В.К. Залыгин

(И.О. Фамилия)

Преподаватель

(Подпись, дата)

Н.В. Аксенов

(И.О. Фамилия)

Москва, 2024

Цель работы

Изучить, как влияют различные способы включения биполярного транзистора и величина сопротивления нагрузки на свойства усилительного каскада.

Задание

Подготовить к работе генератор стандартных сигналов (ГСС) и милливольтметр переменного тока с большим входным сопротивлением. Ознакомившись с назначением органов управления лабораторной установки и присоединив к ней измерительные приборы, подключить установку к сети переменного тока.

1) Подавая на вход схемы синусоидальный сигнал с частотой $f_c = 2 \text{ кГц}$ (средняя частота для усилителя) и напряжением $U_{\Gamma} = 35 \text{ мВ}$, для каждого из усилительных каскадов ОЭ, ОБ, ОК провести экспериментальную оценку малосигнальных параметров каскада $R_{вх}$, k_i , k_u , k_r , $R_{вых}$ различных сопротивлений нагрузки R_H . Построить зависимости параметров усилителя от R_H .

1. Используя формулы таблицы, оценить те же параметры усилителя и вычислить относительное расхождение между экспериментальными и аналитическими результатами.
2. Пользуясь экспериментальными данными определить, какой каскад и при каких R_H обладает наибольшим усилением по мощности. Объясните почему?
3. Дать заключение, как соотносятся между собой у различных каскадов k_i , k_u , $R_{вх}$, $R_{вых}$. Объясните полученные результаты.
4. Экспериментально определить верхнюю граничную частоту для каждого из каскадов ОЭ, ОБ и ОК при $R_H = R_{10}$. Напряжение на выходе ГСС поддерживать неизменным на всех частотах и равным 35 мВ.
5. Рассчитать f_v для каждого каскада и сопоставить расчетные и экспериментально полученные значения между собой.

Параметры

Таблица 1 - параметры схемы

| N | Ек | В | Is | R1 | R2 | Rк, Rэ | Rг | Сбэ | Сбк | fα | C1, C2 | Сблок | Rн |
|----|----|-----|----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|--------|-------|-----|
| | V | | A | kOm | kOm | kOm | kOm | pF | pF | MHz | μf | μf | kOm |
| 12 | 10 | 120 | Ge | 18 | 10 | 3 | 1 | 5 | 12 | 40 | 10 | 250 | 10 |

Is для Ge → 10⁻⁹ А

EG для Ge → 0.7 эВ

$$V_{JE} = V_{JC} = V_{JS} = \frac{2}{3} EG = 0.47$$

$$TF = \frac{1}{2\pi f_{\alpha}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 40 \cdot 10^6} = 3.98 \cdot 10^{-9} c$$

Схема с общим эмиттером

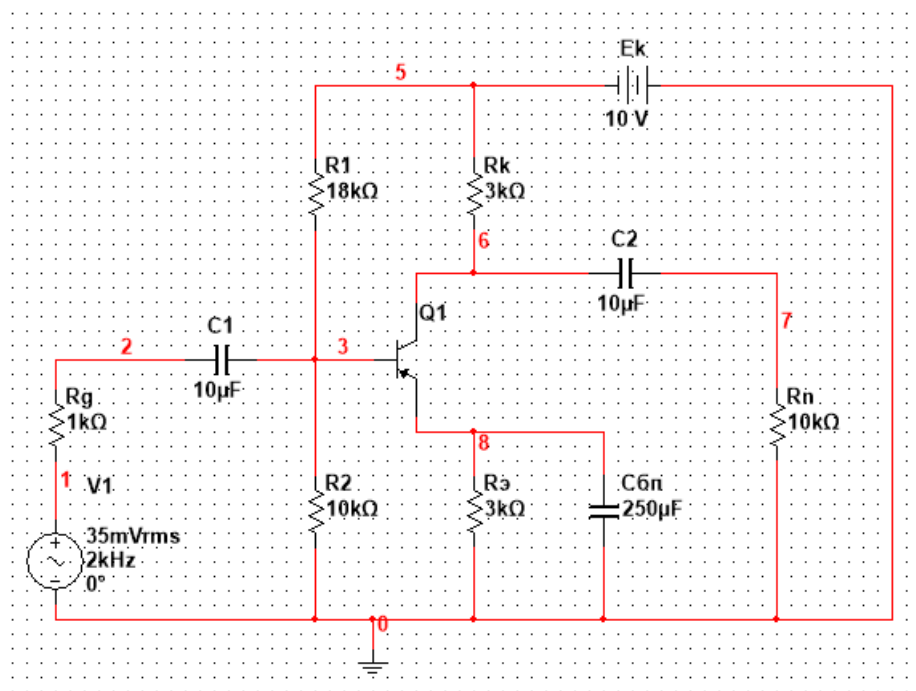


Рисунок 1 - Схема с общим эмиттером

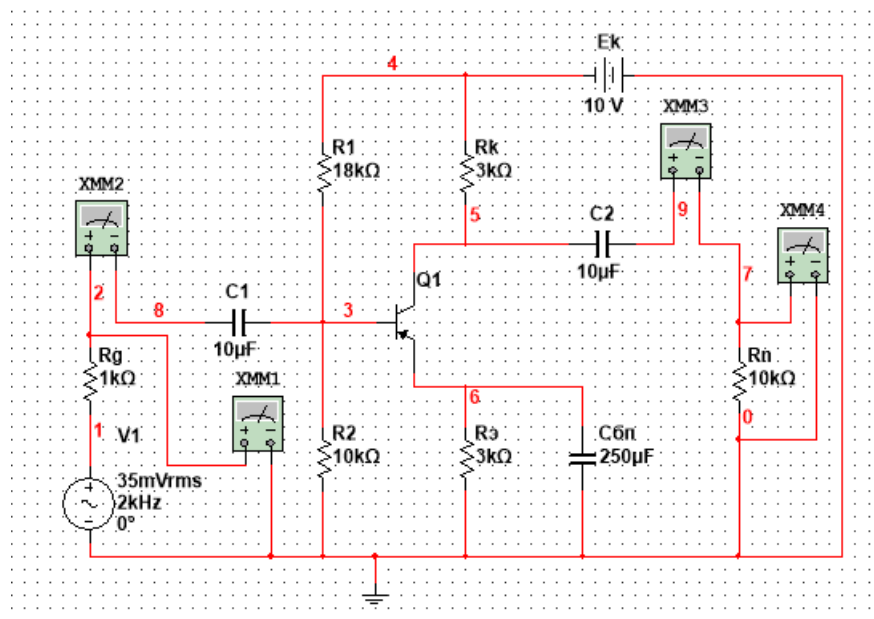


Рисунок 2 - Общий эмиттер. Оценка малосигнальных параметров

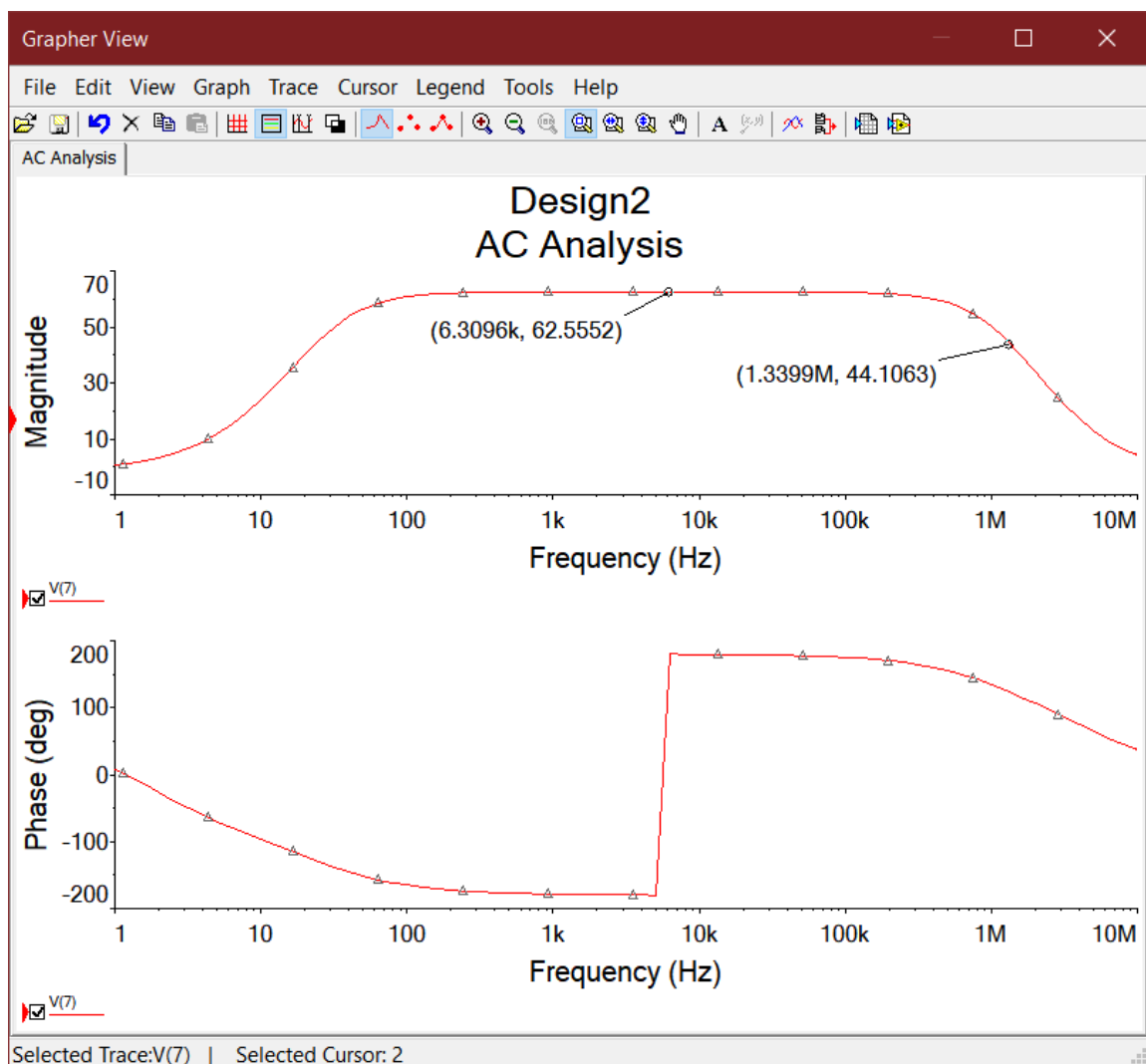


Рисунок 3 - Общий эмиттер. Частотный анализ

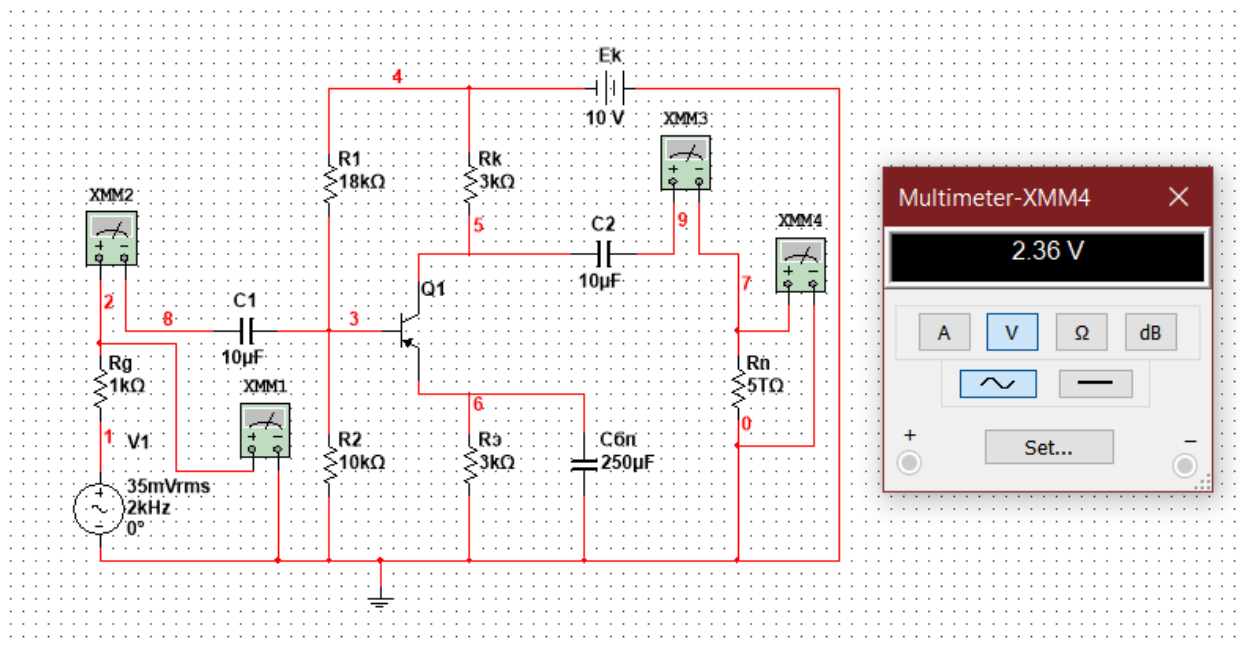


Рисунок 4 - Общий эмиттер. Определение напряжения холостого хода

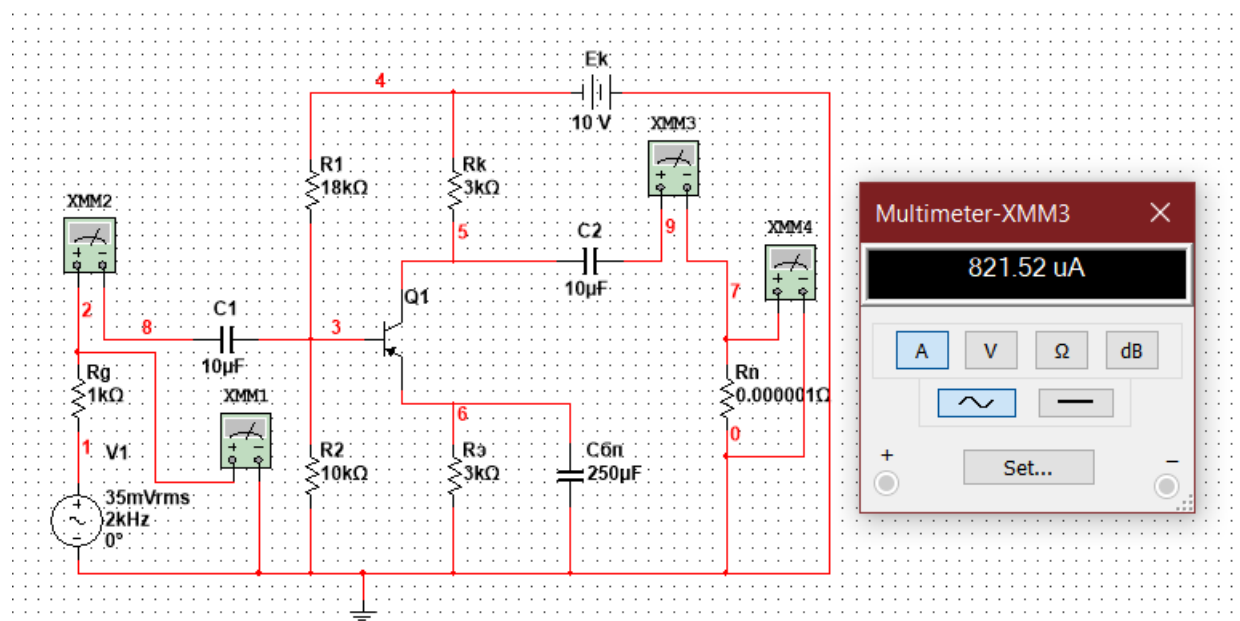


Рисунок 5 - Общий эмиттер. Определение тока короткого замыкания

Выходное сопротивление вычисляется следующим образом:

$$U_{xx} = 2.36 \text{ В}$$

$$J_{кз} = 821.52 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

$$R_{вых} = \frac{U_{xx}}{J_{кз}} = \frac{2.36}{821.52 \cdot 10^{-6}} = 2.872 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Найдём граничную частоту:

$$U_{max} = 62.556 \text{ В}$$

$$\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = 44.106 \text{ В}$$

$$f_B = 1.339 \text{ МГц}$$

Таблица 2 - Общий эмиттер

| | Rn Ом | U _{ВХ} В | I _{ВХ} А | U _{ВЫХ} В | I _{ВЫХ} А | R _{ВХ} Ом | Ki | Ku | Kp |
|---|--------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|---------|
| 1 | 200 | 24.583e-3 | 10.556e-6 | 154.035e-3 | 770.173e-6 | 2328.82 | 72.96 | 6.26 | 456.73 |
| 2 | 1000 | 24.583e-3 | 10.556e-6 | 616.118e-3 | 616.176e-6 | 2328.82 | 58.37 | 25.07 | 1463.34 |
| 3 | 10000 | 24.583e-3 | 10.556e-6 | 1.896 | 189.507e-6 | 2328.82 | 17.95 | 77.12 | 1384.3 |
| 4 | 250000 | 24.583e-3 | 10.556e-6 | 2.341 | 9.35e-6 | 2328.82 | 0.89 | 95.22 | 847.53 |

Схема с общей базой

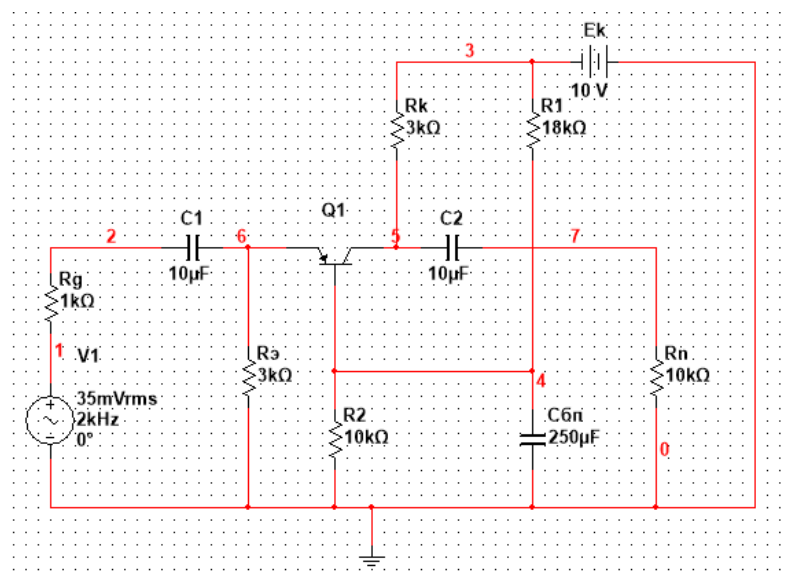


Рисунок 6 - Схема с общей базой

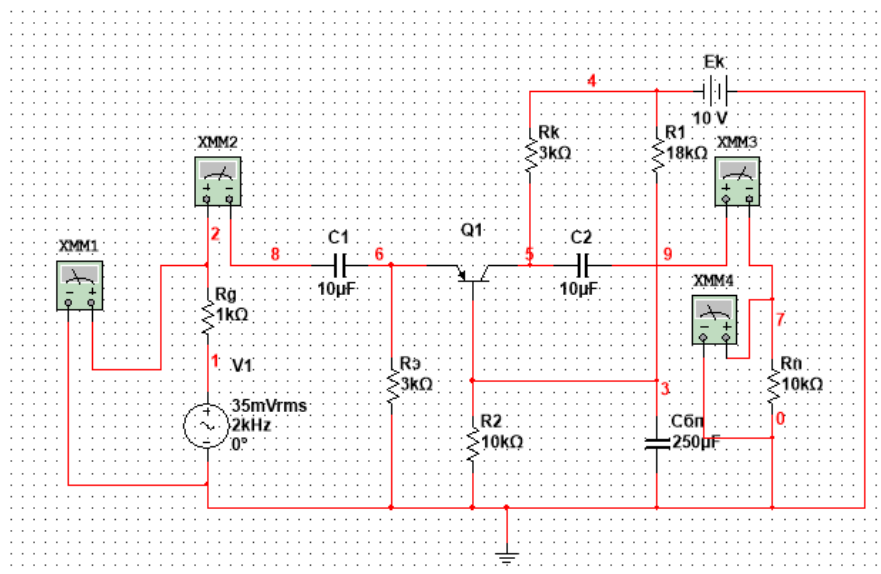


Рисунок 7 - Общая база. Оценка малосигнальных параметров

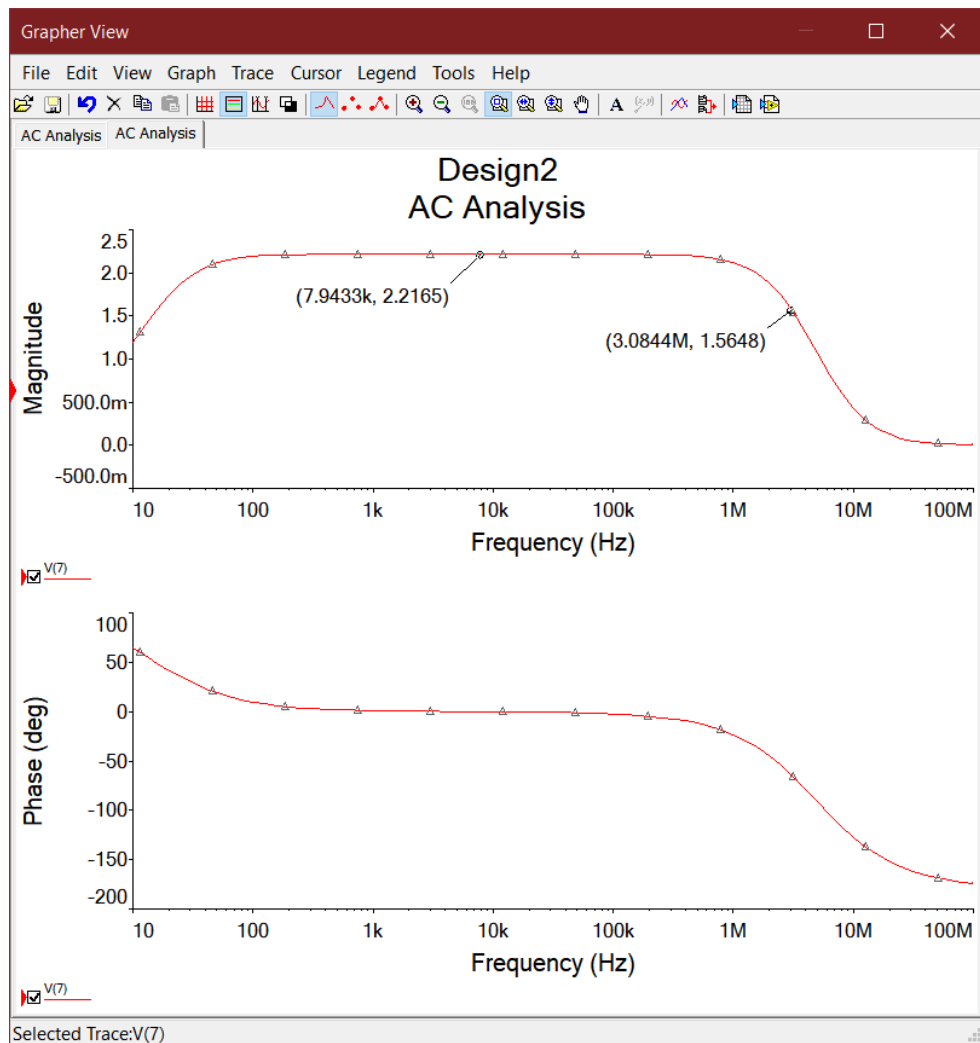


Рисунок 8 - Общая база. Частотный анализ

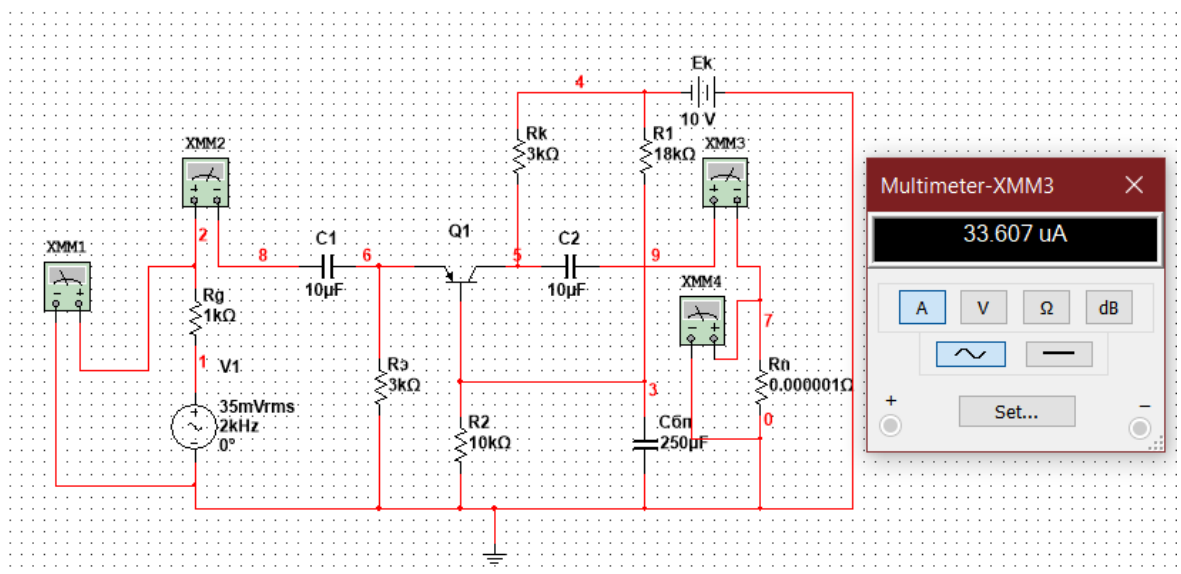


Рисунок 9 - Общая база. Определение тока короткого замыкания

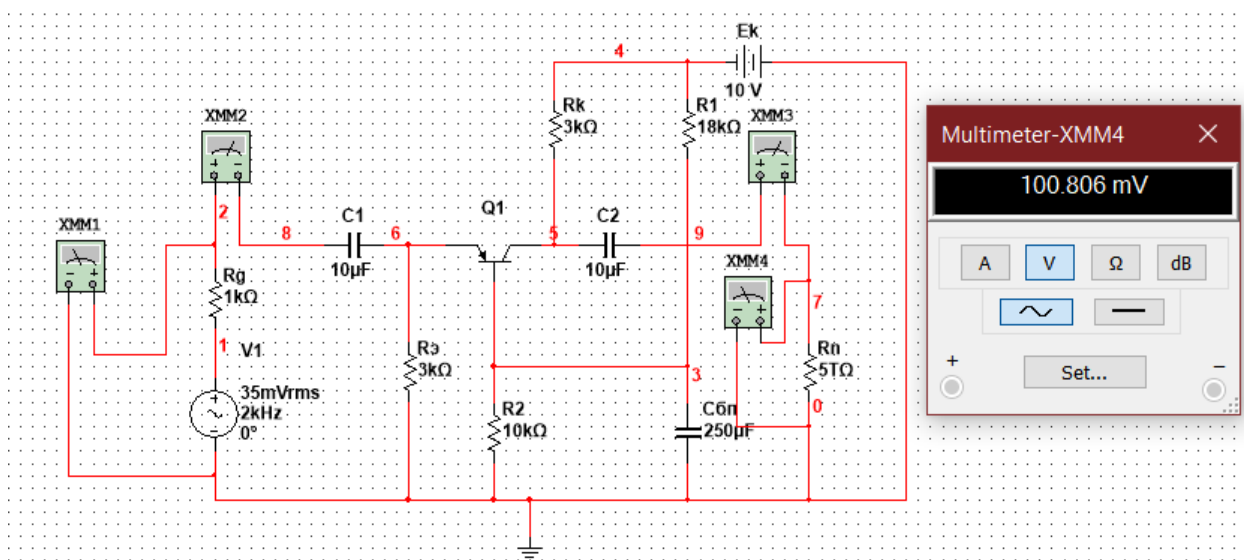


Рисунок 10 - Общая база. Определение напряжения холостого хода

Выходное сопротивление ищется следующим образом:

$$U_{xx} = 100.806 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$J_{кз} = 33.607 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{xx}}{J_{кз}} = \frac{100.806 \cdot 10^{-3}}{33.607 \cdot 10^{-6}} = 2999.55 \text{ Ом}$$

Тогда граничную частоту можно найти так:

$$U_{max} = 2.2165 \text{ В}$$

$$\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = 1.5648 \text{ В}$$

$$f_B = 3.0844 \text{ МГц}$$

Таблица 3 - Общая база

| | Rn Ом | Uвх В | Iвх А | Uвых В | Iвых А | Rвх Ом | Ki | Ku | Kp |
|---|--------|------------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|---------|--------|
| 1 | 200 | 876.618e-6 | 34.165e-6 | 6.301e-3 | 31.507e-6 | 25.658 | 0.922 | 7.188 | 6.627 |
| 2 | 1000 | 876.618e-6 | 34.165e-6 | 25.203e-3 | 25.205e-6 | 25.658 | 0.738 | 28.75 | 21.212 |
| 3 | 10000 | 876.618e-6 | 34.165e-6 | 77.567e-3 | 7.75e-6 | 25.658 | 0.227 | 88.484 | 20.086 |
| 4 | 250000 | 876.618e-6 | 34.165e-6 | 99.631e-3 | 398.02e-9 | 25.658 | 0.012 | 113.654 | 1.364 |

Схема с общим коллектором

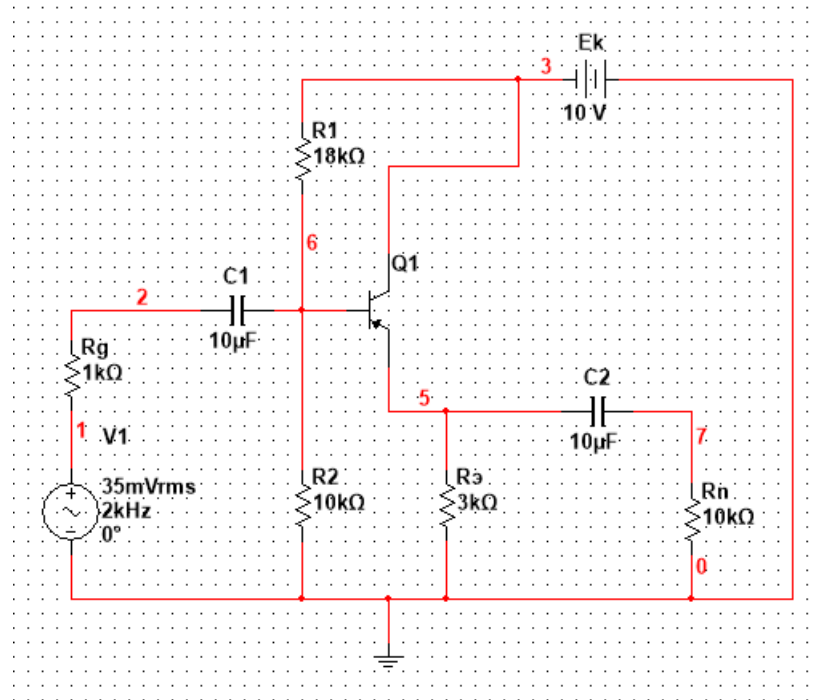


Рисунок 11 - Схема с общим коллектором

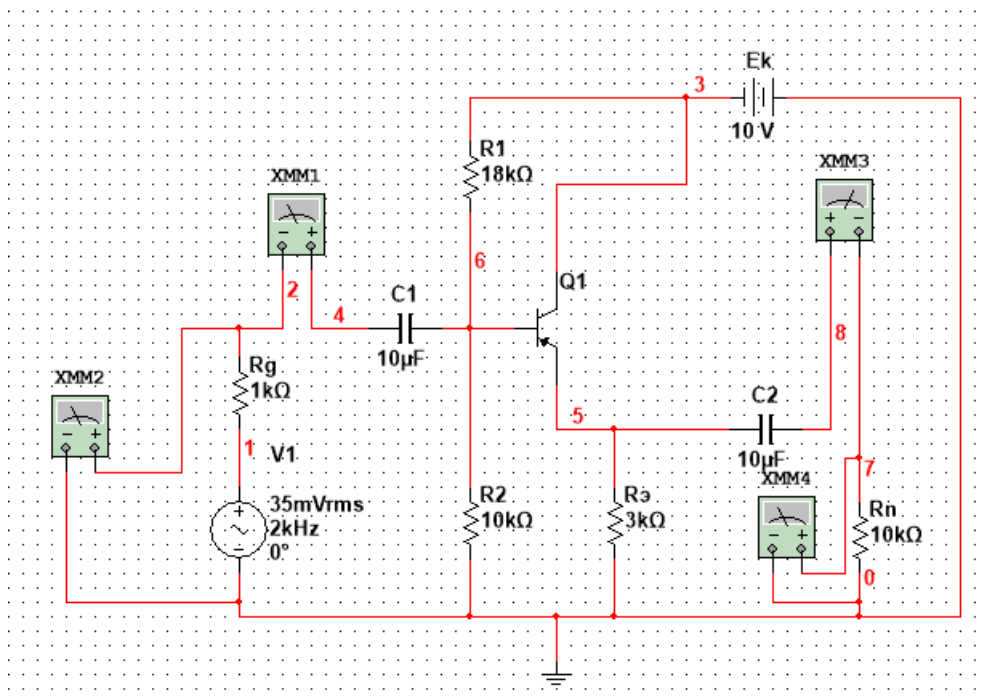


Рисунок 12 - Общий коллектор. Оценка малосигнальных параметров

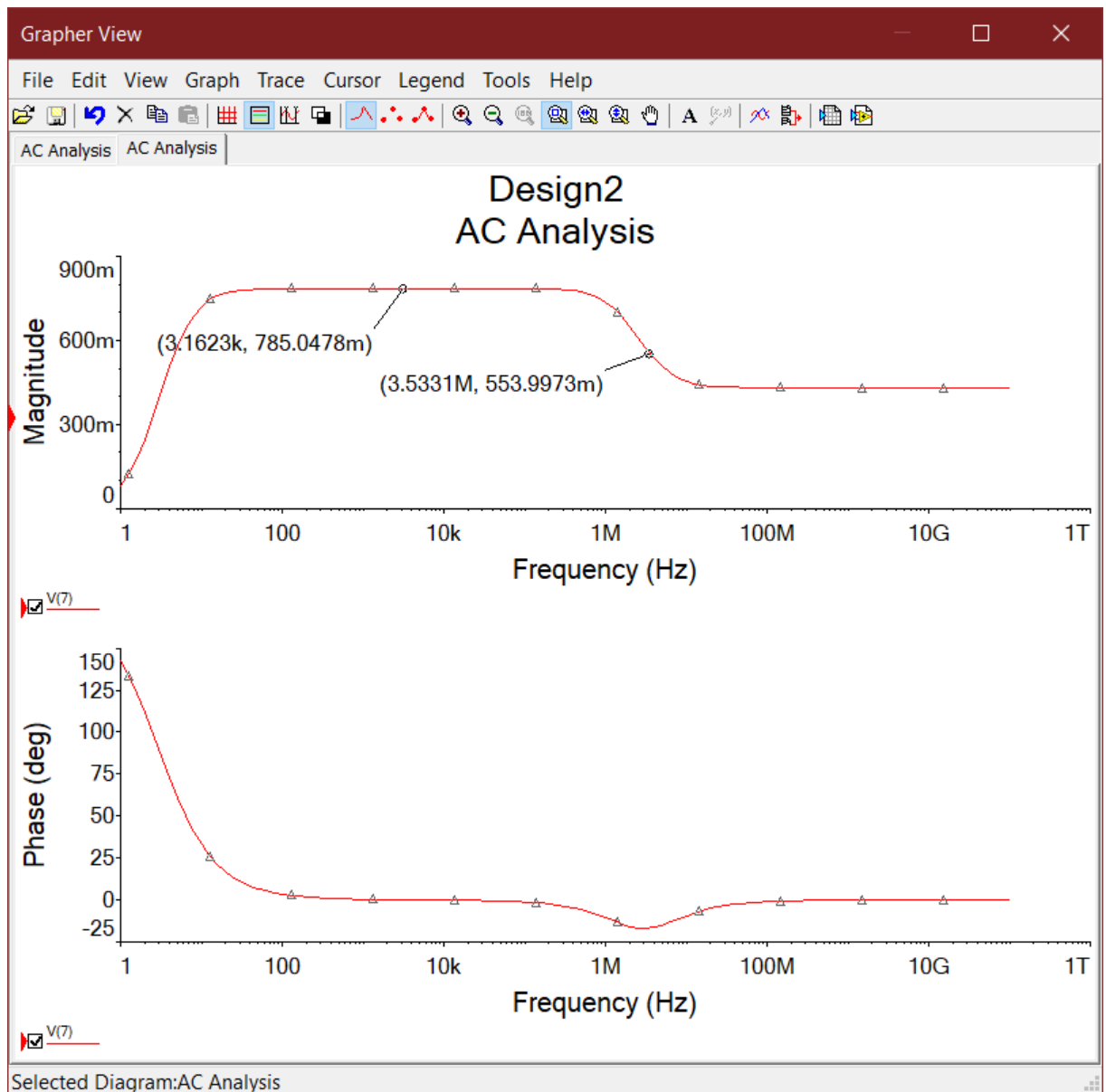


Рисунок 13 - Общий коллектор. Частотный анализ

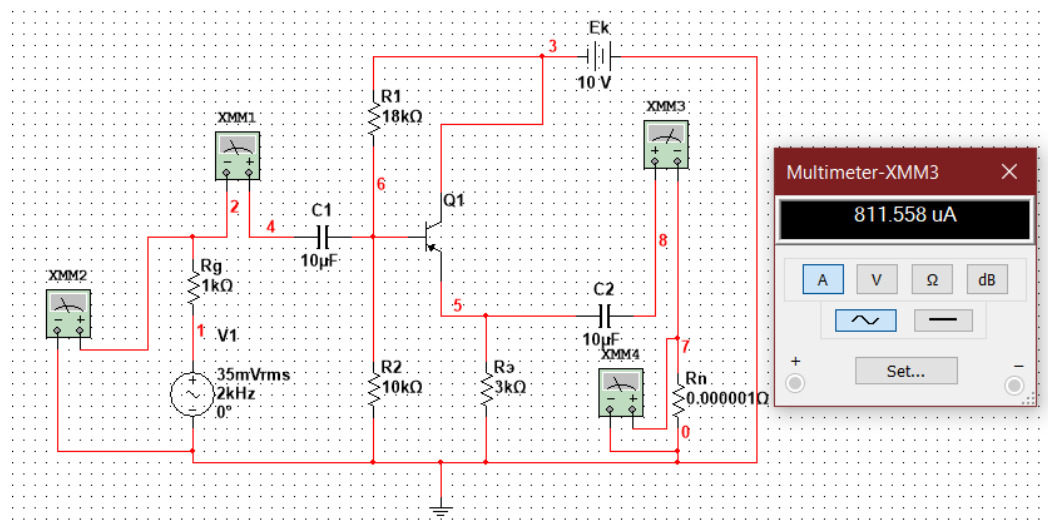


Рисунок 14 - Общий коллектор. Определение тока короткого замыкания

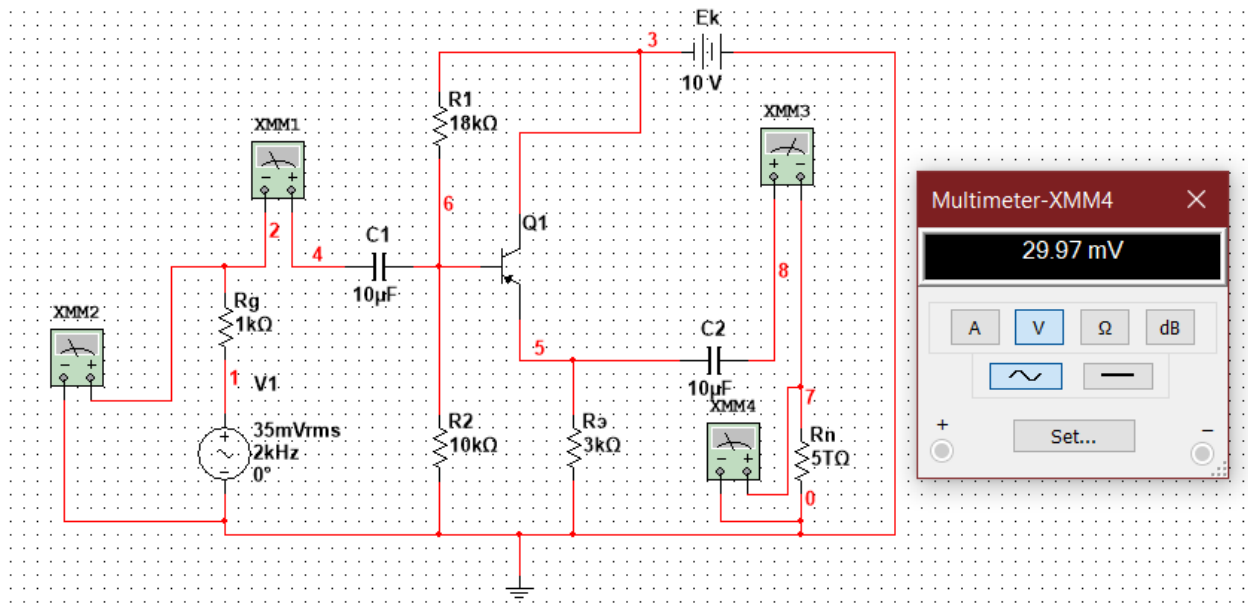


Рисунок 15 - Общий коллектор. Определение напряжения холостого хода

Найдём выходное сопротивление:

$$U_{xx} = 29.97 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$J_{кз} = 811.558 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

$$R_{вых} = \frac{U_{xx}}{J_{кз}} = \frac{29.97 \cdot 10^{-3}}{811.558 \cdot 10^{-6}} = 26.93 \text{ Ом}$$

Найдём граничную частоту:

$$U_{max} = 785.0478 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$\frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = 553.9973 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$f_B = 3.5331 \text{ МГц}$$

Таблица 4 - Общий коллектор

| | Rn Ом | Uвх В | Iвх А | Uвых В | Iвых А | Rвх Ом | Ki | Ku | Kp |
|---|--------|-----------|----------|-----------|------------|---------|------|------|--------|
| 1 | 200 | 29.301e-3 | 5.697e-6 | 25.865e-3 | 129.326e-6 | 5143.23 | 22.7 | 0.88 | 19.976 |
| 2 | 1000 | 30.01e-3 | 4.988e-6 | 29.056e-3 | 29.029e-6 | 6016.44 | 5.82 | 0.97 | 5.6454 |
| 3 | 10000 | 30.195e-3 | 4.804e-6 | 29.876e-3 | 2.985e-6 | 6285.39 | 0.62 | 0.99 | 0.6138 |
| 4 | 250000 | 30.215e-3 | 4.784e-6 | 29.966e-3 | 119.314e-9 | 6311.89 | 0.02 | 0.99 | 0.0198 |

Аналитический расчёт

Схема с общим эмиттером

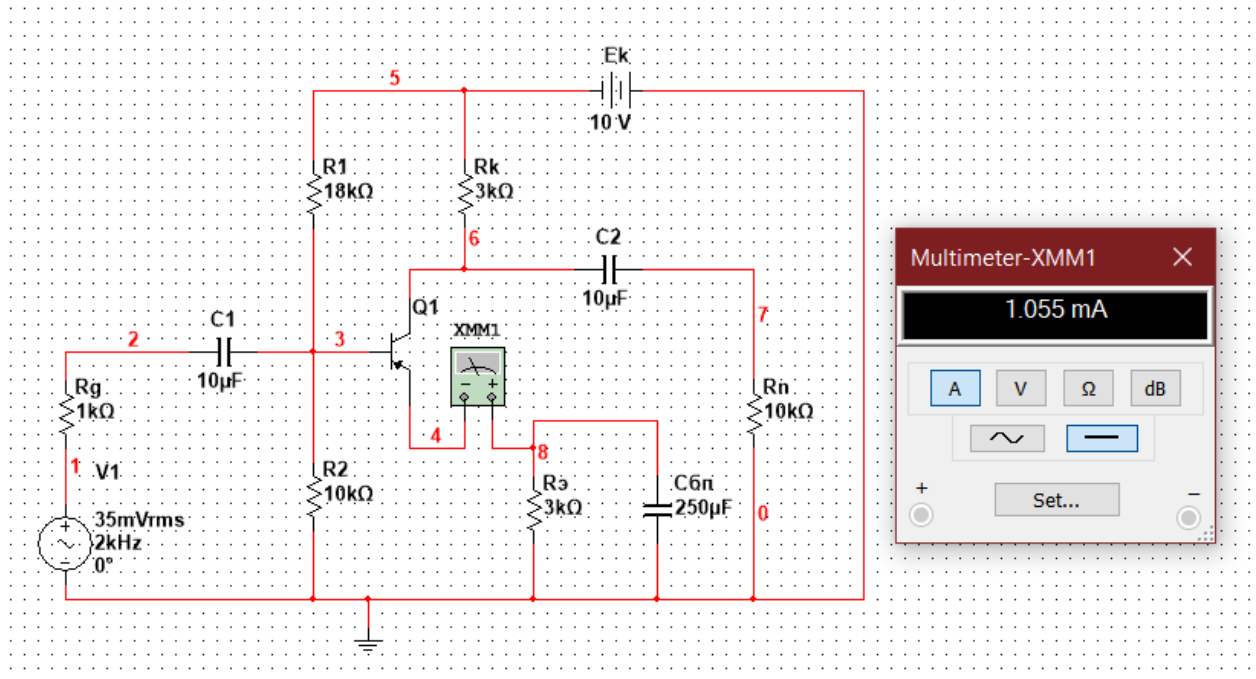


Рисунок 16 - Общий эмиттер. Определение тока эмиттера

Ток эмиттера:

$$I_{ЭА} = 1.055 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Вычислим входное сопротивление:

$$R_6 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 6.42857 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{вх тр оэ}} = r_{\text{баз}} + r_{\text{эм}}(1 + B) = \frac{26}{1000 I_{ЭА}}(1 + B) = 2.98199 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{вх тр оэ}} R_6}{R_{\text{вх тр оэ}} + R_6} = 2.03707 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Выходное сопротивление:

$$R_{\text{вых}} \approx R_k \approx 3000 \text{ Ом}$$

Коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{R_6}{R_6 + R_{\text{вх тр оэ}}} B \frac{R_k}{R_k + R_n} = 120 \frac{6.42857 \cdot 10^3}{6.42857 \cdot 10^3 + 2.98199 \cdot 10^3} \frac{3000}{3000 + R_n}$$

Коэффициент передачи по напряжению:

$$R_{kn} = \frac{R_k R_n}{R_k + R_n} = \frac{3000 R_n}{3000 + R_n}$$

$$K_U = \frac{B R_{kn}}{R_{\text{вх тр оз}}} = \frac{120 R_{kn}}{2.98199 \cdot 10^3}$$

Коэффициент мощности:

$$K_p = K_i K_U$$

Коэффициент G:

$$r_6 \approx 0$$

$$R'_r = \frac{R_r R_6}{R_r + R_6} = 1604.278 \text{ Ом}$$

$$G = \frac{R'_r + r_6 + r_3}{R'_r + R_{\text{вх тр оз}}} = 8.4$$

Постоянная времени в области верхних частот:

$$C_{кз} = C_{6к}(B + 1) = 1.452 \cdot 10^9 \text{ Ф}$$

$$\tau_B = \frac{B + 1}{2\pi f_\alpha} = 4.81444 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$$

$$\tau_B = G(\tau_B + C_{кз} R_{kn}) + C_H R_{kn} = 8.86522 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$$

Верхняя граничная частота:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B} = 1,79527 \cdot 10^5 \text{ Гц}$$

Таблица 5 - Общий эмиттер

| | Rn Ом | R вх Ом | R вых Ом | Ki | Ku | Kp | Δki | Δku | Δkp | Бki | Бku | Бkp |
|---|--------|---------|----------|--------|---------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|--------|
| 1 | 200 | 2037.07 | 3000 | 76.827 | 7.581 | 582.401 | 3.867 | 1.321 | 125.672 | 5.031 | 17.421 | 21.578 |
| 2 | 1000 | | | 61.466 | 30.204 | 1856.5 | 3.096 | 5.134 | 393.163 | 5.036 | 16.997 | 21.178 |
| 3 | 10000 | | | 18.917 | 92.865 | 1756.75 | 0.967 | 15.745 | 372.45 | 5.113 | 16.955 | 21.201 |
| 4 | 250000 | | | 0.972 | 119.293 | 115.956 | 0.082 | 24.013 | 31.157 | 8.438 | 20.13 | 26.87 |

Схема с общей базой

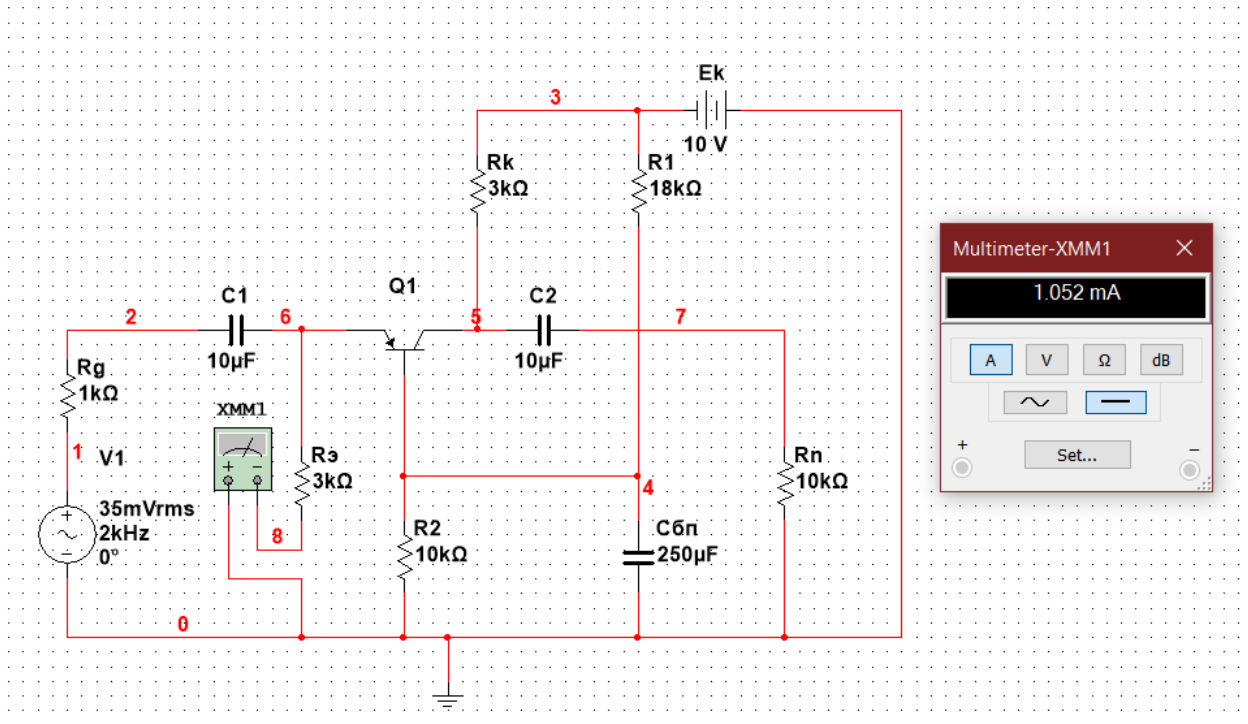


Рисунок 17 - Общая база. Определение тока эмиттера

Ток эмиттера:

$$I_{ЭА} = 1.052 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

Входное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\frac{R_{\text{вх тр об}}}{B+1} R_{\text{э}}}{\frac{R_{\text{вх тр об}}}{B+1} + R_{\text{э}}} = 24.51 \text{ Ом}$$

Коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{R_{\text{э}} \frac{B}{B+1} R_{\text{к}}}{R_{\text{э}} + \frac{R_{\text{вх тр об}}}{B+1} (R_{\text{к}} + R_{\text{н}})}$$

Коэффициент G:

$$G = \frac{R'_{\text{г}} + r_{\text{б}} + r_{\text{э}}}{R'_{\text{г}}(B+1) + R_{\text{вх тр об}}} = \frac{\frac{R_{\text{г}} R_{\text{б}}}{R_{\text{г}} + R_{\text{б}}} + r_{\text{э}}}{\frac{R_{\text{г}} R_{\text{б}}}{R_{\text{г}} + R_{\text{б}}} (B+1) + R_{\text{вх тр об}}} = 8.26446 \cdot 10^{-3}$$

Постоянная времени в области верхних частот:

$$C_{\text{кэ}} = C_{\text{бк}}(B+1) = 1.452 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$\tau_{\text{в}} = G(\tau_{\text{б}} + C_{\text{кэ}} R_{\text{кн}}) = 3.16712 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$$

Верхняя граничная частота:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B} = 5.02523 \cdot 10^6 \text{ Гц}$$

Таблица 6 - Общая база

| | R _n Ом | R _{вх} Ом | R _{вых} Ом | K _i | K _u | K _p | Δk _i | Δk _u | Δk _p | Б _{ki} | Б _{ku} | Б _{kp} |
|---|-------------------|--------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 200 | 24.513 | 3000 | 1.087 | 7.524 | 8.181 | 0.165 | 0.336 | 1.554 | 15.205 | 4.464 | 18.99 |
| 2 | 1000 | | | 0.876 | 30.095 | 26.372 | 0.138 | 1.345 | 5.154 | 15.779 | 4.47 | 19.544 |
| 3 | 10000 | | | 0.275 | 92.601 | 25.487 | 0.048 | 4.117 | 5.401 | 17.525 | 4.446 | 21.192 |
| 4 | 250000 | | | 0.014 | 118.954 | 1.697 | 0.002 | 5.3 | 0.333 | 15.894 | 4.455 | 19.641 |

Схема с общим коллектором

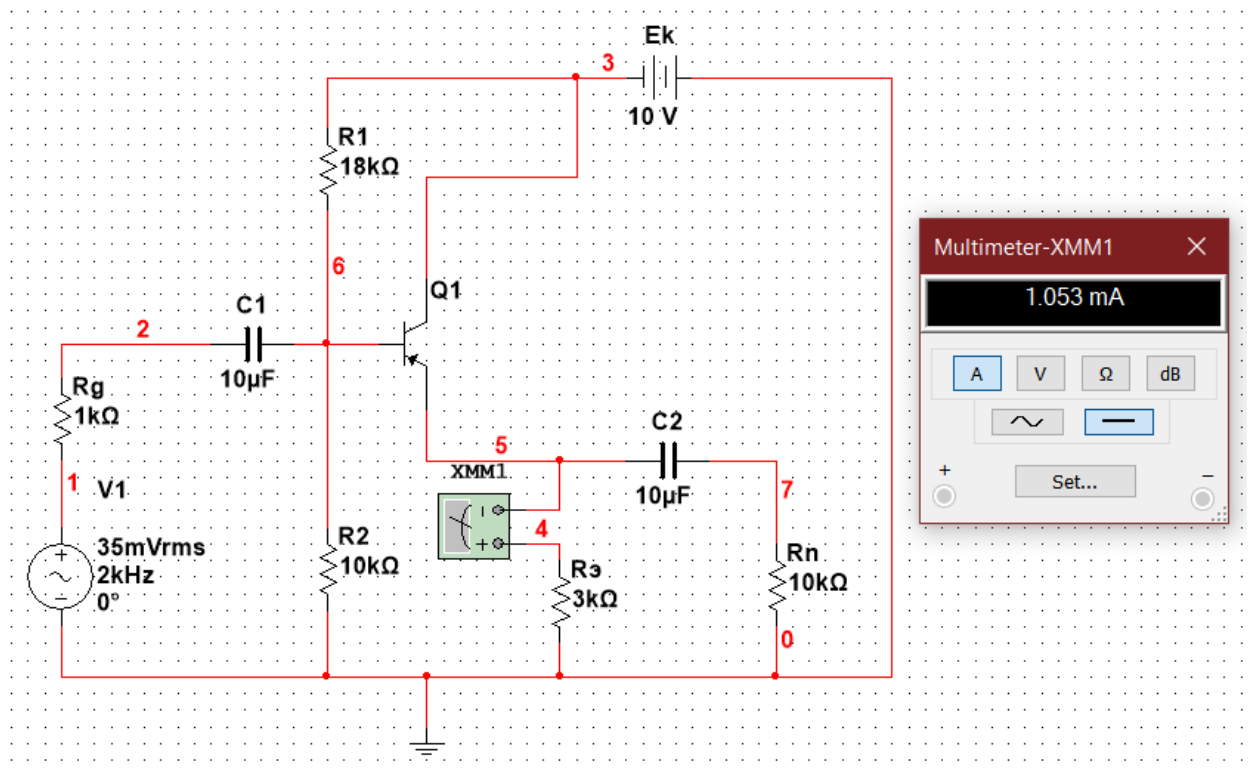


Рисунок 18 - Общий коллектор. Определение тока эмиттера

Ток эмиттера:

$$I_{ЭА} = 1.053 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

Входное сопротивление:

$$R_{BX} = \frac{R_{BX \text{ тр ок}} + (B + 1)R_{ЭН}R_6}{R_{BX \text{ тр ок}} + (B + 1)R_{ЭН} + R_6},$$

$$R_{ЭН} = \frac{R_3 R_H}{R_3 + R_H}$$

Выходное сопротивление:

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_3 \left(r_{\text{эм}} + \frac{R'_r}{B+1} \right)}{R_3 + r_{\text{эм}} + \frac{R'_r}{B+1}},$$

$$R'_r = \frac{R_r R_6}{R_r + R_6}$$

Коэффициент передачи по току:

$$K_i = \frac{R_6(B+1)R_3}{R_6 + R_{\text{вх тр ок}} + (B+1)R_{\text{эн}}(R_3 + R_n)}$$

Коэффициент передачи по напряжению:

$$K_U = \frac{(B+1)R_{\text{эн}}}{R_{\text{вх тр ок}} + (B+1)R_{\text{эн}}}$$

Коэффициент G:

$$G = \frac{R'_r + R_3 + R_{\text{эн}}}{R'_r + R_{\text{вх тр ок}} + (B+1)R_{\text{эн}}} = 1.1209 \cdot 10^{-2}$$

Постоянная времени в области верхних частот:

$$C_{\text{кэ}} = C_{\text{бк}}(B+1) = 1.452 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$\tau_{\text{в}} = G(\tau_{\text{в}} + C_{\text{кэ}} R_{\text{кн}}) = 4.29551 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$$

Верхняя граничная частота:

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2\pi\tau_{\text{в}}} = 3.70514 \cdot 10^6 \text{ Гц}$$

Таблица 7 - Общий коллектор

| | Rn Ом | R вх Ом | R вых Ом | Ki | Ku | Kp | Δki | Δku | Δkp | бki | бku | бkp |
|---|--------|---------|----------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 200 | 5145.54 | 31.509 | 22.633 | 0.884 | 20.01 | 0.067 | 0.004 | 0.034 | 0.296 | 4.656 | 0.171 |
| 2 | 1000 | 6016.27 | | 5.819 | 0.968 | 5.634 | 0.0012 | 0.001 | 0.012 | 0.02 | 1.91 | 0.211 |
| 3 | 10000 | 6285.4 | | 6.219 | 0.989 | 0.615 | 0.0019 | 0.0005 | 0.0015 | 0.303 | 5.926 | 0.244 |
| 4 | 250000 | 6316.31 | | 0.025 | 0.992 | 0.025 | 0.0051 | 0.002 | 0.005 | 20.18 | 1.754 | 20.32 |

Вывод

Изучено, как различные способы включения биполярного транзистора и величина сопротивления нагрузки влияют на свойства усилительного каскада.