

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 1
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра радиоэлектронных устройств и систем

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 1
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Воронеж 2022

УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5

Составители: Ю. В. Худяков, А. В. Русанов

Схемотехника аналоговых электронных устройств: методические указания к выполнению лабораторной работы № 1 для студентов специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Ю. В. Худяков, А. В. Русанов. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022.– 38 с.

В методических указаниях рассматриваются вопросы определения входных и выходных сопротивлений однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах. Тематика лабораторной работы соответствует рабочей программе дисциплины «Схемотехника аналоговых электронных устройств».

Предназначены для студентов 2 курса специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле СхАЭУ_УМД_ЛР1.pdf.

Ил. 26. Табл. 8. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 721:53(073)
ББК 38.113я7-5**

**Рецензент – А. В. Останков, д-р техн. наук, профессор
кафедры радиотехники ВГТУ**

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания к выполнению лабораторной работы составлены в соответствии с программой курса «Основы теории радиосистем передачи информации» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Лабораторная работа посвящена изучению характеристик однокаскадных резистивных усилителей на биполярных транзисторах. Моделирование осуществляется в программном обеспечении EWB5.12 и Micro-CaP8.

Методические указания содержат авторские иллюстрации.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

1.1. ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Цели лабораторной работы:

- Разработка исходных моделей однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе представлений о принципах задания начальной рабочей точки на проходной характеристике усилителей с общими эмиттером, базой и коллектором.
- Разработка моделей для расчета входных и выходных сопротивлений однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах для схем с общими эмиттером, базой и коллектором.

Транзистор в каждой группе выбирается согласно порядковому номеру в списке группы согласно таблице 1.

Таблица 1

Варианты заданий

№ варианта	РП-XX1	РП-XX2	РП-XX3	РП-XX4
1	BC489	BC546	КТ3102А	Q2N2369
2	D40D1	КТ653В	BC184	2N3904
3	BC517	BC639	КТ3117А	BC107
4	MPQ100	2N4401	BC237	Q2N1613
5	BC546	BC394	КТ312В	BC108
6	BC639	BF258	BC337	Q2N1711
7	2N2218	Q2N3019	КТ315В	Q2N1893
8	BC846А	2N5830	BC368	BC394
9	2N2222А	Q2N3019	КТ316Д	Q2N2219
10	BC848С	Q2N5550	BC372	BF258
11	2N4401	2N2712	КТ608А	Q2N3019

№ варианта	РП-XX1	РП-XX2	РП-XX3	РП-XX4
12	Q2N2369	KT3102A	BC489A	BC182
13	KT316Д	KT3117A	D40D1	2N5830
14	2N3904	BC184	BC517	BC183
15	2N2712	KT315B	MPQ100	Q2N5550
16	BC107	BC368	MPQ2222	KT3102A
17	Q2N1613	KT316Д	2N2218	BC546
18	BC546	BC372	BC846A	BC237
19	BC237	KT608A	2N2222A	Q2N3019
20	Q2N3019	BC546	BC848C	2N5830
21	2N5830	BC237	2N4401	BC517

1.2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Содержанием практической части работы является составление моделей однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе представлений о принципах задания начальной рабочей точки на проходной характеристике усилителей с общими эмиттером, базой и коллектором, а также разработка моделей для расчета входных и выходных сопротивлений однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах для схем с общими эмиттером, базой и коллектором.

Выполнение лабораторной работы проводится на ПЭВМ с использованием прикладных программ «EWB5.12» и «Micro-CaP8».

Правила безопасности при выполнении лабораторной работы являются типовыми.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Рассмотрим схемы включения транзистора.

Имеются три основные схемы включения транзистора в электронные цепи.

1 Схема с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 1). Общим выводом здесь является эмиттер: входной сигнал подается между базой и эмиттером, а выходной сигнал снимается между коллектором и эмиттером. Эта схема получила наиболее широкое распространение из-за своей гибкости и высокого коэффициента усиления.

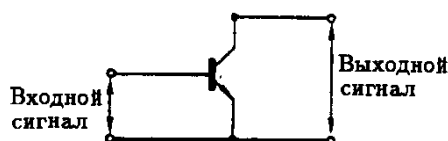


Рис. 1. Схема с общим эмиттером

2. Схема с общей базой (ОБ) (рис. 2). Базовый вывод транзистора является общим выводом для входного и выходного сигналов

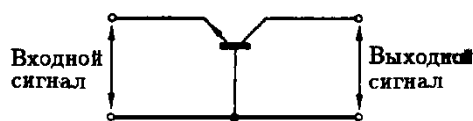


Рис. 2. Схема с общей базой

3. Схема с общим коллектором (ОК) (рис. 3). В этой схеме общим выводом для входного и выходного сигналов является коллектор. Ее называют также эмиттерным повторителем.

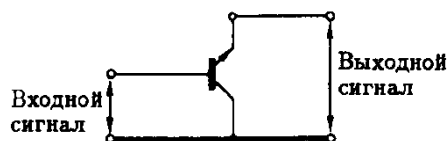


Рис. 3. Схема с общим коллектором

На внутреннем уровне транзистор работает во всех схемах включения совершенно одинаково, тогда как внешнее поведение его в каждом случае различно.

Каждая схема включения характеризуется своим собственным набором основных параметров, в который входят коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления и АЧХ.

В таблице 2 приведены входные и выходные сопротивления, а также величина усиления по напряжению, току и мощности для трех схем включения.

Таблица 2

Параметры различных схем включения

Параметр Тип цепи	Входное сопротив- ление	Выходное сопротив- ление	Усиление по напря- жению	Усиление по току	Усиление по мощности
Общая база	Низкое	Высокое	Высокое	Меньше 1	Среднее
Общий эмиттер	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Высокое
Общий коллектор	Высокое	Низкое	Меньше 1	Среднее	Среднее

3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВАРИАНТА ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА

3.1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПО СХЕМЕ ОЭ НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

Тип транзистора задается преподавателем.

3.1.1. МОДЕЛЬ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ УСИЛИТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СЕРЕДИНЕ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Амплитудной характеристикой усилителя по схеме с ОЭ называется зависимость выходного напряжения на нагрузке от напряжения база – эмиттер $U_{б-э}$.

На рисунке 4 представлен снимок с экрана модели резистивного усилителя напряжения НЧ по схеме с ОЭ. Литературный анализ аналогичных схем усилителей показал, что наиболее часто значения сопротивления коллекторного резистора R_k лежит в пределах от 1 кОм до 4,7 кОм. Для нашей модели выберем среднее значение для этого интервала сопротивлений, то есть 3 кОм.

В качестве источника начального смещения $E_{см}$ используется батарея элементов питания GB1 с напряжением 708 мВ, что соответствует середине линейного участка амплитудной характеристики. При этом постоянное напряжение $U_{вых0}$ на коллекторе и измеренное вольтметром PV1 составляет около половины напряжения источника питания GB3.

Линейный участок амплитудной характеристики по выходу обычно находится в пределах от 1 В до $(E_{пит}-1)$ В, то есть от 1 до 11 в. Середина этого линейного участка соответствует 6 В, а его размах составляет 10 В. Тогда амплитуда выходного синусоидального сигнала, которая не будет подвержена нелинейным искажениям будет равна 5 В, что соответствует 3,3 В действующего напряжения. С запасом выберем действующее значение выходного гармонического сигнала равное приблизительно 2 В. Путем подбора определим величину напряжения входного синусоидального сигнала, которая равна 10 мВ.

Напряжение $U_{б-э}$ будет равно

$$U_{б-э} = E_{см} + 1,41U_{вх} \cos \omega t = 708 + 14,1 \cos \omega t, \text{ мВ}, \quad (1)$$

то есть в процессе работы напряжение между базой и эмиттером изменяется от 694 до 722 мВ.

При этом среднее значение эффективного значения тока базы, как следует из показания амперметра PA2, равно $I_{бх.0} = 106,9$ мкА, а его эффективное

изменения, измеренное амперметром PA1, составляют $I_{BX} = 26,55 \text{ мкА}$. Таким образом эффективное значение тока базы изменяется от 80 мкА до 133 мкА.

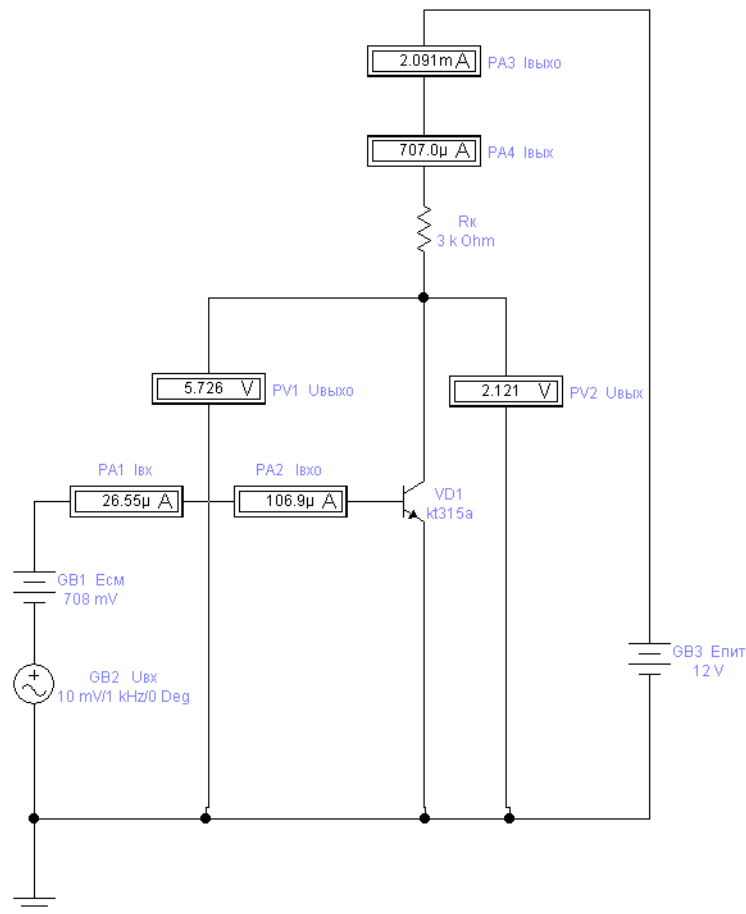


Рис. 4. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОЭ для середины линейного участка амплитудной характеристики

В представленной модели входное сопротивление для переменного тока R_{BX} имеет значение

$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{26,55 \cdot 10^{-6}} = 376 \text{ Ом}. \quad (2)$$

Аналогичный параметр для постоянного тока R_{BXO} равен

$$R_{BXO} = \frac{E_{CM}}{I_{BXO}} = \frac{708 \cdot 10^{-3}}{106,9 \cdot 10^{-6}} = 6,6 \text{ кОм}. \quad (3)$$

Динамический коэффициент усиления по постоянному току β_0 для этой рабочей точки равен

$$\beta_0 = \frac{I_{BЫХО}}{I_{BXO}} = \frac{2091}{106,9} = 19,5, \quad (4)$$

а динамический коэффициент усиления по переменному току β_0 для этой рабочей точки равен

$$\beta = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{707}{26,5} = 26,7. \quad (5)$$

Отличие коэффициентов β_0 и β указывают на нелинейность характеристики прямой передачи $I_{\text{ВЫХО}} = f(I_{\text{ВХО}})$.

Для проведения анализа полученных значений входных сопротивлений воспользуемся проходной (сквозной) статической характеристикой усилителя $I_{\text{КО}} = f(U_{\text{ВХО}})$. Статическая характеристика отличается от динамической отсутствием в модели источника переменного входного напряжения и коллекторного резистора $R_{\text{К}}$, как показано на рисунке 5.

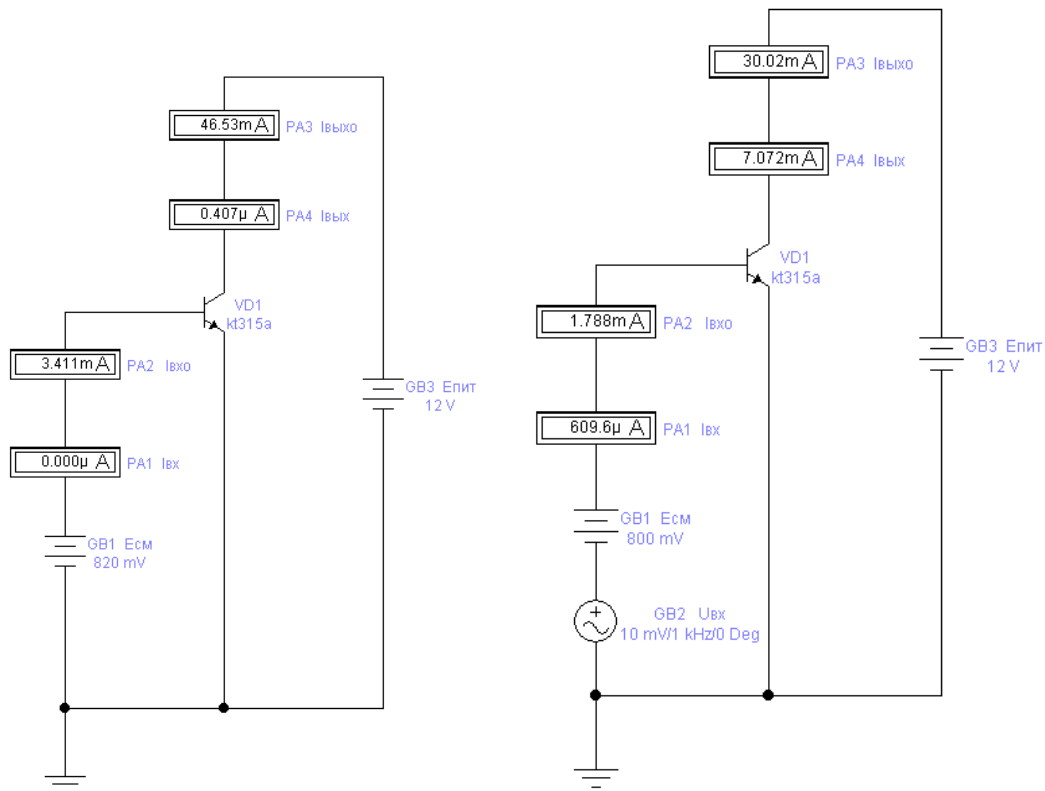


Рис. 5. Снимок с экрана модели для измерения статических характеристик

Для модели на рисунке 5 проходная (сквозная) статическая характеристика усилителя $I_{\text{КО}} = f(U_{\text{ВХО}})$ будет иметь вид $I_{\text{ВЫХО}} = f(E_{\text{СМ}})$. Построим эту характеристику по точкам при отсутствии источника переменного напряжения GB2 и коллекторного резистора $R_{\text{К}}$. Координаты каждой точки занесем в таблицу 3.

Таблица 3

Координаты точек проходной характеристики усилителя

$E_{\text{СМ}}, \text{ мВ}$	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820
$I_{\text{ВЫХО}}, \text{ мА}$	0,05	0,1	0,18	0,36	0,75	1,5	3	5,75	10,4	17,8	29	46

На рисунке 6 представлена построенная по этим точкам проходная характеристика. На основе этой характеристики сопоставим значения входных сопротивлений при разных положениях рабочей точки или разных значениях напряжения смещения 708 мВ и 800 мВ.

В соответствии с моделью, представленной на рисунке 1, рабочая точка O_1 имеет координаты 707 мВ и 2 мА. Наклон прямой, соединяющей начало координат (0 мВ и 0 мА, на рисунке 3 не показан) с точкой O_1 пропорционален входному сопротивлению по постоянному току R_{BXO} .

$$R_{BXO} = \frac{E_{CM}}{I_{BXO}}. \quad (6)$$

Наклон касательной к этой точке пропорционален входному сопротивлению по переменному току $R_{\hat{\delta}\delta}$

$$R_{BX} = \frac{\Delta E_{CM}}{\Delta I_{BXO}}. \quad (7)$$

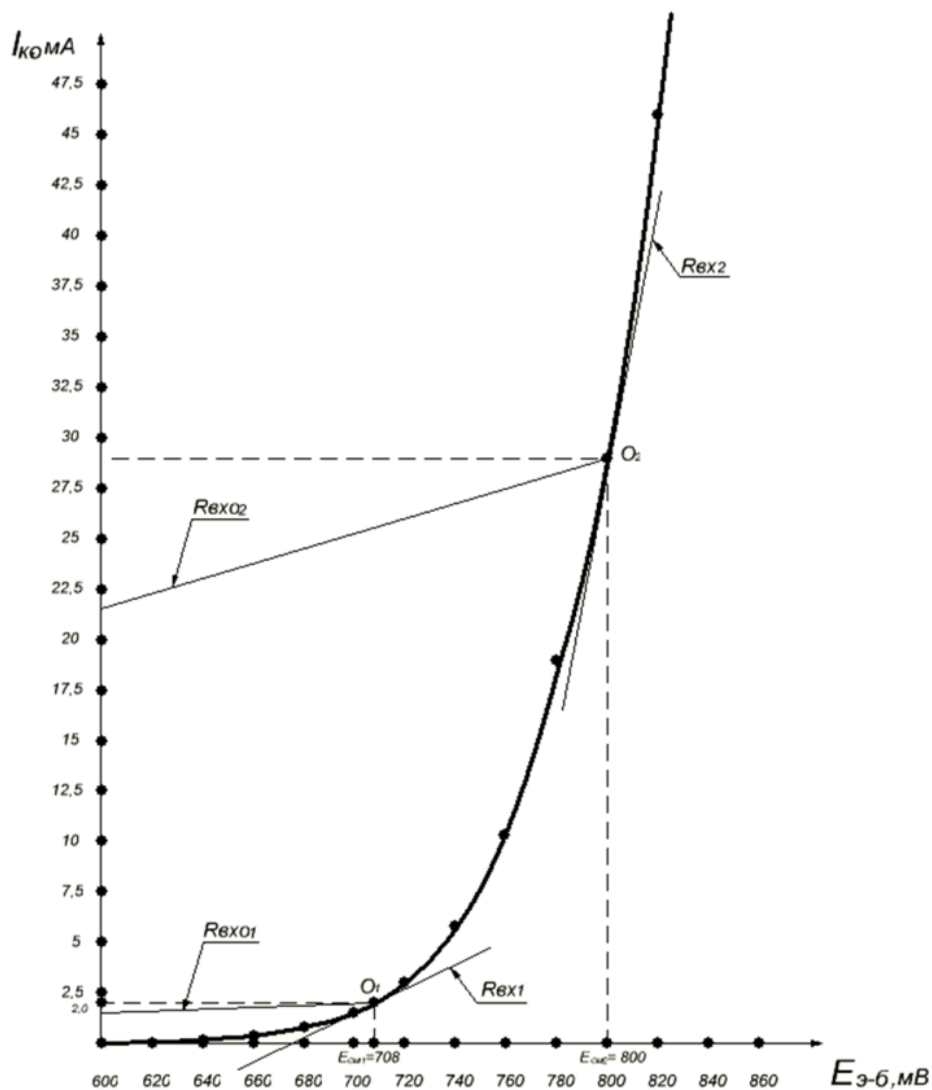


Рис. 6. Рабочие точки O_1 и O_2 на проходной статической характеристике

В соответствии с моделью, представленной на рисунке 5, рабочая точка O_2 имеет координаты 800 мВ и 29,3 мА. Наклон прямой, соединяющей начало координат (0 мВ и 0 мА, на рисунке 3 не показан) с точкой O_2 пропорционален входному сопротивлению по постоянному току $R_{вхо}$. Наклон касательной к этой точке пропорционален входному сопротивлению по переменному току $R_{вх}$. Из рисунка 6 следует, что входные сопротивления по постоянному току всегда больше аналогичного параметра по переменному току, так как касательная в данной точке не может пересекать график функции. При бóльшем значении напряжения смещения $E_{см}$ сопротивления по постоянному и переменному токам снижаются.

Определим зависимости $R_{вхо}$ и $R_{вх}$ от величины $E_{см}$ воспользовавшись моделью, представленной на рисунке 5. Исходные и расчетные данные сведем в таблицу 4.

Таблица 4

Исходные и расчетные данные для построение функций $R_{вхо} = f(E_{см})$ и $R_{вх} = f(E_{см})$

$E_{см}, \text{ мВ}$	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820
$I_{вхо}, \text{ мА}$	0,011	0,016	0,024	0,035	0,053	0,085	0,140	0,244	0,445	0,848	1,63	3,41
$\Delta I_{вхо}, \text{ мА}$	0,007	0,008	0,011	0,018	0,032	0,055	0,104	0,211	0,403	0,782	1,78	
$R_{вхо}, \text{ кОм}$	54,5	38,5	27,5	18,9	12,8	8,3	5,1	3,1	1,7	0,9	0,5	0,24
$\Delta E_{см}, \text{ мВ}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
$R_{вх}, \text{ кОм}$	2,9	2,5	1,8	1,1	0,6	0,36	0,19	0,09	0,05	0,026	0,012	

На рисунке 7 показаны функции $R_{вхо} = f(E_{см})$ и $R_{вх} = f(E_{см})$ для модели, представленной на рисунке 5.

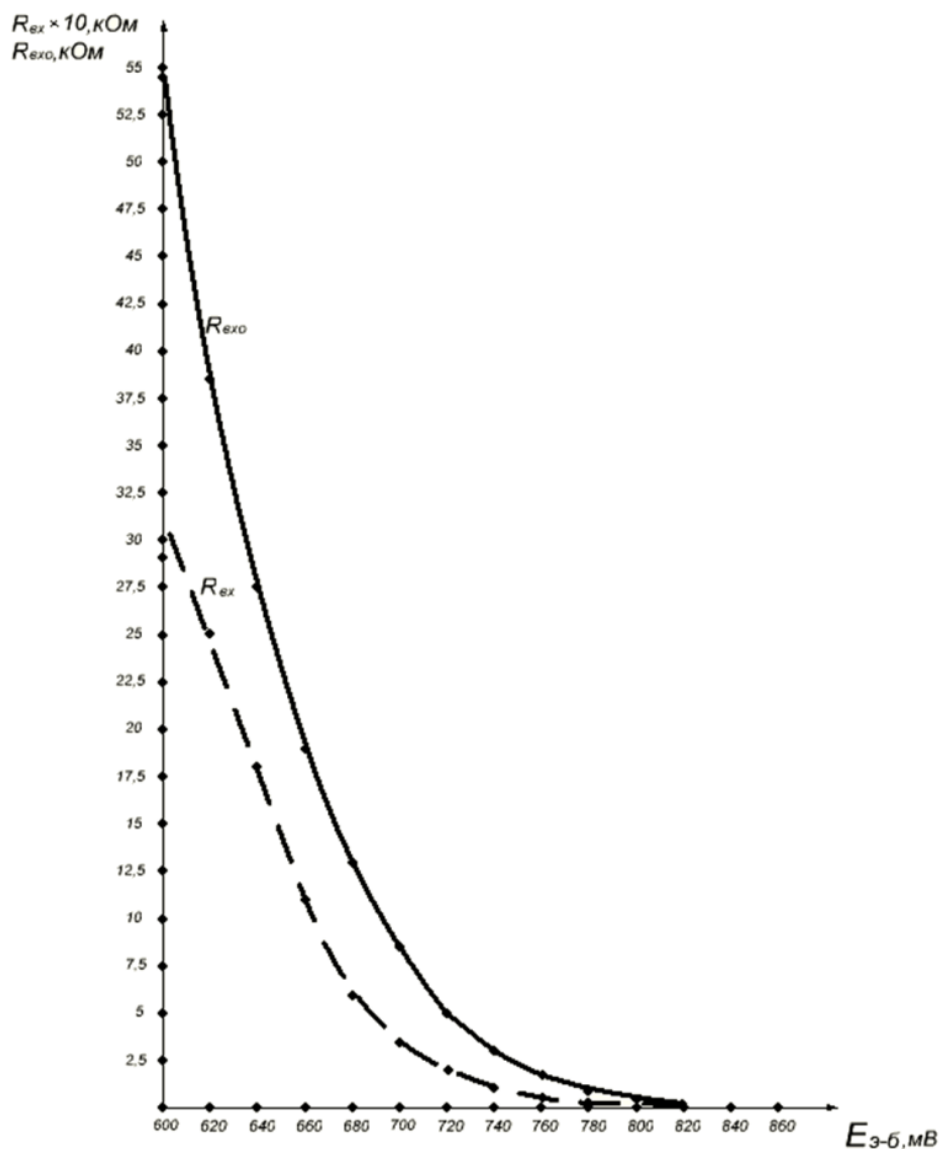


Рис. 7. Зависимость входных сопротивлений по постоянному $R_{вxo} = f(E_{см})$ и переменному $R_{вх} = f(E_{см})$ токам от положения рабочей точки $E_{см}$ (E_{3-6})

С ростом напряжения смещения $E_{см}$ входные сопротивления по постоянному и переменному токам снижаются в соответствии со входными характеристиками транзистора. Причем $R_{вxo}$ более, чем на порядок превышает $R_{вх}$, что указывает на большую крутизну входной характеристики транзистора.

Рассмотрим зависимость коэффициентов усиления по постоянному β_0 и переменному β токов от величины $E_{см}$ воспользовавшись моделью, представленной на рисунке 5. Исходные и расчетные данные сведем в таблицу 5.

Таблица 5

Исходные и расчетные данные для построения графиков функций $R_{\text{вх}0} = f(E_{\text{см}})$

и $R_{\text{вх}} = f(E_{\text{см}})$

$E_{\text{см}}, \text{ мВ}$	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820
$I_{\text{вх}0}, \text{ мА}$	0,011	0,016	0,024	0,035	0,053	0,085	0,140	0,244	0,445	0,848	1,63	3,41
$I_{\text{вх}}, \text{ мА}$	0,03	0,073	0,156	0,335	0,713	1,43	3	5,727	10,38	17,83	29,3	46,3
β_0	2,7	4,6	6,5	9,5	13,5	16,8	21,4	23,4	23,1	21	18	13,6
$\Delta I_{\text{вх}}, \text{ мА}$	0,007	0,008	0,011	0,018	0,032	0,055	0,104	0,211	0,403	0,782	1,78	
$\Delta I_{\text{вх}}, \text{ мА}$	0,043	0,083	0,179	0,378	0,717	1,57	2,73	4,65	7,45	11,5	17	
β	6,1	10,4	16,3	21	22,4	28,5	26,5	22	18,5	14,7	9,6	

Коэффициент усиления по постоянному току β_0 определяется как

$$\beta_0 = \frac{I_{\text{вх}0}}{I_{\text{вх}}}, \quad (8)$$

а коэффициент усиления по переменному току β определяется по формуле

$$\beta = \frac{\Delta I_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{вх}}}. \quad (9)$$

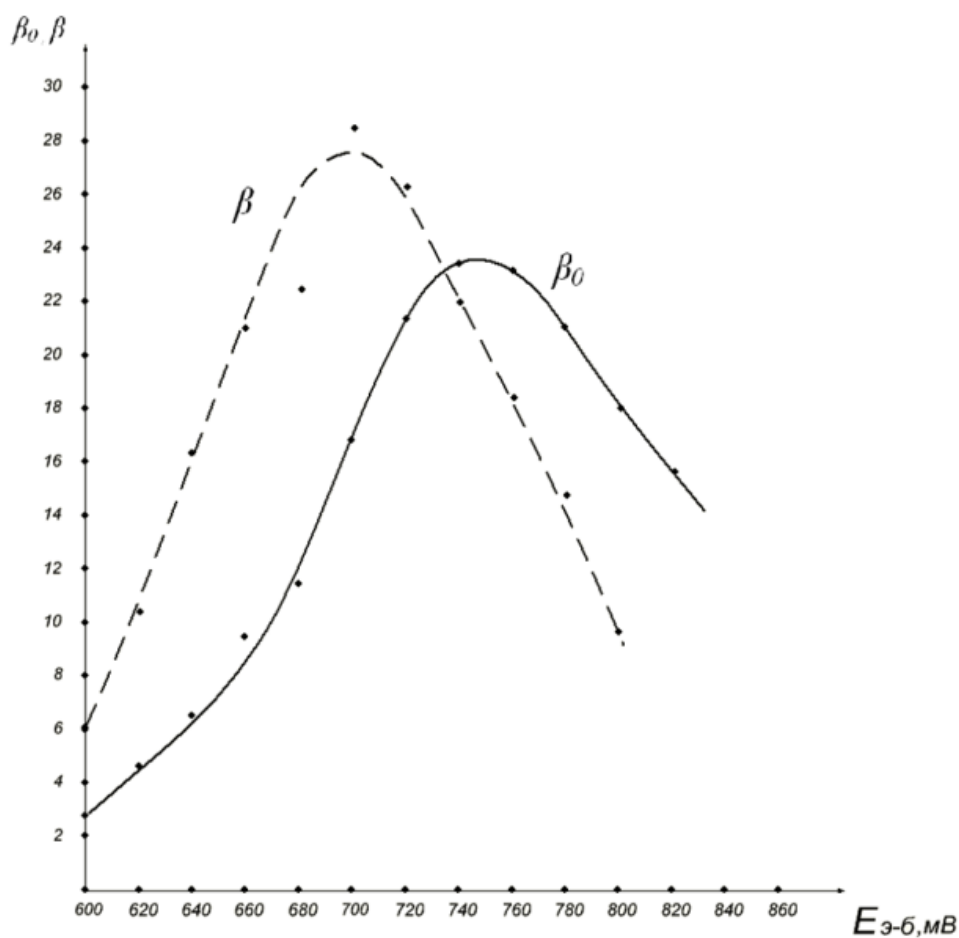


Рис. 8. Зависимость коэффициентов усиления по постоянному β_0 и переменному β токам от положения рабочей точки $E_{\text{см}}$ ($E_{3-б}$)

С ростом тока эмиттера коэффициент передачи тока базы в начале повышается вследствие увеличения напряженности внутреннего поля базы, ускоряющего перенос дырок через базу к коллектору и этим уменьшающего рекомбинационные потери на поверхности базы. При значительном увеличении тока эмиттера коэффициент передачи тока базы будет падать за счет снижения коэффициента инжекции, уменьшения эффективной площади эмиттера и увеличения рекомбинационных потерь в объеме базы.

3.1.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРАНЗИСТОРА ПО СХЕМЕ ОЭ ПО ПОСТОЯННОМУ И ПЕРЕМЕННОМУ ТОКАМ

Внутренним сопротивлением по постоянному току транзистора R_{io} по схеме ОЭ называют отношение постоянного напряжения коллектор – эмиттер $U_{выхо}$ к постоянному току через этот транзистор

$$R_{io} = \frac{U_{выхо}}{I_{выхо}}. \quad (10)$$

В отсутствие коллекторного резистора можно записать

$$R_{io} = \frac{E_{пит}}{I_{выхо}}. \quad (11)$$

Известно для выходных характеристик транзистора, что $I_{выхо}$ практически не зависит от постоянного напряжения коллектор – эмиттер $U_{выхо}$ и сильно зависит от $E_{см}$. Поэтому внутреннее сопротивление постоянному току R_{io} прямо пропорционально напряжению коллектор – эмиттер $U_{выхо}$ ($E_{пит}$) и резко уменьшается с ростом $E_{см}$. В таблице 6 показано, что с увеличением напряжения смещения от 600 мВ до 820 мВ R_{io} уменьшается более, чем в 1000 раз.

Таблица 6

Зависимость $R_{io} = f(E_{пит}, E_{см})$

	$E_{см}$, мВ	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820
	$I_{выхо}$, мА	0,03	0,073	0,156	0,335	0,713	1,43	3	5,727	10,38	17,83	29,3	46,3
1	R_{io} при $E_{num}=1$ В, Ом	$33 \cdot 10^3$	$14 \cdot 10^3$	$6,4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	700	330	170	96	60	35	20
	$\lg R_{io}$	4,5	4,15	3,8	3,48	3,15	2,85	2,52	2,23	1,98	1,78	1,54	1,3
2	R_{io} при $E_{num}=3$ В, Ом	$100 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^3$	$19,2 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$4,2 \cdot 10^3$	2100	1000	510	300	180	100	60
	$\lg R_{io}$	5	4,62	4,28	3,95	3,62	3,32	3	2,71	2,48	2,26	2	1,78
3	R_{io} при $E_{num}=6$ В, Ом	$200 \cdot 10^3$	$84 \cdot 10^3$	$38,4 \cdot 10^3$	$18 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^3$	5600	2000	1000	600	360	200	120
	$\lg R_{io}$	5,3	4,92	4,58	4,25	3,92	3,75	3,3	3	2,78	2,56	2,3	2,08

4	R_{io} при $E_{num}=9$ В, Ом	$300 \cdot 10^3$	$126 \cdot 10^3$	$57,6 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^3$	$12,6 \cdot 10^3$	6300	3000	1500	900	540	300	180
	$\lg R_{io}$	5,5	5,1	4,76	4,43	4,1	3,8	3,48	3,18	2,95	2,73	2,48	2,26
5	R_{io} при $E_{num}=12$ В, Ом	$400 \cdot 10^3$	$168 \cdot 10^3$	$76,8 \cdot 10^3$	$36 \cdot 10^3$	16,8	8400	4000	2000	1200	720	400	240
	$\lg R_{io}$	5,6	5,23	4,89	4,56	4,23	3,92	3,6	3,3	3,08	2,86	2,6	2,38

На рисунке 9 представлены графики зависимости $R_{io} = f(E_{cm}, E_{пит})$. В связи с тем, что зависимость $R_{io} = f(E_{cm})$ перекрывает интервал значений более, чем 1000 раз графики зависимости $R_{io} = f(E_{cm}, E_{пит})$ представлены в логарифмическом масштабе $\lg R_{io} = f(E_{cm}, E_{пит})$.

Внутреннее сопротивление транзистора постоянному току R_{io} и сопротивление коллекторной нагрузки R_k (рисунок 4) образуют делитель напряжения источника питания $E_{пит}$. Усилитель будет работать на середине линейного участка, если $R_k = R_{io}$. При заданном значении R_k путем изменения напряжения E_{cm} до момента, когда напряжение между коллектором и эмиттером станет равным половине напряжения источника питания ($U_{выхо} = E_{пит} / 2$) мы устанавливаем рабочую точку на середину линейного участка.

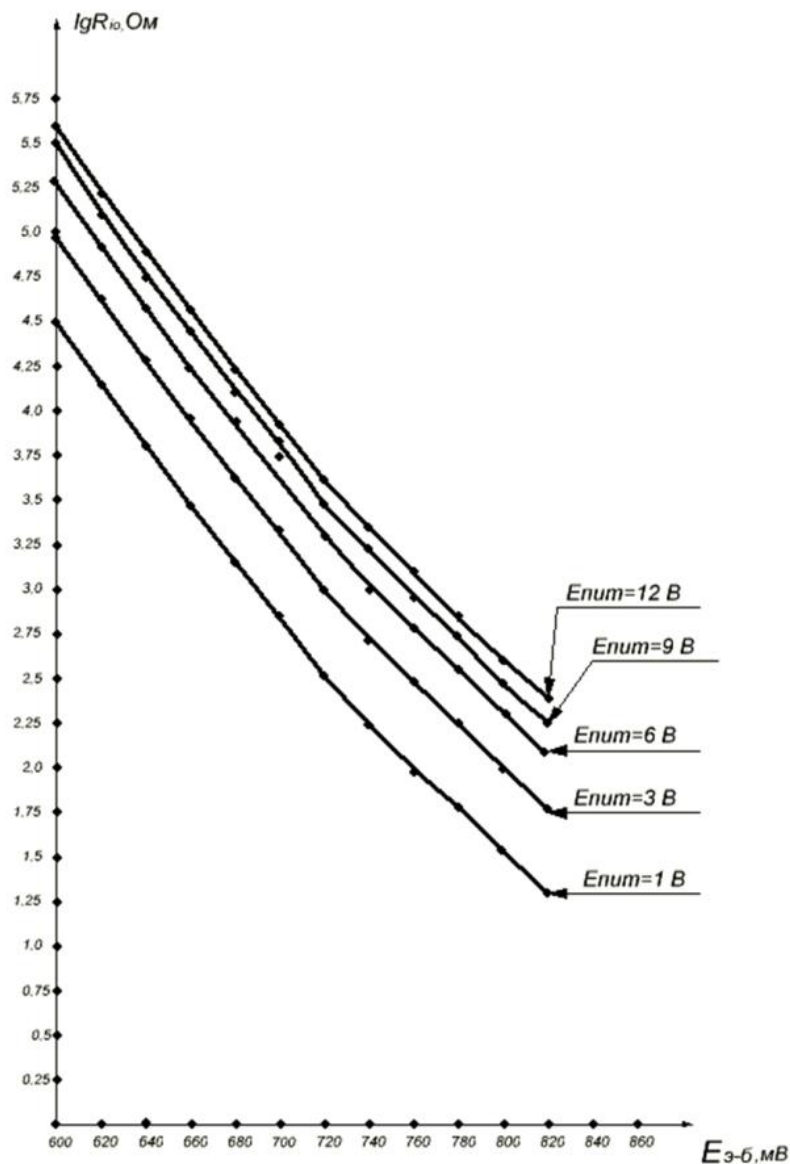


Рис. 9. График зависимости $\lg R_{10} = f(E_{\text{см}}, E_{\text{пит}})$ для транзистора КТ315А

Внутренним сопротивлением по переменному току R_i транзистора по схеме ОЭ называют отношение переменной составляющей напряжения коллектор – эмиттер $U_{\text{выхо}}$ к переменному току $I_{\text{вых}}$ через этот транзистор

$$R_i = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}}, \quad (12)$$

что реализуется в отсутствие коллекторного резистора на модели, представленной на рисунке 10.

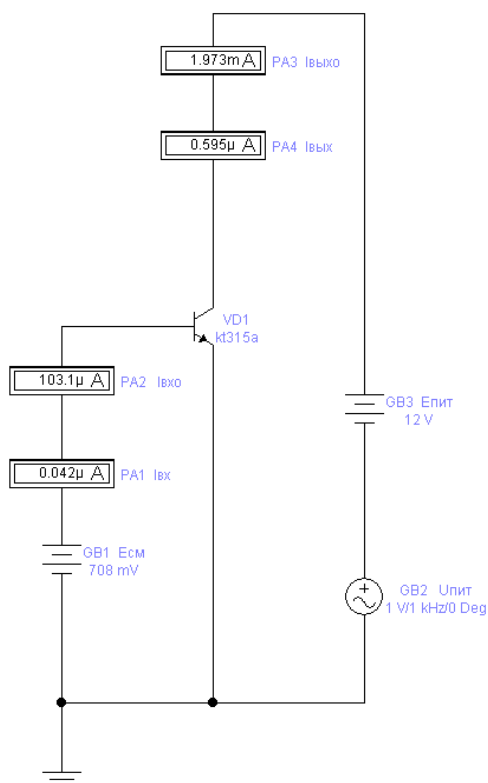


Рис. 10. Модель для определения внутреннего сопротивления по переменному току R_i транзистора по схеме ОЭ

Известно для выходных характеристик транзистора, что изменение выходного напряжения коллектор – эмиттер $\Delta U_{\text{ВЫХО}}$ практически не влияет на изменение тока коллектора $\Delta I_{\text{ВЫХО}}$ на всем протяжении горизонтального участка этой характеристики и сильно зависит от $E_{\text{см}}$. На представленной модели источник напряжения GB2 $U_{\text{ПИТ}}$ имитирует $\Delta U_{\text{ВЫХО}}$, а амперметр PA4 - $\Delta I_{\text{ВЫХО}}$. В таблице 6 представлены результаты измерения переменной составляющей тока коллектора при неизменной величине переменной составляющей напряжения коллектор – эмиттер $U_{\text{ПИТ}}$ (один вольт) при разных значениях напряжения питания $E_{\text{ПИТ}}$ и смещения $E_{\text{см}}$, а также результаты расчета R_i по этим данным.

Таблица 7

Экспериментальные и расчетные значения $I_{\text{ВЫХ}}$ и R_i

	$E_{\text{см}}, \text{ мВ}$	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820
1	$I_{\text{вых}}$ при $E_{\text{пит}}=3 \text{ В}, \text{ мкА}$	0,07	0,073	0,08	0,13	0,23	0,45	0,9	1,7	3,1	5,4	8,8	14
	R_i при $E_{\text{пит}}=3 \text{ В}, \text{ МОм}$	14	13,7	12,5	7,7	4,3	2,2	1,1	0,6	0,3	0,2	0,11	0,07
2	$I_{\text{вых}}$ при $E_{\text{пит}}=6 \text{ В}, \text{ мкА}$	0,05	0,06	0,08	0,11	0,2	0,45	0,9	1,7	3,1	5,4	8,8	14
	R_i при $E_{\text{пит}}=6 \text{ В}, \text{ МОм}$	20	17	12,5	9	5	2,2	1,1	0,6	0,3	0,2	0,11	0,07

3	$I_{вых}$ при $E_{пит}=9$ В, мкА	0,05	0,06	0,07	0,1	0,22	0,47	0,9	1,7	3,2	5,4	8,8	14
	R_i при $E_{пит}=9$ В, МОм	20	17	14	10	5	2,1	1,1	0,6	0,3	0,2	0,11	0,07
4	$I_{вых}$ при $E_{пит}=12$ В, мкА	0,045	0,047	0,08	0,1	0,2	0,43	0,9	1,7	3,1	5,3	8,8	14,0
	R_i при $E_{пит}=12$ В, МОм	22	21	12,5	10	5	2,3	1,1	0,6	0,3	0,2	0,11	0,07

На основе данных таблицы 6 построим графики зависимости $R_i = f(E_{см}, E_{пит})$. Анализ данных в таблице 7 показал, что зависимость $R_i = f(E_{см}, E_{пит})$ практически не зависит от $E_{пит}$; имеется только небольшой разброс значений при открытии транзистора. При напряжении смещения более 680 мВ графики практически совпадают. Будем полагать, что разброс значений при открытии транзистора связан с погрешностью измерения. Поэтому проведем усредненную кривую для всех значений $E_{пит}$, как показано на рисунке 11.

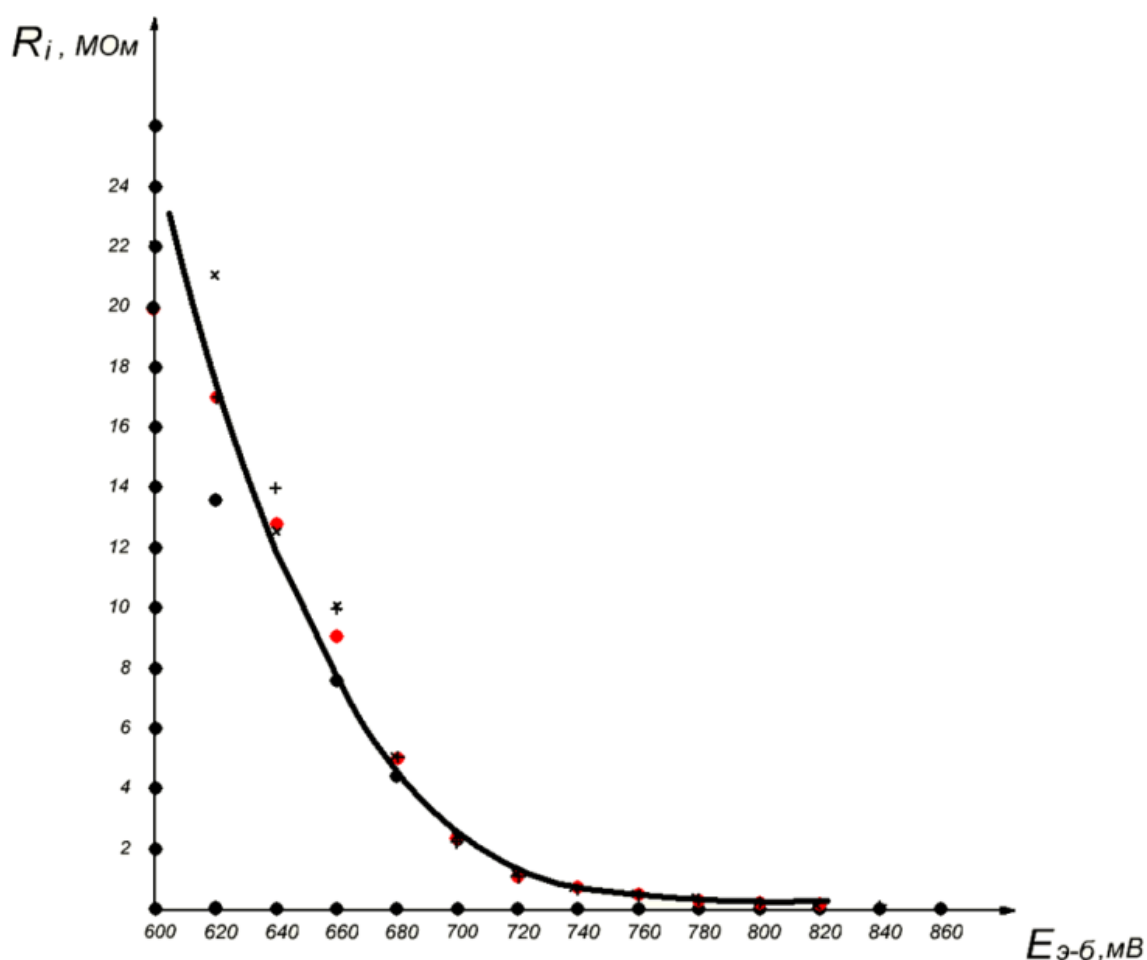


Рис. 11. Зависимость внутреннего сопротивления $E_{пит}$ транзистора КТ315А для переменного тока от напряжения смещения на базе $E_{см}$

Из графика следует, что с ростом напряжения смещения $E_{см}$ и, как следствие этого, ростом базового тока $I_{б0}$ наклон «горизонтальной» части статических выходных характеристик $I_{ко} = f(U_{ко})$ транзистора увеличивается, что приводит к уменьшению внутреннего сопротивления транзистора. В пределах реально применяемых режимах эксплуатации для транзистора КТ315А коллекторных токов от 0,3 до 50 мА внутреннее сопротивление переменному току находится в пределах от 100 кОм до 10 МОм. Последнее позволяет считать транзистор как источник переменного тока.

3.1.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОДНОКАСКАДНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОЭ ПО ПОСТОЯННОМУ И ПЕРЕМЕННОМУ ТОКАМ

Выходным сопротивлением по постоянному току однокаскадного резистивного усилителя $R_{вых0}$ по схеме ОЭ называют отношение постоянного напряжения коллектор – эмиттер $U_{вых0}$ к постоянному току через последовательно включенный транзистор и коллекторный резистор $I_{вых0}$

$$R_{вых0} = \frac{U_{вых0}}{I_{вых0}}. \quad (13)$$

Определим, как $R_{вых0}$ зависит от напряжения смещения в базовой цепи $E_{см}$ при разных значениях величины коллекторного резистора R_k . Воспользовавшись моделью, представленной на рисунке 12, по точкам определим зависимости $U_{вых0} = f_1(E_{см}, R_k)$ и $I_{вых0} = f_2(E_{см}, R_k)$ при разных значениях величины коллекторного резистора R_k , а затем рассчитаем $R_{вых0} = f_3(E_{см}, R_k)$. Результаты измерения и расчета сведем в таблицу 8.

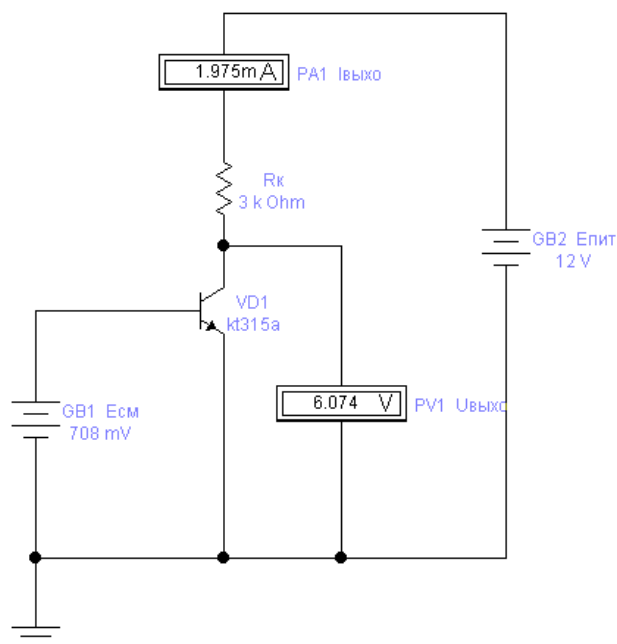


Рис. 12. Снимок с экрана модели для определение зависимости $U_{\text{вых0}} = f_1(E_{\text{см}}, R_{\text{к}})$ и $I_{\text{вых0}} = f_2(E_{\text{см}}, R_{\text{к}})$

Таблица 8

Результаты измерения $U_{\text{вых0}}$, $I_{\text{вых0}}$ и расчета $R_{\text{вых0}}$ при разных значениях $E_{\text{см}}$ и $R_{\text{к}}$

$E_{\text{num}}=12 \text{ В}$	$E_{\text{см}}, \text{ мВ}$	600	620	640	660	680	700	720	740	760	780	800	820	840	860	880
$R_{\text{к}} = 0 \text{ Ом}$	$I_{\text{блх0}}, \text{ мА}$	0,035	0,072	0,156	0,335	0,713	1,484	2,987	5,727	10,38	17,83	29,29	46,53	72,17	110,1	165,9
	$R_{\text{блх0}}, \text{ кОм}$	342	166	77	36	17	8,1	4,0	2,0	1,2	0,67	0,41	0,26	0,166	0,110	0,073
$R_{\text{к}} = 100 \text{ Ом}$	$U_{\text{блх0}}, \text{ В}$	11,99	11,99	11,98	11,96	11,93	11,85	11,70	11,43	10,96	10,22	9,072	7,352	4,796	1,022	0,106
	$I_{\text{блх0}}, \text{ мА}$	0,045	0,085	0,169	0,348	0,725	1,496	2,998	5,737	10,39	17,83	29,28	46,48	72,04	109,8	118,9
	$R_{\text{блх0}}, \text{ кОм}$	267	141	71	34	16	7,9	3,9	2,0	1,1	0,57	0,32	0,16	0,067	0,009	0,008
$R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$	$U_{\text{блх0}}, \text{ В}$	11,95	11,92	11,83	11,65	11,28	10,51	9,007	6,277	1,649	0,065	0,055	0,056	0,061	0,067	0,075
	$I_{\text{блх0}}, \text{ мА}$	0,045	0,084	0,168	0,347	0,724	1,494	2,993	5,723	10,35	11,94	11,94	11,94	11,94	11,93	11,93
	$R_{\text{блх0}}, \text{ кОм}$	266	142	70	33	16	7,0	3,0	1,0	0,159	0,005	0,0045	0,0046	0,0051	0,0056	0,0062
$R_{\text{к}} = 3 \text{ кОм}$	$U_{\text{блх0}}, \text{ В}$	11,86	11,75	11,50	11,00	9,83	7,53	3,06	0,06	0,045	0,043	0,045	0,051			
	$I_{\text{блх0}}, \text{ мА}$	0,045	0,084	0,17	0,35	0,72	1,49	3,00	3,98	3,99	3,99	3,99	3,98			
	$R_{\text{блх0}}, \text{ кОм}$	265	140	68	31	14	5,0	1,0	0,015	0,011	0,0107	0,011	0,013			
$R_{\text{к}} = 10 \text{ кОм}$	$U_{\text{блх0}}, \text{ В}$	11,55	11,16	10,33	8,56	4,84	0,068	0,040	0,034	0,035	0,038	0,043	0,05			
	$I_{\text{блх0}}, \text{ мА}$	0,045	0,084	0,167	0,344	0,716	1,193	1,196	1,197	1,196	1,196	1,196	1,195			
	$R_{\text{блх0}}, \text{ кОм}$	257	133	62	25	6,8	0,0057	0,0033	0,0028	0,0029	0,0032	0,0035	0,0042			

На основе данных таблицы построим графики для амплитудной характеристики по постоянному току $U_{\text{ВЫХО}} = f_1(E_{\text{СМ}}, R_K)$ (рисунок 13) и зависимости $R_{\text{ВЫХО}} = f_3(E_{\text{СМ}}, R_K)$ (рисунок 14).

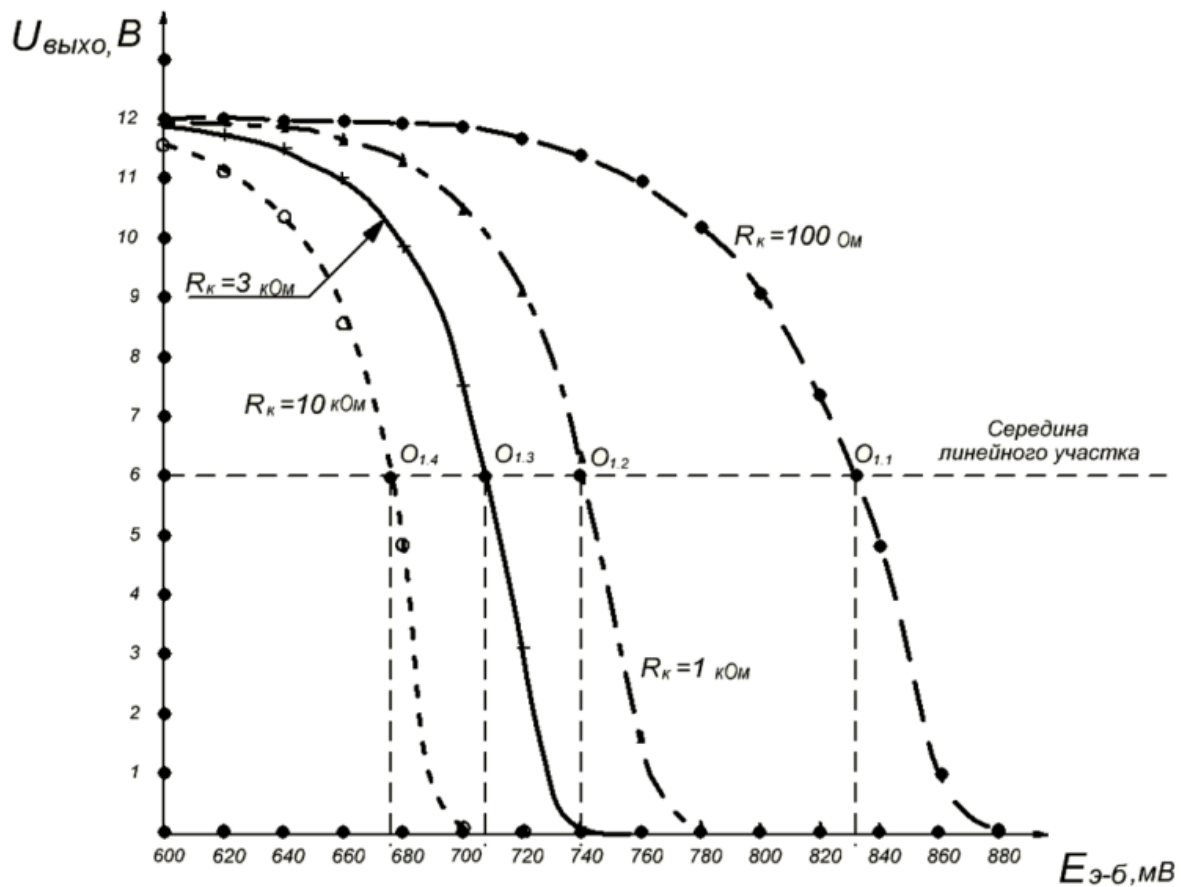


Рис. 13. Амплитудные характеристики по постоянному току $U_{\text{ВЫХО}} = f(E_{\text{СМ}})$ однокаскадного резистивного усилителя на транзисторе КТ315А по схеме ОЭ

$O_{1.1}$, $O_{1.2}$, $O_{1.3}$ и $O_{1.4}$ - рабочие точки для середины линейных участков при сопротивлениях коллекторных резисторов R_K соответственно 100 Ом, 1 кОм, 3 кОм и 10 кОм

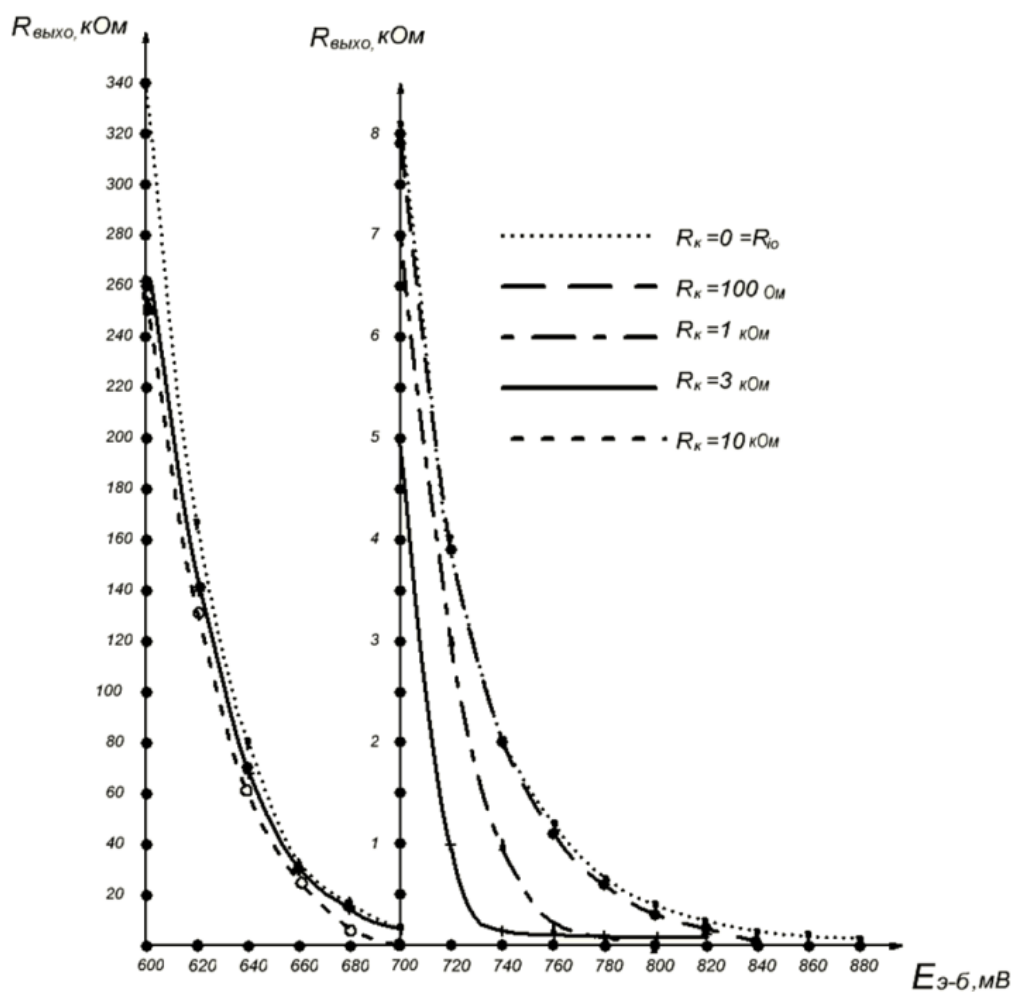


Рис. 14. Графики зависимости $R_{\text{выхо}} = f_3(E_{\text{см}}, R_k)$

В отсутствие коллекторного резистора $R_{\text{выхо}}$ является внутренним сопротивлением транзистора по постоянному току $R_{\text{ио}}$ зависит только от $I_{\text{выхо}}$, а этот ток зависит только от напряжения смещения в базовой цепи $E_{\text{см}}$.

При его присутствии для режима отсечки и активной области работы транзистора $R_{\text{выхо}}$ также зависит только от напряжения смещения в базовой цепи $E_{\text{см}}$ и слабо зависит от $U_{\text{выхо}}$ (и, следовательно R_k) вплоть до режима насыщения. Поэтому кривые на рисунке 10 до $E_{\text{см}}$ равного 780 мВ практически совпадают при любых представленных значениях R_k .

Рабочая точка будет находиться на середине линейного участка статической амплитудной характеристики $U_{\text{выхо}} = f(E_{\text{см}})$ при равенстве внутреннего сопротивления транзистора по постоянному току $R_{\text{ио}}$ и сопротивления резистора в цепи коллектора $R_k = R_{\text{ио}}$.

3.1.4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРАНЗИСТОРА ПО СХЕМЕ ОЭ ПО ПОСТОЯННОМУ И ПЕРЕМЕННОМУ ТОКАМ

Внутренним сопротивлением по постоянному току $R_{\text{ВЫХ}0}$ усилителей по схеме ОЭ называют отношение постоянного напряжения коллектор – эмиттер $U_{\text{ВЫХО}}$ к постоянному току через этот транзистор $I_{\text{ВЫХО}}$

$$R_{\text{ВЫХ}0} = \frac{U_{\text{ВЫХО}}}{I_{\text{ВЫХО}}}. \quad (14)$$

Выходным сопротивлением по переменному току $R_{\text{ВЫХ}}$ усилителей по схеме ОЭ называют отношение переменного (выходного) напряжения коллектор –эмиттер $U_{\text{ВЫХ}}$ к переменному току через этот транзистор $I_{\text{ВЫХ}}$

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}}. \quad (15)$$

На рисунке 15 представлен снимок с экрана модели резистивного усилителя напряжения по схеме с ОЭ.

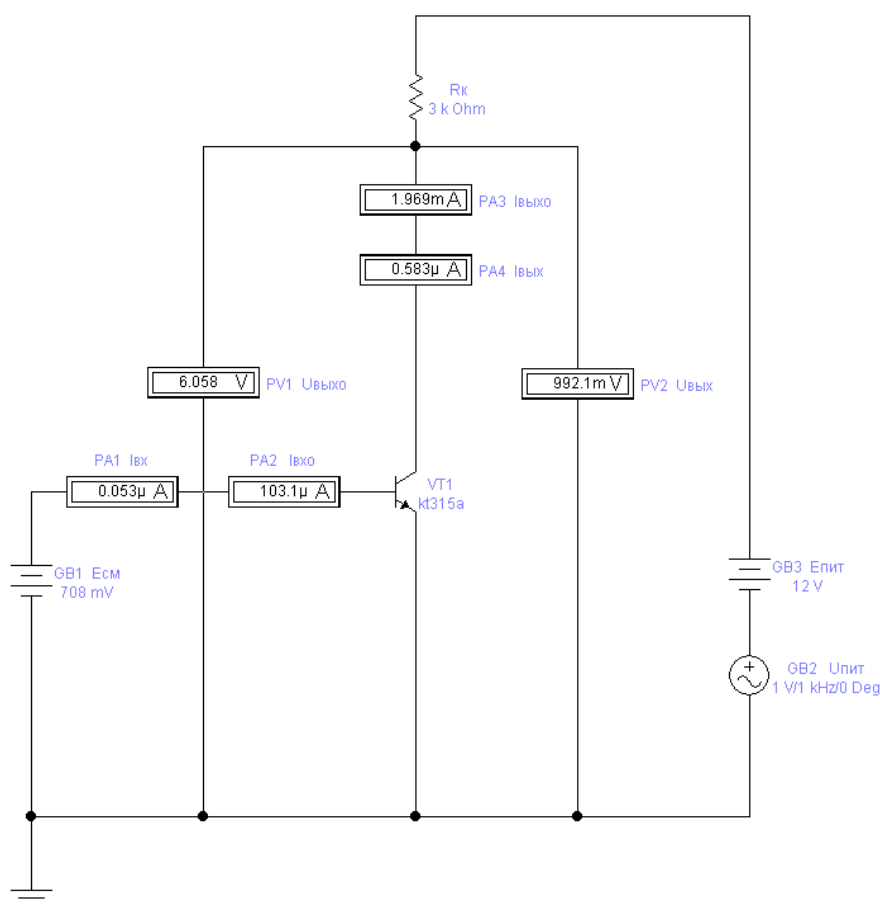


Рис. 15. Снимок с экрана модели резистивного усилителя напряжения по схеме с ОЭ

Источники питания GB1 и GB3 обеспечивают необходимый для работы транзистора режим по постоянному току на середине амплитудной характеристики, а источник GB2 необходим для расчета выходных сопротивлений переменному току.

Выходное сопротивление по постоянному току $R_{\text{вых}0}$ усилителя, представленной на этой модели (рисунок 15) будет равно

$$R_{\text{вых}0} = \frac{U_{\text{вых}0}}{I_{\text{вых}0}} = \frac{6,058}{1,969 \cdot 10^{-3}} \approx 3 \text{ кОм}. \quad (16)$$

Полученное значение выходное сопротивление по постоянному току $R_{\text{вых}0}$ равно сопротивлению коллекторного резистора R_k . Действительно, делитель напряжения источника питания из двух включенных последовательно одинаковых сопротивлений $R_{\text{вых}0}$ и R_k делит напряжения источника питания GB3 пополам.

Выходное сопротивление по переменному току $R_{\text{вых}}$ усилителя, представленной на той же модели (рисунок 15) будет равно

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} = \frac{992,1 \cdot 10^{-3}}{0,583 \cdot 10^{-6}} \approx 1,7 \text{ МОм}. \quad (17)$$

Полученное значение выходное сопротивление по переменному току $R_{\text{вых}}$ значительно превышает величину сопротивлению коллекторного резистора R_k . Действительно, делитель напряжения источника питания из двух включенных последовательно одинаковых сопротивлений $R_{\text{вых}}$ и R_k делит напряжения источника переменного напряжения GB2 (1000 мВ)

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_k} = 1000 \cdot \frac{1700}{1703} \approx 992,1 \text{ мВ}. \quad (18)$$

Выходное сопротивление по переменному току $R_{\text{вых}}$ усилителя, представленной на той же модели (рисунок 15) будет равно

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} = \frac{992,1 \cdot 10^{-3}}{0,583 \cdot 10^{-6}} \approx 1,7 \text{ МОм}. \quad (19)$$

Полученное значение выходное сопротивление по переменному току $R_{\text{вых}}$ значительно превышает величину сопротивлению коллекторного резистора R_k . Действительно, делитель напряжения источника питания из двух включенных последовательно одинаковых сопротивлений $R_{\text{вых}}$ и R_k делит напряжения источника переменного напряжения GB2

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_k} = 1 \cdot \frac{1700}{1703} \approx 1 \text{ В}. \quad (20)$$

Коллекторный резистор практически не влияет на выходные токи транзистора, что показано на рисунке 16. Поэтому в различных моделях транзистор представляют как источник тока, а выходное сопротивление усилителя по переменному току равняется величине коллекторного резистора

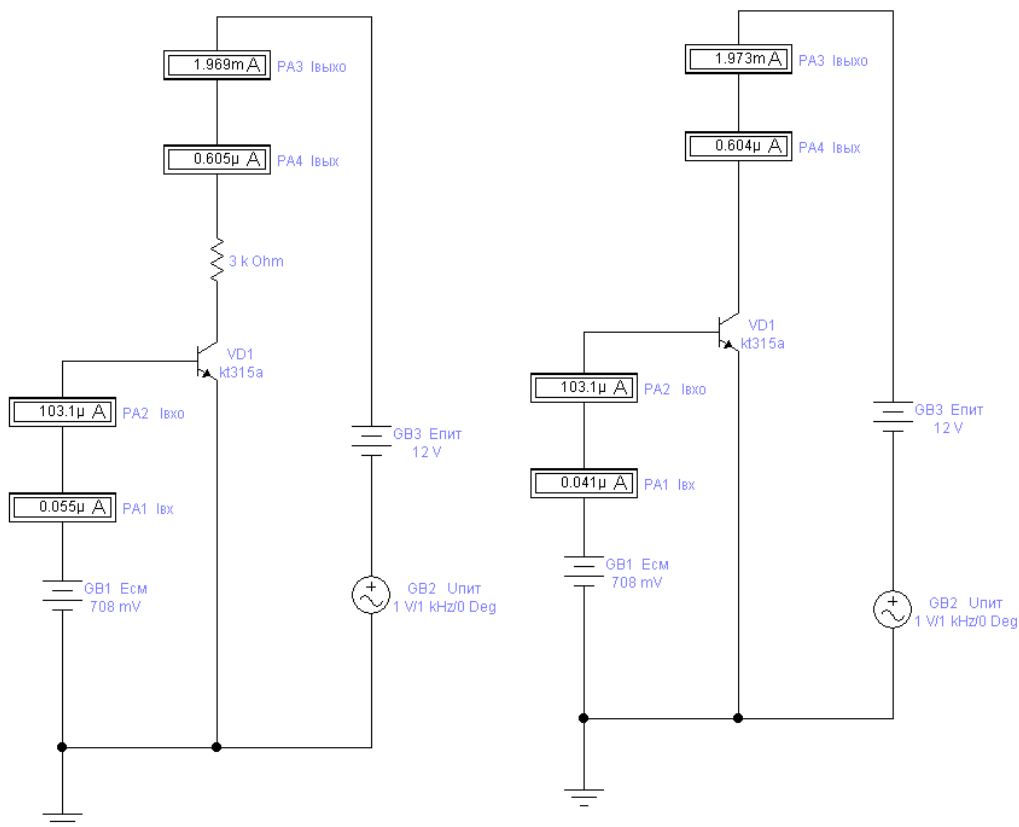


Рис. 16. Влияние коллекторного резистора на выходные токи транзистора при одинаковых условиях на его входе

3.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПО СХЕМЕ ОБ НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

Тип транзистора при выполнении задания задается преподавателем.

3.2.1. МОДЕЛЬ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ УСИЛИТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕЙ НА СЕРЕДИНЕ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Амплитудной характеристикой усилителя по схеме с ОБ называется зависимость выходного напряжения от входного напряжения.

На рисунке 17 представлен снимок с экрана модели резистивного усилителя напряжения НЧ по схеме с ОБ.

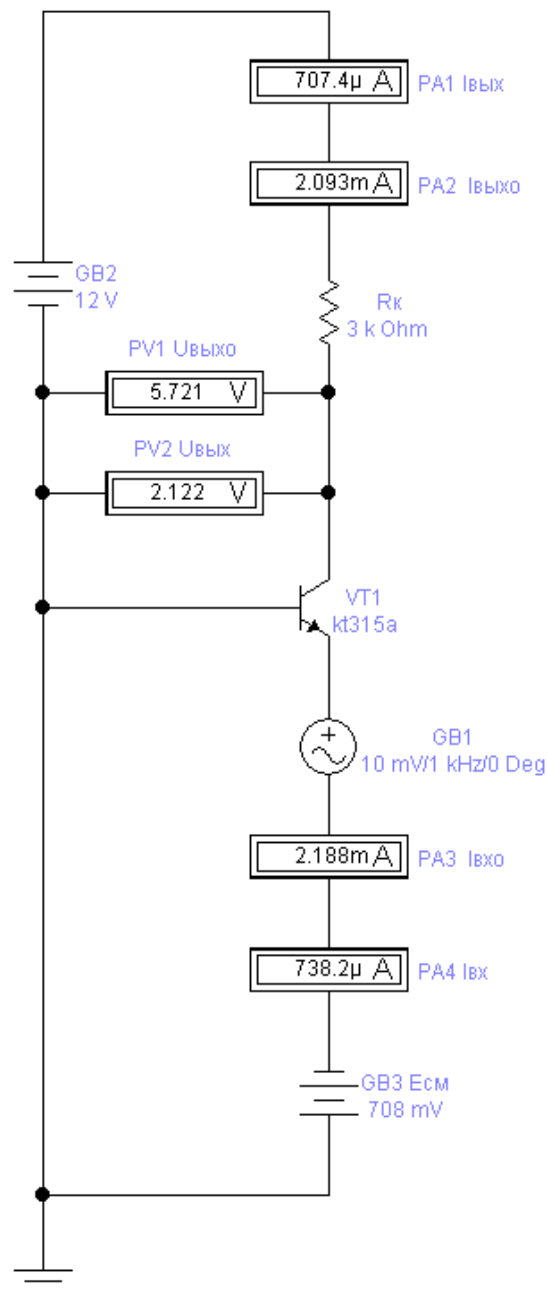


Рис. 17. Снимок с экрана модели резистивного усилителя напряжения по схеме с ОБ

В представленной модели входное сопротивление усилителя для переменного тока R_{BX} имеет значение

$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{738,2 \cdot 10^{-6}} = 13,6 \text{ Ом.} \quad (21)$$

Аналогичный параметр для постоянного тока R_{BXO} равен

$$R_{BXO} = \frac{E_{CM}}{I_{BXO}} = \frac{708 \cdot 10^{-3}}{2,188 \cdot 10^{-3}} = 324 \text{ Ом.} \quad (22)$$

Динамический коэффициент усиления по постоянному току α_0 для этой рабочей точки равен

$$\alpha_0 = \frac{I_{\text{ВЫХО}}}{I_{\text{ВХО}}} = \frac{2,093}{2,188} = 0,96, \quad (23)$$

а динамический коэффициент усиления по переменному току α для этой рабочей точки равен

$$\alpha = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{707}{738} = 0,96. \quad (24)$$

Равенство коэффициентов α_0 и α указывают на отсутствие нелинейности характеристики прямой передачи $I_{\text{ВЫХО}} = f(I_{\text{ВХО}})$.

3.2.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРАНЗИСТОРА ПО СХЕМЕ ОБ ПО ПОСТОЯННОМУ И ПЕРЕМЕННОМУ ТОКАМ

На рисунке 18 представлен снимок с экрана модели резистивного усилителя напряжения по схеме с ОБ.

Выходное сопротивление по постоянному току $R_{\text{ВЫХО}}$ усилителя, представленной на этой модели (рисунок 18) будет равно

$$R_{\text{ВЫХО}} = \frac{U_{\text{ВЫХО}}}{I_{\text{ВЫХО}}} = \frac{6,054}{1,969 \cdot 10^{-3}} \approx 3 \text{ кОм}. \quad (25)$$

Полученное значение выходное сопротивление по постоянному току $R_{\text{ВЫХО}}$ равно сопротивлению коллекторного резистора R_k . Действительно, делитель напряжения источника питания из двух включенных последовательно одинаковых сопротивлений $R_{\text{ВЫХО}}$ и R_k делит напряжения источника питания GB2 пополам.

Выходное сопротивление транзистора по переменному току $R_{\text{ВЫХ}}$ усилителя, представленной на той же модели будет равно

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}} = \frac{992,1 \cdot 10^{-3}}{0,588 \cdot 10^{-6}} \approx 1,7 \text{ МОм} \quad (26)$$

Полученное значение выходное сопротивление по переменному току $R_{\text{ВЫХ}}$ значительно превышает величину сопротивлению коллекторного резистора R_k . Действительно, делитель напряжения источника питания из двух включенных последовательно одинаковых сопротивлений $R_{\text{ВЫХ}}$ и R_k делит напряжения источника переменного напряжения GB1

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ПИТ}} \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_k} = 1 \cdot \frac{1700}{1703} \approx 1 \text{ В}. \quad (27)$$

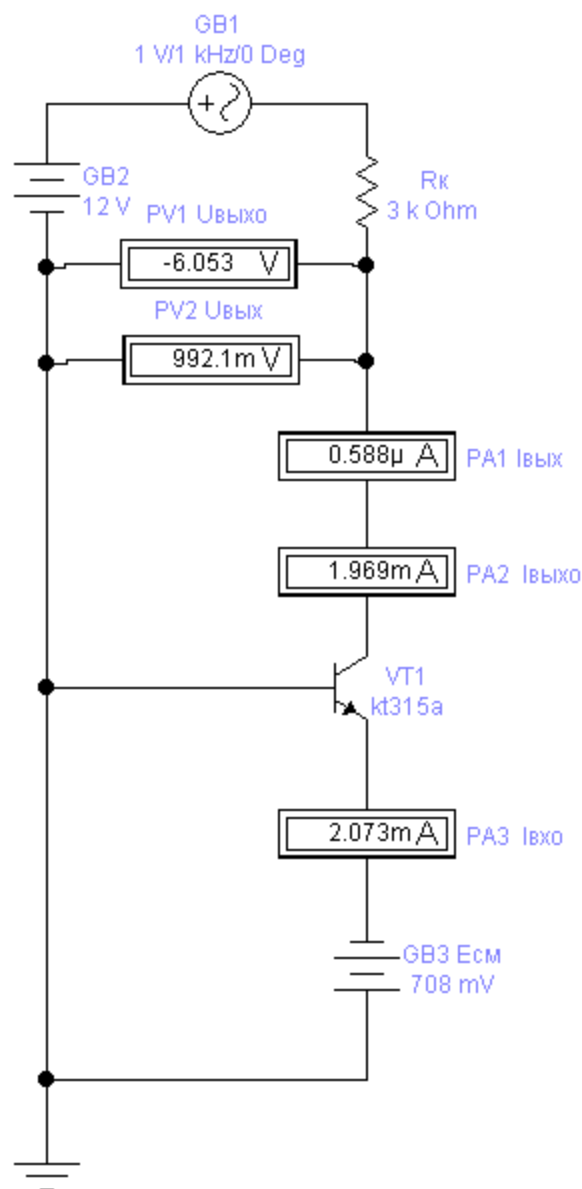


Рис. 18. Снимок с экрана модели резистивного усилителя для определения выходных сопротивлений напряжения по схеме с ОБ

Коллекторный резистор практически не влияет на выходные токи транзистора, что следует из сравнения рисунков 18 и 19. Поэтому в различных моделях транзистор представляют как источник тока, а выходное сопротивление по переменному току равняется величине коллекторного резистора.

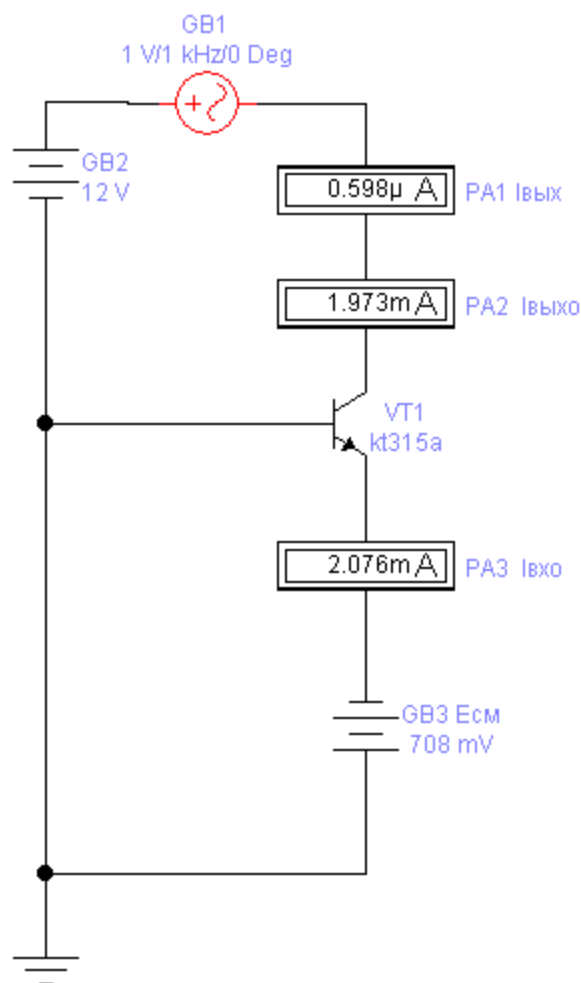


Рис. 19. Снимок с экрана модели для определения выходных сопротивлений напряжения по схеме с ОБ

3.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПО СХЕМЕ ОК НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

На рисунке 20 представлен снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОК, в котором в качестве источника начального смещения $E_{см}$ используется батарея элементов питания GB1 с напряжением 6 В, что соответствует середине линейного участка статической амплитудной характеристики, то есть постоянное напряжение $U_{выхо}$ на резисторе R_e в цепи эмиттера и измеренное вольтметром PV2 составляет около половины напряжения источника питания GB3.

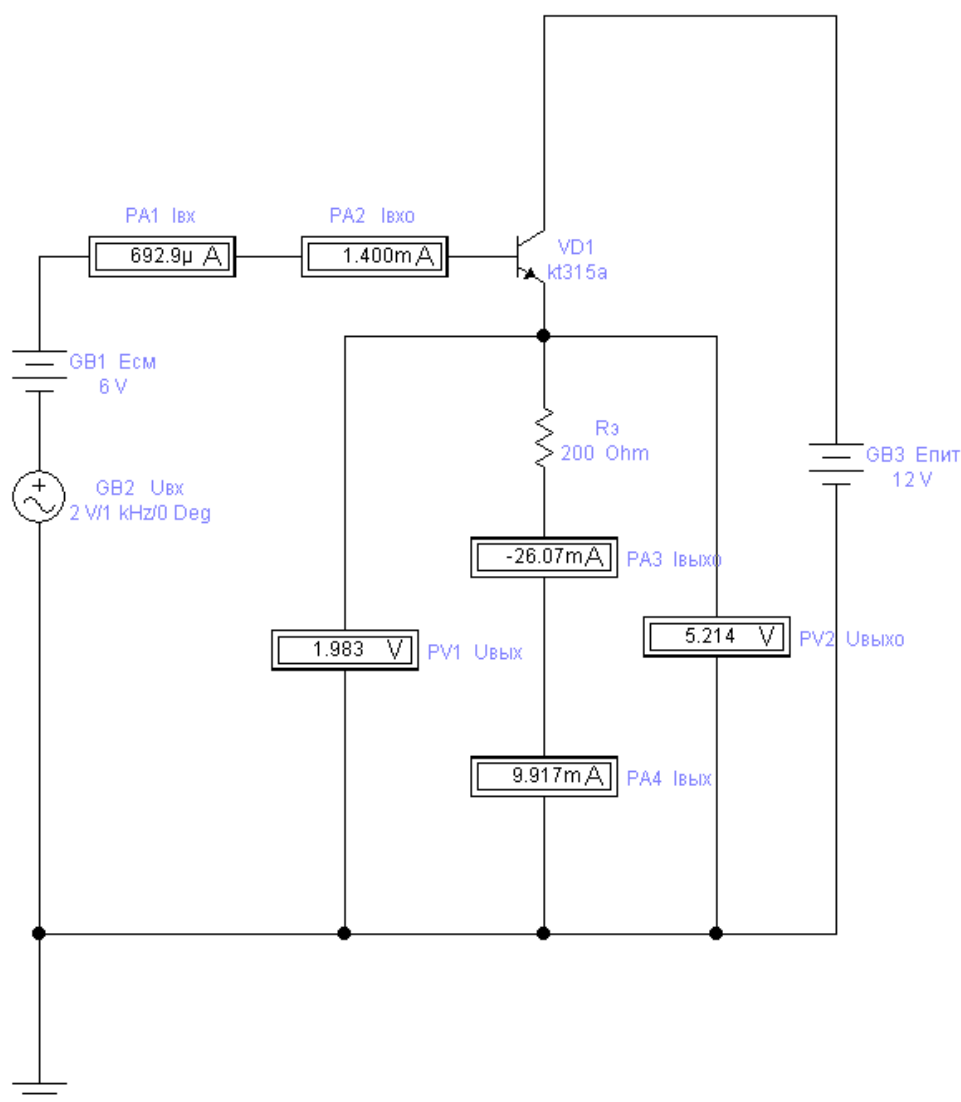


Рис. 20. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОК

Линейный участок динамической амплитудной характеристики по выходу обычно находится в пределах от 1 В до $(E_{пит}-1)$ В, то есть от 1 до 11 В. Середина этого линейного участка соответствует 6 В, а его размах составляет 10 В. Тогда амплитуда входного синусоидального сигнала, которая не будет подвержена нелинейным искажениям будет равна 5 В, что соответствует 3,3 В действующего напряжения. С запасом выберем действующее значение входного гармонического сигнала равное 2 В. Выходное напряжение, представленное на вольтметре PV1 практически равно входному $U_{вх} = 1,983$ В.

В представленной модели входное сопротивление для переменного тока $R_{вх}$ имеет значение

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{2}{692,9 \cdot 10^{-6}} = 2,9 \text{ кОм}. \quad (28)$$

Аналогичный параметр для постоянного тока $R_{\text{вхо}}$ равен

$$R_{\text{вхо}} = \frac{E_{\text{см}}}{I_{\text{вхо}}} = \frac{6}{1,4 \cdot 10^{-3}} = 4,2 \text{ кОм}. \quad (29)$$

Динамический коэффициент усиления по постоянному току β_0 для этой рабочей точки равен

$$\beta_0 = \frac{I_{\text{выхо}}}{I_{\text{вхо}}} = \frac{26,07}{1,4} = 18,6, \quad (30)$$

а динамический коэффициент усиления по переменному току β для этой рабочей точки равен

$$\beta = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{9917}{693} = 14,3. \quad (31)$$

3.3.1 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОК ДЛЯ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКАМ

Воспользуемся известным соотношением для расчета внутреннего сопротивления R_i источника напряжения

$$R_i = \frac{U_{\text{xx}}}{I_{\text{кз}}}, \quad (32)$$

где U_{xx} - напряжение холостого хода (без нагрузки);

$I_{\text{кз}}$ - ток короткого замыкания.

На рисунке 21 показана модель, в которой при помощи емкостного сопротивления $X_C = 0,15 \text{ Ом}$ замкнут выход усилителя.

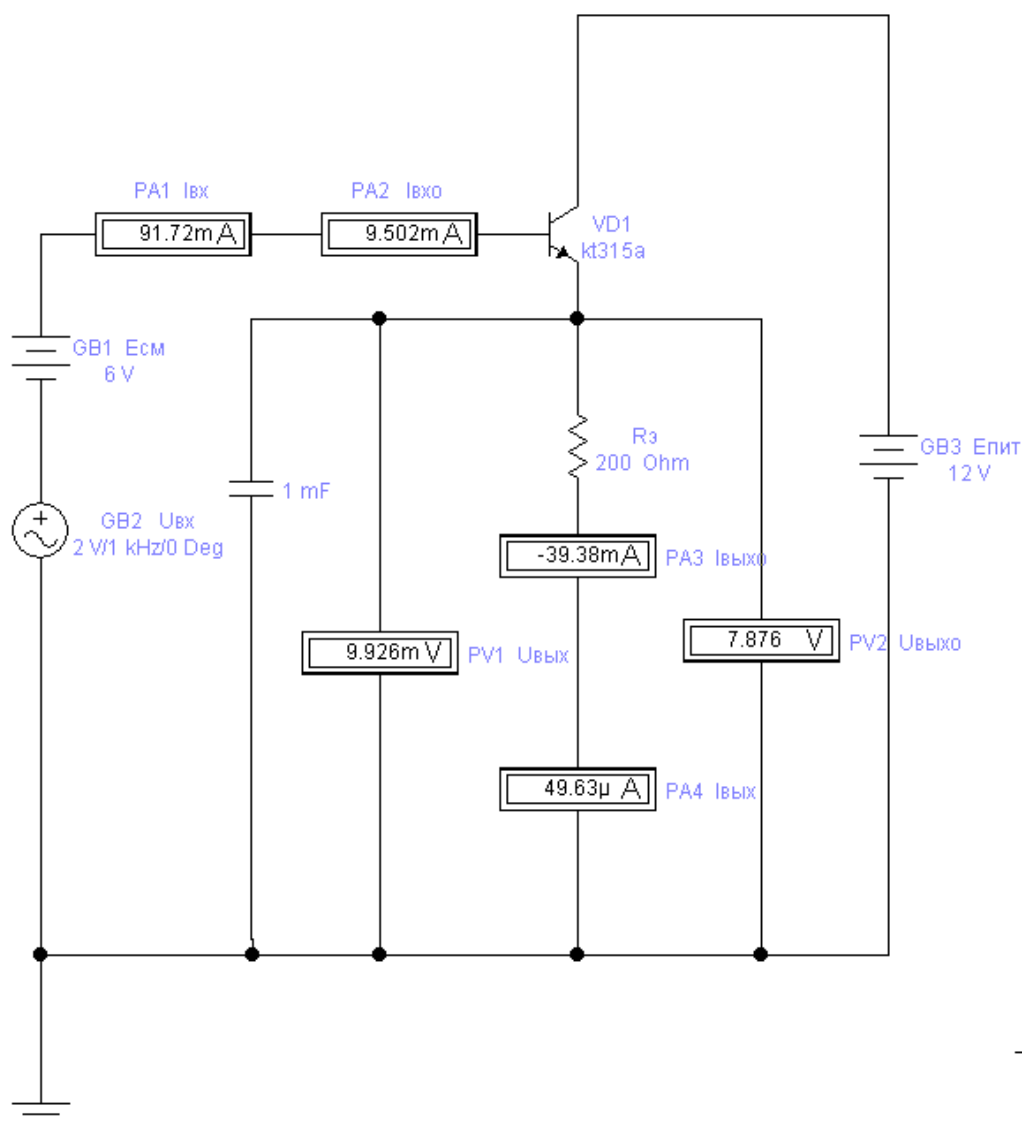


Рис. 21. Снимок с экрана модели эмиттерного повторителя в режиме короткого замыкания по переменной составляющей на выходе

Зная падение напряжения на этом сопротивлении (вольтметр PV1), можно посчитать ток короткого замыкания

$$I_{кз} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{X_C} = \frac{9,926}{0,15} = 66 \text{ мА} . \quad (33)$$

Из рисунка 20 следует, что $U_{\text{xx}} = 1,983 \text{ В}$ (показания вольтметра PV1).

Тогда

$$R_i = \frac{U_{\text{xx}}}{I_{кз}} = \frac{1,983}{66} = 30 \text{ Ом} . \quad (34)$$

Воспользуемся известным утверждением, что нагружая источник напряжения с внутренним сопротивлением R_i нагрузкой R_H , равной внутреннему сопротивлению $R_i = R_H$, получаем напряжение на выходе $U_{\text{ВЫХ}}$ (показания вольтметра PV1) в два раза меньше, чем до нагрузки. Проверим

реализацию этого утверждения для нашего случая. Согласно модели, представленной на рисунке 22, это утверждение полностью подтвердилось.

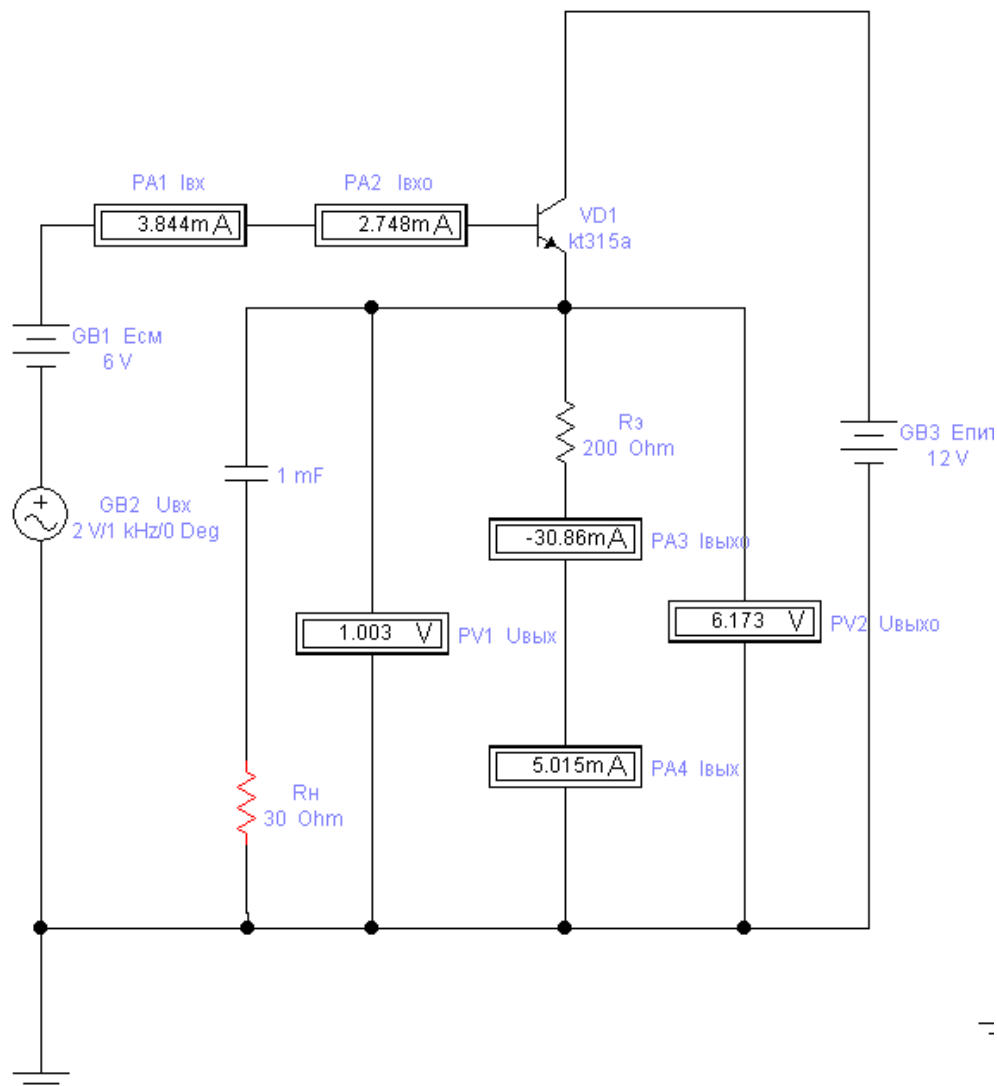


Рис. 22. Снимок с экрана модели эмиттерного повторителя в режиме подключения нагрузки

Таким образом, выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ транзисторного усилителя по схеме ОК для переменного тока равно 30 Ом. В состав этого сопротивления входят параллельно включенные сопротивление резистора R_3 в эмиттерной цепи и сопротивление транзистора со стороны эмиттера. Последнее в основном определяется сопротивлением участка эмиттер-база R_{6-3} , которое можно оценить по формуле на основании рисунка 20

$$R_{\text{вых}} \approx R_{6-3} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{2 - 1,983}{692,9 \cdot 10^{-6}} = 25 \text{ Ом}, \quad (35)$$

что согласуется с соответствующими теоретическими положениями.

Проверим на достоверность рассчитанную величину выходного сопротивления по переменной составляющей. Для этого подключим на выход эмиттерного повторителя сопротивление нагрузки R_H , равное $R_{\text{вых}}$ транзисторного усилителя. Результаты моделирования этого действия были представлены на рисунке 22: напряжение на выходе усилителя уменьшилось в 2 раза, то есть расчеты приведены верно.

Организовать режим к.з. на выходе эмиттерного повторителя по постоянной составляющей согласно модели, представленной на рисунке 10 не представляется возможным, так внутренние сопротивления источников напряжений GB1 и GB2 на входе равны нулю. Поэтому во входной цепи отсутствует сопротивление, ограничивающее базовый ток транзистора.

На натурной модели при таких напряжениях на входе к.з. на выходе сразу бы вывело из строя транзистор. Чтобы этого не произошло в базовую цепь вводят ограничивающий (балластный) резистор. Часто роль этого резистора выполняет внутреннее сопротивление источника напряжения на входе эмиттерного повторителя.

На рисунке 23 показана модель схемы эмиттерного повторителя для постоянной составляющей.

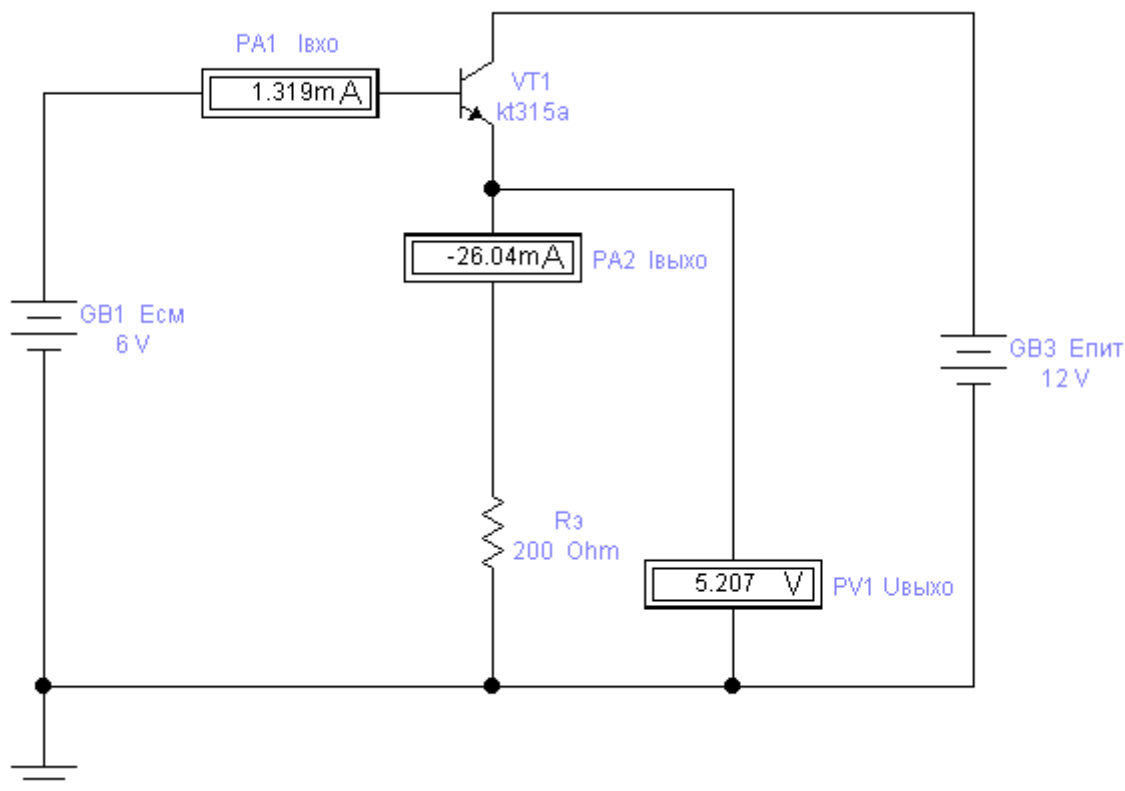


Рис. 23. Снимок с экрана модели эмиттерного повторителя для постоянной составляющей с источником напряжения на входе

При создании режима к.з. по постоянному току параметры усилителя будут сильно изменяться. В частности, будет изменяться ток базы и все

зависящие от него параметры. Поэтому ток базы необходимо стабилизировать, как показано на рисунке 24.

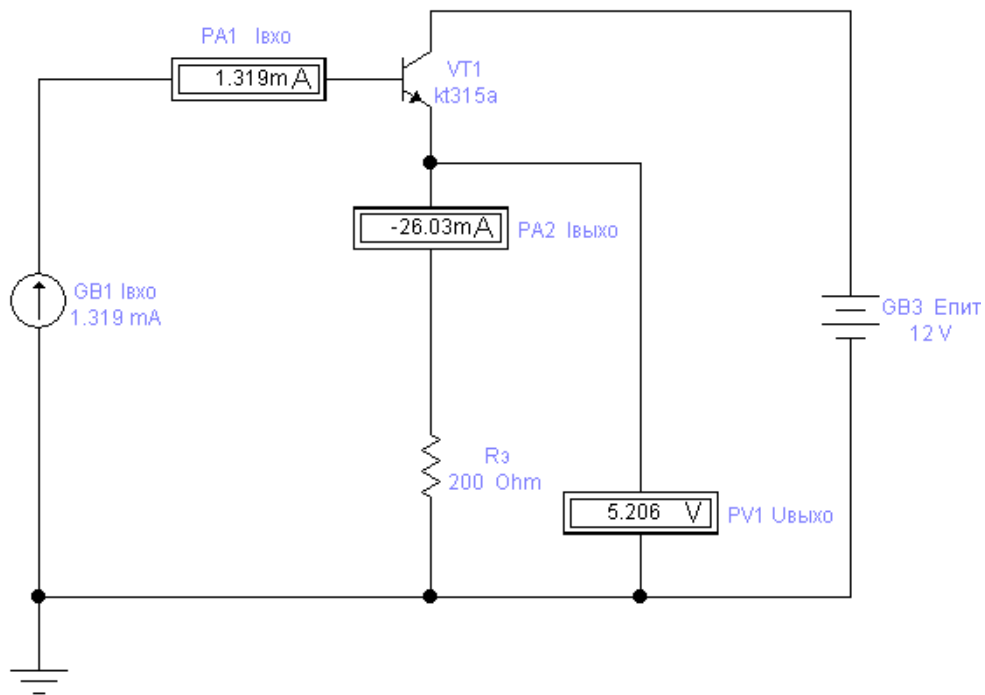


Рис. 24. Снимок с экрана модели эмиттерного повторителя для постоянной составляющей с источником тока на входе

Далее организуем режим к.з. по постоянному току, как показано на рисунке 25.

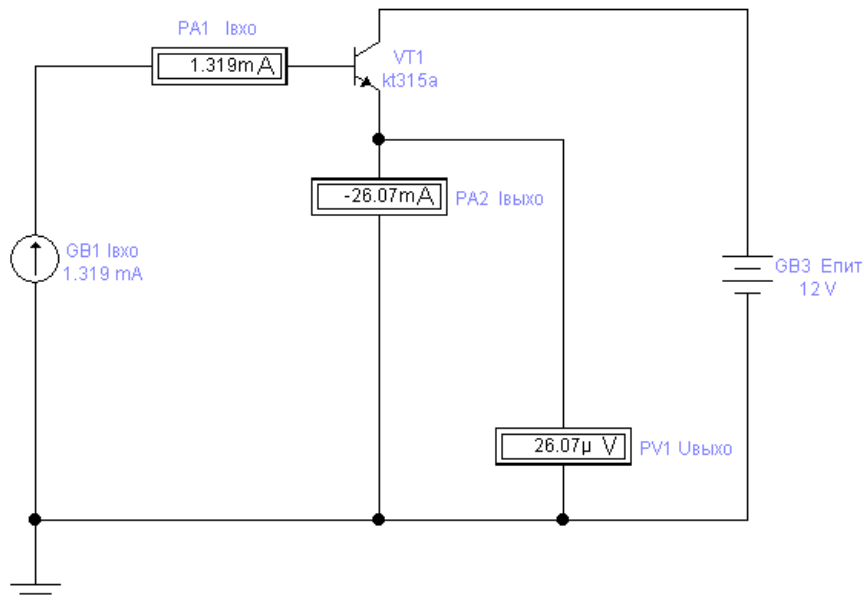


Рис. 25. Снимок с экрана модели эмиттерного повторителя в режиме короткого замыкания по постоянной составляющей на выходе

Ток как следует из показаний амперметра РА2 равен $I_{кзв\text{ых}0} = 26,07\text{мА}$, а напряжение х.х., как следует из показаний вольтметра PV2 на рисунке 10 равно $U_{ххв\text{ых}0} = 5,206\text{ В}$. Тогда выходное сопротивление $R_{в\text{ых}0}$ эмиттерного повторителя по постоянной составляющей будет равно

$$R_{в\text{ых}0} = \frac{U_{ххв\text{ых}0}}{I_{кзв\text{ых}0}} = \frac{5206\text{мВ}}{26,07\text{мА}} = 200\text{ Ом}. \quad (36)$$

Проверим на достоверность рассчитанную величину выходного сопротивления по постоянной составляющей. Для этого подключим на выход эмиттерного повторителя сопротивление нагрузки $R_{н}$, равное $R_{в\text{ых}0}$ транзисторного усилителя. Результаты моделирования этого действия представлены на рисунке 26: напряжение на выходе усилителя уменьшилось в 2 раза, то есть расчеты приведены верно.

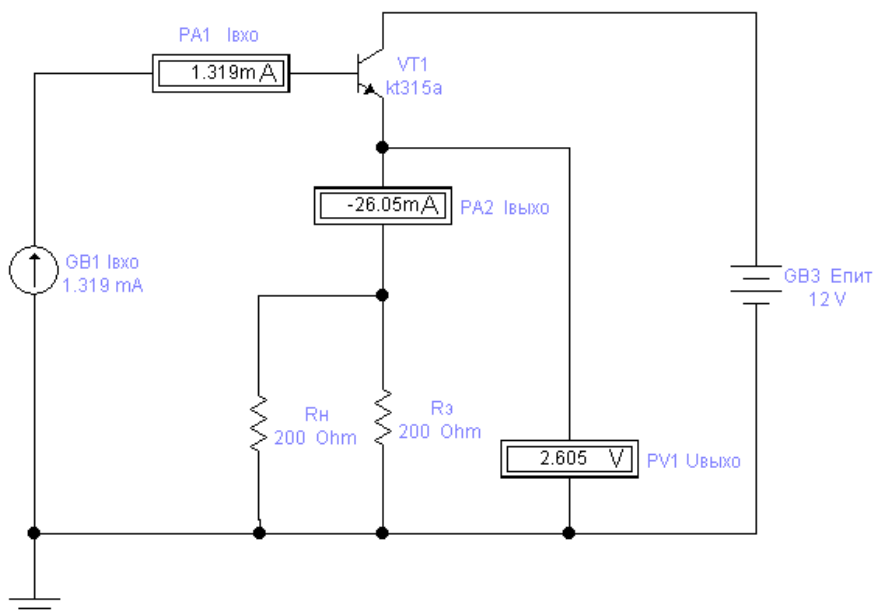


Рис. 26. Снимок с экрана модели эмиттерного повторителя в режиме подключения нагрузки по постоянному току

Таким образом, выходное сопротивление эмиттерного повторителя по постоянному току равно величине сопротивления резистора в эмиттерной цепи, а сам транзистор представляет собой источник тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение характеристик различных типов усилительных каскадов на биполярных транзисторах. Производится сравнение значений, полученных при моделировании с теоретическими. При необходимости углубить теоретические знания по рассмотренным темам следует обратиться к библиографическому списку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТП ВГТУ 62-2007 Текстовые документы. Правила оформления. - Воронеж: ВГТУ, 2007. – 53 с.
2. Малахов В.П. Схемотехника аналоговых устройств: пособие для вузов [Электронный ресурс] / В.П. Малахов – Режим доступа: <https://kurskelectronic.ru/library/sxemotexnika-analogovyx-ustrojstv-v-p-malaxov/>
3. Чижма, С.Н. Основы схемотехники; Учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс] / С.Н. Чижма - Электрон. дан. – Режим доступа: <https://studizba.com/files/show/pdf/15828-1-chizhma-s-n--osnovy-shemotehniki-2008.html>
4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники. В 2-х томах с дополнением. [Электронный ресурс] / П. Хоровиц, У.Хилл - пер с англ. под. ред. канд. техн. наук М.В. Гальперина - Издание 3-е стереотипное - М.; Мир 1986 - Т.1 - 596 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Определение входных и выходных сопротивлений однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах.....	3
1.1. Цель лабораторной работы	3
1.2. Содержание работы	4
2. Краткие теоретические сведения.....	4
3. Разработка моделей однокаскадных резистивных усилителей для определения входных и выходных сопротивлений в зависимости от варианта включения транзистора	6
3.1. Разработка моделей однокаскадного резистивного усилителя для определения входных и выходных сопротивлений по схеме ОЭ на биполярном п-р-п транзисторе.	6
3.1.1. Модель для нахождения параметров модели усилителя, работающей на середине линейного участка амплитудной характеристики	6
3.1.2. Разработка моделей для определения внутренних сопротивлений транзистора по схеме ОЭ по постоянному и переменному токам.....	13
3.1.3. Разработка моделей для определения выходного сопротивления однокаскадного усилителя по схеме ОЭ по постоянному и переменному токам	18
3.1.4. Разработка моделей для определения внутренних сопротивлений транзистора по схеме ОЭ по постоянному и переменному токам.....	22
3.2. Разработка моделей однокаскадного резистивного усилителя для определения входных и выходных сопротивлений по схеме ОБ на биполярном п-р-п транзисторе	24
3.2.1. Модель для нахождения параметров модели усилителя, работающей на середине линейного участка амплитудной характеристики	24
3.2.2. Разработка моделей для определения выходных сопротивлений транзистора по схеме ОБ по постоянному и переменному токам	26
3.3. Разработка моделей однокаскадного резистивного усилителя для определения входных и выходных сопротивлений по схеме ОК на биполярном п-р-п транзисторе	28
3.3.1. Разработка моделей для определения выходных сопротивлений транзисторного усилителя по схеме ОК для постоянного и переменного токам	30
Заключение	35
Библиографический список	36

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 1
для студентов специальности 11.05.01
«Радиоэлектронные системы и комплексы»
очной формы обучения*

Составители:
Худяков Юрий Васильевич
Русанов Александр Валерьевич

В авторской редакции

Подписано к изданию 16.09.2022.
Уч.-изд. л. 1,8.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84