Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы № 5
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 № 5
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 № 5 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.– 34 с.

В методических указаниях рассматриваются вопросы исследования однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах ОЭ с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению и току. 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_ЛР5.pdf.

Ил. 39. Табл. 6. 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 исследованию однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах ОЭ с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению и току. Моделирование осуществляется в программном обеспечении EWB5.12 и Micro-CaP8.

Методические указания содержат авторские иллюстрации.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ОЭ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ТОКУ

1.1. ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является исследование влияния последовательной отрицательной обратной связью по току на основных параметры резистивных усилителей ОЭ

1.2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Содержанием практической части работы является исследование влияния последовательной отрицательной обратной связью по току на коэффициент усиления, частотные искажения, нелинейные искажения, входное сопротивление и выходное сопротивление.

Выполнение лабораторной работы проводится на ПЭВМ с использованием 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. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ СХЕМЫ БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ОЭ, ПО КОТОРЫМ ПРОИЗВОДИТСЯ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТОКУ И БЕЗ ТАКОВОЙ

Сначала определим основные параметры усилителя без обратной связи: коэффициент усиления, частотные искажения, нелинейные искажения, входное сопротивление и выходное сопротивление. Схема этого усилителя представлена на рисунке 1.

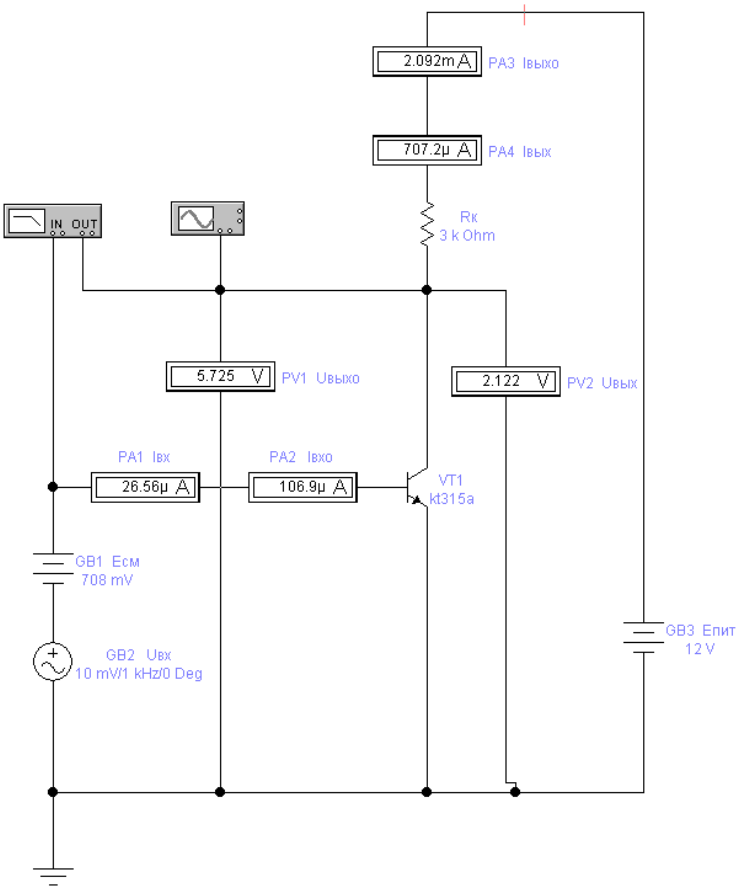

Рис. 1. Снимок с экрана схемы усилителя без учета емкостной составляющей внешней нагрузки

Показания имеющихся в этой схеме приборов представлены ниже (рисунок 2 – 4).

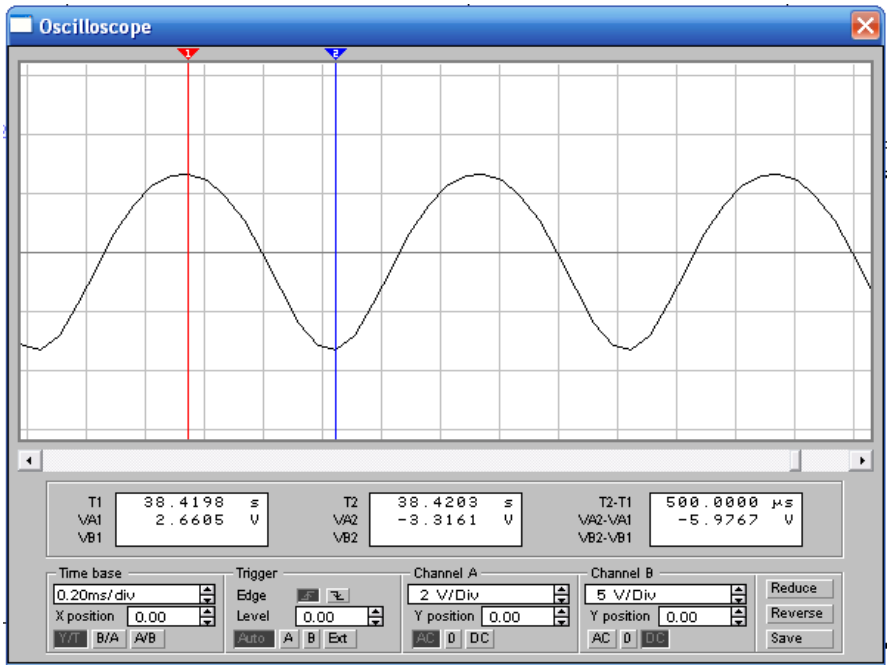

Рис. 2. Осциллограмма на выходе усилителя

Нелинейные искажения просматриваются визуально. Амплитуды верхней и нижней полуволны разные: 2,66 В и 3,32 В.

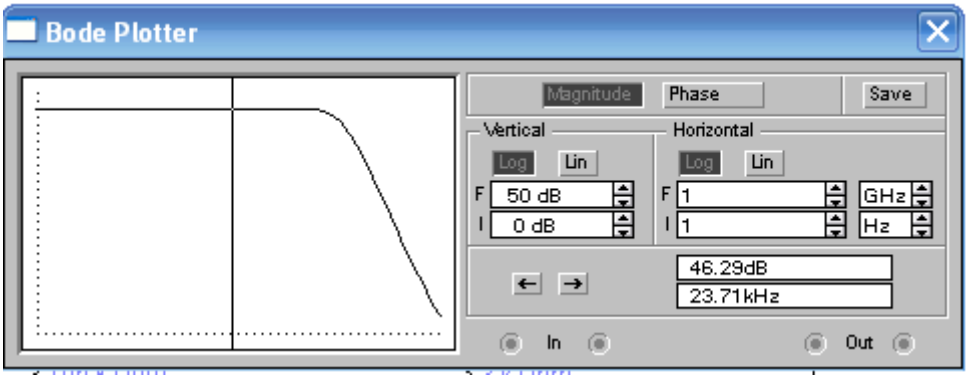

Рис. 3. АЧХ усилителя

Коэффициент усиления К по показаниям этого приборов измерителя АЧХ равен 46,29 дБ.

По показанию вольтметра PV2 коэффициент усиления К в разах будет равен

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{2122}{10} = 212,2,$$

а в дБ – 20lgK = 20lg212,2 = 46,53 дБ, что практически совпадает с показанием на измерителе АЧХ или сокращенно ИАЧХ.

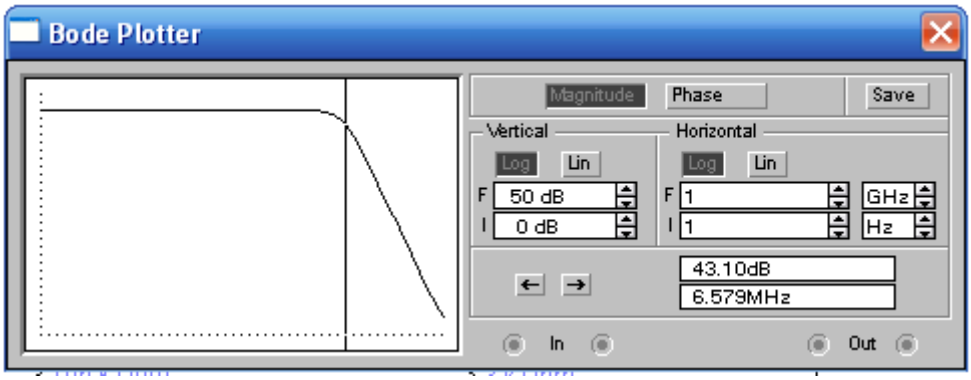

Рис. 4. Определение верхней частоты среза усилителя

Частота, при которой К уменьшается на 3 дБ называется частотой среза и равна в нашем случае 6,579 МГц. Уменьшение К обусловлено эффектом Миллера.

Входное сопротивление по переменному току будет равно

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{10}{26,56} = 377 \text{ Ом}.$$

Входное сопротивление по постоянному току будет равно

$$R_{BX0} = \frac{U_{BX0}}{I_{BX0}} = \frac{708}{106,9} = 6,62 \text{ кОм}$$

Выходное сопротивление по переменному току будет равно

$$R_{BX} = \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВЫХ}} = \frac{2,122}{707,2} \approx 3 \text{ кОм}$$

Для определения коэффициента гармонических искажений $К_Г$ применим схему измерителя КГИ из 4-ой лаб. работы, представленную на рисунке 5.

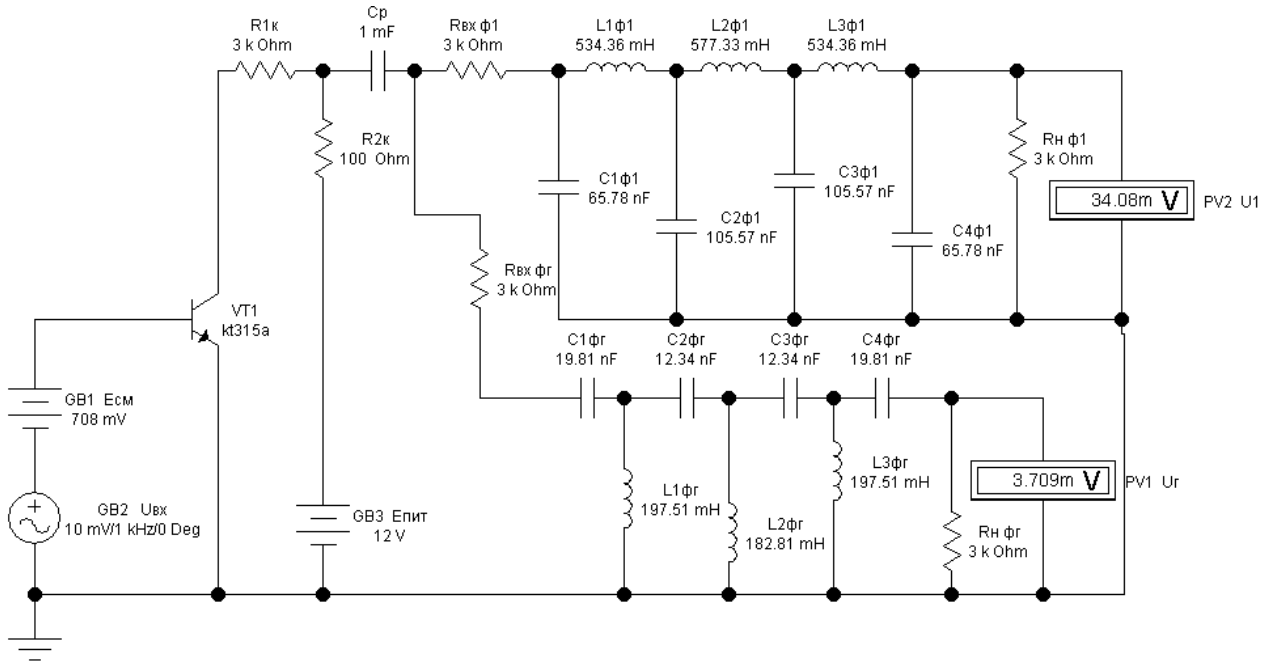

Рис. 5. Снимок с экрана схемы для определения $К_Г$

Значение $К_Г$ будет определяться как $К_Г = U_Г / U_1 = 3,709 / 34,08 = 10,9$ %

В схеме на рисунке 1 не учтена емкостная составляющая сопротивления нагрузки. Под сопротивлением нагрузки будем понимать входное сопротивление последующего каскада, такого же по схемотехническому построению, как и рассматриваемого. Связь между каскадами гальваническая. Для простоты рассуждений активную составляющую сопротивления нагрузки включим в состав коллекторного резистора.

Емкостная составляющая сопротивления нагрузки $С_Н$ будет складываться из диффузионной емкости $С_д$ транзистора последующего каскада и емкости монтажа $С_М$.

Максимальное значение диффузионной емкости (емкость база-эмиттер) определим через постоянную времени заряда-разряда этой емкости при подаче на вход транзистора напряжение в форме меандра, как показано на рисунке 6.

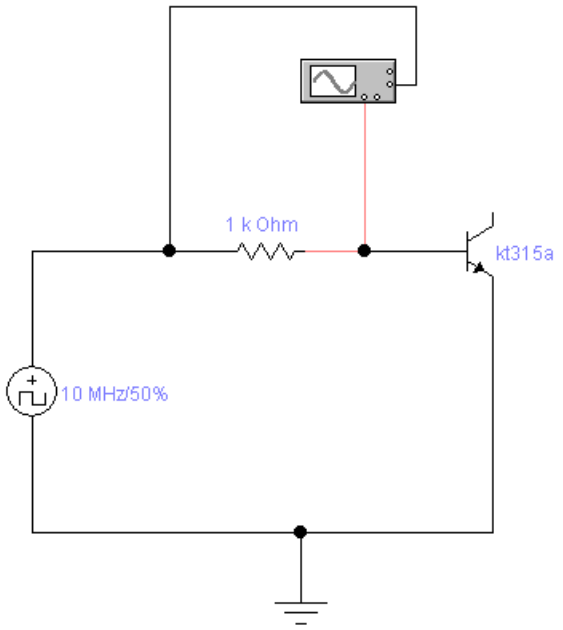

Рис. 6. Снимок с экрана схемы для определения диффузионной емкости

На рисунке 7 показана осциллограмма напряжения на базе транзистора при заряде-разряде диффузионной емкости.

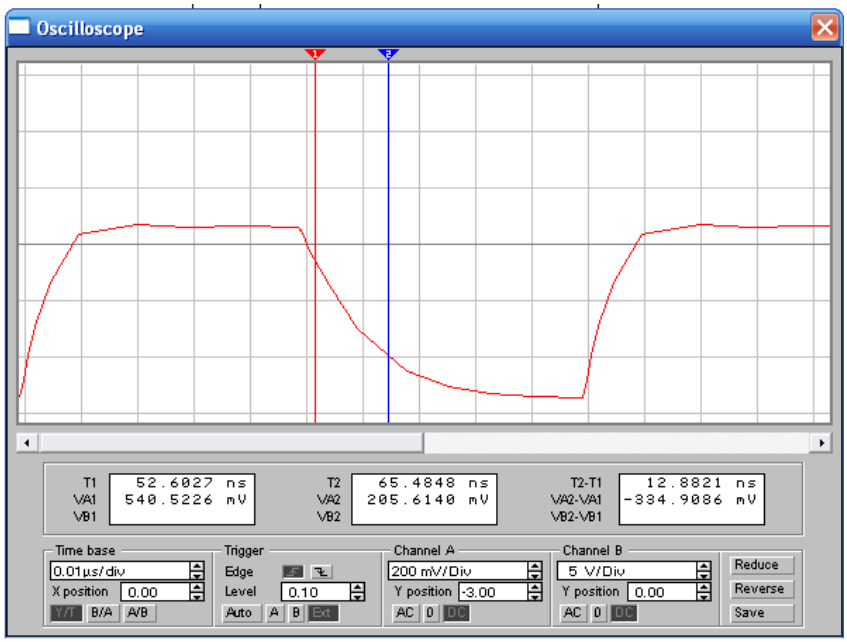

Рис. 7. Осциллограмма напряжения на базе транзистора заряда-разряда диффузионной емкости

Эмиттер-базовый переход работает как параллельный детектор, поэтому на нем присутствует постоянная составляющая отрицательной полярности.

Время, в течении которого напряжение на емкости уменьшится в e (2,72) раз называется постоянной времени τ заряда-разряда емкости и определяется выражением $\tau = RC$.

Зная τ и R, можно определить величину емкости C = τ / R.

Из осциллограмм, положению курсоров и показаний вольметров осциллографа на рисунке 7 следует, что τ = T2 – T1 = 12,8821 нс, отношение уровней напряжений VA1 / VA2 = 540,5226 / /205,6140 = 2,64 ≈ e, а из рисунка 6 – R = 1 кОм. Тогда величина $C_д$ ≈ 13 пФ. Емкость монтажа обычно находится в пределах от 2 пФ до 10 пФ. Примем $C_М$ = 7 пФ, а тогда $C_Н$ = 20 пФ.

Включим эту емкость в состав схемы на рисунке 1, получим новую схему, показанную на рисунке 8.

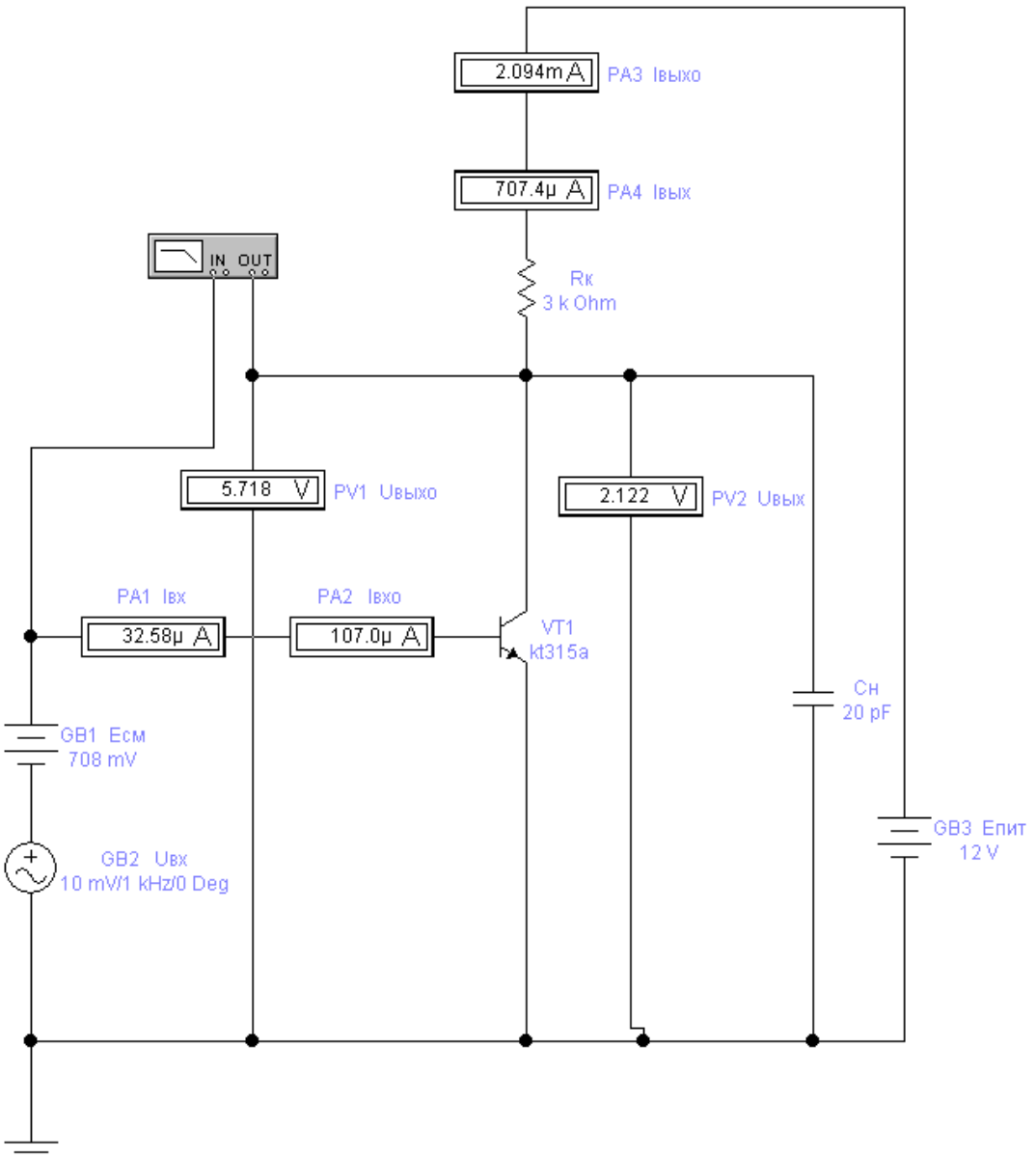

Рис. 8. Снимок с экрана схемы усилителя с учетом емкостной составляющей внешней нагрузки

Емкостная составляющая сопротивление нагрузки проявляется только на высоких частотах, как показано на рисунке 9.

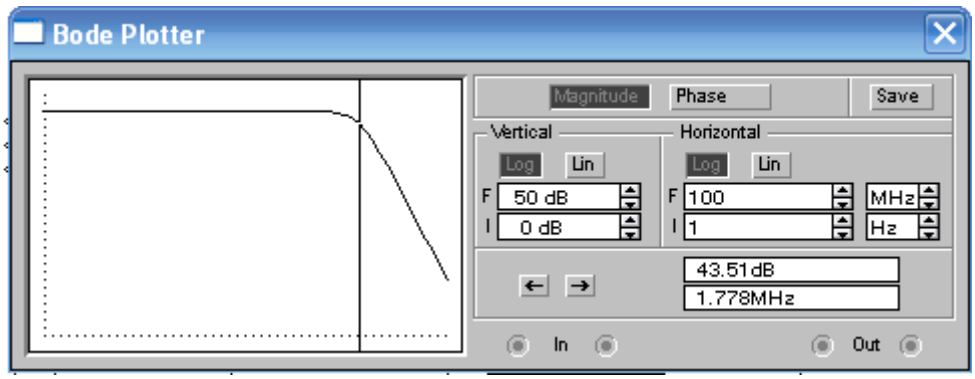

Рис. 9. Определение частоты среза усилителя с учетом емкости нагрузки

Частота среза уменьшилась с 6,579 МГц до 1,778 МГц потому, что с этой частоты начинает проявляться уменьшение сопротивления нагрузки за счет увеличения шунтирования коллекторного резистора $R_к$ емкостным сопротивлением $X_{Cн}$.

В схеме, представленную на рисунке 8, нельзя гальванически разделить источники напряжения GB1 и GB2, то есть подать сигнал от источника GB2 через разделительный конденсатор Ср на вход усилителя потому, что при таком включении сигнал будет замыкаться через нулевое внутреннее сопротивление идеального источника напряжения GB1. Поэтому заменим идеальный источник напряжения GB1 $E_{см}$ на идеальный источник тока GB1 $I_{вхо}$, у которого бесконечно большое внутреннее сопротивление, как показано на рисунке 10.

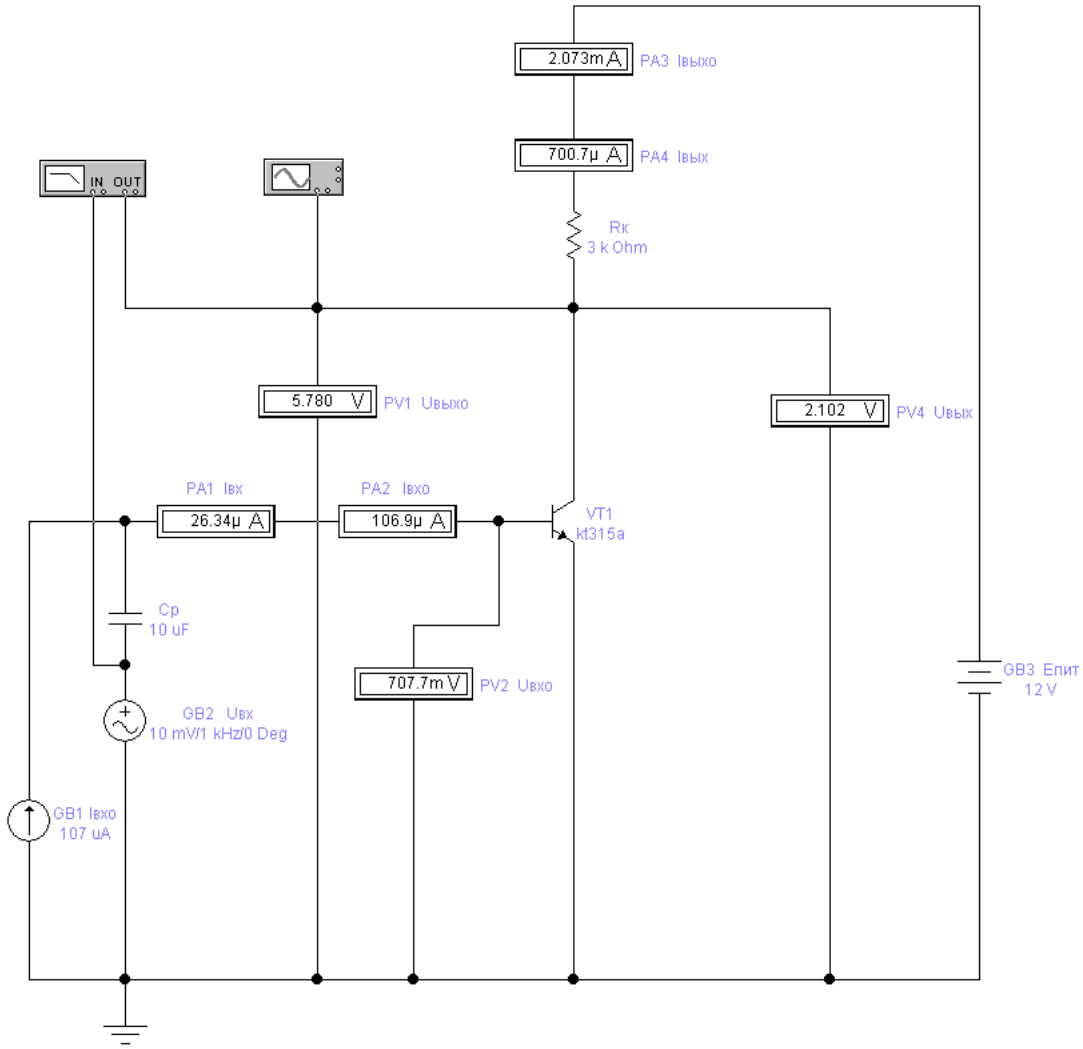

Рис. 10. Снимок с экрана схема усилителя без учета емкостной составляющей внешней нагрузки и гальванической развязкой от источника сигнала с помощью разделительного конденсатора C_p

Несмотря на одинаковое положение рабочей точки на входной динамической характеристике (708 мВ, 107 мкА) все остальные параметры незначительно отличаются вследствие того, что по постоянной составляющей в первом случае (рисунок 1) база замкнута с эмиттером, а во втором случае (рисунок 10) – обрыв.

Введение в схему разделительного конденсатора C_p будет влиять только на коэффициент усиления на низких частотах. Емкостное сопротивление разделительного конденсатора и входное сопротивление усилителя образуют частотно зависимый делитель напряжения. На высоких частотах коэффициент передачи этого делителя практически равен единицы и не зависит от частоты.

Наличие разделительного конденсатора на входе усилителя приводит к завалу АЧХ на низких частотах, как показано на рисунке 11, хотя коэффициент усиления на средних частотах практически не изменился.

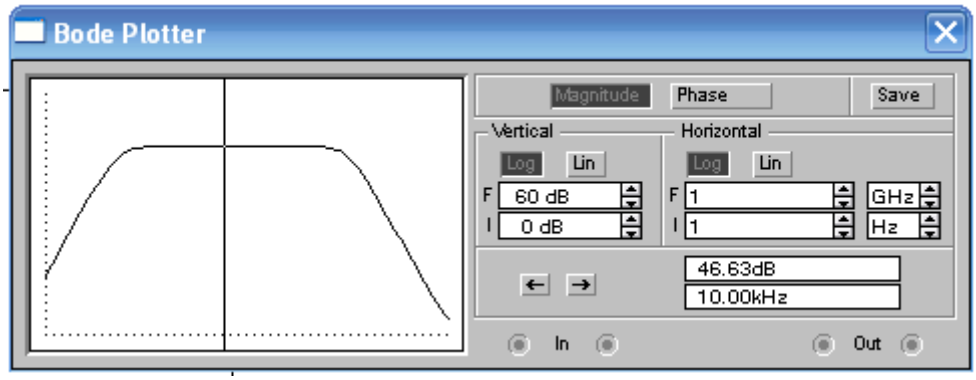

Рис. 11. АЧХ усилителя без учета емкости нагрузки

Верхняя частота среза, обусловленная эффектом Миллера, также не изменилась, что следует из показаний приборов ИАЧХ на рисунках 4 и 12.

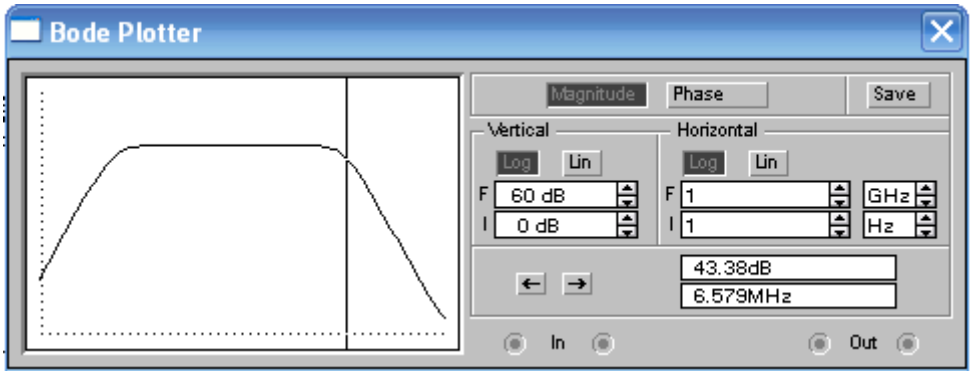

Рис. 12. Определение верхней частоты среза усилителя без учета емкости нагрузки

Нижняя частота среза для усилителя на рисунке 1 равна нулю (рисунок 3), а для усилителя на рисунке 10 равна 44 Гц, что следует из рисунка 13.

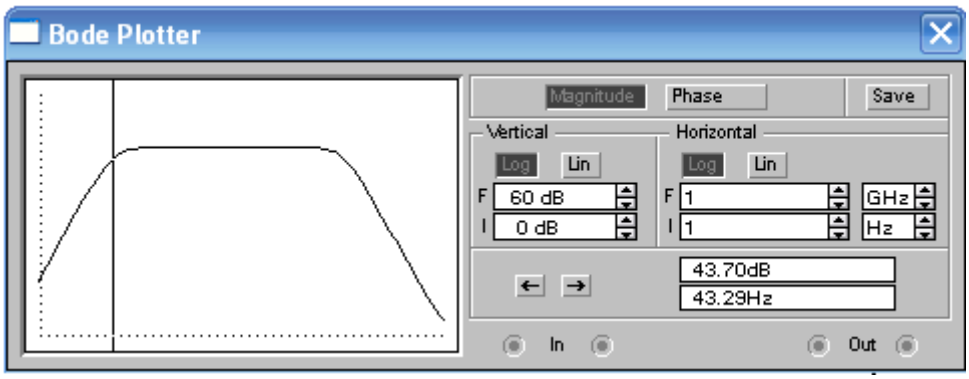

Рис. 13. Определение нижней частоты среза усилителя (рисунок 10) без учета емкости нагрузки

Введем в схему на рисунке 10 конденсатор $C_н$ емкостной составляющей внешней нагрузки, получим схему, представленную на рисунке 14. Наличие этой емкости сказывается только на высоких частотах, что видно из показаний приборов ИАЧХ, представленных на рисунке 15. Частота среза под влиянием

этой емкости уменьшилась с 6,579 МГц до 1,778 МГц (рисунок 15), как и для схемы на рисунке 8, что следует из показания приборов ИАЧХ на рисунке 9.

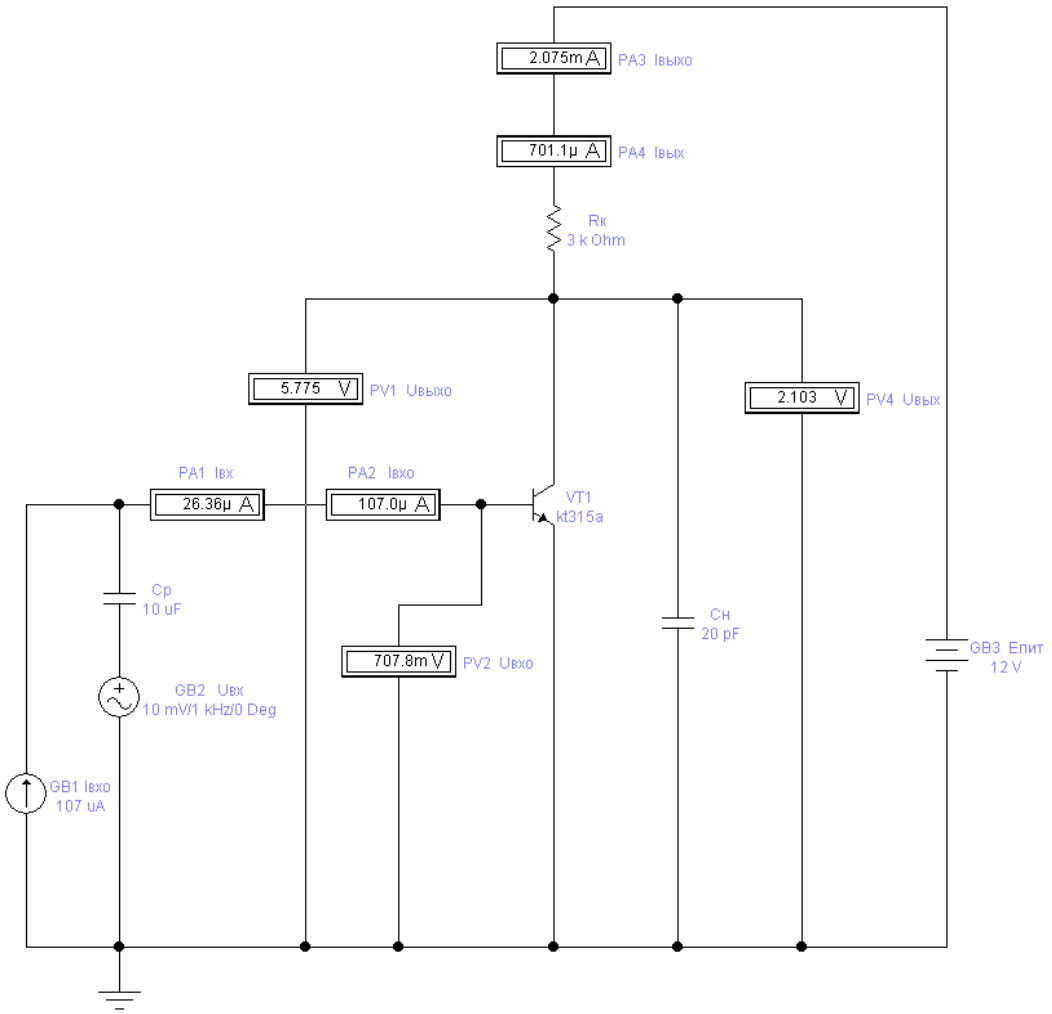

Рис. 14. Схема усилителя с учетом емкостной составляющей внешней нагрузки и гальванической развязкой от источника сигнала с помощью разделительного конденсатора C_p

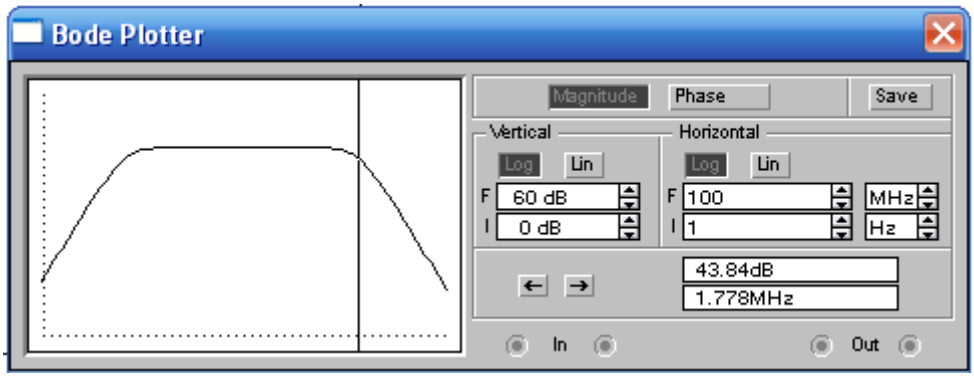

Рис. 15. Определение верхней частоты среза усилителя (рисунок 13) с учетом емкости нагрузки

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ УСИЛИТЕЛЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ТОКУ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ОЭ, ПО КОТОРЫМ ПРОИЗВОДИТСЯ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И БЕЗ ТАКОВОЙ

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ УСИЛИТЕЛЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ТОКУ С РЕЗИСТОРОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ 100 ОМ

Схема однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах ОЭ с последовательной отрицательной обратной связью по току представлена на рисунке 16. Эта схема получена путем введения в эмиттерную цепь транзистора VT1 (рисунок 13) резистора отрицательной обратной связи R_{ooc}, трех вольтметров для измерения переменного PV4 и постоянного напряжения PV3 на этом резисторе и измерения напряжения смещения база-эмиттер PV2.

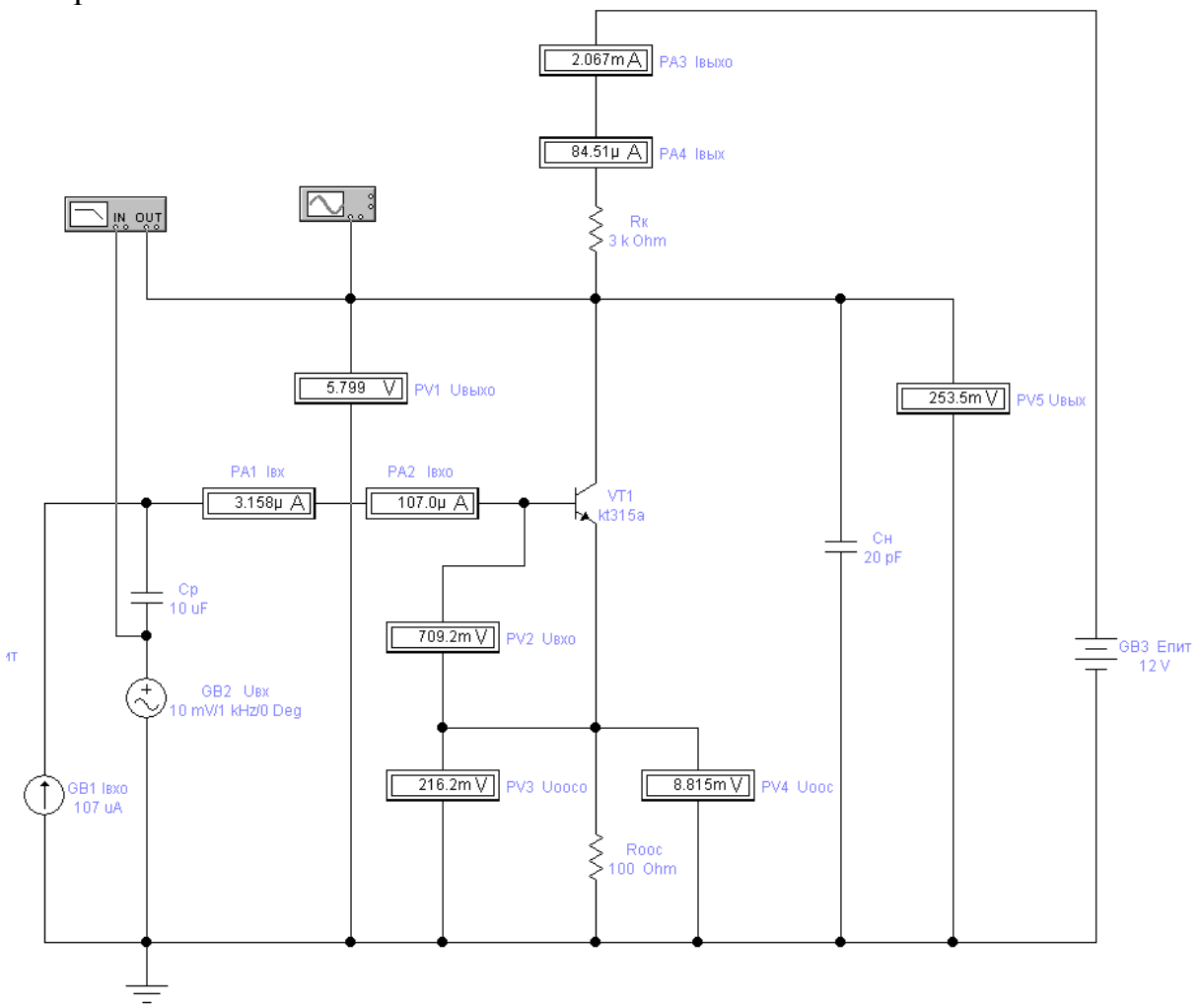

Рис. 16. Снимок с экрана схемы усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 100 Ом

Определяем коэффициент передачи цепи обратной связи $\beta = U_{ooc} / U_{вых} = 8{,}815 / 253{,}5 = 0{,}035$.

Определяем коэффициент усиления усилителя без обратной связи (рисунок 13) $K = U_{вых} / U_{вх} = 2103 / 10 \approx 210$.

Определяем коэффициент усиления усилителя с обратной связи (рисунок 16)

$$K_{ooc} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{210}{1 + 0{,}035 \cdot 210} = \frac{210}{8{,}35} = 25{,}1,$$

Определяем коэффициент усиления усилителя с обратной связи (рисунок 16) другим способом $K_{ooc} = U_{выхooc} / U_{вх} = 253{,}5 / 10 = 25{,}35$ или в дБ: $20 \lg K_{ooc} = 20 \lg 25{,}1 \approx 28$ дБ.

Использование ООС приводит к существенному уменьшению коэффициента усиления, в данном случае более, чем в восемь раз.

Входное сопротивление по переменному току будет равно

$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{10}{3{,}158} = 3{,}17 \text{ кОм},$$

что почти на порядок превышает аналогичный параметр усилителя без ООС (рисунки 1 и 13).

Входное сопротивление по постоянному току будет равно

$$R_{BX0} = \frac{U_{BX0} + U_{OOC0}}{I_{BX0}} = \frac{709{,}2 + 216{,}2}{107} = \frac{925{,}4}{107} = 9{,}65 \text{ кОм},$$

что несколько больше аналогичного параметра усилителя без ООС (рисунки 1 и 13).

Выходное сопротивление по переменному току будет равно

$$R_{ВЫХ} = \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВЫХ}} = \frac{253{,}5 \text{мВ}}{84{,}51 \text{мкА}} \approx 3 \text{ кОм}.$$

Выходное сопротивление по переменному току не изменилось. Действительно, выходное сопротивление по переменному току в активном режиме работы усилителя определяется только величиной коллекторного резистора $R_к$.

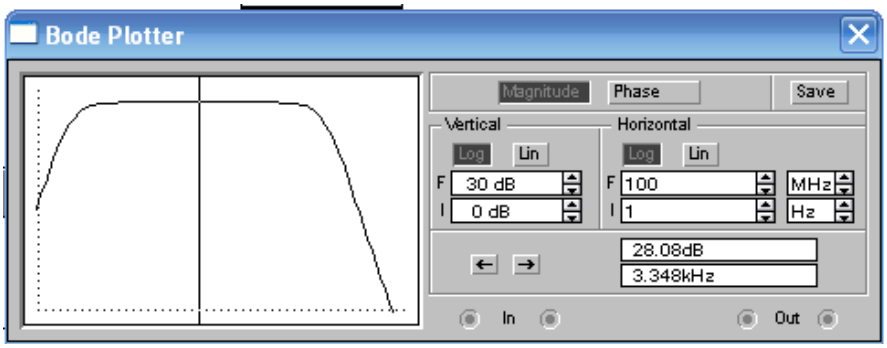

Рис. 17. АЧХ усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 100 Ом

Коэффициент усиления усилителя с обратной связи согласно рисунка 16 равен 28,08 дБ, то есть практически равен расчетным значениям.

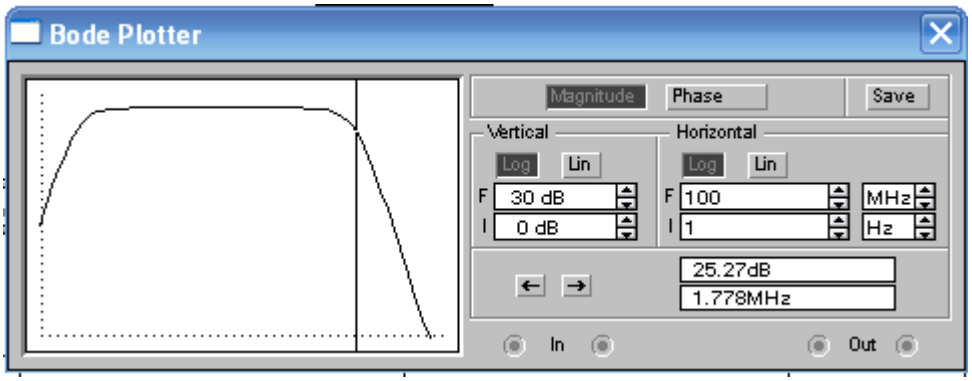

Рис. 18. Определение верхней частоты среза усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 100 Ом

Верхняя частота среза при введении обратной связи осталась без изменения (рисунок 14). Это объясняется тем, что напряжение обратной связи U_{ooc} (PV4) зависит только от коллекторного (эмиттерного) тока. Транзистор является источником тока, а ток в коллекторной (эмитерной) цепи не зависит от сопротивлений, включенных последовательно с транзистором. Ток транзистора зависит только от напряжения база–эмиттер, а оно на верхних частотах постоянно.

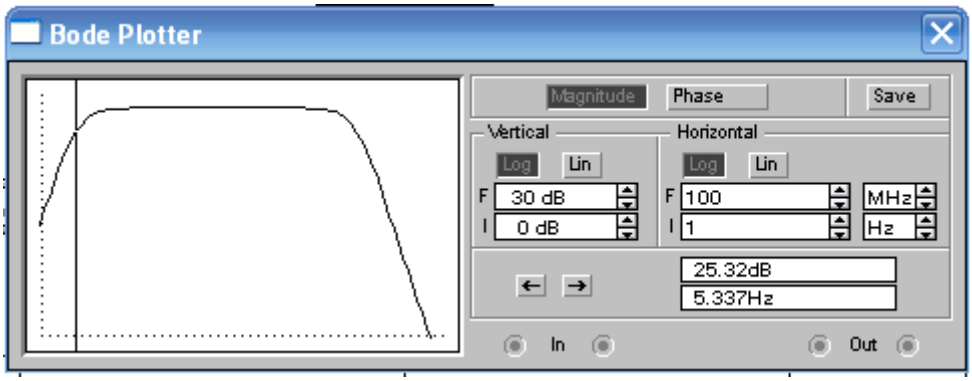

Рис. 19. Определение нижней частоты среза усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 100 Ом

Другое дело, когда напряжение на входе усилителя после разделительного конденсатора C_p зависит от частоты, то есть напряжение база-эмиттер изменяется с частотой. Будут изменяться коллекторный (эмитерный) токи и напряжение обратной связи $U_{ooc.}$ Поэтому в этом случае проявляется действие ООС в виде снижения нижней граничной частоты.

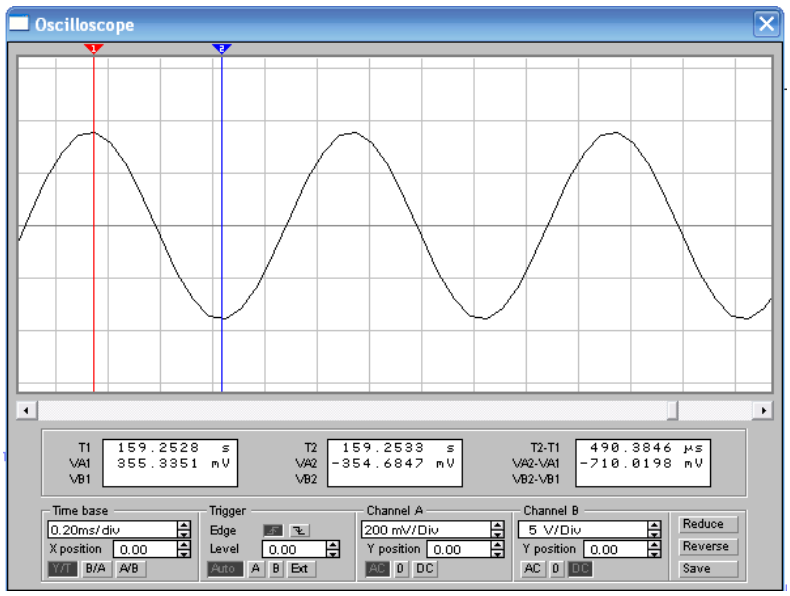

Рис. 20. Осциллограмма на выходе усилителя

Искажений формы сигнала визуально не наблюдается: амплитуды верхней и нижней полуволны практически равны. Однако, это не означает, что искажений нет. Для более точной числовой оценки нелинейных искажений используем схему, представленную на рисунке 21.

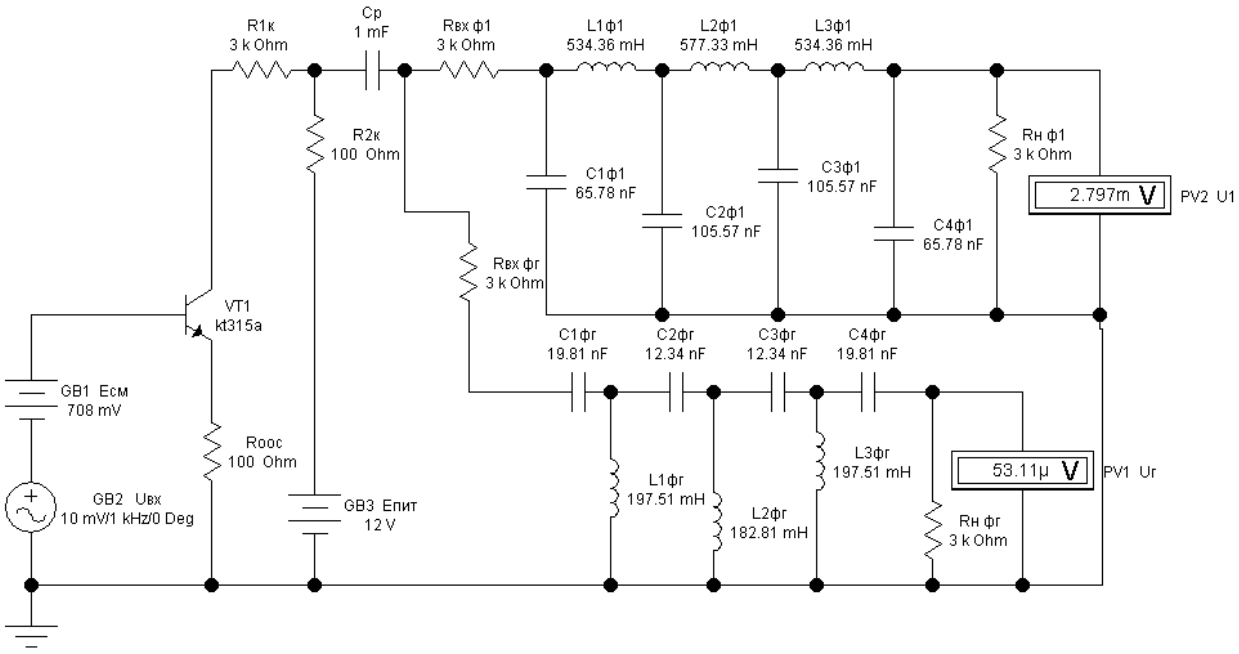

Рис. 21. Снимок с экрана схемы для определения коэффициента гармоник $К_Г$ в усилителе с обратной связью с резистором обратной связи 100 Ом

Значение коэффициента гармоник $К_Г$ будет определяться как $К_{Гooc} = U_{Гooc} / U_{1ooc} = 53{,}11 / 2797 \approx 1{,}9\%$, что существенно меньше аналогичного параметра (10,9%) для усилителя без обратной связи.

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ УСИЛИТЕЛЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ТОКУ С РЕЗИСТОРОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ 500 ОМ

Схема усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 500 Ом представлена на рисунке 22.

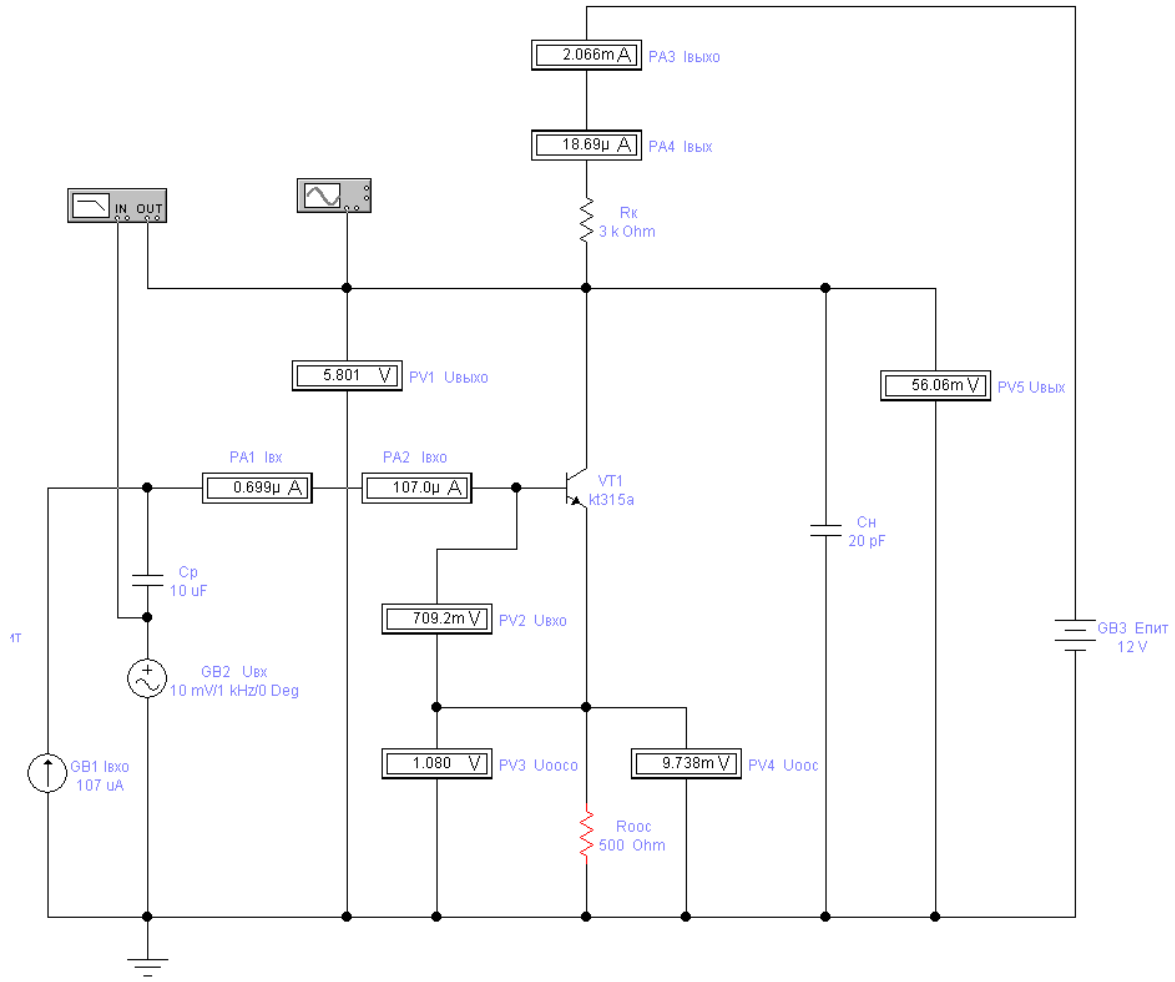

Рис. 22. Снимок с экрана схемы усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 500 Ом

Определяем коэффициент передачи цепи обратной связи $\beta = U_{ooc} / U_{вых} = 9,738 / 56,06 \approx 0,17$.

Определяем коэффициент усиления усилителя без обратной связи (рисунок 13) $K = U_{вых} / U_{вх} = 2103 / 10 \approx 210$.

Определяем коэффициент усиления усилителя с обратной связи (рисунок 22).

$$K_{ooc} = \frac{K}{1+\beta K} = \frac{210}{1+0,17 \cdot 210} = \frac{210}{36,7} = 5,7,$$

Определяем коэффициент усиления усилителя с обратной связи (рисунок 22) другим способом $К_{оос} = U_{выхоос} / U_{вх} = 56,06 / 10 = 5,6$ или в дБ: $20\lg К_{оос} = 20\lg 5,6 \approx 15$ дБ.

Использование ООС приводит к существенному уменьшению коэффициента усиления, в данном случае более, чем в 36 раз.

Входное сопротивление по переменному току будет равно

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}} = \frac{10}{0,699} = 14,3 \text{ кОм},$$

что почти на порядок превышает аналогичный параметр усилителя без ООС (рисунки 1 и 13).

Входное сопротивление по постоянному току будет равно

$$R_{ВХ0} = \frac{U_{ВХ0} + U_{ООС0}}{I_{ВХ0}} = \frac{709,2 + 1080}{107} = \frac{1789}{107} = 16,7 \text{ кОм},$$

что больше аналогичного параметра усилителя без ООС (рисунки 1 и 3).

Выходное сопротивление по переменному току будет равно

$$R_{ВЫХ} = \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВЫХ}} = \frac{253,5 \text{мВ}}{84,51 \text{мкА}} \approx 3 \text{ кОм}$$

Выходное сопротивление по переменному току не изменилось. Действительно, выходное сопротивление по переменному току в активном режиме работы усилителя определяется только величиной коллекторного резистора $R_к$. Это сопротивление не влияет на коллекторный (эмиттерный), и, следовательно, на величину ООС. Поэтому выходное сопротивление при данном способе ООС не зависит от величины ООС.

Коэффициент усиления усилителя с обратной связью согласно рисунку 23 равен 14,97 дБ, то есть практически равен расчетным значениям.

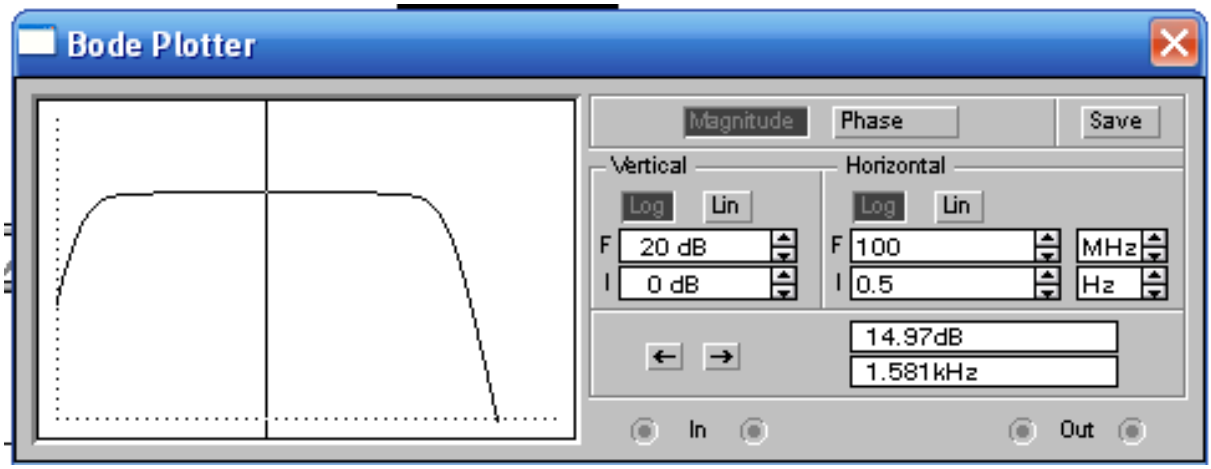

Рис. 23. АЧХ усилителя с обратной связью (рисунок 22) с резистором обратной связи 500 Ом

Верхняя частота среза при увеличения сопротивления резистора обратной связи с 100 Ом до 500 Ом осталась без изменения (рисунки 18 и 24) по причине, описанной выше.

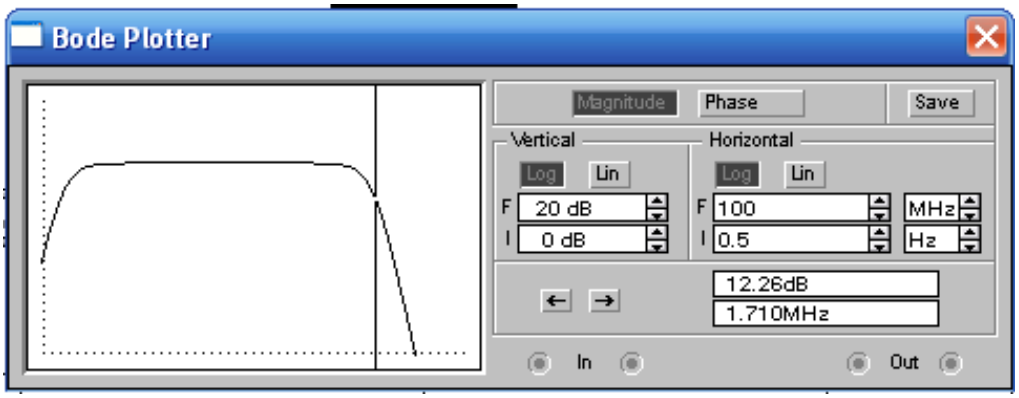

Рис. 24. Определение верхней частоты среза усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 500 Ом

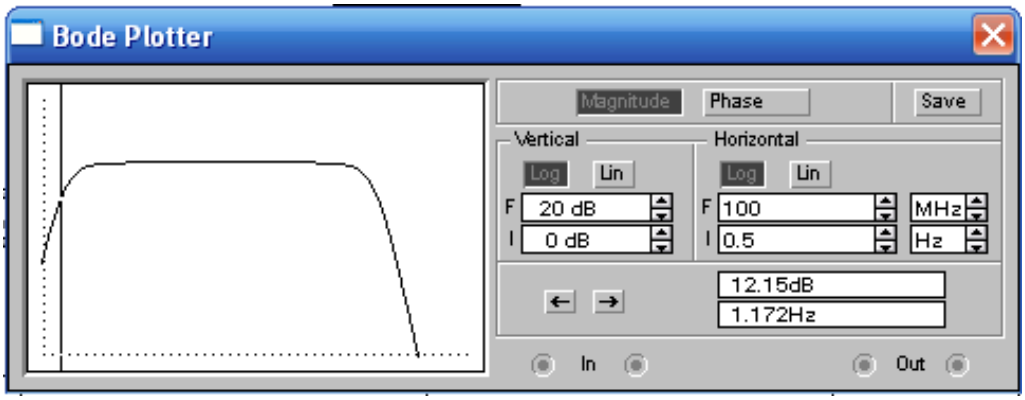

Рис. 25. Определение нижней частоты среза усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 500 Ом

Нижняя частота среза при увеличения сопротивления резистора обратной связи с 100 Ом до 500 Ом снизилась с 5,3 Гц до 1,2 Гц (рисунки 19 и 25) по причине, описанной выше.

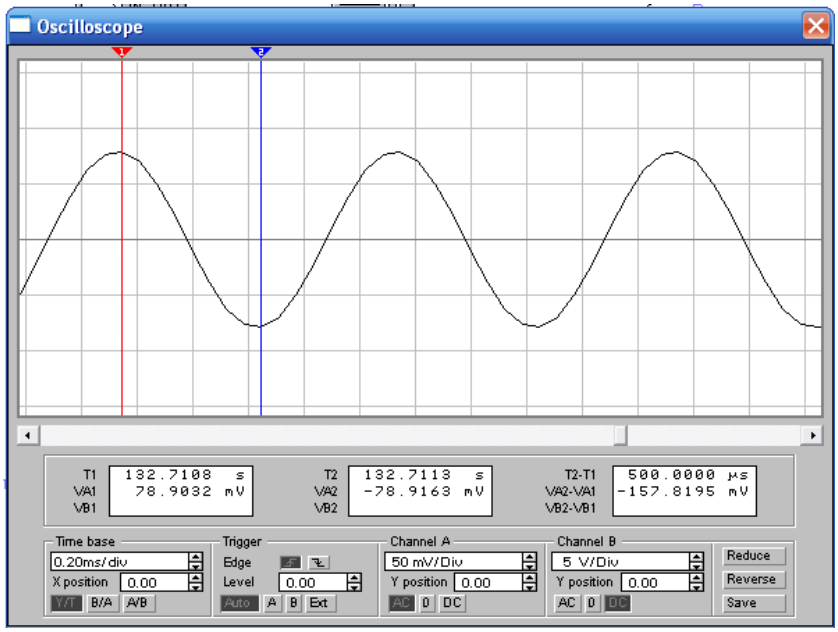

Рис. 26. Осциллограмма на выходе усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 500 Ом

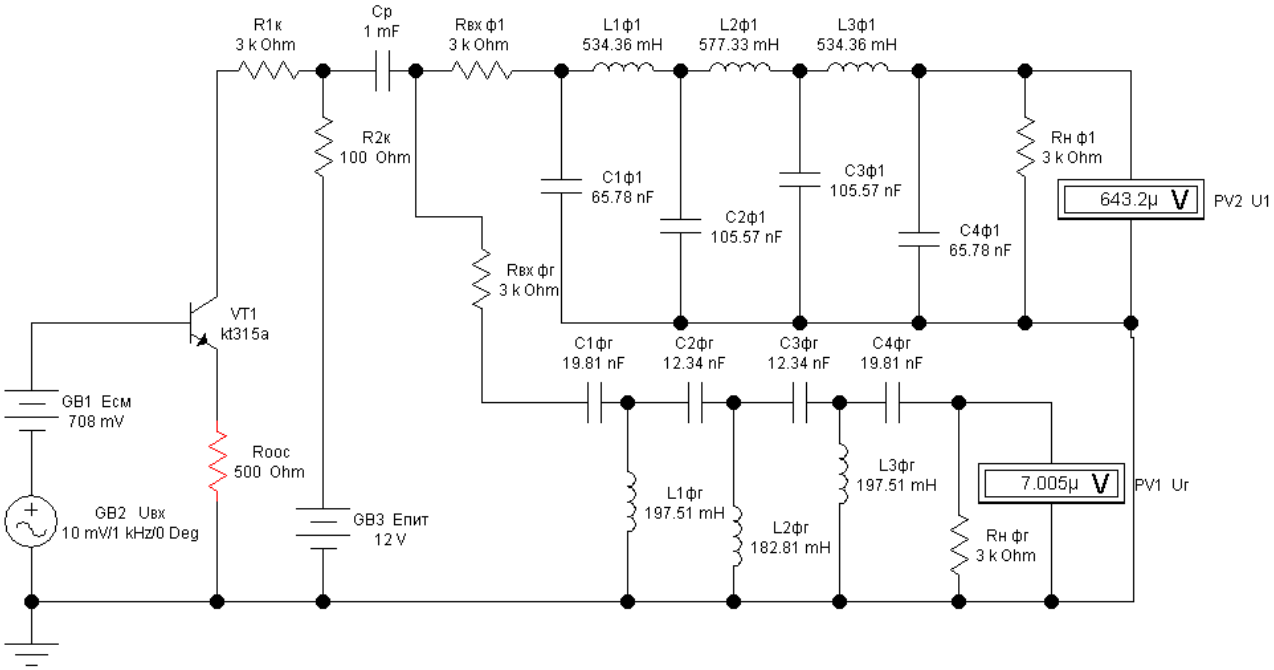

Рис. 27. Снимок с экрана схемы для определения коэффициента гармоник $К_Г$ в усилителе с обратной связью с резистором обратной связи 500 Ом

Увеличения сопротивления резистора обратной связи со 100 Ом до 500 Ом приводит к дальнейшему снижению значение коэффициента гармоник $К_Г$ с 1, 9 %, до $К_{Гooc} = U_{Гooc} / U_{1ooc} = = 7{,}005 / 643{,}2 \approx 1{,}1\%$.

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ УСИЛИТЕЛЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ТОКУ С РЕЗИСТОРОМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ 1 КОМ

Схема усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 1 кОм представлена на рисунке 28.

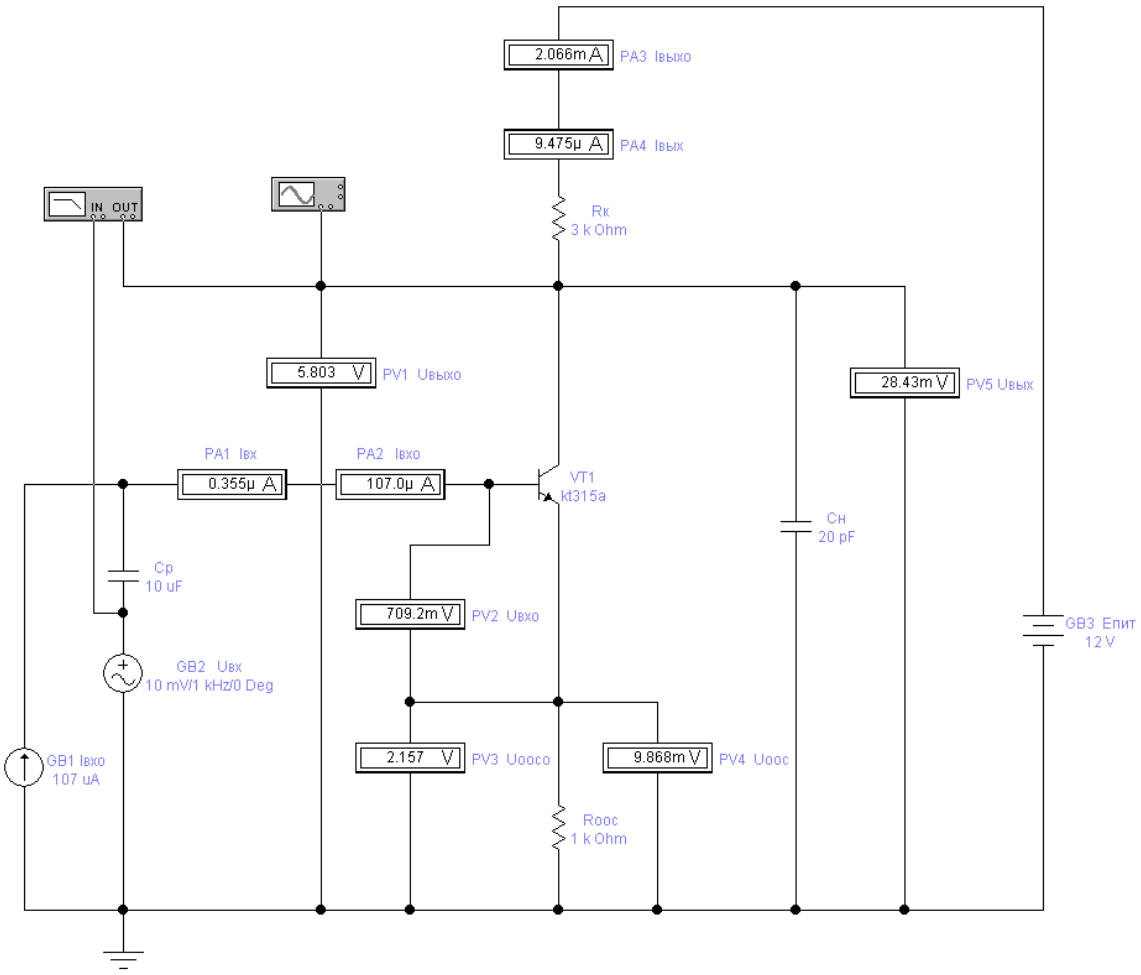

Рис. 28. Схема усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 1 кОм

Определяем коэффициент передачи цепи обратной связи $\beta = U_{ooc} / U_{вых} = 9,868 / 28,43 \approx 0,35$.

Определяем коэффициент усиления усилителя с обратной связи (рисунок 28)

$$K_{ooc} = \frac{K}{1+\beta K} = \frac{210}{1+0,35 \cdot 210} = \frac{210}{74,5} = 2,8,$$

Определяем коэффициент усиления усилителя с обратной связи (рисунок 15) другим способом $K_{ooc} = U_{выхоос} / U_{вх} = 28,43 / 10 \approx 2,8$ или в дБ: $20\lg K_{ooc} = 20\lg 2,8 \approx 9$ дБ.

Использование резистора с сопротивлением 1 кОм в ООС приводит к уменьшению коэффициента усиления, в данном случае более, чем в 75 раз.

Входное сопротивление по переменному току будет равно

$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{10}{0,355} = 28,2 \text{ кОм},$$

что почти на порядок превышает аналогичный параметр усилителя без ООС (рисунки 1 и 3).

Входное сопротивление по постоянному току будет расти по сравнению с предыдущими и составляет

$$R_{BX0} = \frac{U_{BX0} + U_{OOC0}}{I_{BX0}} = \frac{709,2 + 2157}{107} = \frac{2866}{107} = 26,7 \text{ кОм}.$$

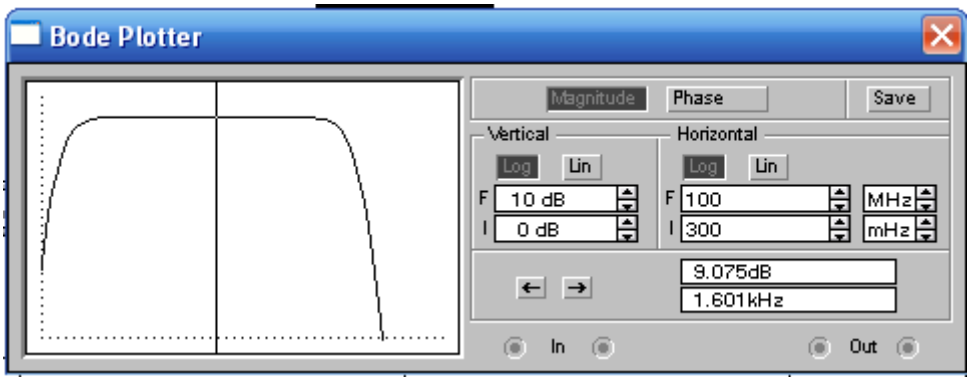

Рис. 29. АЧХ усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 1 кОм

Верхняя частота среза при увеличения сопротивления резистора обратной связи с 500 Ом до 1 кОм осталась в пределах статистической ошибки без изменения (рисунки 24 и 30) по причине, описанной выше.

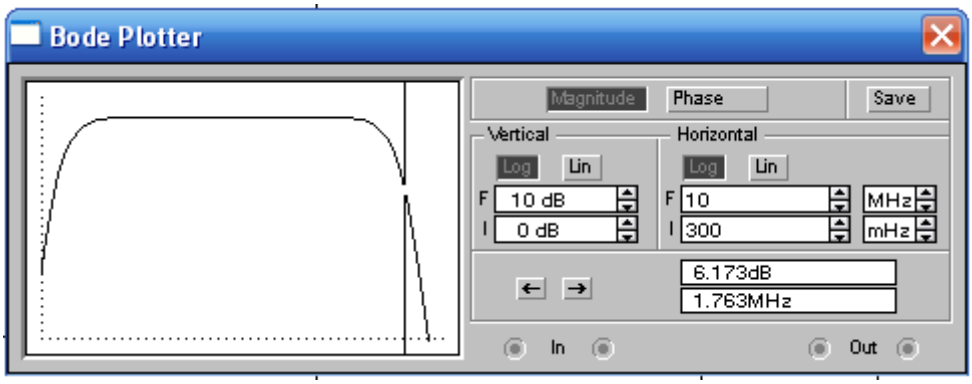

Рис. 30. Определение верхней частоты среза усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 1 кОм

Нижняя частота среза при увеличения сопротивления резистора обратной связи с 500 Ом до 1 кОм снизилась с 1,2 Гц до 0,56 Гц (рисунки 24 и 30) по причине, описанной выше.

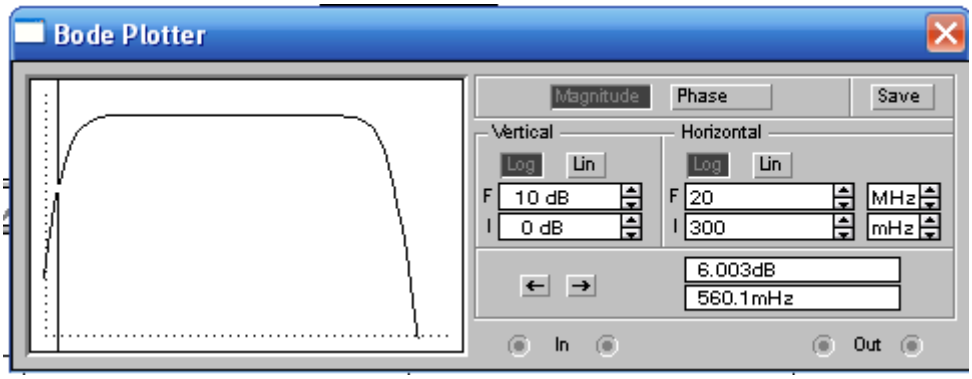

Рис. 31. Определение нижней частоты среза усилителя с обратной связью (рисунок 28) с резистором обратной связи 1 кОм

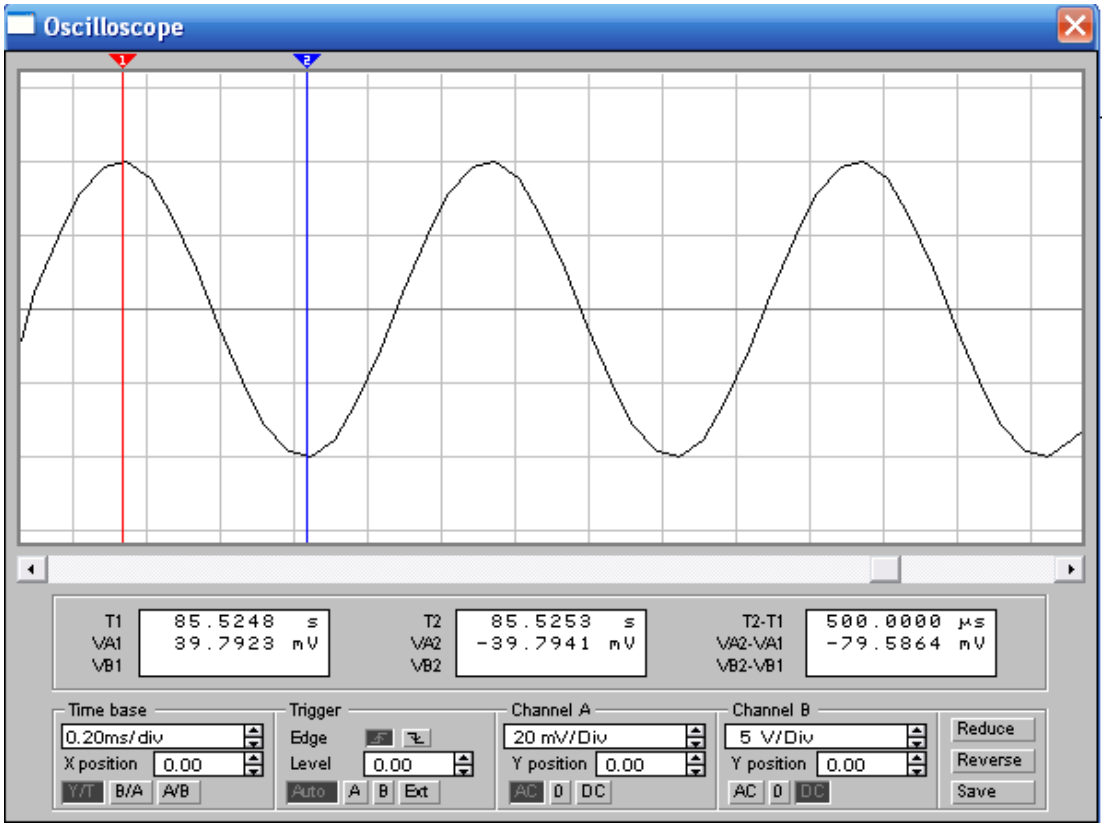

Рис. 32. Осциллограмма на выходе усилителя с обратной связью с резистором обратной связи 1 кОм

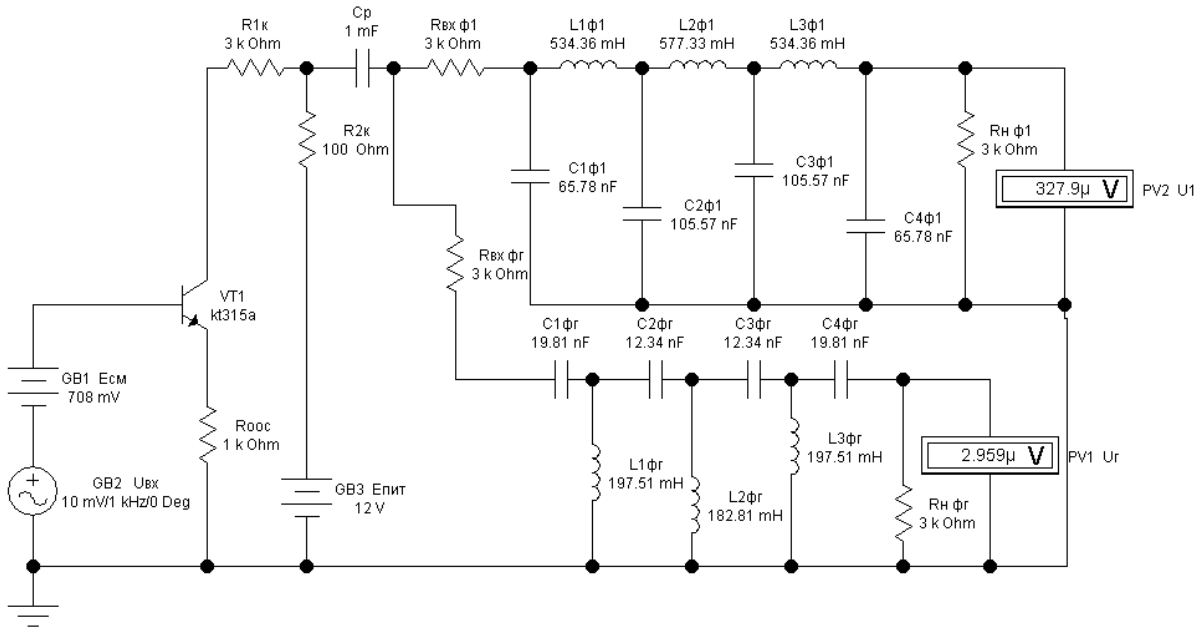

Рис. 33. Снимок с экрана схемы для определения коэффициента гармоник $К_Г$ в усилителе с обратной связью с резистором обратной связи 1 кОм

Увеличения сопротивления резистора обратной связи со 500 Ом до 1 кОм приводит к дальнейшему снижению значение коэффициента гармоник с $К_{Гоос} = 1{,}1\ \%$, до $К_{Гоос} = U_{Гоос} / U_{1оос} = 2{,}959 / 327{,}9 \approx 0{,}9\%$.

3.4. ОБОБЩЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Для наглядности представления полученных результатов построим графики зависимости исследуемых параметров от величины сопротивления резистора ООС R_{ooc}:

- величины коэффициента передачи цепи обратной связи $\beta = f(R_{ooc})$;
- коэффициента усиления $K_{ooc} = f(R_{ooc})$;
- входного сопротивления усилителя по переменному току $R_{BX} = f(R_{ooc})$;
- входного сопротивления усилителя по постоянному току $R_{BX0} = f(R_{ooc})$;
- нижней частоты среза $f_H = \varphi(R_{ooc})$;
- коэффициента гармонических искажений $K_Г = f(R_{ooc})$.

Коэффициент передачи цепи обратной связи β часто называют глубиной обратной связи.

Сначала сведем все исходные данные в таблицу 1.

Таблица 1

Данные для построения графиков

$R_{ooc,}$ Ом	0	100	500	1000
β	0	0,035	0,17	0,35
K,дБ	46	28	15	9
$R_{BX,}$ кОм	0,38	3,2	14,3	28,2
$R_{BX0,}$ кОм	6,6	9,7	16,7	26,7
$f_{H,}$ Гц	43	5,4	1,2	0,56
$K_{Г}$, %	10,9	1,9	1,1	0,9

На основании данных таблицы строим графики.

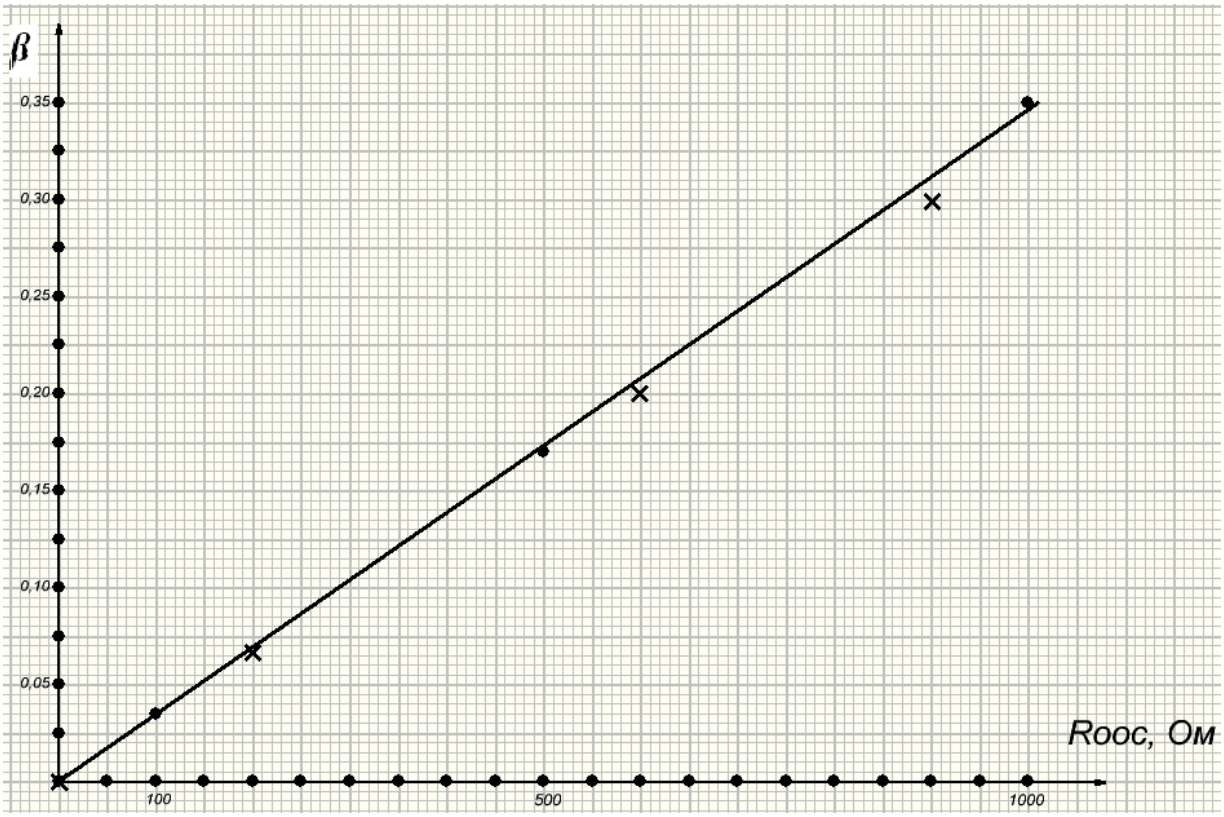

Рис. 34. График зависимости величины коэффициента передачи цепи обратной связи от величины сопротивления резистора ООС $\beta = f(R_{ooc})$

Аналитическая зависимость $\beta = f(R_{ooc})$ будет иметь вид

$$\beta = \frac{U_{ooc}}{U_{ВЫХ}} = \frac{I_K R_{ooc}}{I_K R_K} = \frac{R_{ooc}}{R_K} = \frac{1}{R_K} \cdot R_{ooc}$$

Согласно рисунку 28 величина резистора R_K равна 3 кОм. Проведем проверку на соответствие экспериментальных данных расчетным по четырем точкам. Расчетные данные сведем в таблицу 2.

Таблица 2

Расчетные данные для построения графика $\beta = f(R_{ooc})$

$R_{ooc,}$ Ом	0	200	600	900
β	0	0,067	0,2	0,3

Точками на графике обозначены экспериментальные данные, а крестиком расчетные. Как следует из рисунка 34 экспериментальные и расчетные совпадают с точностью до статистической погрешности.

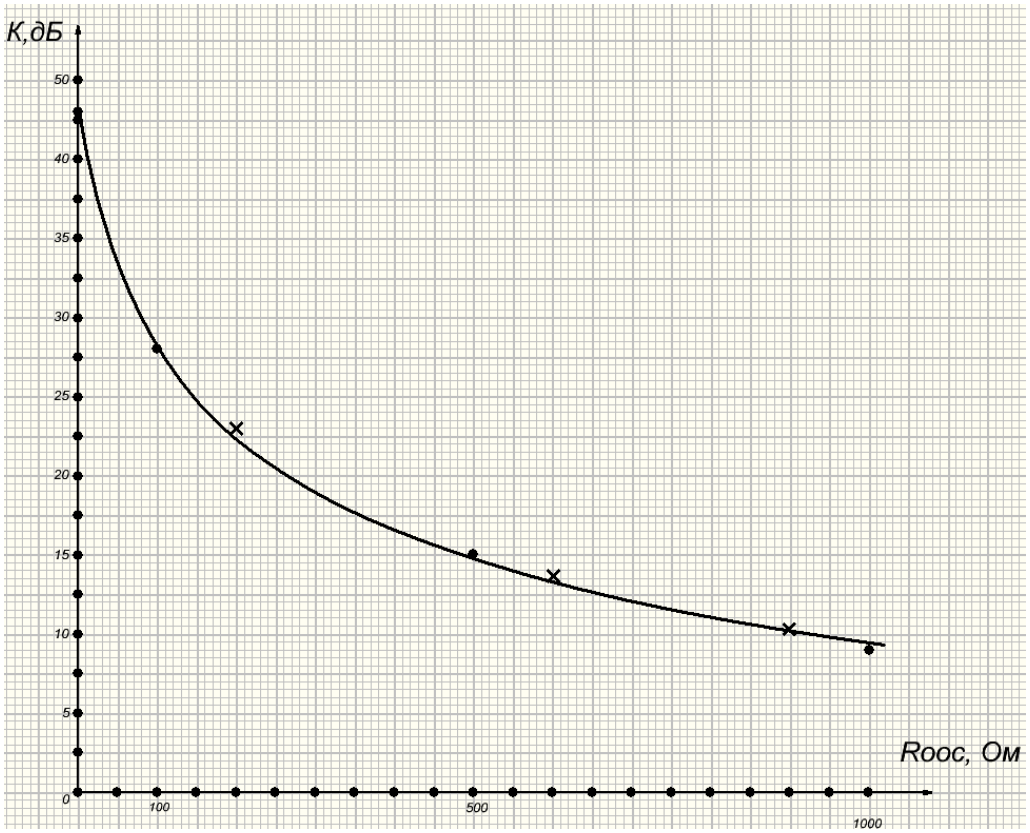

Рис. 35. График зависимости величины коэффициента усиления усилителя ОЭ с обратной связью по току от величины сопротивления резистора ООС $К_{ooc} = f(R_{ooc})$

Аналитическая зависимость $К_{ooc} = f(R_{ooc})$ будет иметь вид

$$К_{ooc} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{I_K R_K}{U_{бэ} + U_{ooc}} = \frac{I_K R_K}{U_{бэ} + I_K R_{ooc}} = \frac{KR_K}{\frac{KU_{бэ}}{I_K} + KR_{ooc}} =$$

$$= \frac{KR_K}{\frac{U_{ВЫХ}}{I_K} + KR_{ooc}} = \frac{KR_K}{R_K + KR_{ooc}},$$

где K – коэффициент усиления усилителя без обратной связи, который как рассчитано ранее равен 210; $U_{áý}$ - переменное напряжение между эмиттером и базой.

Проведем проверку на соответствие экспериментальных данных расчетным по четырем точкам. Расчетные данные сведем в таблицу 3 .

Таблица 3

Расчетные данные для построения графика $K_{ooc} = f(R_{ooc})$

R_{ooc}, Ом	0	200	600	900
K_{ooc}	210	14	4,9	3,3
$lg\ K_{ooc}$	46	23	13,8	10,3

Точками на графике обозначены экспериментальные данные, а крестиком расчетные. Как следует из рисунка 35 экспериментальные и расчетные совпадают с точностью до статистической погрешности.

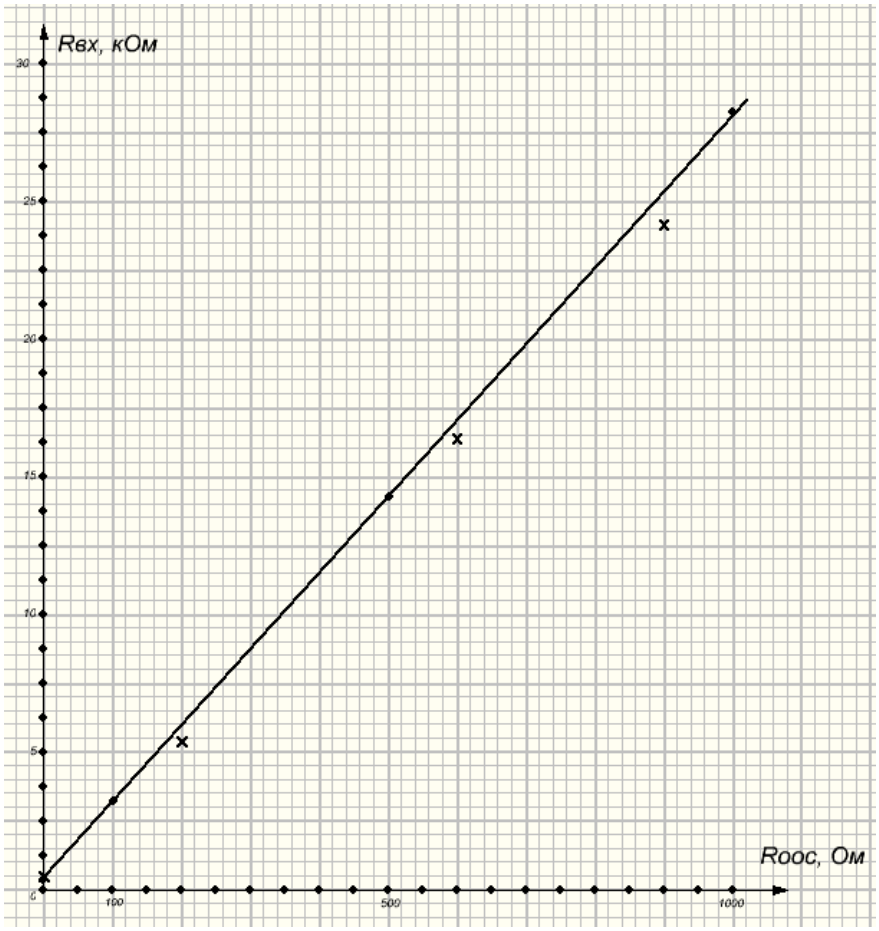

Рис. 36. График зависимости значений входного сопротивления по переменному току усилителя ОЭ с обратной связью по току от величины сопротивления резистора ООС $R_{BXooc} = f(R_{ooc})$

Аналитическая зависимость $R_{BXooc} = f(R_{ooc})$ будет иметь вид

$$R_{BXooc} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{U_{бэ} + U_{ooc}}{I_{BX}} = \frac{U_{бэ}}{I_{BX}} + \frac{U_{ooc}}{I_{BX}} = R_{BX} + \frac{I_K R_{ooc}}{I_K / \beta_1} = R_{BX} + \beta_1 \cdot R_{ooc},$$

где R_{BX} – входное сопротивление усилителя без обратной связи, который как рассчитано ранее равно 377 Ом; $U_{áý}$ - переменное напряжение между эмиттером и базой; β_1 - динамический коэффициент усиления по переменному току транзистора ОЭ для выбранной рабочей точки.

Из лабораторной работы №1 известно, что β_1 равен 26,7.

Проведем проверку на соответствие экспериментальных данных расчетным по четырем точкам. Расчетные данные сведем в таблицу 4.

Таблица 4

Расчетные данные для построения графика $R_{BXooc} = f(R_{ooc})$

R_{ooc}, Ом	0	200	600	900
R_{BXooc}	377	5,72	16,4	24,4

Точками на графике обозначены экспериментальные данные, а крестиком расчетные. Как следует из рисунка 36 экспериментальные и расчетные совпадают с точностью до статистической погрешности.

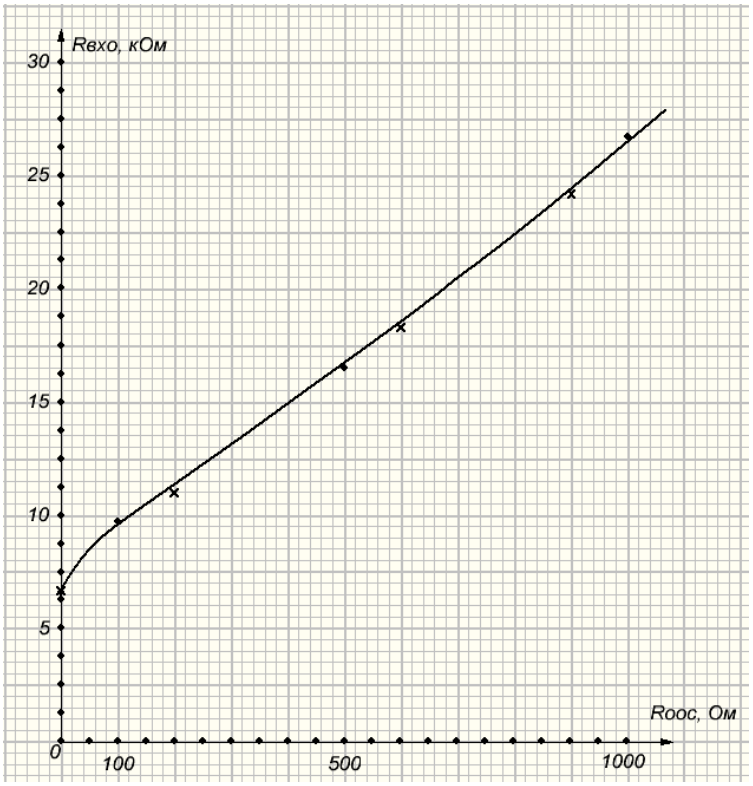

Рис. 37. График зависимости значений входного сопротивления по постоянному току усилителя ОЭ с обратной связью по току от величины сопротивления резистора ООС $R_{BX0} = f(R_{ooc})$

Аналитическая зависимость $R_{BX0} = f(R_{ooc})$ будет иметь вид

$$R_{BX0ooc} = \frac{U_{BX0} + U_{ooc0}}{I_{BX0}} = \frac{U_{BX0}}{I_{BX0}} + \frac{U_{ooc0}}{I_{BX0}} = R_{BX0} + \frac{I_{K0}R_{ooc}}{I_{K0}/\beta_{10}} = R_{BX0} + \beta_{10} \cdot R_{ooc}$$

где R_{BX0} – входного сопротивления усилителя по постоянному току без обратной связи, которое как рассчитано ранее равно 6,62 кОм; U_{BX0} - постоянное напряжение между эмиттером и базой (рабочая точка); β_{10} - динамический коэффициент усиления по постоянному току транзистора ОЭ для выбранной рабочей точки.

Из лабораторной работы №1 известно, что β_{10} равен 19,5.

Проведем проверку на соответствие экспериментальных данных расчетным по четырем точкам. Расчетные данные сведем в таблицу 5.

Таблица 5

Расчетные данные для построения графика $R_{BX0} = f(R_{ooc})$

R_{ooc}, Ом	0	200	600	900
R_{BX0ooc}	6,62	10,5	18,3	24,2

Точками на графике обозначены экспериментальные данные, а крестиком расчетные. Как следует из рисунка 36 экспериментальные и расчетные совпадают с точностью до статистической погрешности.

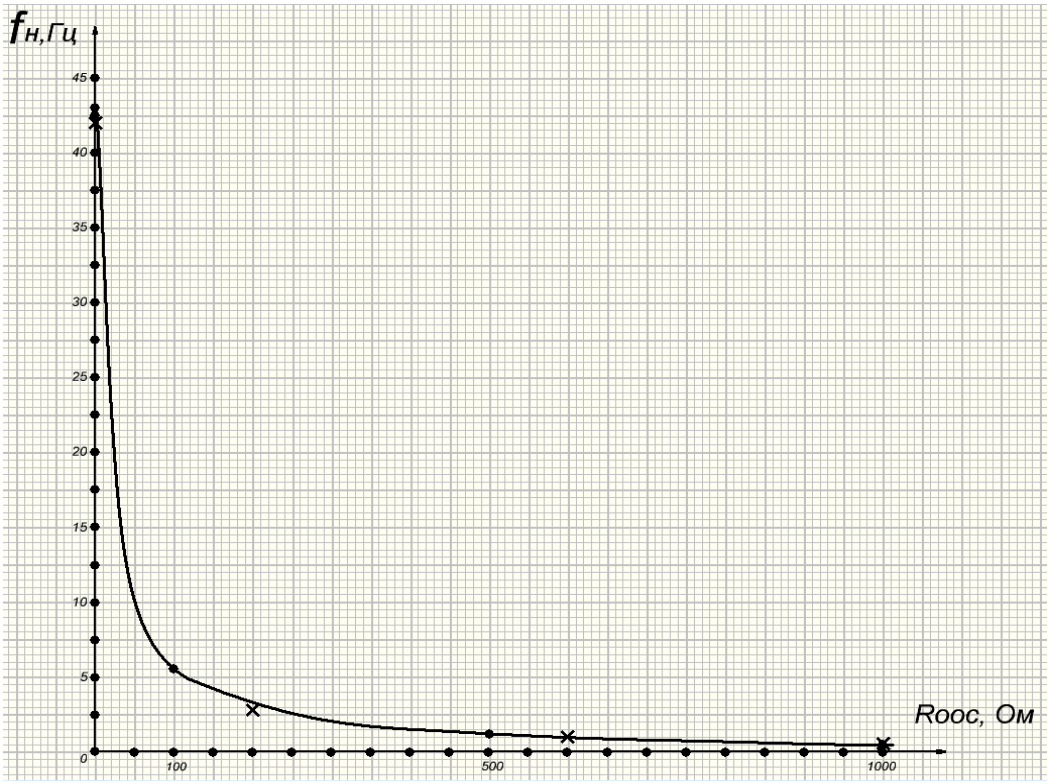

Рис. 38. График зависимости значений нижней частоты среза f_H усилителя ОЭ с обратной связью по току от величины сопротивления резистора ООС $f_H = \varphi(R_{ooc})$

Из теории цепей известно, что на частоте среза f_H АЧХ *RC* дифференцирующей цепочки, соответствующей снижению уровня коэффициента передачи на 3 дБ, сопротивление конденсатора (в нашем случае разделительного C_p (рисунок 28), X_{C_p} и активного сопротивления (в нашем случае входного сопротивления усилителя, рисунок 28) R_{BXooc} равны.

Тогда аналитическая зависимость для этого случая будет иметь вид

$$X_{C_p} = R_{BXooc} = \frac{1}{2\pi f_H C_p} = R_{BX} + \beta_1 \cdot R_{ooc},$$

Отсюда

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_p \left(R_{BX} + \beta_1 \cdot R_{ooc}\right)}.$$

Значение C_p согласно рисунку 28 равна 10 мкФ.

Проведем проверку на соответствие экспериментальных данных расчетным по четырем точкам. Расчетные данные сведем в таблицу 6.

Таблица 6

Расчетные данные для построения графика $f_H = \varphi(R_{ooc})$

R_{ooc}, Ом	0	200	600	900
f_H, Гц	42	2,8	1,0	0,65

Точками на графике обозначены экспериментальные данные, а крестиком расчетные. Как следует из рисунка 38 экспериментальные и расчетные совпадают с точностью до статистической погрешности.

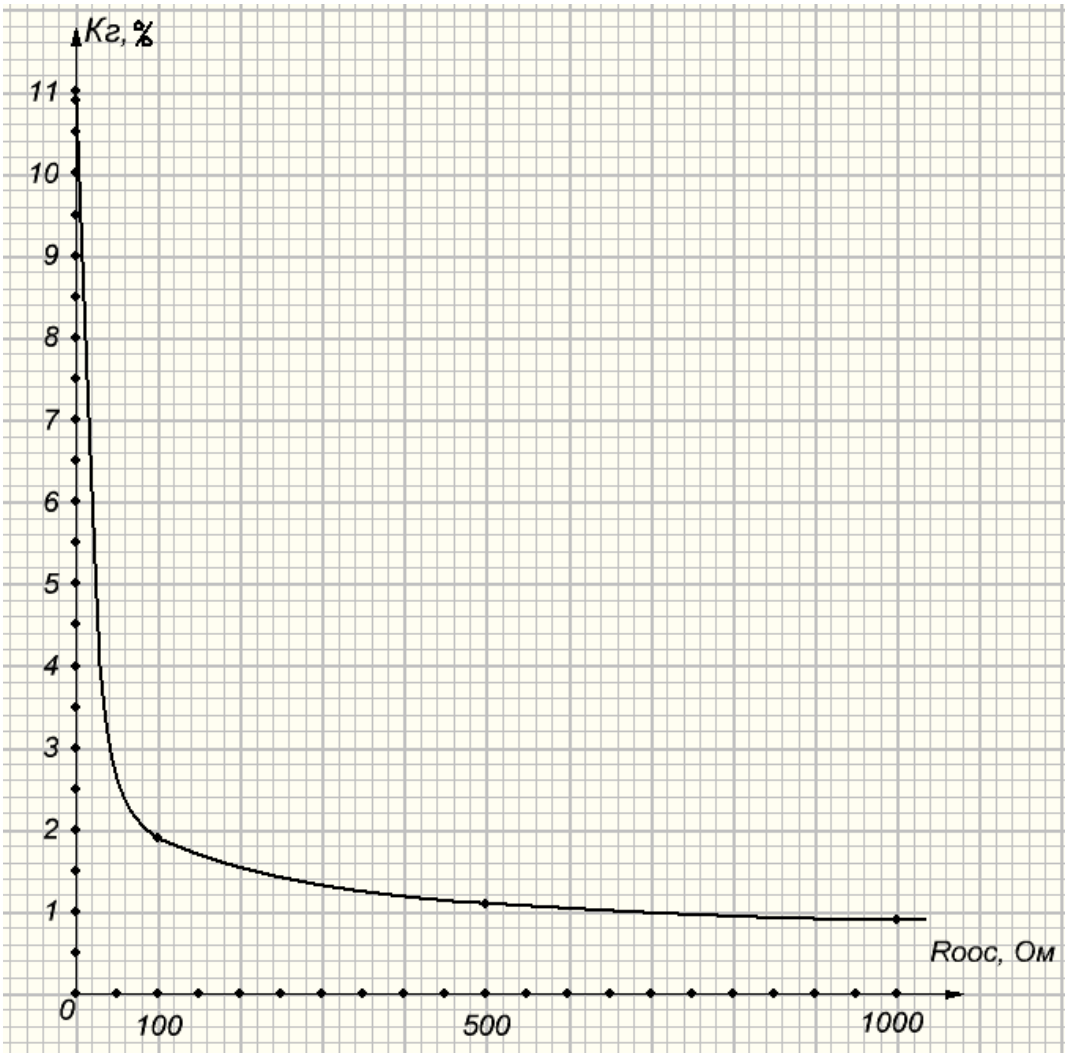

Рис. 39. График зависимости значений коэффициента гармонических искажений усилителя ОЭ с обратной связью по току от величины сопротивления резистора ООС $K_\Gamma = f(R_{ooc})$

Аналитическая зависимость $K_\Gamma = f(R_{ooc})$ очень сложная, поэтому ее рассматривать не будем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах ОЭ с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению и току. 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. Исследование однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах ОЭ с последовательной отрицательной обратной связью по напряжению и току ..... ……3
1.1. Цель лабораторной работы 3
1.2. Содержание работы 3
2. Определение параметров модели схемы без обратной связи однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах ОЭ, по которым производится сравнительный анализ схем с последовательной отрицательной обратной связью по току и без таковой 3
3. Определение параметров модели усилителя с последовательной отрицательной обратной связью по току однокаскадного резистивного усилителя на биполярном транзисторе ОЭ, по которым производится сравнительный анализ схем с обратной связью и без таковой ..... ……..13
3.1. Определение параметров модели усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 100 Ом 13
3.2. Определение параметров модели усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 500 Ом 17
3.3. Определение параметров модели усилителя с отрицательной обратной связи по току с резистором обратной связи 1 кОм 21
3.4. Обобщение и анализ полученных результатов измерения 24
Заключение 31
Библиографический список 32

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы № 5
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. 1,8.

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