

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 3
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 № 3
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 № 3 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.– 40 с.

В методических указаниях рассматриваются вопросы моделирования режимов работы усилительных элементов однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах при больших уровнях выходного сигнала. 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_ЛР3.pdf.

Ил. 38. Табл. 1. 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 лабораторных работ составлены в соответствии с программой курса «Основы теории радиосистем передачи информации» для специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Лабораторные работы посвящены изучению режимов работы усилительных элементов однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах при больших уровнях выходного сигнала. Моделирование осуществляется в программном обеспечении EWB5.12 и Micro-CaP8.

Методические указания содержат авторские иллюстрации.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ПРИ БОЛЬШИХ УРОВНЯХ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

1.1. ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является изучение влияния режима работы однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на его усилительные свойства, искажение сигнала и другие параметры при больших уровнях выходного сигнала.

1.2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Содержанием практической части работы является выполнение расчетно-графических работ по определению токов и напряжений резистивного усилителя на биполярных транзисторах по схеме ОЭ для разных положений рабочей точки.

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

Правила безопасности при выполнении лабораторной работы являются типовыми.

Тип транзистора такой же как в лабораторной работе №1.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Каждый переход биполярного транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают следующие четыре режима работы транзистора.

Усилительный или активный режим - на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный - обратное. Именно этот режим работы транзистора соответствует максимальному значению коэффициента передачи тока эмиттера. Ток коллектора пропорционален току базы, обеспечиваются минимальные искажения усиливаемого сигнала.

Инверсный режим - к коллекторному переходу подведено прямое напряжение, а к эмиттерному - обратное. Инверсный режим приводит к значительному уменьшению коэффициента передачи тока базы транзистора по сравнению с работой транзистора в активном режиме и поэтому на практике используется только в ключевых схемах.

Режим насыщения - оба перехода (эмиттерный и коллекторный) находятся под прямым напряжением. Выходной ток в этом случае не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки. Из-за малого напряжения между выводами коллектора и эмиттера режим насыщения используется для замыкания цепей передачи сигнала.

Режим отсечки - к обоим переходам подведены обратные напряжения. Так как выходной ток транзистора в режиме отсечки практически равен нулю, этот режим используется для размыкания цепей передачи сигналов.

Основным режимом работы биполярных транзисторов в аналоговых устройствах является активный режим. В цифровых схемах транзистор работает в ключевом режиме, т.е. он находится только в режиме отсечки или насыщения, минуя активный режим.

Режим работы усилителя определяется начальным положением рабочей точки (точки покоя) на сквозной или амплитудной динамических характеристик усилительного элемента, т. е. на характеристике зависимости выходного тока или напряжения усилительного элемента от ЭДС входного сигнала. Точка покоя определяет величину токов и напряжений на выводах усилительного элемента при отсутствии входного сигнала.

Различают три основных режима работы усилительного элемента — А, В, С и два промежуточных АВ и D.

В режиме А рабочая точка 0 выбирается на середине прямолинейного участка сквозной $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}, E_{\text{см}})$ и амплитудной $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}, E_{\text{см}})$ динамических характеристик. Выходной сигнал, как следует из рисунка 1 практически повторяет форму входного сигнала при относительно небольшой величине последнего.

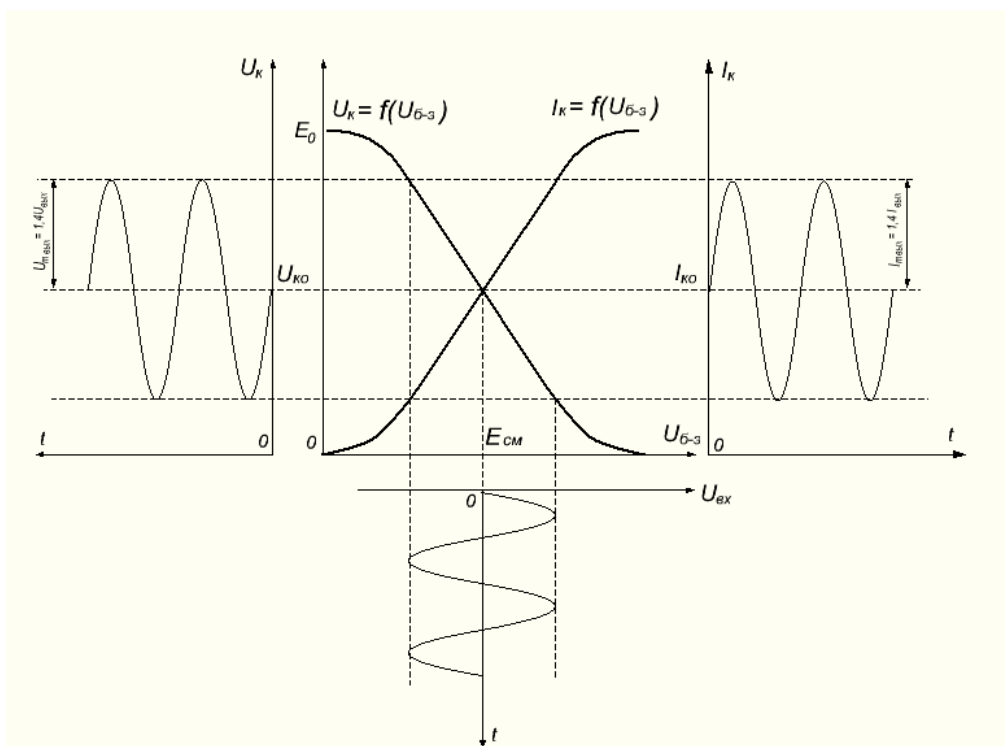


Рис. 1. Работа усилительного элемента в режиме А

Нелинейные искажения при этом минимальны. Ток в выходной цепи существует в течение всего периода входного сигнала. При этом среднее значение выходного тока велико по сравнению с амплитудой (или действующим значением) его переменной составляющей. Поэтому КПД усилительного каскада невысок от 2 до 20 %.

В режиме В рабочая точка 0 выбирается так, чтобы ток через усилительный элемент протекал в течение несколько больше, чем половина периода входного сигнала (рисунок 2).

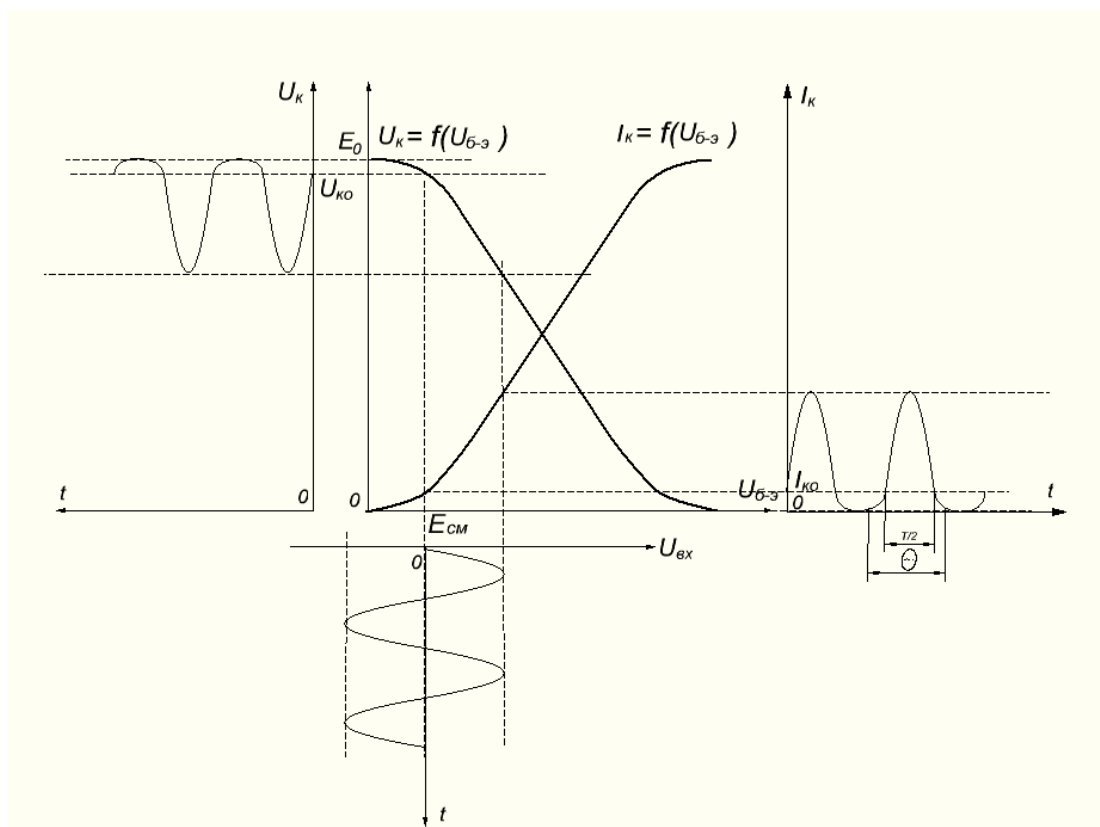


Рис. 2. Работа усилительного элемента в режиме В

Усилительный элемент работает с так называемой отсечкой. Угол, соответствующий моменту прекращения тока, называется углом отсечки и обозначается через Θ . При работе в режиме В угол отсечки $\Theta > 90^\circ$. Ток покоя из-за нижнего изгиба сквозной характеристики оказывается неравным нулю, и форма выходного тока искажается относительно входного. В кривой тока появляются высшие гармоники, что приводит к увеличению нелинейных искажений по сравнению с режимом А. Среднее значение выходного тока уменьшается, в результате чего КПД усилителя достигает 60...70%.

В режиме С рабочая точка 0 выбирается таким образом, чтобы угол отсечки оказался равным $\Theta = 90^\circ$ (рисунок 3).

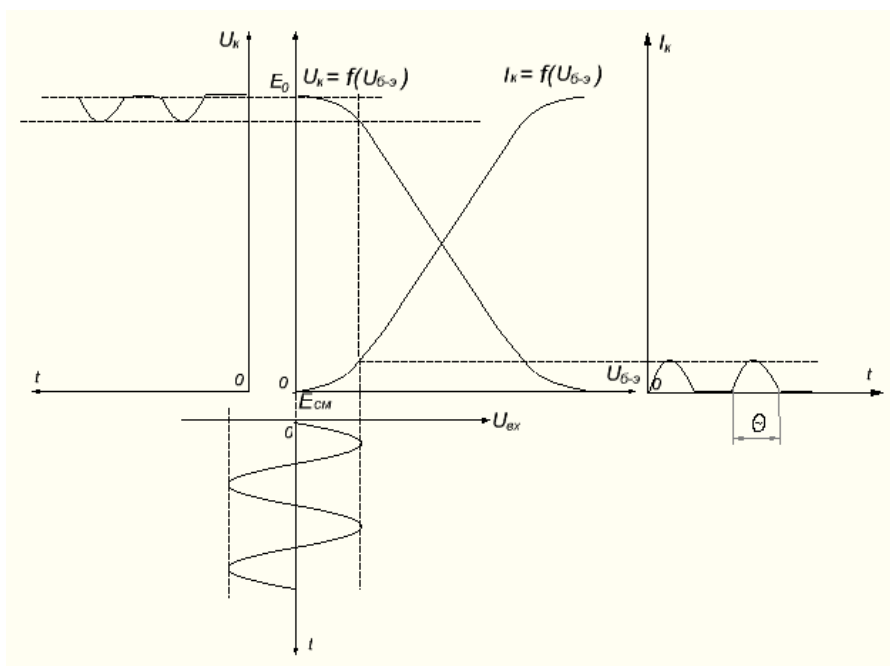


Рис. 3. Работа усилительного элемента в режиме С

В этом режиме обеспечивается КПД до 70 до 85 %. Однако высокий уровень линейных искажений существенно ограничивает применение его для усиления колебаний.

Существует промежуточный режим АВ, когда рабочая точка О выбирается на сквозной характеристике ниже, чем в режиме А, и выше, чем в режиме В (но все же ближе к режиму В) (рисунок 4). Поэтому и показатели этого режима имеют промежуточное значение между режимами А и В — КПД 50...60% при невысоком уровне нелинейных искажений.

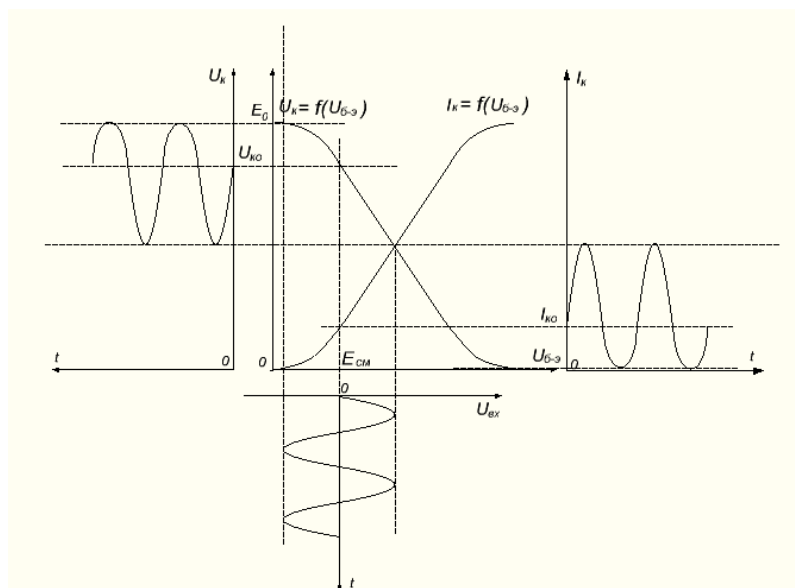


Рис. 4. Работа усилительного элемента в режиме АВ

Указанные характеристики соответствуют усилителям с ОЭ, которые кроме усиления инвертируют выходное напряжение. Каскады с ОБ и ОК не инвертируют выходное напряжение, однако каскад ОБ инвертирует выходной ток.

3. ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНОЙ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВХОДНОЙ И ПРОХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

Схема ОЭ для измерения амплитудной $U_{\text{ВЫХО}} = f_1(E_{\text{СМ}})$ и динамических входной и проходной характеристик $I_{\text{ВЫХО}} = f_2(E_{\text{СМ}})$ при $R_{\text{К}} = 3 \text{ кОм}$ показана на рисунке 5.

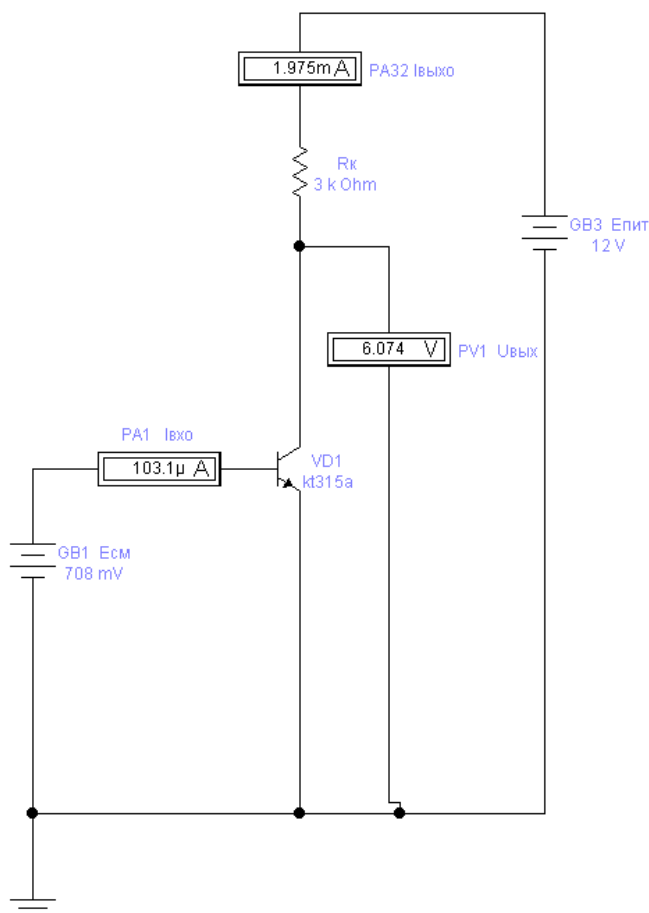


Рис. 5. Снимок с экрана модели для определение зависимости $U_{\text{ВЫХО}} = f_1(E_{\text{СМ}})$, $I_{\text{ВЫХО}} = f_2(E_{\text{СМ}})$ и $I_{\text{ВХО}} = f_2(E_{\text{СМ}})$ при $R_{\text{К}} = 3 \text{ кОм}$ и $E_{\text{ПИТ}} = 12 \text{ В}$

Результаты измерения $U_{\text{ВЫХО}}$, $I_{\text{ВЫХО}}$ и $I_{\text{ВХО}}$ для разных значений $E_{\text{СМ}}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения $U_{\text{ВЫХО}}$, $I_{\text{ВЫХО}}$ и $I_{\text{ВХО}}$ для разных значений $E_{\text{см}}$ при $R_{\text{к}} = 3 \text{ кОм}$ и $E_{\text{пит}} = 12 \text{ В}$

$E_{\text{пит}} = 12 \text{ В}$ $R_{\text{к}} = 3 \text{ кОм}$	$E_{\text{см}}, \text{ мВ}$	600	620	640	660	680	700	710	720	730	740	750	760	780
	$I_{\text{ВХО}}, \text{ мкА}$	11,3	16,2	24	35	53	85	106	140	305	140	2912	5000	11200
	$U_{\text{ВЫХО}}, \text{ В}$	11,86	11,75	11,50	11,0	9,83	7,53	5,7	3,06	0,1	0,06	0,049	0,045	0,043
	$I_{\text{ВЫХО}}, \text{ мА}$	0,045	0,084	0,17	0,35	0,72	1,49	2,1	3,00	3,96	3,98	3,98	3,99	3,99

По результатам измерения строим графики $U_{\text{ВЫХО}} = f_1(E_{\text{см}})$, $I_{\text{ВХО}} = f_2(E_{\text{см}})$ и $I_{\text{ВЫХО}} = f_3(E_{\text{см}})$ в программе SPlan, копируем их в библиотеку и при необходимости в отчет по лабораторной работе.

На рисунках 6, 7 и 8 представлены соответственно графики динамических входной, проходной и амплитудной характеристик.

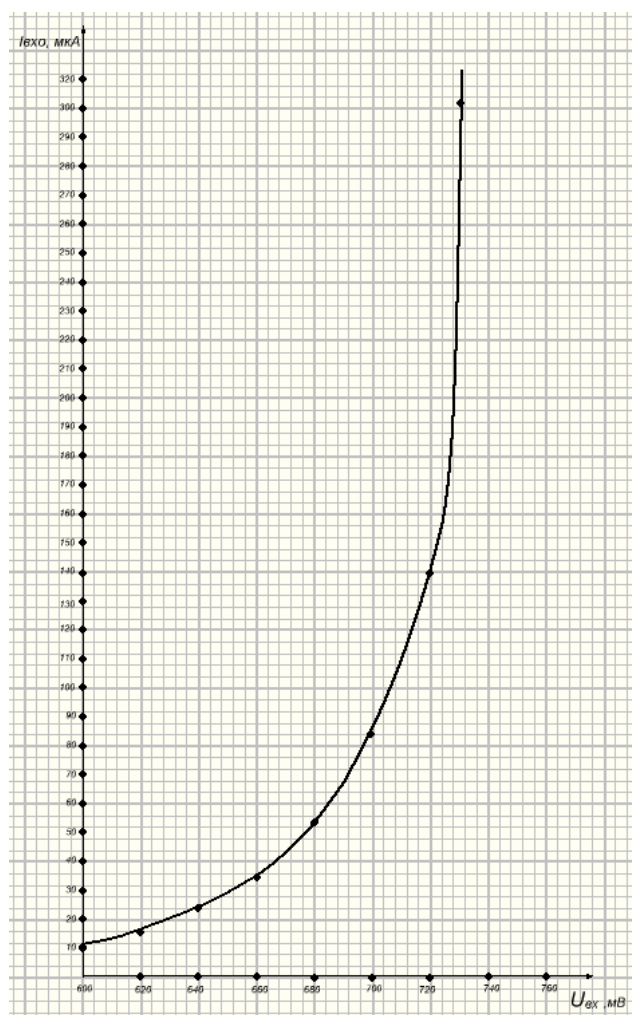


Рис. 6. Динамическая входная характеристика $I_{\text{ВХО}} = f_2(E_{\text{см}})$ при $R_{\text{к}} = 3 \text{ кОм}$ и $E_{\text{пит}} = 12 \text{ В}$

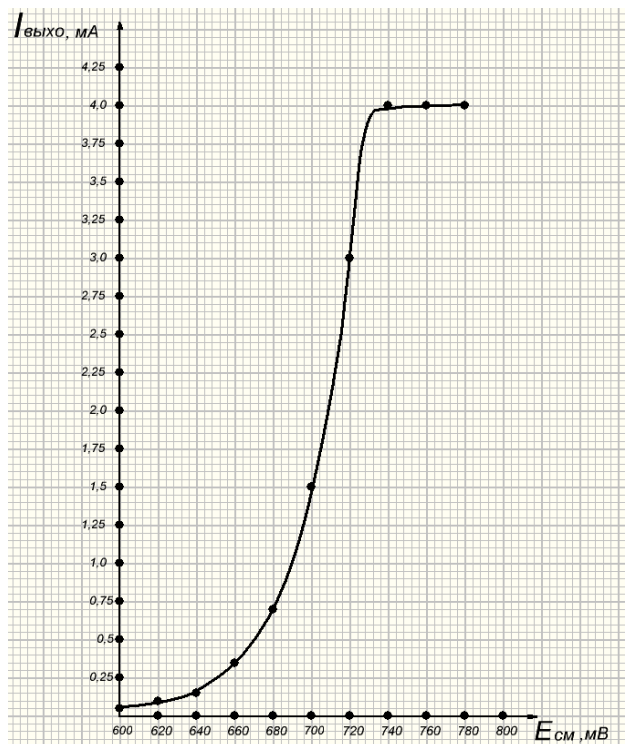


Рис. 7. Динамическая проходная характеристика $I_{выхо} = f_3(E_{см})$ при $R_k = 3 \text{ кОм}$ и $E_{пит} = 12 \text{ В}$

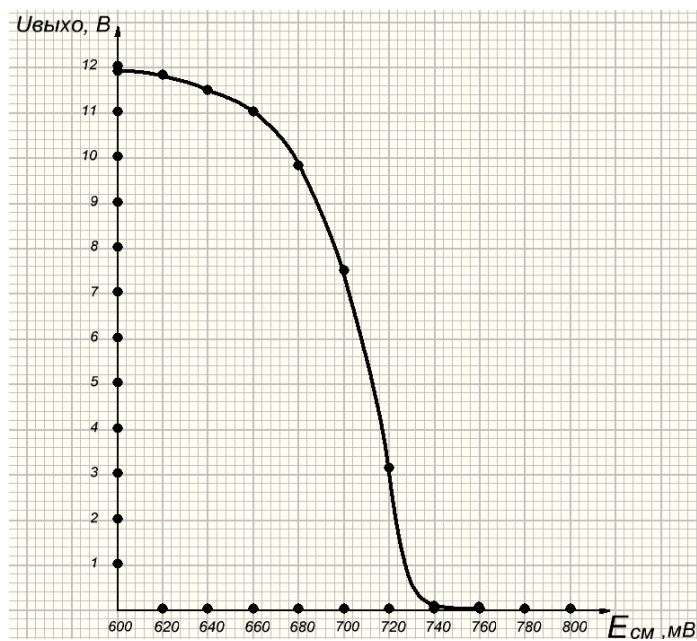


Рис. 8. Амплитудная характеристика при $R_k = 3 \text{ кОм}$ и $E_{пит} = 12 \text{ В}$

Амплитудную характеристику можно аппроксимировать тремя отрезками, как показано на рисунке 9.

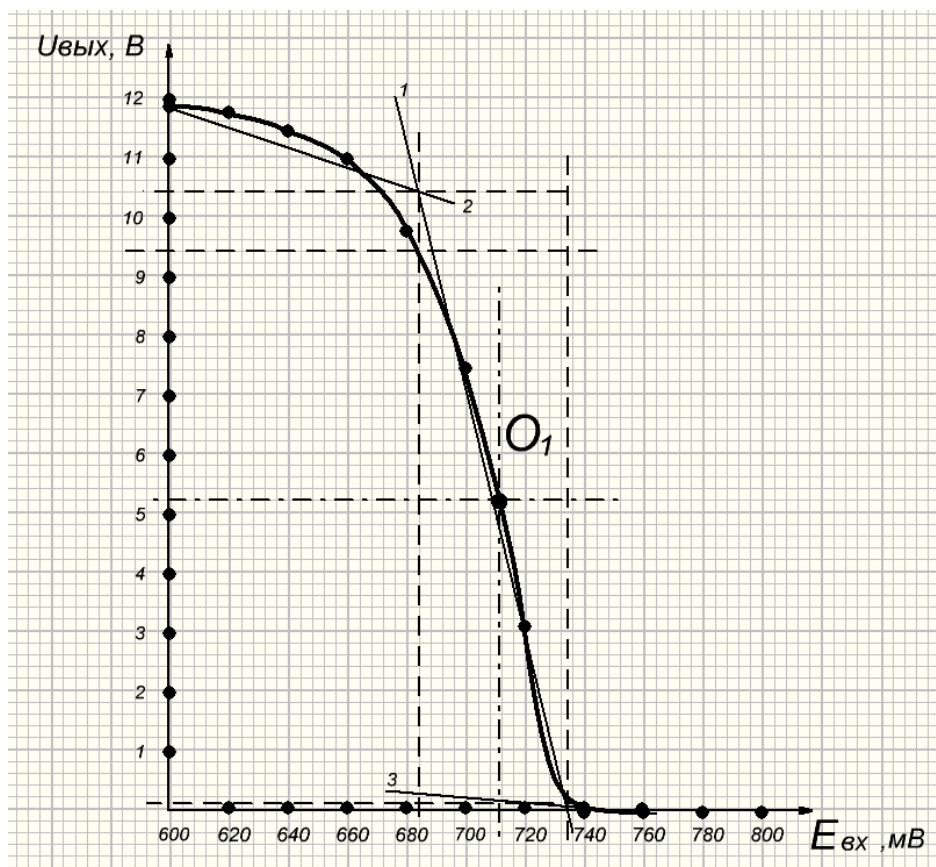


Рис. 9. Кусочно-линейная аппроксимация амплитудной характеристики

Амплитудная характеристика представляет собой убывающую функцию $U_{\text{выхо}} = f_1(E_{\text{см}})$. В начале и конце графика этой функции имеются перегибы, а в середине функция монотонно убывает. В соответствие с таким характером графика этой функции разобьем его на три участка и заменим каждый из них прямыми линиями, как показано на рисунке 9. Серединный самый протяженный участок аппроксимируем прямой 1, верхний участок до первого перегиба – прямой 2 и нижний после второго перегиба – прямой 3.

4. АНАЛИЗ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ БОЛЬШИХ УРОВНЯХ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В РАЗНЫХ РЕЖИМАХ

4.1. АНАЛИЗ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ БОЛЬШИХ УРОВНЯХ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА НА СЕРЕДИНЕ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА

Точка пересечения прямых 1 и 2 (рисунок 9) имеет координаты (684 мВ и 10,4 В), а точка пересечения прямых 1 и 3 - (735 мВ и 0 В). Однако эти точки лежат вне графика амплитудной характеристики, что может к появлению дополнительной ошибки при проведении экспериментальных работ. Поэтому точку пересечения прямых 1 и 2 горизонтально переместим до пересечения с графиком амплитудной характеристики, которая имеет координаты (670 мВ, 10,4 В). Точка пересечения прямых 1 и 3 - (735 мВ и 0 В) практически лежит на графике амплитудной характеристики.

Ордината точка пересечения прямых 1 и 2 равна 10,4 В. Линейный участок 1 заканчивается практически при ординате, равной нуле. Тогда среднее значение напряжения на коллекторе будет равно 5,2 В. Проводим линию, параллельную оси абсцисс до пересечения с графиком $U_{\text{выхо}} = f_1(E_{\text{см}})$. Точку пересечения O_1 принимаем за середину линейного участка амплитудной характеристики., которая имеет координаты (711 мВ и 5,2 В). Соберем схему, представленную на рисунке 5, установим напряжение смещения 711 мВ и проверим выходное напряжение.

Результаты мониторинга выбранной рабочей точки представлены на рисунке 10

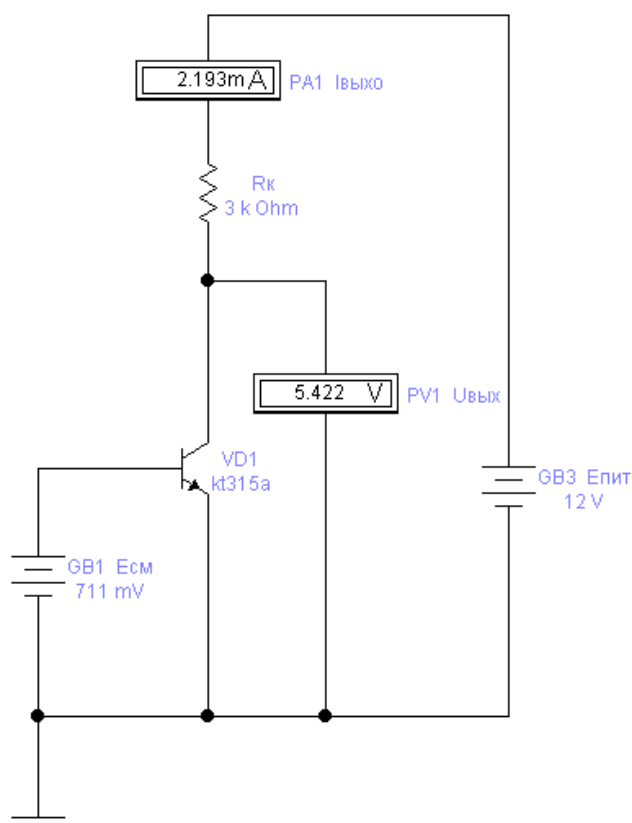


Рис. 10. Результаты мониторинга выбранной рабочей точки O_1

Ошибка в выбранном значении выходного напряжения и показания вольтметра PV1, равная приблизительно 0,2 В, находится в пределах погрешности при построении графиков.

За входной динамический диапазон линейного участка 1 примем разность абсцисс точек пересечения прямых 1 и 2 и прямых 1 и 3. Тогда динамический диапазон по входу $\Delta E_{\text{см}}$ будет равен

$$\Delta E_{\text{см}} = E_{\text{смmax}} - E_{\text{смmin}} = 735 - 684 = 51 \text{ мВ.} \quad (1)$$

Максимальный размах сигнала в пределах линейного участка динамической характеристики на входе усилителя будет равен также 51 мВ,

амплитуда $U_{\text{мвх}} = 25,5 \text{ мВ}$, и действующее значение в 1,41 раза меньше, то есть $U_{\text{вх}} = 18 \text{ мВ}$. Для получения меньших искажений примем

$$U_{\text{вх}} = 10 \text{ мВ}$$

Визуально по осциллограмме определим характер искажений выходных сигналов при синусоидальном сигнале $U_{\text{вх}} = 10 \text{ мВ}$ для середины линейного участка O_1 , а также для точек пересечения прямых 1 и 2 и прямых 1 и 3.

Сначала соберем схемы для наблюдения за формой сигнала, представленные на рисунке 11.

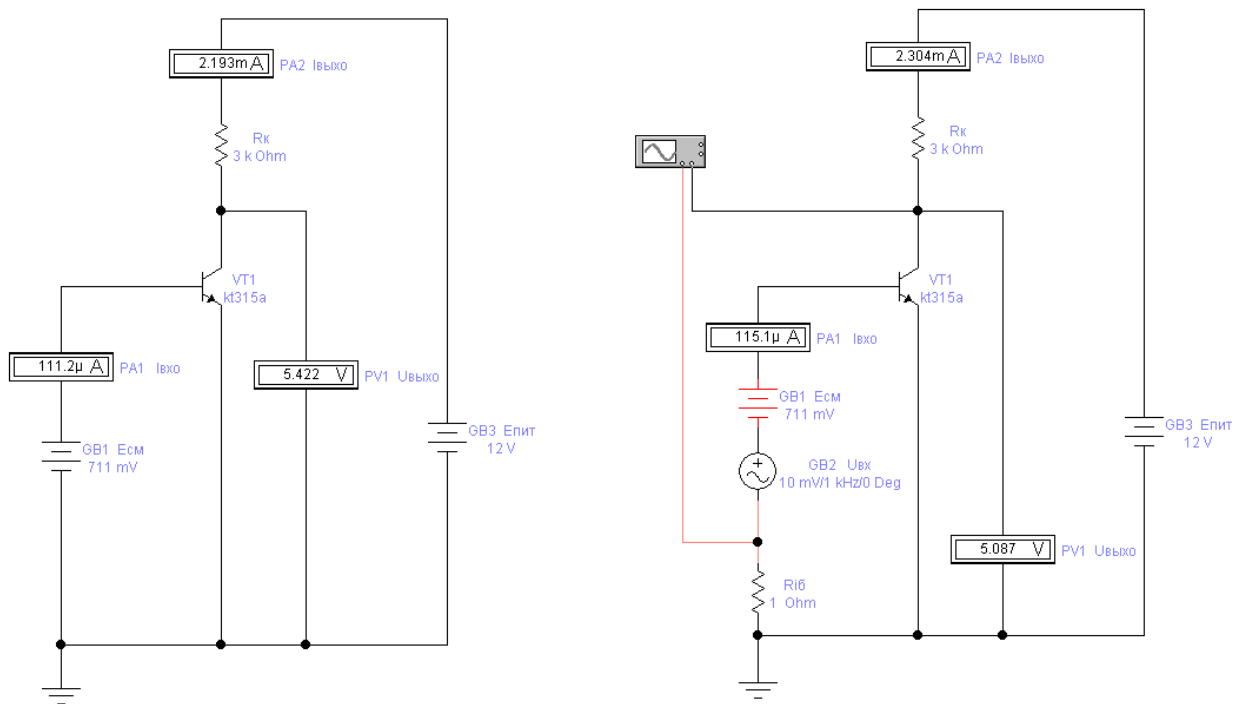


Рис. 11. Снимок с экрана схемы для наблюдения за формой сигнала для середины линейного участка 1

В левой схеме нет источника переменного напряжения. В правой схеме он присутствует. Контроль за формой сигналов осуществляется осциллографом. Один канал этого осциллографа подключен к выходу усилителя и контролирует форму сигнала на коллекторе транзистора VT1, а второй канал контролирует форму напряжения на резисторе R_{i6} . Величина последнего существенно меньше входного сопротивления усилительного каскада, поэтому его введение во входную цепь никак не сказывается на ее параметры. Этот резистор позволяет линейно преобразовать протекающий через него ток базы в напряжение для того, чтобы пользоваться осциллографом (осциллограф не контролирует ток). Однако, полярность падения напряжения на этом резисторе противоположно полярности источников питания в базовой цепи. При величине сопротивления этого резистора, равного 1 Ом токам в мА соответствуют напряжения в мВ, а токам в мкА – напряжения в мкВ.

Как показано на рисунке 11 однотипные токи и напряжения различны в случаях отсутствия и присутствия источника переменного напряжения GB2 $U_{вх}$. Разберем причину этого явления.

На рисунках 12 и 13 представлены осциллограммы соответственно переменных составляющих напряжения на выходе усилителя и тока базы. Из осциллограмм следует, что при синусоидальном входном сигнале переменные составляющие напряжения на выходе усилителя и тока базы даже визуально отличаются от синусоиды. Так, например, для переменной составляющей выходного напряжения курсор 1 показывает, что отрицательный полупериод U_{m-} имеет амплитуду 3,57 В, а положительный U_{m+} (курсор 2) - 2,91 В. Верхний полупериод как бы прижат, а нижний – растянут. Размах U_{p-p} сигнала будет равен сумме этих амплитуд $U_{m+} + U_{m-} \approx 6,5$ В.

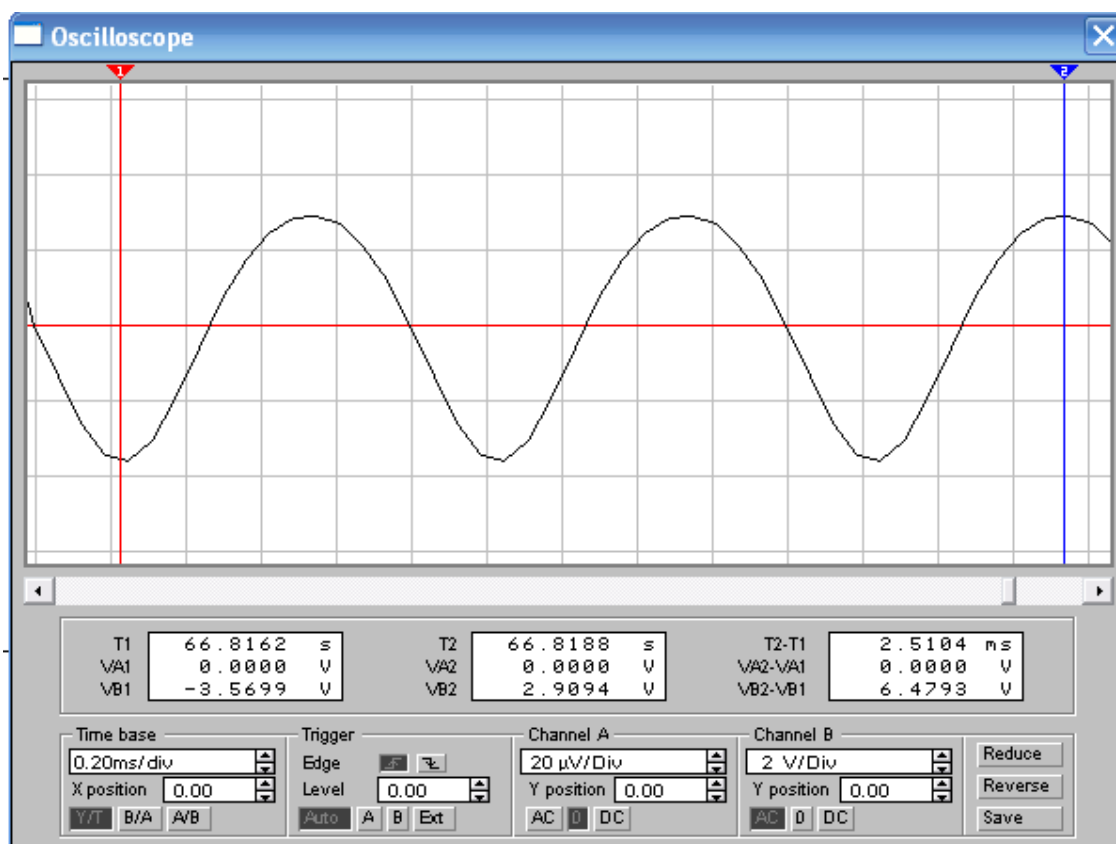


Рис. 12. Осциллограмма переменной составляющей выходного напряжения для середины линейного участка 1

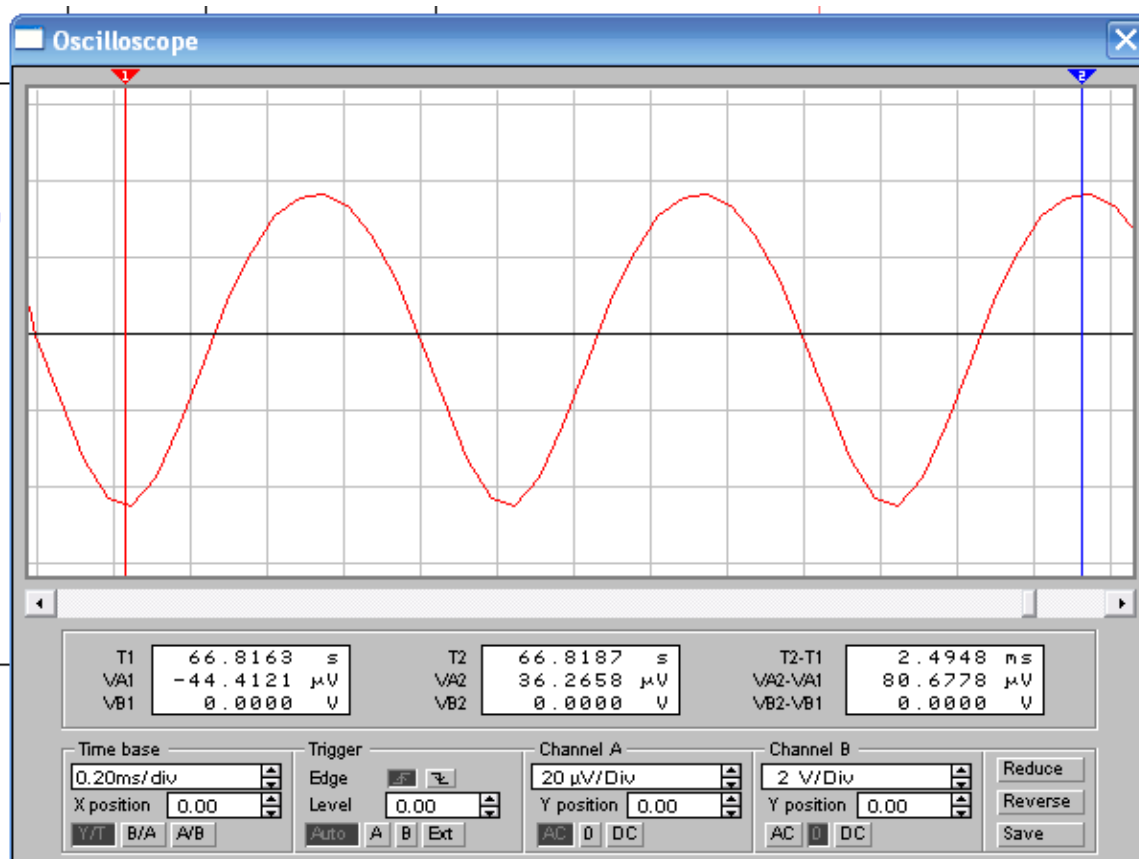


Рис. 13. Осциллограмма переменной составляющей тока базы для середины линейного участка 1

В случае гармонического сигнала амплитуды положительного и отрицательного полупериодов равны $U_{m+} = U_{m-} = U_{p-p} / 2 = U_m = 6,5 / 2 = 3,25$ В. Тогда действующее значение гармонического сигнала будет равно $U_m / 1,41 = 3,25 / 1,41 \approx 2,3$ В. Сравним формы осциллограмм с одинаковым размахом U_{p-p} искаженной переменной составляющей выходного напряжения и неискаженной. Для этого соберем схему, представленную на рисунке 14, а на рисунке 15 показаны в одном масштабе осциллограммы искаженного и гармонического сигналов. В качестве неискаженного сигнала будем использовать генератор GB0 с напряжением 2,3 В и частотой 1 кГц. Так как входное и выходное напряжения усилителя для каскада ОЭ находятся в противофазе, то источник GB0 включим в противофазе.

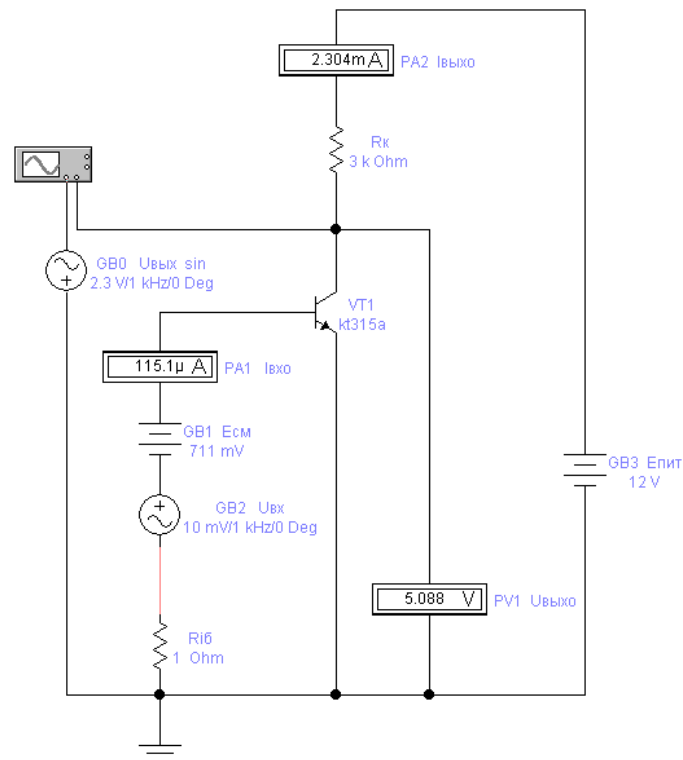


Рис. 14. Снимок с экрана схемы для сравнения формы осциллограмм искаженного и неискаженного сигналов

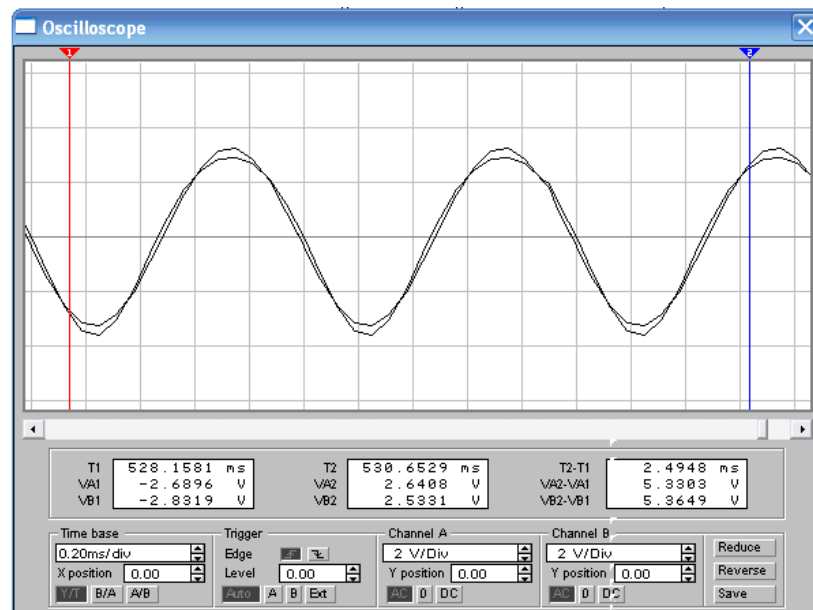


Рис. 15. Сравнение осциллограмм искаженного и неискаженного сигналов при одинаковом размахе U_{p-p} этих сигналов

В общем случае переменное напряжение в своем составе содержит постоянную составляющую и переменную составляющую в виде суммы гармонических составляющих. На рисунке 16 показан частный случай переменного напряжения u_{ω} , когда переменная составляющая $u_{\sin}$ состоит только из первой гармоники и постоянной составляющей u_0 .

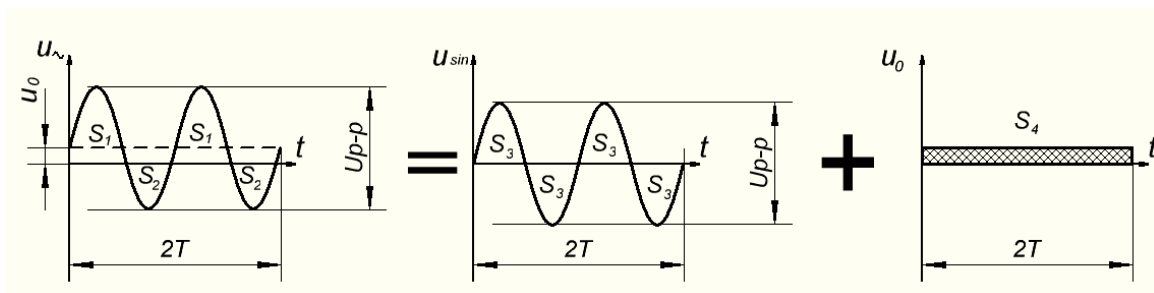


Рис. 16. График к определению величины постоянной составляющей

S_1 – площадь под графиком с положительным значением переменного напряжения u_v ; S_2 – площадь под графиком с отрицательным значением переменного напряжения u_v ;

S_3 – площадь полуволны переменной составляющей;

S_4 – заштрихованная площадь под графиком (прямая параллельная оси времени) постоянной составляющей;

U_{p-p} – размах переменного напряжения и переменной составляющей этого напряжения;

T – период сигнала

За одинаковый период времени (в нашем случае $2T$) можно записать для переменного напряжения

$$S_4 = 2S_1 - 2S_2. \quad (2)$$

В общем случае форма графика переменной составляющей может быть сложной, потому что она состоит из суммы гармонических сигналов. Каждый гармонический сигнал имеет постоянную составляющую, равную нулю. Тогда и их сумма $\sum U_{sin}$ тоже будет равна нулю, то есть постоянная составляющая отсутствует. Поэтому для любой формы осциллограммы переменной составляющей площадь под графиком с положительным значением напряжения будет всегда равна площади под графиком с отрицательным значением напряжения, как показано на рисунке 17.

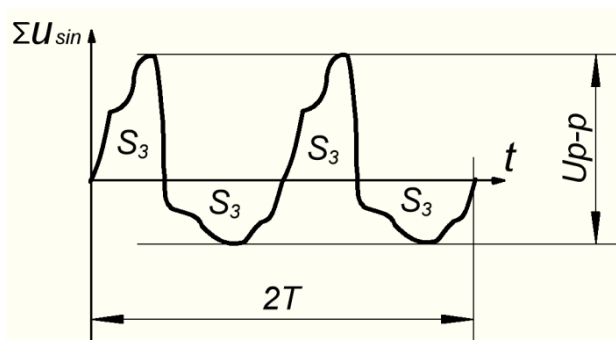


Рис. 17. График переменной составляющей сложной формы

Значение постоянной составляющей графически определяется в следующей последовательности:

- выравнивают значения размаха U_{p-p} сигнала и его переменной составляющей;
- совмещают графики этих сигналов;
- определяют величину постоянной составляющей по смещению осей времени.

Согласно показанию приборов левой по положению схеме на рисунке 11 временная ось для переменной составляющей тока базы должна проходить через точку с координатами (711 мВ, 101 мкА), а размах тока базы должен быть ограничен двумя горизонтальными прямыми. Последние проходят через точки пересечения графика входной динамической характеристики $I_{вxo} = f_2(E_{cm})$ вертикальными прямыми, расстояние между которыми определяются размахом входного сигнала. Входной сигнал симметричный относительно оси времени, так как он гармонический и, следовательно, положение вертикальных линий симметрично относительно линии, проходящей через точку 711 мВ на оси $U_{вх}$. Размах входного синусоидального сигнала $U_{p-p \text{ вх}}$ с эффективным напряжением $U_{вх} = 10 \text{ мВ}$ будет равен

$$U_{p-p \text{ вх}} = 2 \cdot 1.41 U_{вх} = 2,82 \cdot 10 \text{ мВ} = 28,2 \text{ мВ}, \quad (3)$$

с амплитудными значениями 14,1 мВ, симметрично расположенными относительно рабочей точки 711 мВ.

Строим или копируем из рисунка 6 или из библиотеки SPlan входную динамическую характеристику. Находим на оси абсцисс E_{cm} , равную 711 мВ. Проводим вертикальную линию до пересечения с графиком $I_{вxo} = f_2(E_{cm})$. Находим на оси абсцисс точки, равные $(711 - 14 = 697) \text{ мВ}$ и $(711 + 14) = 725 \text{ мВ}$. Также через эти точки проводим вертикальные линии до пересечения с графиком $I_{вxo} = f_2(E_{cm})$. Через полученные три точки пересечения проводим три горизонтальные прямые. Средняя горизонтальная линия отстоит от крайних на разных расстояниях, как показано на рисунке 18.

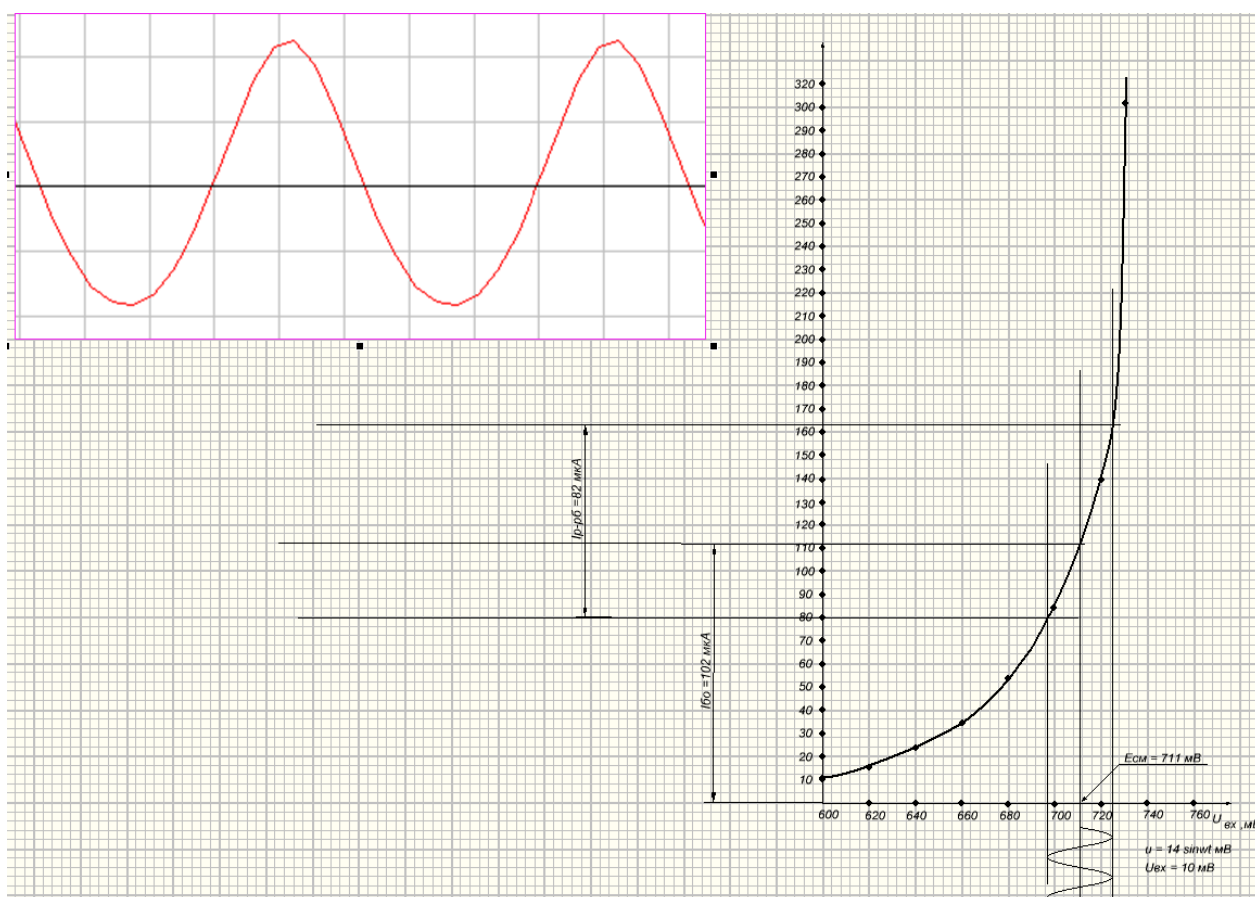


Рис. 18. Графический метод нахождения динамического диапазона I_{p-pb} переменной составляющей тока базы по динамическому диапазону U_{p-p} входного переменного напряжения и напряжения смещения $E_{см}$.

Расстояние между крайними горизонтальными линиями в мкА отсчитываем по шкале оси ординат; получилось 82 мкА. Для внесения этого размера в программе SPlan убираем галочку «Авто» в окне настройки размеров (рисунок 19) и записываем наименование и значения параметра как на рисунке 20.

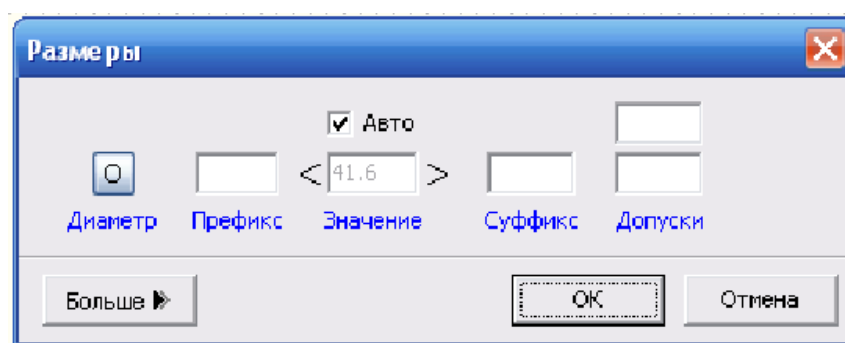


Рис. 19. Окно настройки размеров в автоматическом режиме

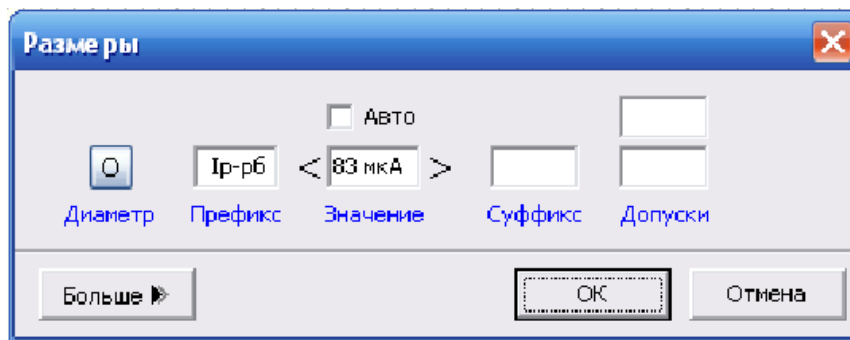


Рис. 20. Окно настройки размеров в ручном режиме

Для удобства отсчета нужно сначала выделить размерную линию, а затем перенести ее таким образом, что нижняя выносная линия размера совместилась с началом координат. Далее просто отсчитываем значение тока в точке пересечения верхней выносной линии с осью ординат.

С учетом того, что 1 мкВ на осциллограмме соответствует току базы в 1 мкА, из рисунка 13 определяем размах тока базы $I_{p-рб}$ путем суммирования амплитуд положительного I_{m+} и отрицательного I_{m-} полупериодов

$$I_{p-рб} = I_{m+} + I_{m-} = 36,3 + 44,4 \approx 80,7 \text{ мкА}, \quad (4)$$

или считываем напрямую эту сумму в окне VA2 – VA1 информационной панели осциллографа.

Как видим, последняя величина 80,7 мкА не сильно отличается от аналогичной 82 мкА, полученной графическим методом на рисунке 21.

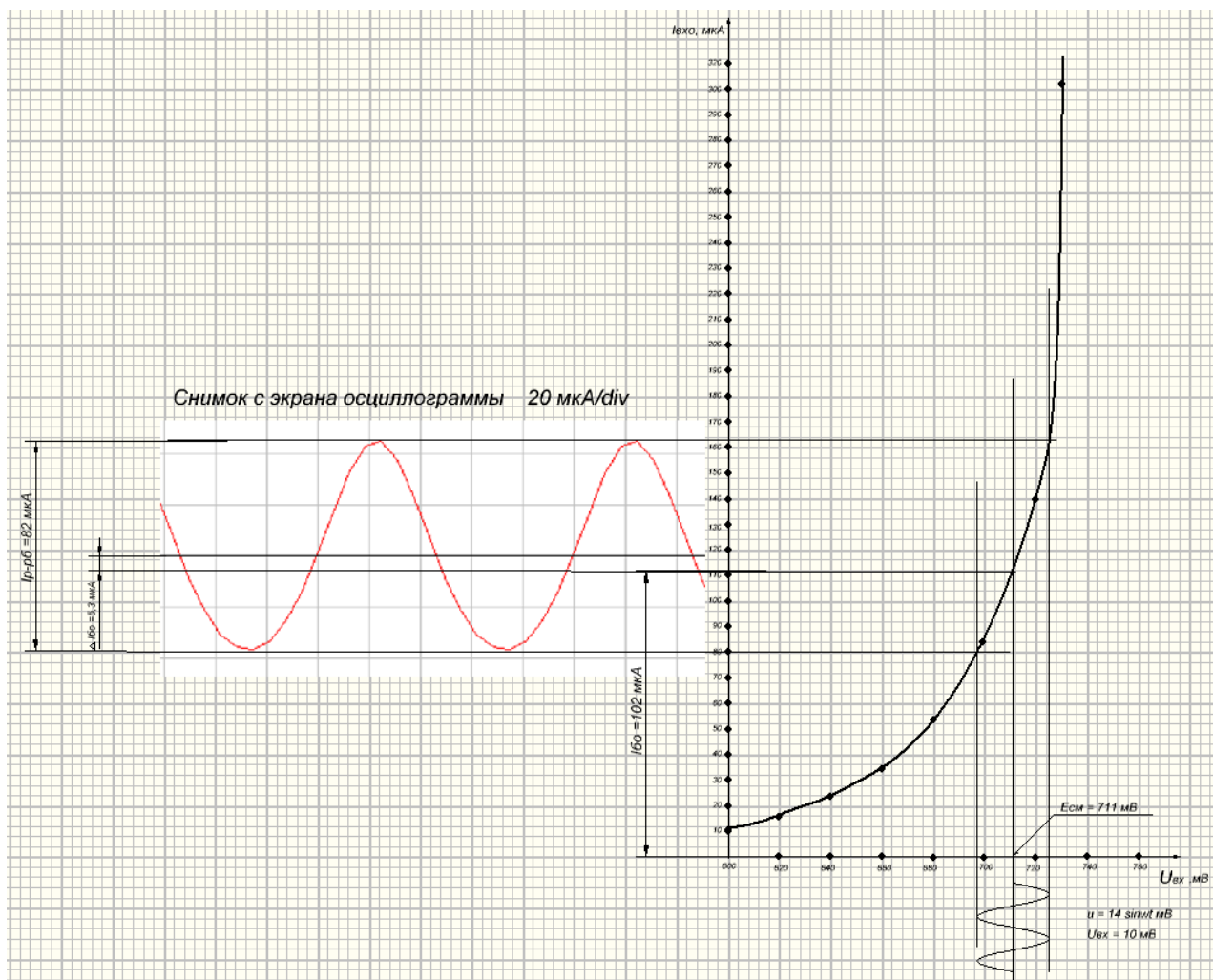


Рис. 21. Влияние нелинейности входной динамической характеристики транзистора на величину постоянной составляющей тока базы при входном сигнале для середины линейного участка 1

Копируем изображение осциллографа вместе с осциллограммой тока базы из рисунка 13 в Paint. Проводим обрезку рисунка. По оси времени оставляем два периода, а по оси напряжения – по половине клетки сверху и снизу от осциллограммы. Выделяем полученный фрагмент осциллограммы в Paint, копируем выделенный фрагмент осциллограмм через Ctrl+C в SPlan и зеркально отражаем по вертикали как показано на рисунке 18. Сжимаем или растягиваем фрагмент осциллограммы, привязавшись стрелкой только к уголку фрагмента. И одновременно перемещаем фрагмент до тех пор, пока размах осциллограммы не впишется между крайними горизонтальными линиями динамического диапазона переменной составляющей тока базы до касания к ним, как показано на рисунке 21.

Выше указывалось, что дополнительная постоянная составляющая определяется как разница в положении осей времени в отсутствие и присутствие входного сигнала. В нашем случае - это 12 мкА. Эксперимент показывает величину 4,6 мкА, что соответствует погрешности в процентах

$$\delta I_{\text{бo}} = \frac{\Delta(\Delta I_{\text{бo}})}{I_{\text{бo}}} = \frac{5.3 - 4.6}{102} = \frac{0.7}{102} \approx 0.7 \%. \quad (5)$$

Причем основная часть погрешности падает на графическую часть.

На рисунке 22 представлена осциллограмма переменной составляющей напряжения на выходе усилителя. Из осциллограммы следует, что при синусоидальном входном сигнале переменная составляющая напряжения на выходе усилителя даже визуально отличаются от синусоиды. Так, например, для переменной составляющей выходного напряжения курсор 1 показывает, что отрицательный полупериод U_{m-} имеет амплитуду 3,57 В, а положительный U_{m+} (курсор 2) - 2,91 В. Верхний полупериод как бы прижат, а нижний – растянут. Размах U_{p-p} сигнала будет равен сумме этих амплитуд $U_{m+} + U_{m-} \approx 6,5$ В.

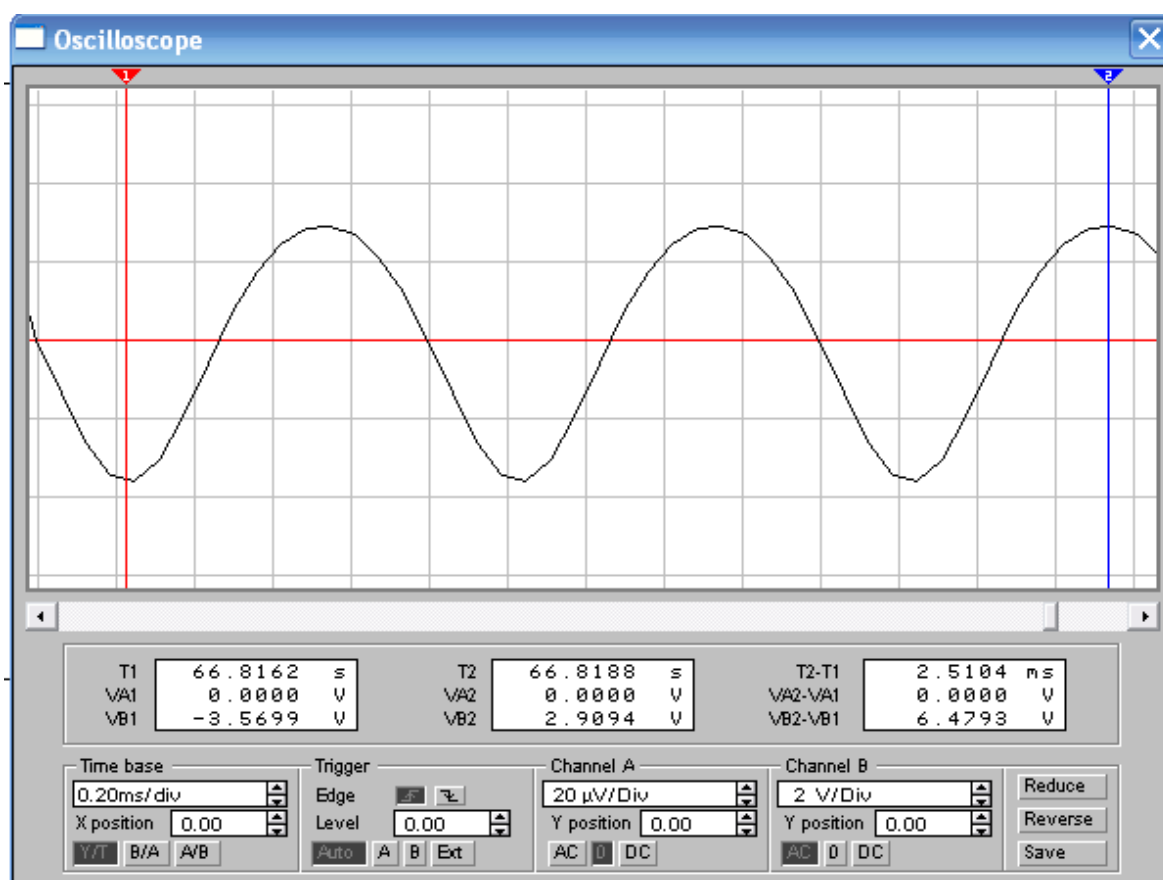


Рис. 22. Осциллограмма переменной составляющей выходного напряжения (между коллектором и эмиттером) для середины линейного участка 1

Форма напряжения на резисторе R_k получается в результате вычитания из напряжения источника питания GB3 напряжения между коллектором и эмиттером. Форма напряжения на резисторе R_k и тока через этот резистор и, следовательно, тока коллектора транзистора VT1 находится в противофазе с представленной на рисунке 22, что следует из особенности работы каскада с ОЭ. Размах тока коллектора $I_{p-рк}$ сигнала будет равен

$$I_{p-рк} = U_{p-p} / R_k = 6,5 \text{ В} / 3 \text{ кОм} \approx 2,2 \text{ мА}. \quad (6)$$

Строим или копируем из рисунка 7 или из библиотеки SPlan проходную динамическую характеристику $I_{\text{выхо}} = f_3(E_{\text{см}})$. Находим на оси абсцисс $E_{\text{см}}$, равную 711 мВ. Проводим вертикальную линию до пересечения с графиком $I_{\text{выхо}} = f_3(E_{\text{см}})$. Находим на оси абсцисс точки со значениями $(711 - 14 = 697)$ мВ и $(711 + 14) = 725$ мВ. Через эти точки проводим вертикальные линии до пересечения с графиком $I_{\text{вхо}} = f_2(E_{\text{см}})$. Через полученные три точки пересечения с графиком проводим три горизонтальные прямые. Средняя горизонтальная линия отстоит от крайних на разных расстояниях, как показано на рисунке 23.

На проходной динамической характеристике $I_{\text{выхо}} = f_3(E_{\text{см}})$ определяем динамический диапазон переменной составляющей тока коллектора $I_{p-рк}$ по аналогии с методикой нахождения динамического диапазона $I_{p-рб}$ переменной составляющей тока базы по динамическому диапазону $U_{p-p \text{ вх}}$ входного переменного напряжения и напряжения смещения $E_{\text{см}}$, представленной на рисунке 18. Затем по аналогии с рисунком 18 обрезаем осциллограмму в Paint, переносим изображение осциллограммы в SPlan и отображаем зеркально по вертикали. Вставляем между крайними горизонтальными линиями динамического диапазона $I_{p-рк}$ и масштабируем это изображение согласно шкале по оси ординат, как показано на рисунке 23.

В отсутствие сигнала временная ось соответствует согласно рисунку 23 значению тока 2,15 мА, а по показанию прибора РА2 – 2,19 мА (рисунок 11). В присутствии сигнала согласно рисунку 23 новая временная ось (красного цвета) соответствует значению тока 2,3 мА, а по показанию прибора РА2 – тоже 2,3 мА. Прирост постоянной составляющей тока коллектора из-за нелинейности проходной характеристики составляет 0,14 мА или 140 мкА.

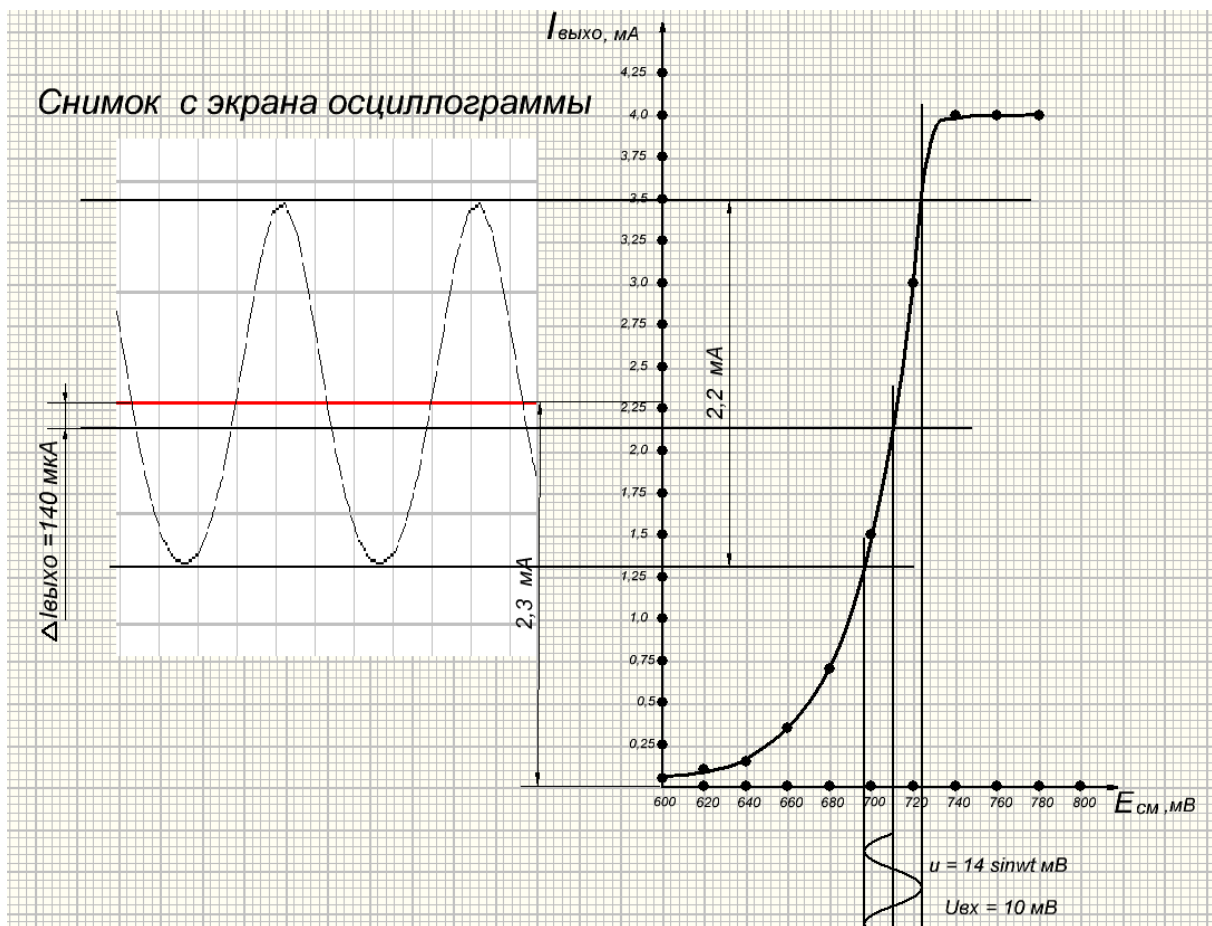


Рис. 23. Влияние нелинейности проходной динамической характеристики транзистора на величину постоянной составляющей тока коллектора при входном сигнале 10 мВ для середины линейного участка 1

Переменная составляющая напряжения между коллектором и эмиттером представлена на рисунке 22. Форма этого сигнала при гармоническом входном сигнале приплюснута сверху и растянута снизу, что указывает на нелинейность амплитудной характеристики усилителя. Проводим типичные для первых двух характеристик операции и, с учетом того, что размах переменной составляющей напряжения коллектор-эмиттер равен $U_{p-pk} = 6.5 \text{ В}$, получаем на основе амплитудной характеристики результаты, представленные на рисунке 24.

Согласно рисунка 24 в отсутствие переменного сигнала на входе усилителя временная ось проходит через точку 5,4 В, а показание вольтметра PV1 равно 5.42 В. Напряжения, полученные разными способами почти совпадают. В присутствии сигнала 10 мВ согласно рисунку 24 значению постоянного напряжения становится равным 5.04 В, а по показанию прибора РА2 –5,09 В. Уменьшение постоянной составляющей согласно расчетно-графическому методу составляет 0,36 В, а из эксперимента - 0,34 В, что находится в пределах статистической погрешности.

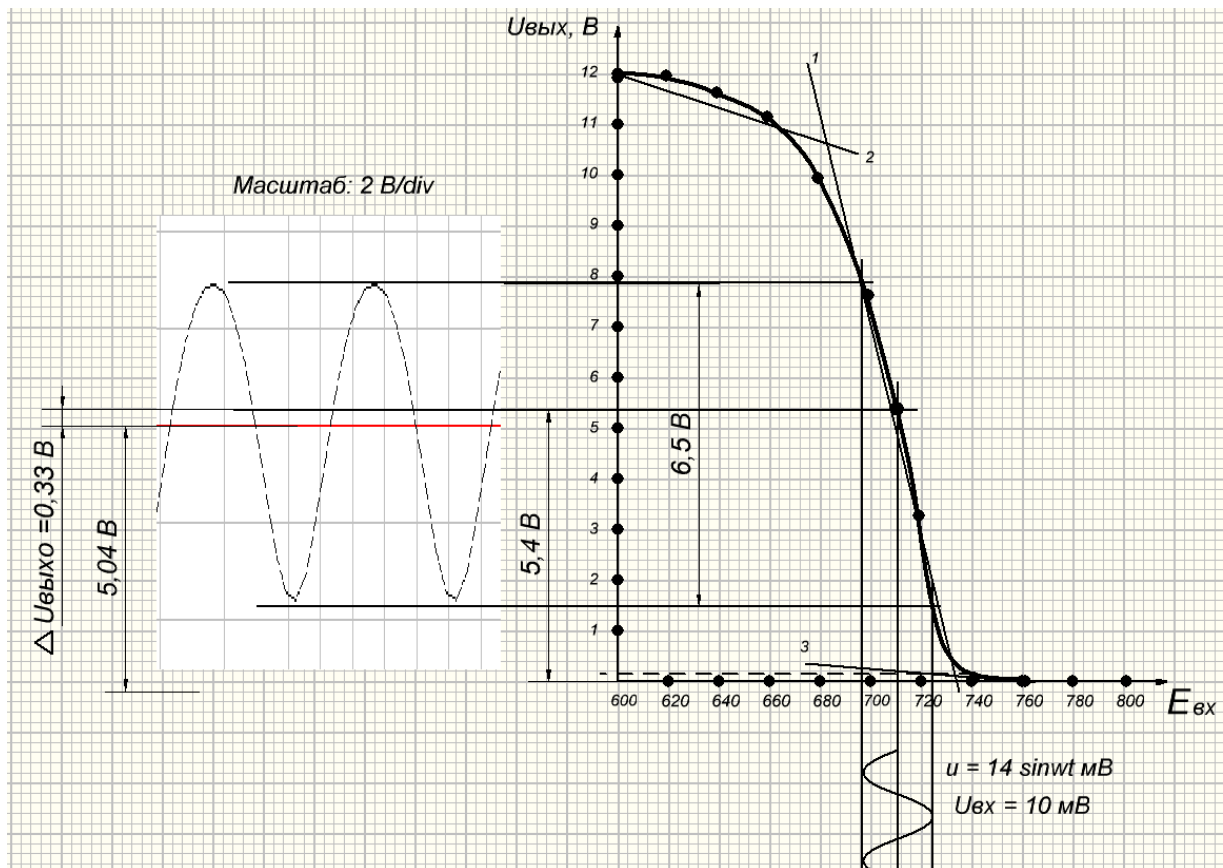


Рис. 24. Влияние нелинейности амплитудной характеристики усилителя на величину постоянной составляющей выходного напряжения при входном сигнале для середины линейного участка 1

Размах тока коллектора I_{p-pk} сигнала будет равен

$$I_{p-pk} = U_{p-p} / R_k = 6,5 \text{ В} / 3 \text{ кОм} \approx 2,2 \text{ мА}. \quad (7)$$

4.2. АНАЛИЗ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ БОЛЬШИХ УРОВНЯХ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ПРИ МАЛОМ СМЕЩЕНИИ

На рисунке 25 показан метод выбора рабочей точки на пересечении 1-ой и 2-ой прямых аппроксимаций. Эта точка лежит вне графика функции амплитудной характеристики. Проведем горизонтальную пунктирную линию через точку пересечения 1-ой и 2-ой прямых аппроксимаций. Эта линия пересекает график функции амплитудной характеристики в точке O_2 , которую и примем за рабочую точку при малом смещении. Точка O_2 имеет координаты (670 мВ, 10,45 В).

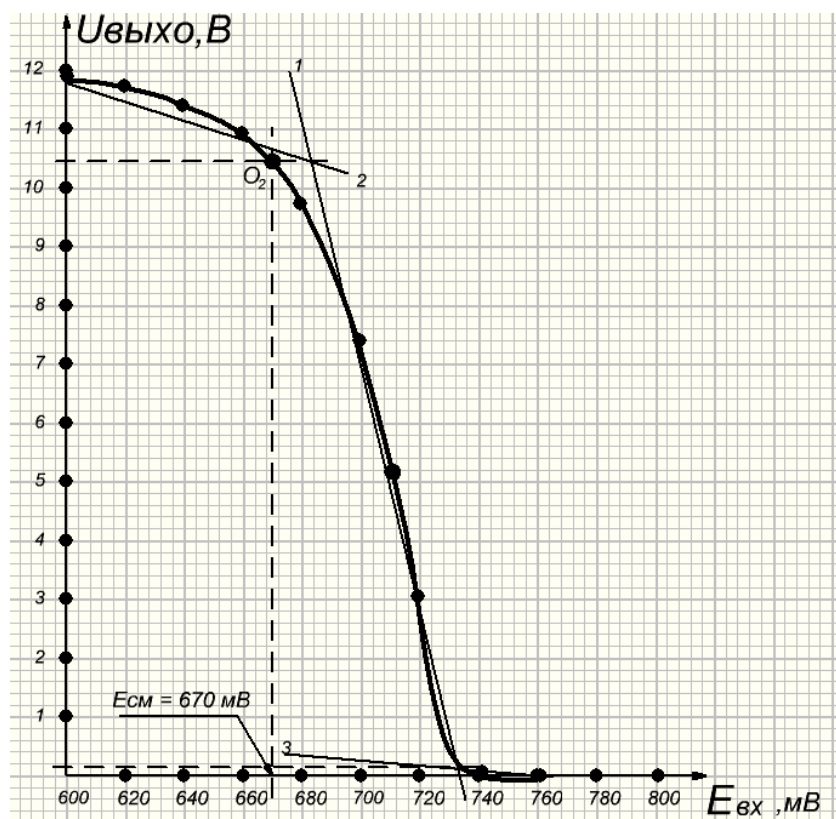


Рис. 25. Нахождение рабочей точки в режиме малого смещения

Напряжение смещения тогда будет равно $E_{см} = 670$ мВ. На рисунке 26 показаны схемы, измерительные приборы которых показывают значение постоянных составляющих токов базы РА1 и коллектора РА2, постоянное напряжения между коллектором и эмиттером PV1.

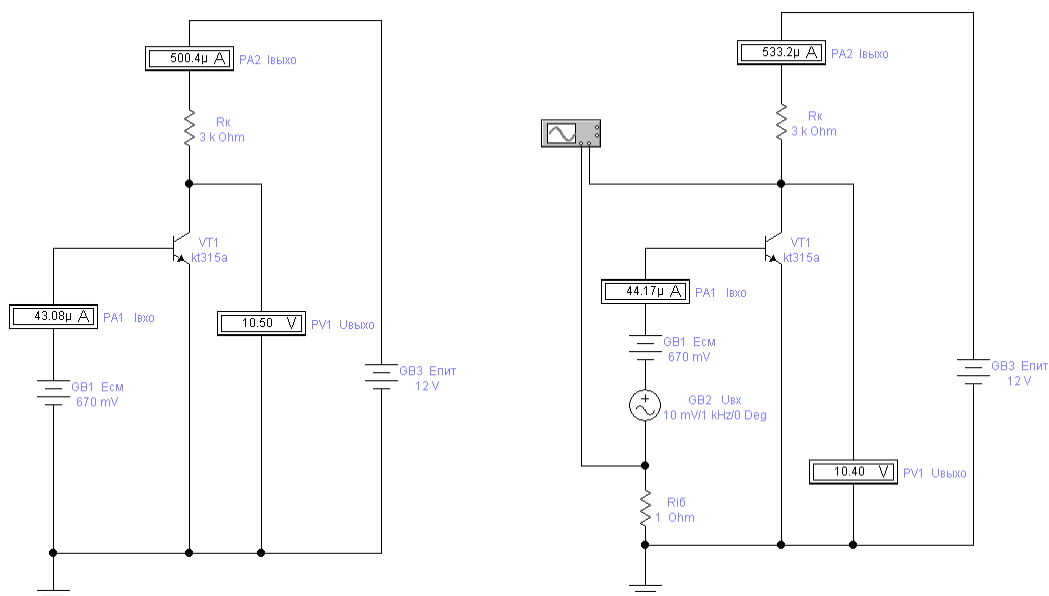


Рис. 26. Снимок с экрана схемы для наблюдения за формой сигнала для режима малого напряжения смещения

На рисунках 27 и 28 показаны осциллограммы переменных составляющих соответственно тока базы и напряжения коллектор–эмиттер.

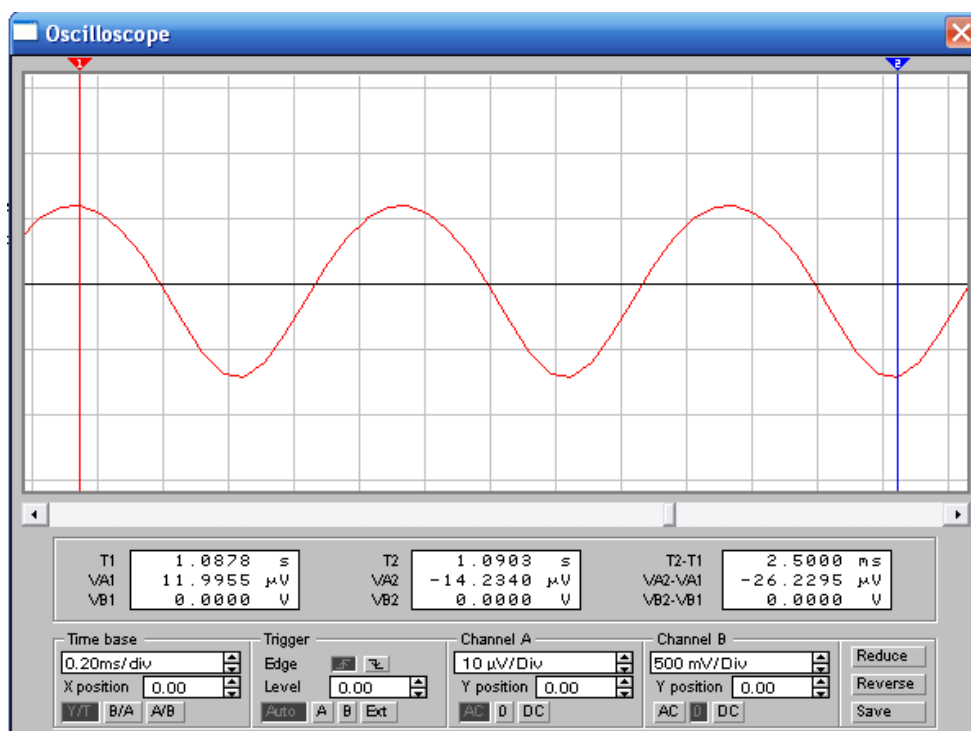


Рис. 27. Осциллограмма переменной составляющей тока базы для режима малого напряжения смещения

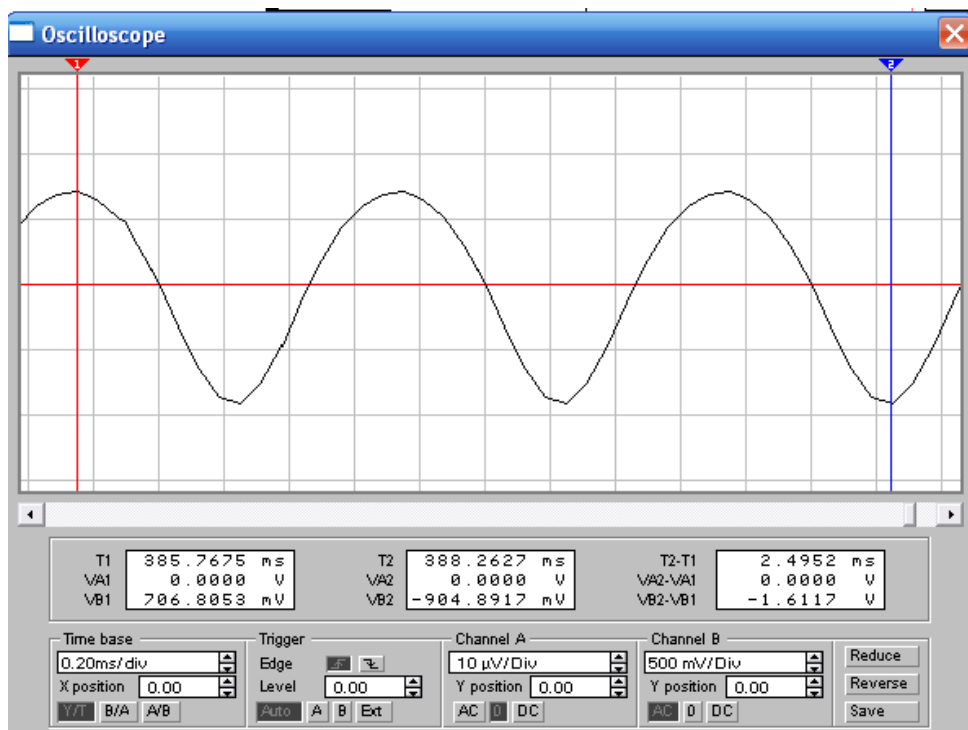


Рис. 28. Осциллограмма переменной составляющей напряжения коллектор–эмиттер для режима малого напряжения смещения

После проведения последовательности операций, описанных выше, определим графическим методом постоянные составляющие токов базы в отсутствии и присутствии источника переменного напряжения, представленные на рисунке 29.

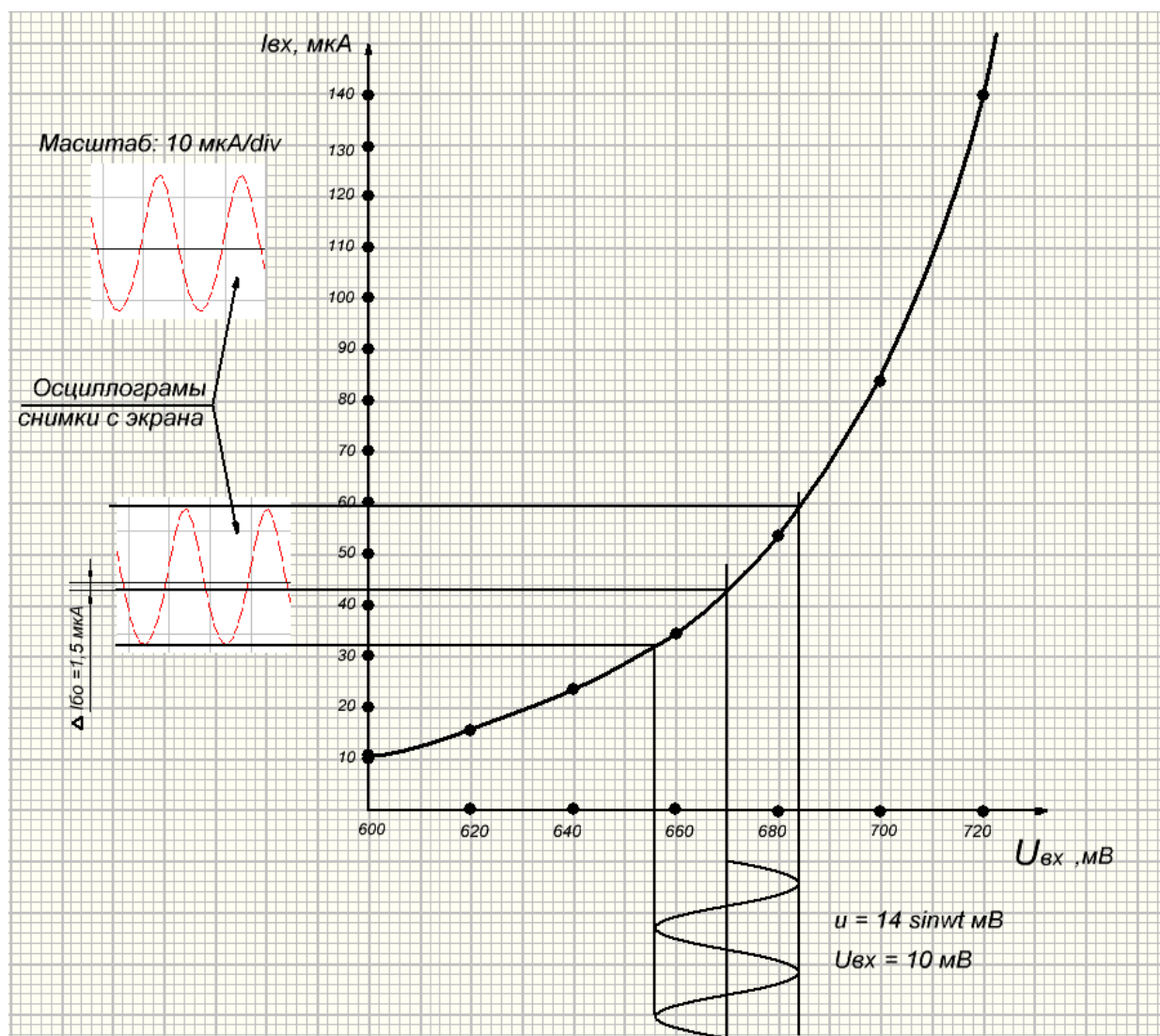


Рис. 29. Влияние нелинейности входной динамической характеристики транзистора на величину постоянной составляющей тока базы при входном сигнале для режима малого напряжения смещения

Из рисунка 29 следует, что постоянная составляющая тока базы в отсутствии сигнала равна 43 мкА, а по показанием прибора РА1 (рисунок 26) – 43,1 мкА. Из рисунка 29 также следует, что присутствие сигнала приводит к увеличению постоянной составляющей на 1,5 мкА до 44,5 мкА, а показанию прибора РА1 (рисунок 26) - с 43,1 до 44,2 мкА на 1,1 мкА. Из рисунка 29 также следует, что размах переменной составляющей равен $I_{p-p} = 59 - 32 = 27 \text{ мкА}$, а из осциллограммы на рисунке 27 – 26,2 мкА.

После проведения последовательности операций, описанных выше, определим графическим методом постоянную составляющую тока коллектора в

отсутствии и присутствии источника переменного напряжения, представленные на рисунке 30.

Из осциллограммы на рисунке 28 следует, что размах напряжения на выходе равен 1,61 В. Разделив это значение на 3 кОм, получаем, что размах тока коллектора равен 0,54 мА. Из рисунка 30 следует, что размах тока коллектора равен 0,55 мА.

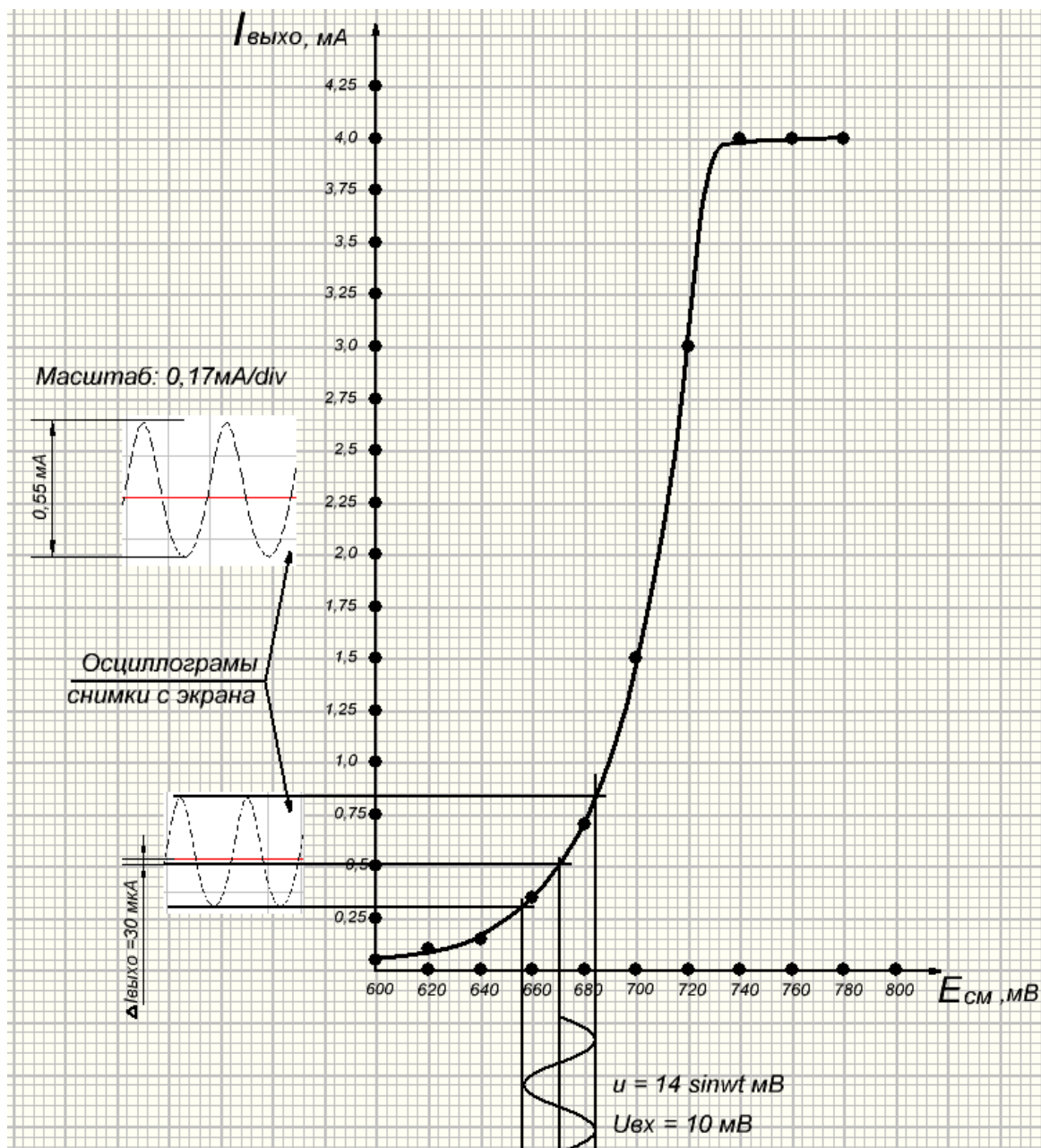


Рис. 30. Влияние нелинейности проходной динамической характеристики транзистора на величину постоянной составляющей тока коллектора для режима малого напряжения смещения

Из рисунка 30 следует, что постоянная составляющая тока коллектора в отсутствии сигнала равна 500 мкА, а по показанием прибора РА1 на рисунке.17

– 500,4 мкА. Из рисунка 30 также следует, что присутствие сигнала приводит к увеличению постоянной составляющей на 30 мкА до 530 мкА, а показанием прибора РА1 – на 32,8 мкА с 500,4 до 533,2 мкА.

После проведения последовательности операций, описанных выше, определим графическим методом постоянную составляющую напряжения на коллекторе в отсутствии и присутствии источника переменного напряжения, представленные на рисунке 31.

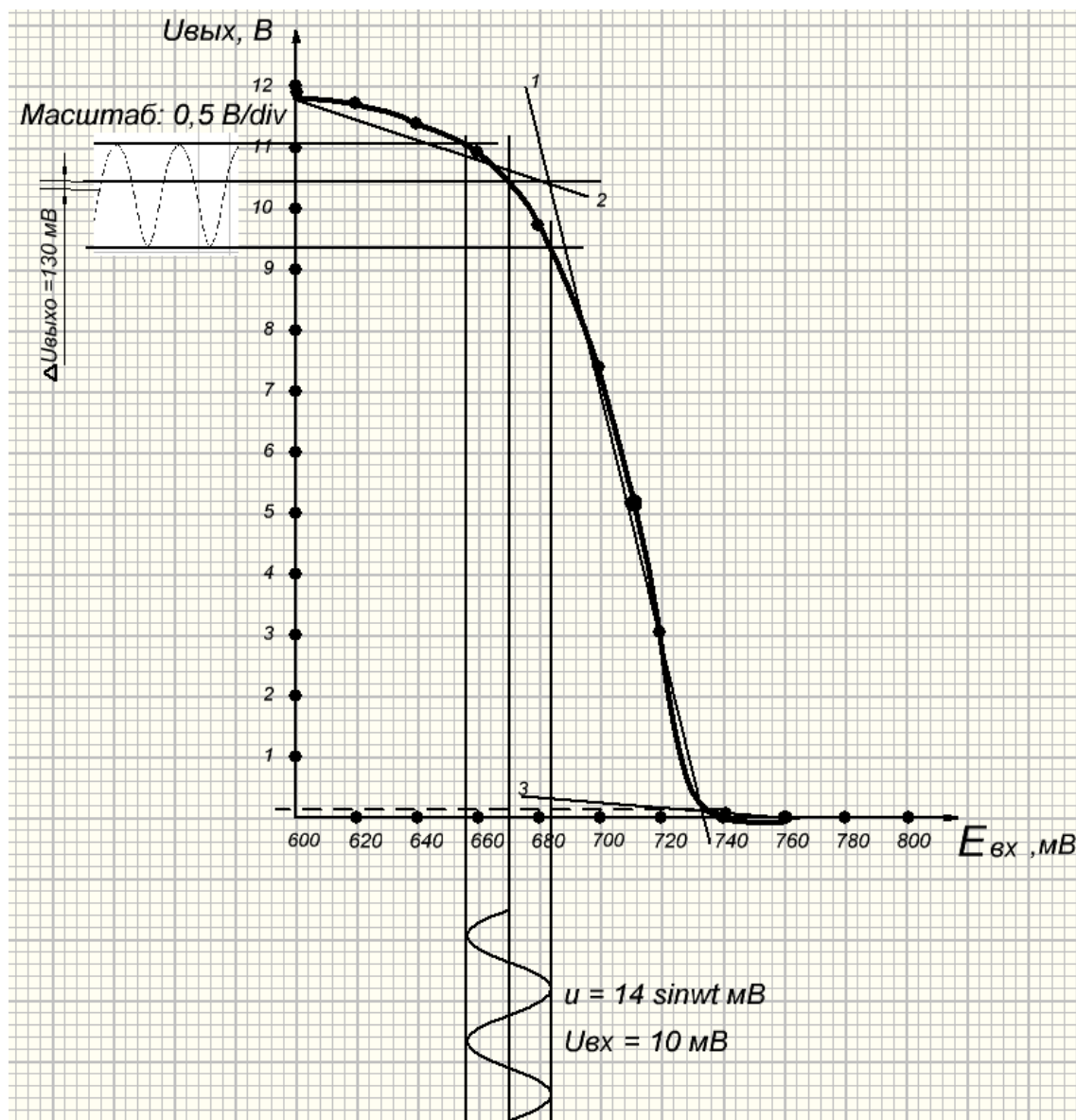


Рис. 31. Влияние нелинейности амплитудной характеристики усилителя на величину постоянной составляющей выходного напряжения при входном сигнале для режима малого напряжения смещения

Из осциллограммы на рисунке 28 следует, что размах напряжения на выходе равен 1,61 В, а из рисунка 31 – 1,7 В.

Из рисунка 31 следует, что постоянная составляющая выходного напряжения в отсутствии сигнала равна 10,45 В, а по показанием прибора PV1

на рисунке 26– 10,5 В. Из рисунка 31 также следует, что присутствие сигнала на входе усилителя приводит к уменьшению постоянной составляющей на 130 мВ до 10,37 В, а по показанию прибора РА1 - на 100 мВ с 10,5 В до 10,4 В .

4.3 АНАЛИЗ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ БОЛЬШИХ УРОВНЯХ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ РЕЖИМА БЛИЗКОГО К НАСЫЩЕНИЮ

Рассмотрим режим работы усилителя в режиме больших токов, при которых рабочая точка соответствует точке пересечения 1-ой и 3-ей аппроксимационных прямых.

Согласно рисунка 9 рабочая точка, лежащая на графике почти совпадает с точкой пересечения линий аппроксимации 1 и 3. Рабочая точка имеет координаты (735 мВ, 150 мВ). При таких напряжениях на базе и коллекторе оба перехода (эмиттерный и коллекторный) находятся под прямым напряжением, как показано на рисунке 32. Однако напряжение на коллекторе в 150 мВ частично подзапирает коллекторный переход. Коэффициент усиления транзистора по току резко падает до нескольких единиц. Выходной ток в этом случае слабо зависит от входного и определяется в основном параметрами нагрузки.

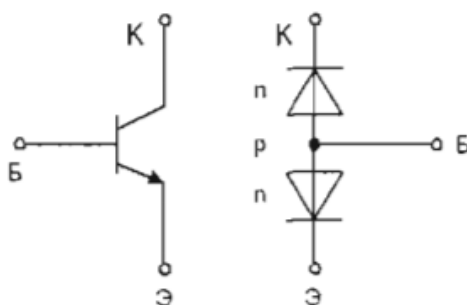


Рис. 32. Диодная эквивалентная схема n-p-n транзистора

Напряжение смещения тогда будет равно $E_{см} = 735$ мВ. На рисунке 33 показаны схемы, измерительные приборы которых показывают значение постоянных составляющих токов базы РА1 и коллектора РА2, постоянное напряжения между коллектором и эмиттером PV1.

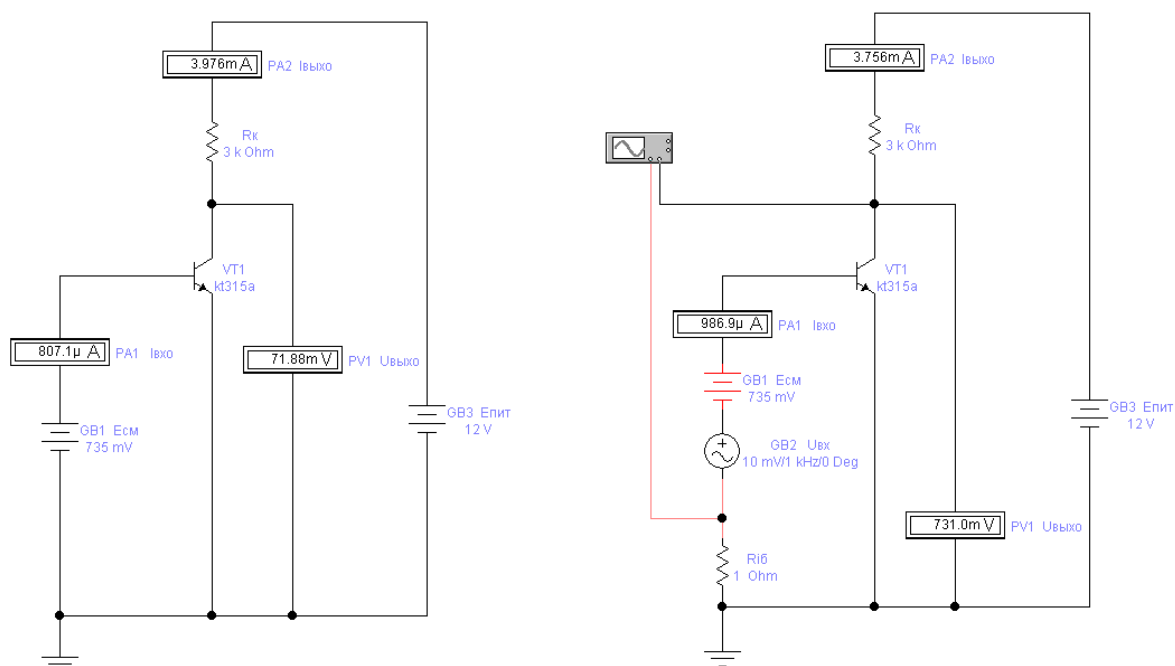


Рис. 33. Снимок с экрана схемы для наблюдения за формой сигнала для режима близкого к насыщению

На рисунках 34 и 35 показаны осциллограммы переменных составляющих соответственно тока базы и напряжения коллектор –эмиттер.

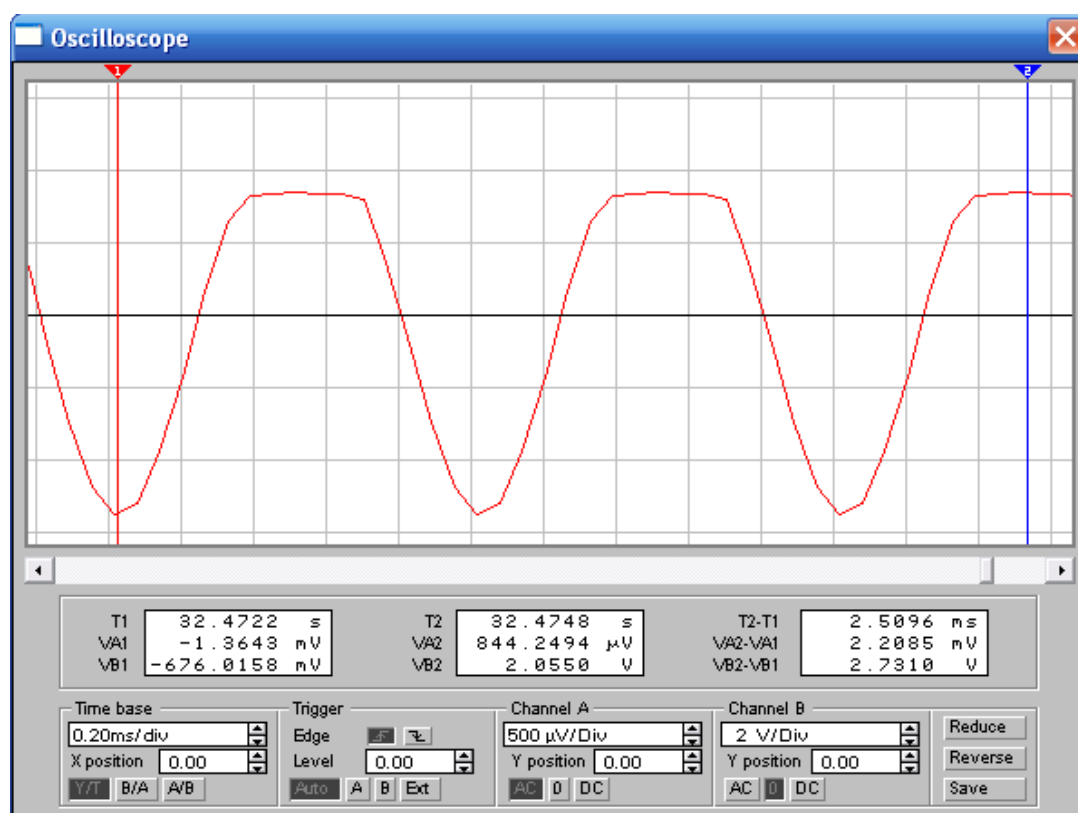


Рис. 34. Осциллограмма переменной составляющей тока базы для режима близкого к насыщению

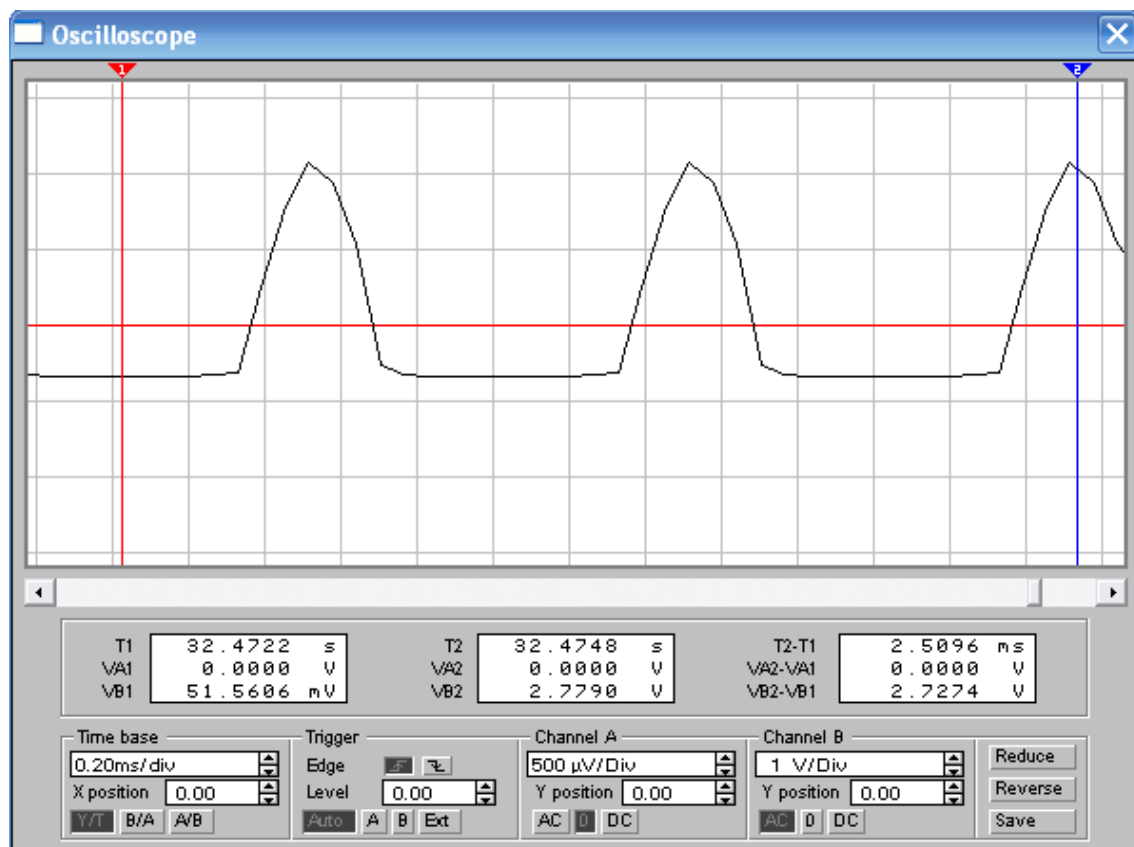


Рис. 35. Осциллограмма переменной составляющей выходного напряжения для режима близкого к насыщению

После проведения последовательности операций, описанных выше, определим графическим методом постоянные составляющие токов базы в режиме близкому к насыщению при отсутствии и присутствии источника переменного напряжения, представленные на рисунке 36. При этом необходимо учитывать, что осциллограмма переменной составляющей тока базы инвертирована.

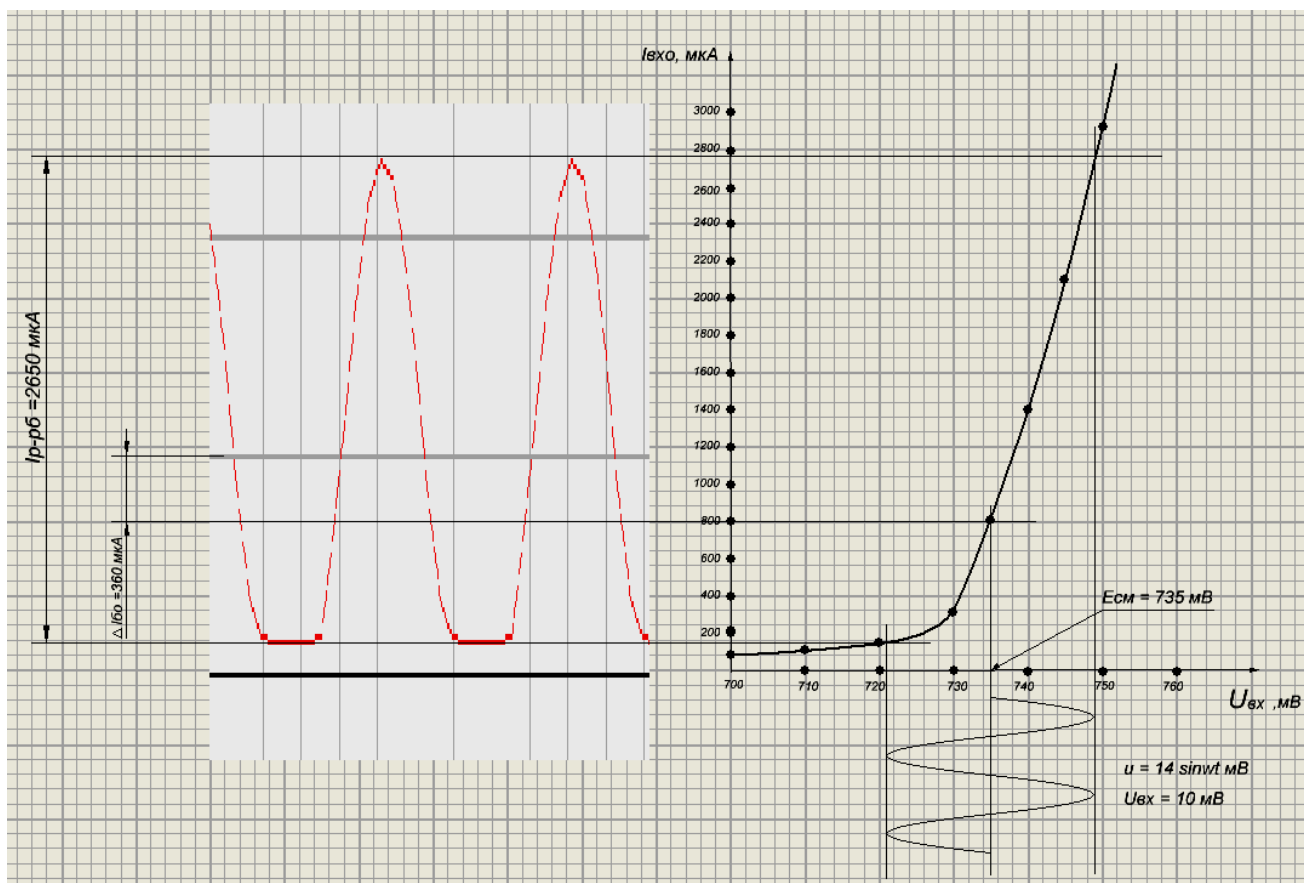


Рис. 36. Влияние нелинейности входной динамической характеристики транзистора на величину постоянной составляющей тока базы при входном сигнале для режима близкого к насыщению

Размах переменной составляющей тока базы результате графических построений, представленных на рисунке 36, равен 2650 мкА, а результате измерения этого параметра осциллографом, представленный на рисунке 34, равен 2300 мкА.

Из рисунка 36 следует, что постоянная составляющая тока базы в отсутствии сигнала равна 800 мкА, а по показанием прибора РА1 на рисунке 33 – 807 мкА. Из этих же рисунков также следует, что присутствие сигнала приводит к увеличению постоянной составляющей на 360 мкА до 1160 мкА, а показанием прибора РА1 - на 180 мкА с 807 до 987 мкА. Полученные различия между значениями токов вероятно всего связаны с добавкой в ток базы тока прямо смещенного коллекторного перехода.

Из осциллограммы переменной составляющей выходного напряжения для режима близкого к насыщению, представленный на рисунке 35 следует, что размах переменного напряжения равен 2,72 В. Тогда размах переменной составляющей тока коллектора будет равен $2,72 \text{ В} / 3 \text{ кОм} = 0,9 \text{ мА}$.

Далее работаем с проходной динамической характеристикой (рисунок 7) и осциллограммой переменной составляющей выходного напряжения (рисунок 35). Результаты графических работ представлены на рисунке 37.

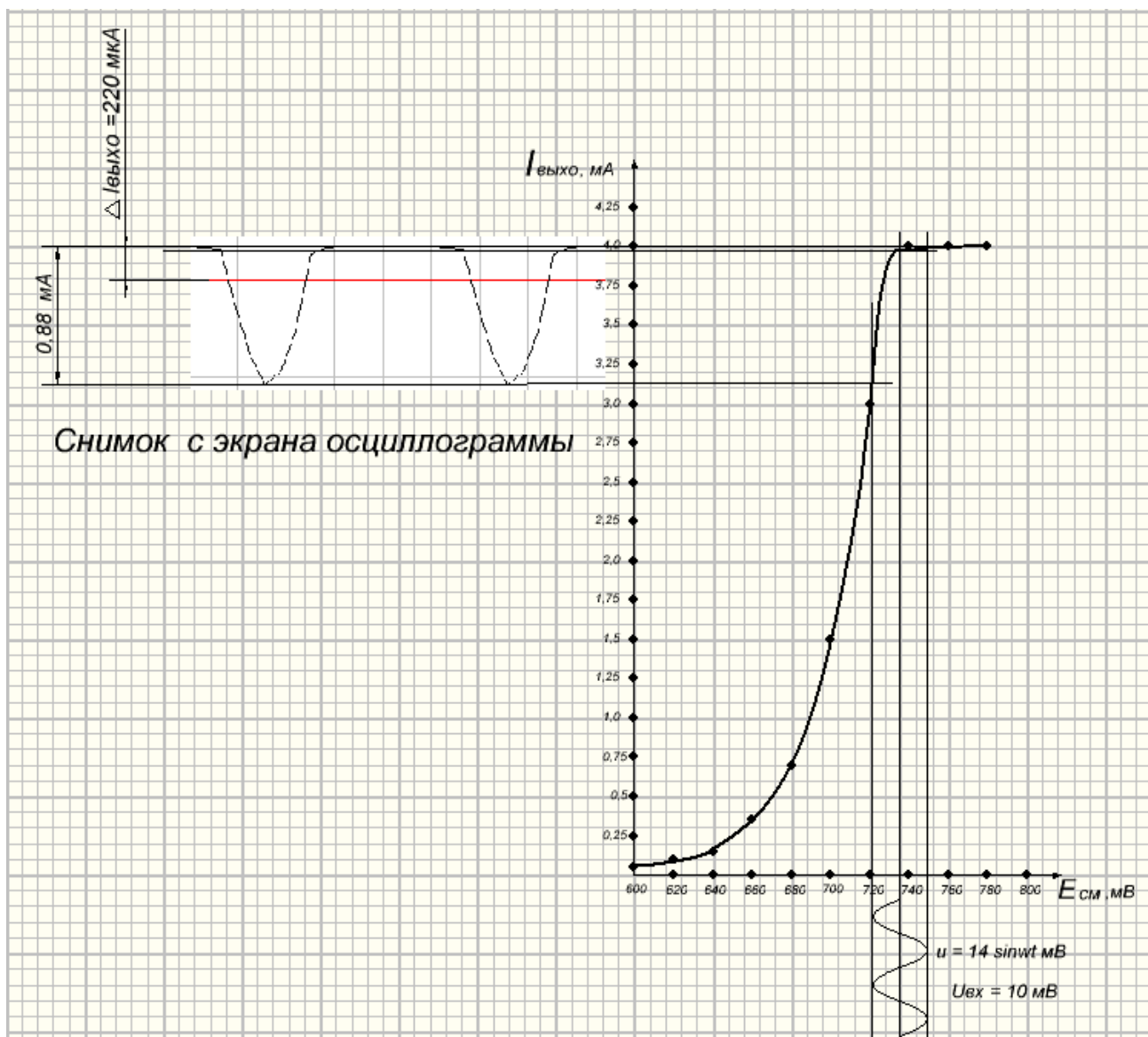


Рис. 37. Влияние нелинейности проходной динамической характеристики транзистора на величину постоянной составляющей тока коллектора для режима близкого к насыщению

Размах переменной составляющей тока коллектора в результате графических построений, представленных на рисунке 37, равен 0,88 мА, а результате измерения осциллографом, представленный на рисунке 35, равен 0,9 мА.

Из рисунка 37 следует, что постоянная составляющая тока коллектора в отсутствии сигнала равна 4 мА, а по показанием прибора РА1 на рисунке 33 – 3,98 мА. Из рисунка 37 также следует, что присутствие сигнала приводит к снижению постоянной составляющей на 220 мкА до 3,78 мА, а АО показанием прибора РА1 (рисунок 33) - тоже на 220 мкА с 3,98 до 3,76 мкА. Полученные результаты существенно лучше, чем для входных характеристик.

Далее после проведения последовательности операций, описанных выше, определим графическим методом постоянную составляющую напряжения на

коллекторе в отсутствии и присутствии источника переменного напряжения, представленные на рисунке 38.

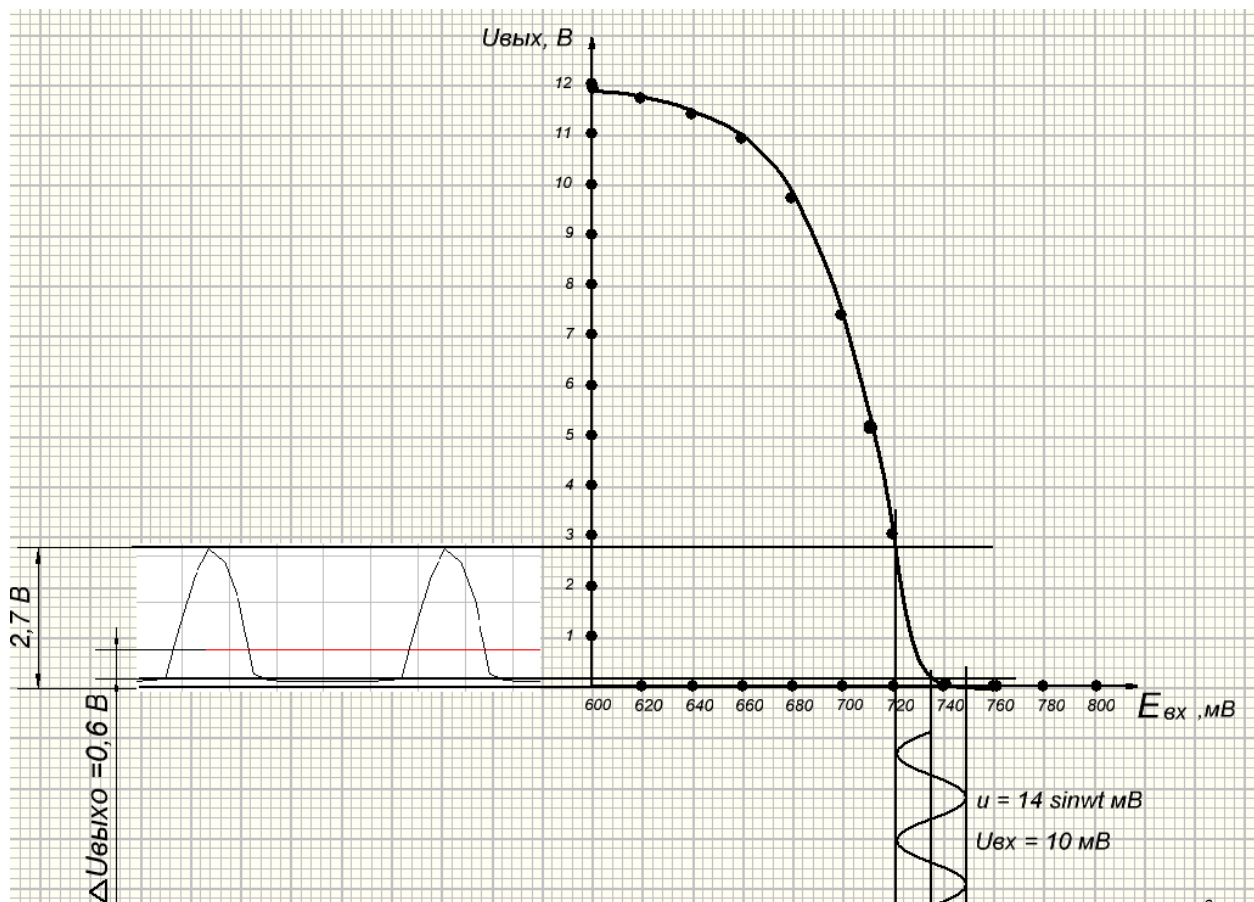


Рис. 38. Влияние нелинейности амплитудной характеристики усилителя на величину постоянной составляющей выходного напряжения при входном сигнале для режима близкого к насыщению

Из рисунка 38 следует, что постоянная составляющая выходного напряжения в отсутствии сигнала равна 0,2 В, а по показанию прибора PV1 на рисунке 33 – 72 мВ. Из рисунка 31 также следует, что присутствие сигнала на входе усилителя приводит к увеличению постоянной составляющей напряжения на 0,6 В до 0,8 В, а по показанию прибора PA1 (рисунок 33) - - на 660 мВ с 72 до 731 мВ. Размах переменной составляющей напряжения на коллекторе в результате графических построений, представленных на рисунке 38, равен 2,7 В, а результате измерения осциллографом, представленный на рисунке 35, также равен 2,7 В.

Выводы:

- в режиме больших сигналов на выходе усилителя существенно проявляется нелинейность основных характеристик транзистора;
- нелинейность основных характеристик транзистора приводит к искажению формы входных сигналов;

- особенно искажения проявляются при малых напряжениях смещения и при режиме, близким к насыщению;
- искажение формы сигнала приводят к изменению режима работы транзистора по постоянному току;
- аналитические расчеты режиме больших сигналов очень сложны, поэтому используется графические методы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение влияния режима работы однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на его усилительные свойства, искажение сигнала и другие параметры при больших уровнях выходного сигнала. 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. Моделирование режимов работы усилительных элементов однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах при больших уровнях выходного сигнала	3
1.1. Цель лабораторной работы	3
1.2. Содержание работы	3
2. Краткие теоретические сведения.....	3
3. Измерение амплитудной и динамических входной и проходной характеристик	8
4. Анализ работы усилителя при больших уровнях выходного сигнала в разных режимах	11
4.1. Анализ работы усилителя при больших уровнях выходного сигнала на середине линейного участка.....	11
4.2. Анализ работы усилителя при больших уровнях выходного сигнала при малом смещении.....	25
4.3. Анализ работы усилителя при больших уровнях выходного сигнала для режима близкого к насыщению	31
Заключение.....	37
Библиографический список.....	38

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 3
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 19.09.2022.
Уч.-изд. л. 2,1.

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