

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 2
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 № 2
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 № 2 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.– 31 с.

В методических указаниях рассматриваются вопросы моделирования входных цепей 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_ЛР2.pdf.

Ил. 23. 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 входных и выходных цепей однокаскадных резистивных усилителей на биполярных транзисторах. Моделирование осуществляется в программном обеспечении EWB5.12 и Micro-CaP8.

Методические указания содержат авторские иллюстрации.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

1.1. ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Целью лабораторной работы является разработка моделей входных цепей однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей напряжения для схем с общими эмиттером, базой и коллектором.

1.2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Содержанием практической части работы является разработка моделей входных цепей однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей напряжения для схем с общими эмиттером, базой и коллектором.

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

2.1. ЦЕПИ СМЕЩЕНИЯ В КАСКАДАХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО СХЕМАМ ОЭ И ОБ

Качественная работа усилителя во многом определяется правильным выбором режима работы усилительного каскада по постоянному току.

Обычно смещение в усилительных каскадах подается от общего источника питания E_K . Наиболее часто используются схемы с фиксированным током базы и фиксированным напряжением база-эмиттер.

Схема смещения с фиксированным током базы приведена на рисунке 1. Смещение в этой схеме обеспечивается от источника E_K через резистор R_6 , необходимая величина которого определяется выражением

$$R_6 = \frac{E_K - U_{06}}{I_{06}} \approx \frac{E_K}{I_{06}}, \quad (1)$$

так как $E_K \gg U_{06}$. Величина тока покоя базы I_{06} практически зависит только от R_6 и E_K и не зависит от параметров транзистора. Отсюда возникло и название схемы подачи смещения.

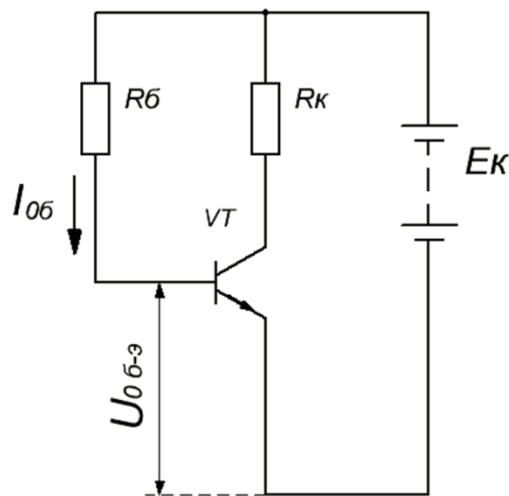


Рис. 1. Схема смещения фиксированным током базы

Схема смещения с фиксированным напряжением база-эмиттер приведена на рисунке 2. В этой схеме напряжение смещения подается от источника питания через делитель напряжения на резисторах $R1$ и $R2$.

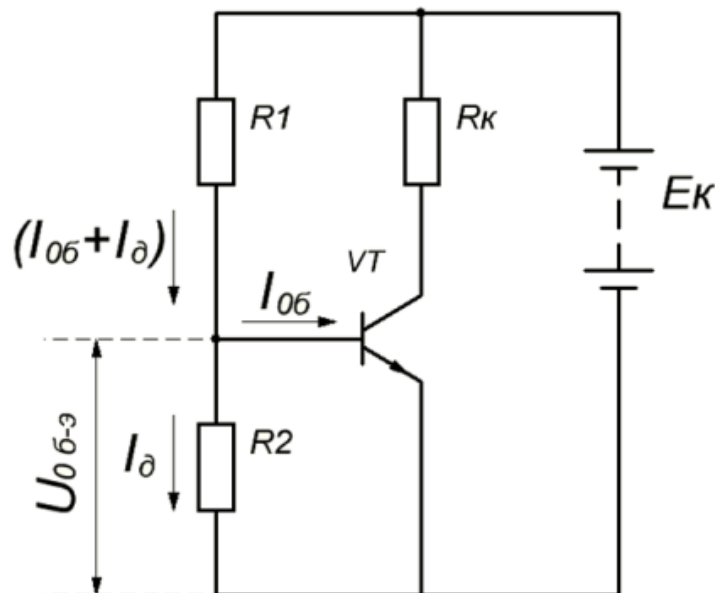


Рис. 2. Схема смещения фиксированным напряжением база-эмиттер

Сопротивления резисторов делителя напряжения могут быть определены при заданном напряжении смещения U_{06} из выражений

$$R1 = \frac{E_K - U_{06}}{I_D + I_{06}}, \quad (2)$$

$$R2 = \frac{U_{06}}{I_D}, \quad (3)$$

где I_D — ток делителя, обычно выбираемый в пределах (от 2 до 5) I_{06} .

При этом повышается стабильность режима работы схемы, так как изменение тока в цепях эмиттера и коллектора транзистора незначительно влияет на величину смещения. Следует иметь в виду, что ток делителя нельзя выбирать слишком большим, поскольку в делителе расходуется дополнительная энергия, и чем больше ток I_D , тем более мощным должен быть источник питания E_K . Кроме того, в этом случае уменьшаются величины сопротивлений $R1$ и $R2$, что приводит к уменьшению входного сопротивления каскада.

2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕПЕЙ СМЕЩЕНИЯ НА ВХОДНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В КАСКАДАХ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ПО СХЕМАМ ОЭ И ОБ

Источник входного сигнала $E_{вх}$ с внутренним сопротивлением R_i в зависимости от схемы включения транзистора подключается к усилителю разными способами.

По схеме с ОЭ входной сигнал подается между базой и эмиттером через разделительный конденсатор C_p , как показано на рисунке 3.

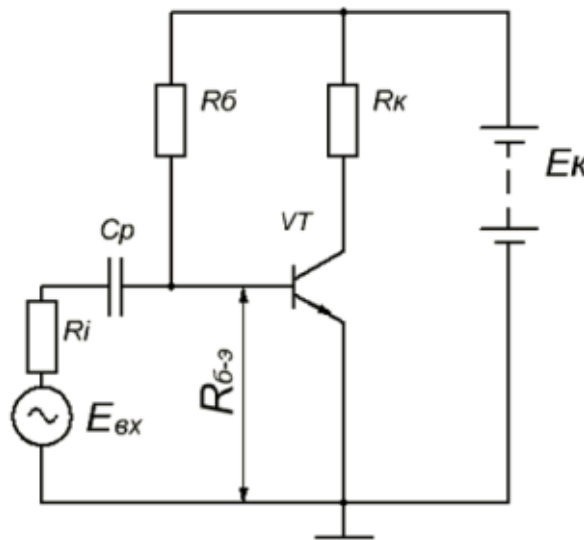


Рис. 3. Схема усилителя ОЭ со смещением фиксированным током базы

Разделительный конденсатор необходим для сохранения режимов смещения, показанных на рисунке 1.

Входное сопротивление усилителя $R_{вх}$ по переменному току в случае смещения фиксированным током будет состоять из двух сопротивлений,

включенных параллельно R_6 и сопротивления участка база-эмиттер транзистора VT переменному току R_{63}

$$R_{вх} = \frac{R_6 \cdot R_{63}}{R_6 + R_{63}}. \quad (4)$$

Сопротивления участка база-эмиттер транзистора VT переменному току R_{63} в первом приближении можно определить как

$$R_{63} = \frac{R_K}{\beta}, \quad (5)$$

где β - коэффициент усиления транзистора по переменному току.

Входное сопротивление усилителя $R_{вх}$ по переменному току в случае смещения фиксированным напряжением (рисунок 4) будет состоять из трех сопротивлений, включенных параллельно: резистора $R1$, сопротивления участка база-эмиттер транзистора VT переменному току R_{63} и резистора $R2$, то есть оно будет меньше, чем при смещении фиксированным током.

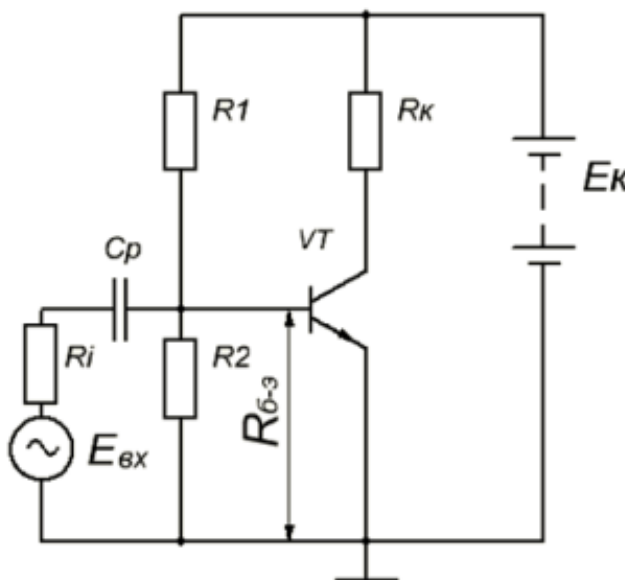


Рис. 4. Схема усилителя ОЭ со смещением фиксированным напряжением

По схеме с ОБ входной сигнал подается между базой и эмиттером через разделительный конденсатор C_p на разделительный резистор R_3 , как показано на рисунке 5, или напрямую в эмиттер, как показано на рисунке 6. База транзистора VT соединяется по переменной составляющей с корпусом через блокировочный конденсатор $C_{бл}$. Разделительный резистор R_3 отделяет по переменной составляющей эмиттер и базу.

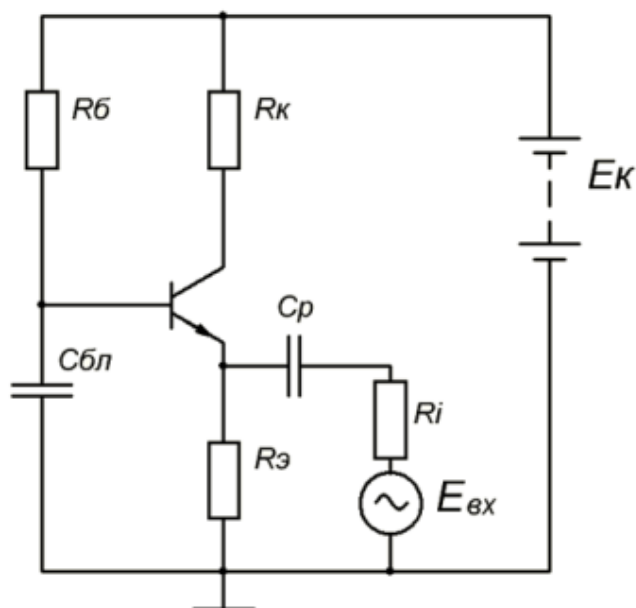


Рис. 5. Схема усилителя ОБ со смещением фиксированным током базы и параллельным вводом входного сигнала

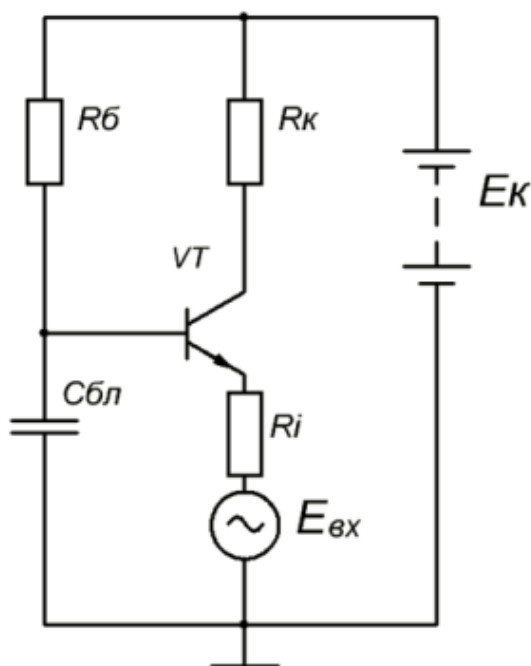


Рис. 6. Схема усилителя ОБ со смещением фиксированным током базы и последовательным вводом входного сигнала

Верхний вывод резистора R_k , на котором выделяется выходное напряжение усилителя, соединен с корпусом и, следовательно, с базой через малое сопротивление источника E_k . Поэтому база является общим электродом для входного и выходного сигналов.

По переменной составляющей оба вывода резистора R_b соединены с корпусом, поэтому переменный ток через этот резистор не протекает и,

следовательно, напрямую шунтирующее действие на входную цепь этого усилителя он не оказывает. Поэтому сколько резисторов на базу не навешай, они не будут влиять напрямую по переменной составляющей на параметры усилителя. Однако надо учитывать, что режим транзистора по постоянной составляющей полностью определяет эти параметры.

Как указывалось выше, предпочтительнее в плане температурной стабильности использовать схему со смещением фиксированным напряжением. Последняя отличается от схема со смещением фиксированным током базы наличием еще одного резистора. А раз этот резистор не оказывает напрямую шунтирующее действие на входную цепь, то вариант со смещением фиксированным напряжением предпочтительнее. На рисунке 7 представлен вариант такой схемы.

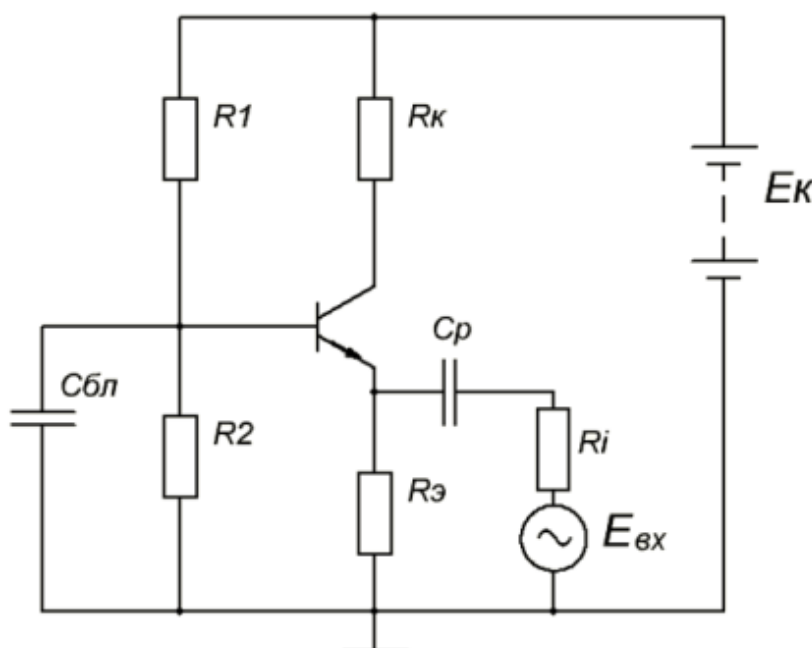


Рис. 7. Схема усилителя ОБ со смещением фиксированным напряжением на базе и параллельным вводом входного сигнала

Входное сопротивление такой схемы (участок схемы эмиттер-корпус) составляет несколько десятков Ом и, обычно, существенно меньше величины R_3 .

2.3. ЦЕПИ СМЕЩЕНИЯ В КАСКАДАХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО СХЕМАМ ОК

Схемы смещения с фиксированными током базы и напряжением, представленными на рисунках 1 и 2, не подходят к каскадам ОК, так как резистор нагрузки в этом каскаде включен в эмиттерной цепи. Тогда схемы смещения с фиксированными током базы и напряжением будут иметь вид, представленный на рисунках 8 и 9.

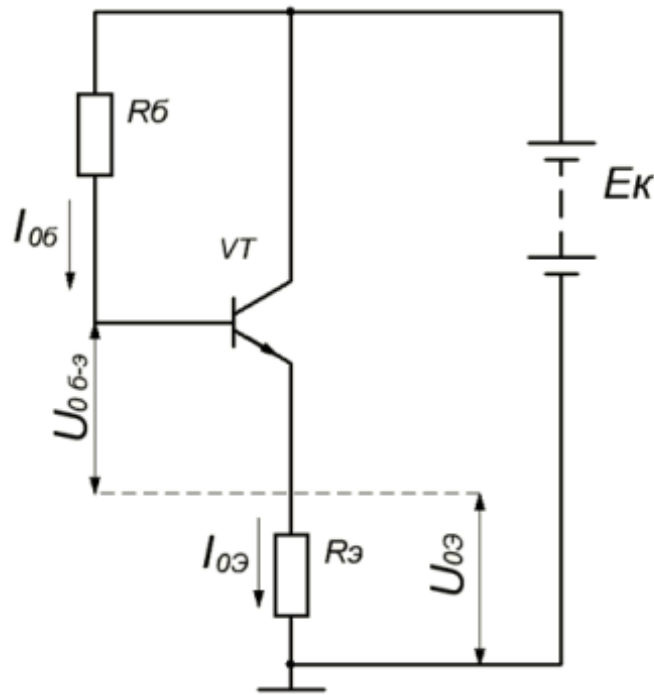


Рис. 8. Схема смещения фиксированным током базы для ОК

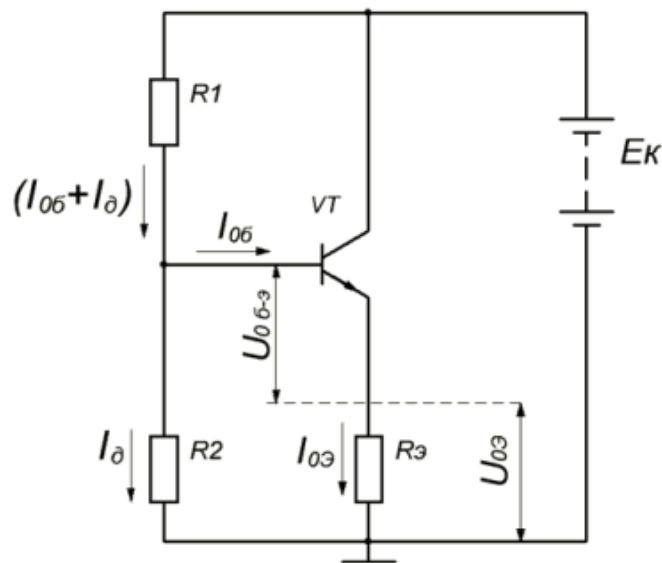


Рис. 9. Схема смещения фиксированным напряжением базы для ОК

Смещение в этой схеме обеспечивается от источника E_k через резистор R_6 , необходимая величина которого определяется выражением

$$R_6 = \frac{E_k - U_{0бэ} - U_{0э}}{I_{0б}}. \quad (6)$$

Рабочую точку выбирают обычно на середине динамической характеристики, то есть $U_{0э} \approx E_k / 2$. Тогда с учетом того, что $E_k \gg U_{0бэ}$, получаем

$$R_6 = \frac{E_K}{2I_{06}}. \quad (7)$$

Величина тока покоя базы I_{06} практически зависит только от R_6 и E_K и не зависит от параметров транзистора.

Эмиттерный ток покоя $I_{0Э}$ для середины динамической характеристики определяется как

$$I_{0Э} = \frac{U_{0Э}}{R_Э} = \frac{E_K}{2R_Э}. \quad (8)$$

Ток покоя базы в β_0 раз меньше тока покоя эмиттера

$$I_{06} = \frac{I_{0Э}}{\beta_0} = \frac{E_K}{2 \cdot \beta_0 \cdot R_Э}. \quad (9)$$

С другой стороны

$$I_{06} = \frac{E_K}{2R_6}. \quad (10)$$

Сравнивая два последних выражения, получаем

$$R_6 = \beta_0 \cdot R_Э. \quad (11)$$

Сопротивление базового резистора полностью определяется сопротивлением в эмиттере и коэффициентом усиления транзистора по постоянному току.

На рисунке 9 представлена схема смещения фиксированным напряжением базы для ОК.

В этой схеме напряжение смещения подается от источника питания через делитель напряжения на резисторах $R1$ и $R2$.

Сопротивления резисторов делителя напряжения могут быть определены при заданном напряжении смещения U_{06} из выражений

$$R1 = \frac{E_K - U_{06} - U_{0Э}}{I_D + I_{06}}, \quad (12)$$

$$R2 = \frac{U_{06Э} + U_{0Э}}{I_D}, \quad (13)$$

где I_D — ток делителя, обычно выбираемый в пределах (от 2 до 5) I_{06} .

При этом стабильность режима работы схемы практически не повышается, так как каскад ОК охвачен почти 100 % отрицательной обратной связью. Следует иметь в виду, что ток делителя нельзя выбирать слишком большим, поскольку в делителе расходуется дополнительная энергия, и чем больше ток I_D , тем более мощным должен быть источник питания E_K . Кроме того, в этом случае уменьшаются величины сопротивлений $R1$ и $R2$, что приводит к уменьшению входного сопротивления каскада.

2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕПЕЙ СМЕЩЕНИЯ НА ВХОДНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В КАСКАДАХ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ПО СХЕМЕ ОК

По схеме с ОК входной сигнал подается между базой и корпусом через разделительный конденсатор C_p как показано на рисунке 10. Коллектор транзистора VT соединяется по переменной составляющей с корпусом через малое внутренне сопротивление источника питания.

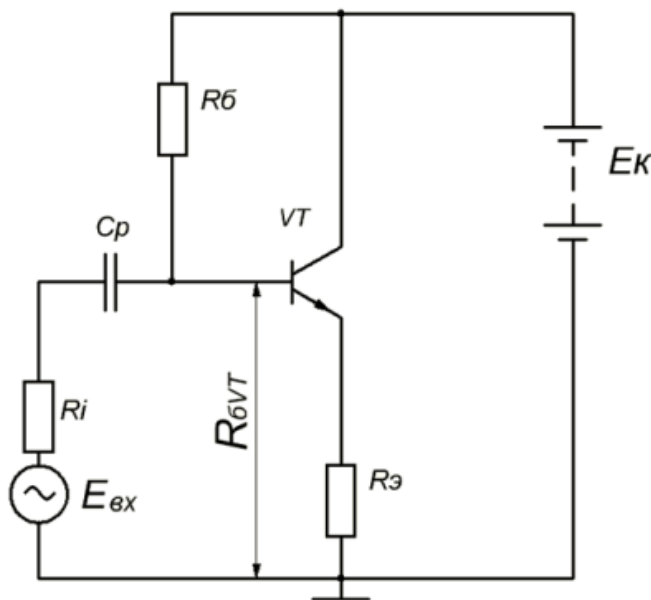


Рис. 10. Схема усилителя ОК со смещением фиксированным током базы

По переменному току входное сопротивление транзистора со стороны базы $R_{бвТ}$ определяется как отношение входного переменного напряжения $U_{вх}$ к переменному току базы $I_{бх}$ ($I_б$)

$$R_{бвТ} = \frac{U_{вх}}{I_{бх}}. \quad (14)$$

Переменный ток на выходе усилителя (переменный ток эмиттера) будет равен

$$I_{вых} = I_э = \frac{U_{вых}}{R_э}, \quad (15)$$

где $U_{вых}$ – переменное напряжение на выходе усилителя.

Переменный ток на входе усилителя (переменный ток базы) будет равен

$$I_{вх} = \frac{I_э}{\beta} = \frac{U_{вых}}{\beta \cdot R_э}, \quad (16)$$

где β – коэффициент усиления по переменному току.

Тогда по переменному току входное сопротивление транзистора со стороны базы $R_{бвТ}$ определяется как

$$R_{6VT} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{U_{BX} \cdot \beta \cdot R_{\mathcal{E}}}{U_{ВЫХ}}. \quad (17)$$

Учитывая, что в эмиттерном повторителе $U_{BX} \approx U_{ВЫХ}$, получаем

$$R_{6VT} \approx \beta \cdot R_{\mathcal{E}}. \quad (18)$$

Сопротивления R_6 и R_{6VT} включены параллельно и определяют входное сопротивление каскада R_{BX}

$$R_{BX} = \frac{R_6 \cdot R_{6VT}}{R_6 + R_{6VT}} = \frac{\beta_0 R_{\mathcal{E}} \cdot \beta R_{\mathcal{E}}}{\beta_0 R_{\mathcal{E}} + \beta R_{\mathcal{E}}} = R_{\mathcal{E}} \frac{\beta_0 \cdot \beta}{\beta_0 + \beta}. \quad (19)$$

Входное сопротивление R_{BX} усилителя ОК со смещения фиксированным током базы определяется сопротивлением в эмиттере $R_{\mathcal{E}}$ и коэффициентами усиления по току для постоянной β_0 и переменной β составляющих.

На рисунке 11 представлена схема усилителя ОК со смещением фиксированным напряжением базы.

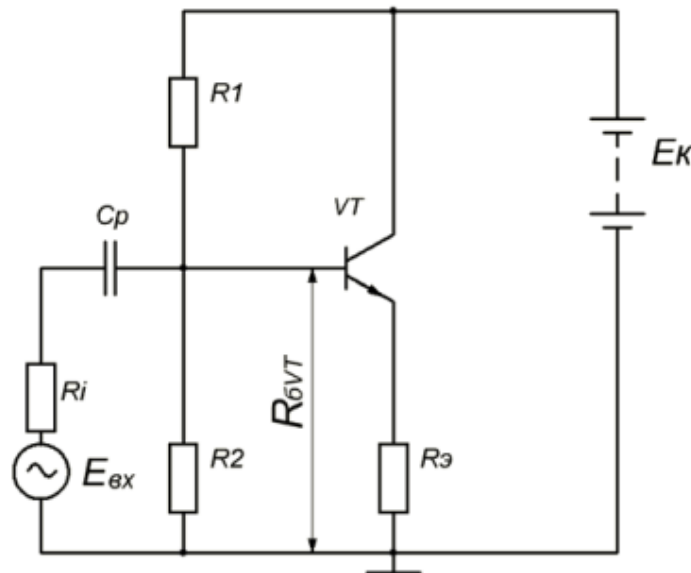


Рис. 11. Схема усилителя ОК со смещением фиксированным напряжением базы

В этой схеме вклад тока базы в общий ток через резистор $R1$ незначителен, поэтому величиной сопротивления в эмиттере $R_{\mathcal{E}}$ и коэффициентами усиления по току для постоянной β_0 и переменной β составляющих можно пренебречь.

При работе на середине линейного участка амплитудной характеристики напряжение смещения на базе равняется около половине источника питания $E_K / 2$. Тогда падение постоянного напряжения на резисторе R_6 также равно $E_K / 2$. Тогда согласно рисунку 8 можем записать

$$\frac{E_K}{2} = I_{06} \cdot R_6. \quad (20)$$

Чтобы не нарушать режим работы по постоянному току в схеме на рисунке 9 напряжение на базе также должно быть $E_K / 2$. Тогда падение постоянного напряжения на резисторе $R1$ также равно $E_K / 2$. Согласно рисунку 9 можем записать

$$\frac{E_K}{2} = (I_{06} + I_d) \cdot R1. \quad (21)$$

Отсюда следует

$$R1 = R_6 \frac{I_{06}}{I_{06} + I_d}, \quad (22)$$

то есть величина сопротивления резистора $R1$ всегда меньше величины сопротивления резистора R_6 приблизительно во столько раз, во сколько ток делителя I_d больше постоянного тока базы I_{06} .

Кроме этого в схеме присутствует еще второй резистор делителя $R2$. По переменной составляющей он включен параллельно резистору $R1$. Эти два резистора существенно снижают входное сопротивление $R_{вх}$ усилителя ОК со смещения фиксированным напряжением базы.

При этом основное преимущество смещения фиксированным напряжением базы - относительная стабильность режима при изменении температуры практически нивелируется, так как каскад ОК охвачен почти 100 % отрицательной обратной связью. Следует иметь в виду, что ток делителя нельзя выбирать слишком большим, поскольку в делителе расходуется дополнительная энергия, и чем больше ток I_d , тем более мощным должен быть источник питания E_K . Поэтому в большинстве практических исполнений таких усилителей предпочтение отдается смещению фиксированным током базы.

Применение делителя напряжения в цепи базы снижает входное сопротивление схемы. В этом случае входное сопротивление определяется параллельным соединением большого входного сопротивления эмиттерного повторителя и сравнительно малого сопротивления, определяемого параллельным соединением резисторов делителя напряжения. Поэтому часто во входную цепь такого каскада включается следящая обратная связь (рис. 5.2). Схема эмиттерного повторителя с применением следящей обратной связи показана на рисунке 12.

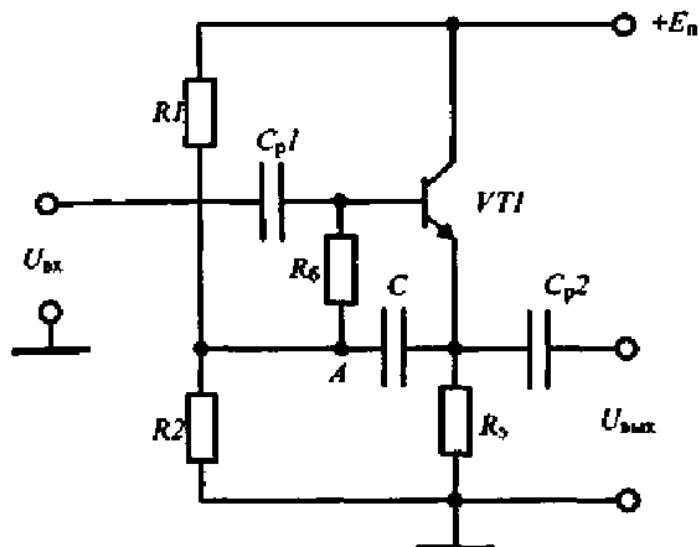


Рис. 12. Схема эмиттерного повторителя со следящей обратной связью

Элементами этой обратной связи являются конденсатор C и резистор R_6 .

При подаче на вход каскада входного переменного напряжения это же напряжение будет действовать на выходе (коэффициент усиления эмиттерного повторителя примерно равен 1 и фаза сигнала не меняется) и при правильном выборе емкости конденсатора C будет передаваться в точку A . Таким образом, на обоих концах резистора будет действовать одно и то же переменное напряжение, следовательно, переменный ток через него будет равен нулю. Это означает, что входное сопротивление каскада будет определяться входным сопротивлением транзистора, т. е. в данном случае оно будет соответствовать $R_{вх} = R_{бВТ} \approx \beta \cdot R_3$.

Задаваясь сопротивлением резистора R_6 , можно определить необходимое напряжение смещения для расчета делителя напряжения для обеспечения смещения

$$U_A = I_{06}R_6 + U_{06Э} + U_{0Э}. \quad (23)$$

Емкость конденсатора C рассчитывается из соотношения

$$X_C \ll \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (24)$$

3. РАЗРАБОТКА СХЕМ ВХОДНЫХ ЦЕПЕЙ ОДНОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

3.1. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОЭ НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

3.1.1. РАЗРАБОТКА ИСХОДНЫХ МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОЭ НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

На рисунке 13 представлен снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОЭ, в котором в качестве источника начального смещения $E_{см}$

используется батарея элементов питания GB1 с напряжением 708 мВ, что соответствует середине линейного участка статической амплитудной характеристики. При этом постоянное напряжение $U_{\text{выхо}}$ на коллекторе, измеренное вольтметром PV1, составляет около половины напряжения источника питания GB3.

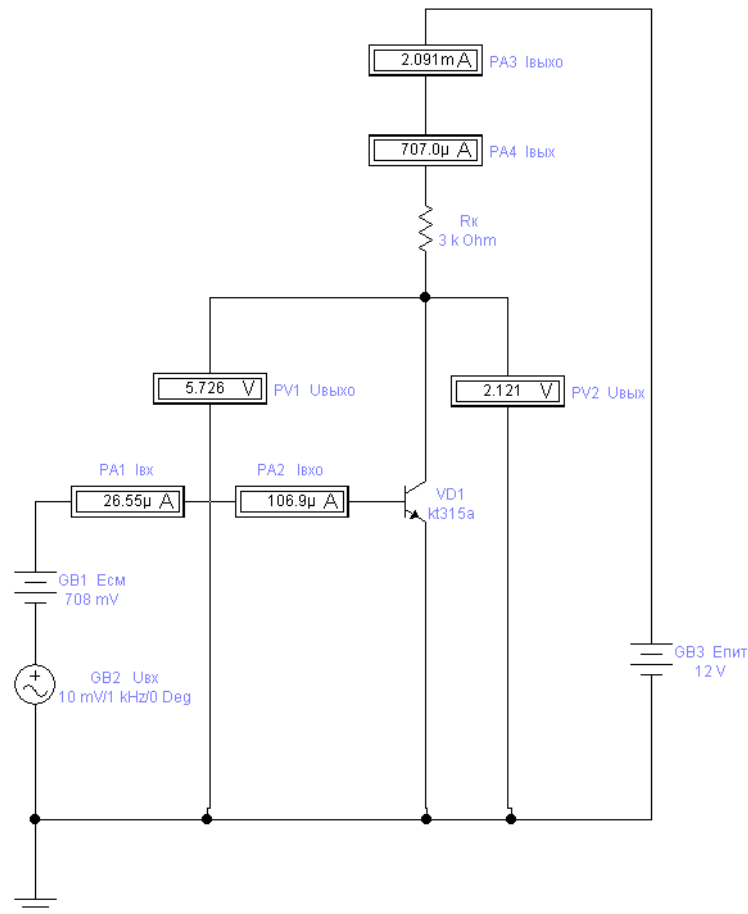


Рис. 13. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОЭ

Линейный участок динамической амплитудной характеристики по выходу обычно находится в пределах от 1 В до $(E_{\text{пит}} - 1)$ 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.

В исходной модели входное сопротивление имеет значение

$$R_{\text{вх.исх}} = \frac{U_{\text{вх.исх}}}{I_{\text{вх.исх}}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{26,55 \cdot 10^{-6}} = 376 \text{ Ом}. \quad (25)$$

3.1.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ С ФИКСИРОВАННЫМ ТОКОМ

В процессе моделирования необходимо представить такую схему, чтобы она обеспечивала минимально возможные отличия по токам и напряжениям от исходной модели, представленной на рисунке 9. Схема смещения с фиксированным током базы приведена на рисунке 14.

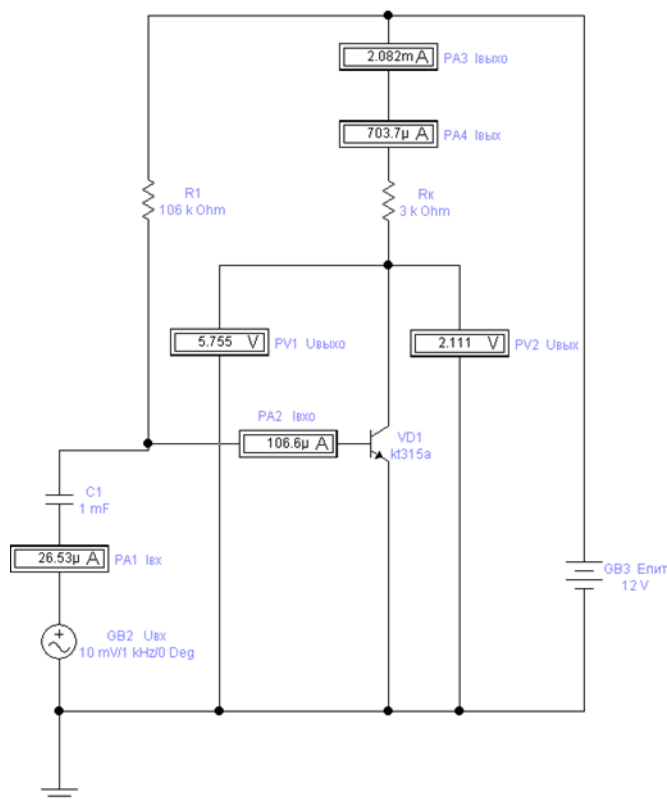


Рис. 14. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОЭ и фиксированным током смещения

Существенного отличия от исходной модели не обнаружено. Действительно, схема смещение фиксированным током базы отличается минимальным числом деталей и малым потреблением тока от источника питания. Кроме того, сравнительно большое сопротивление резистора R1 (106 кОм) практически не влияет на величину входного сопротивления (376 Ом) каскада. Однако этот способ смещения пригоден лишь тогда, когда каскад работает при малых колебаниях температуры транзистора. Кроме того, большой разброс и нестабильность параметра β даже у однотипных транзисторов делают режим работы каскада весьма неустойчивым при смене транзистора, а также с течением времени.

Более эффективной с точки зрения стабильности является схема с фиксированным напряжением смещения,

3.1.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ С ФИКСИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

На рисунке 15 показан снимок с экрана модели резистивного усилителя с фиксированным напряжением смещения по схеме с ОЭ.

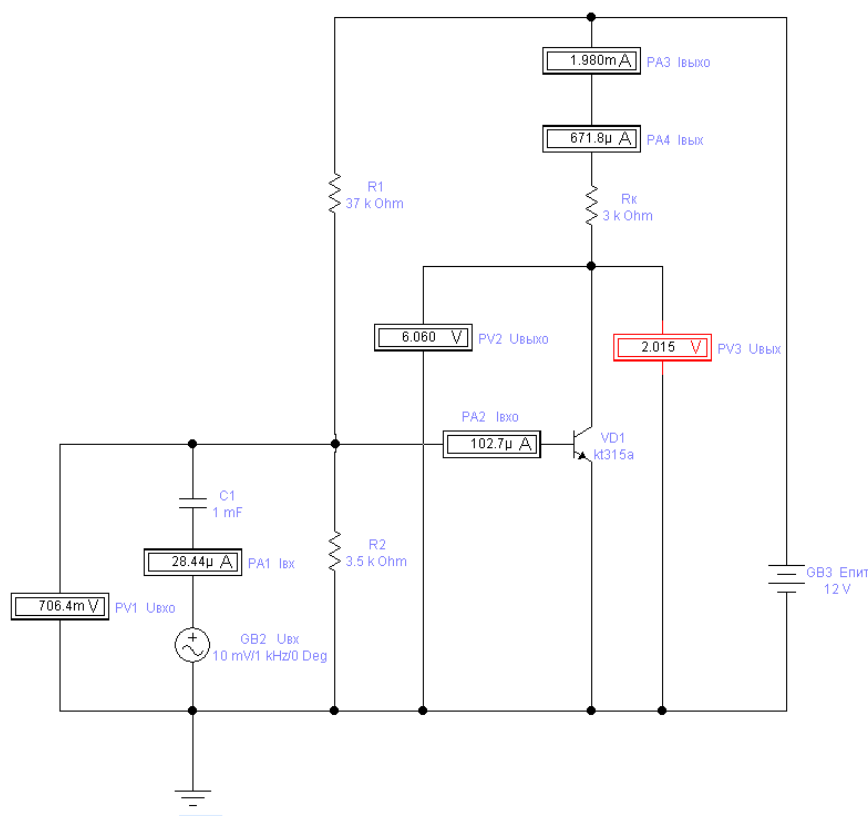


Рис. 15. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОЭ и фиксированным напряжением смещения

Ток через резистор R_2 делителя выбирается из соотношения $I_{R2} \approx (2-5)I_{B_{XO}}$. Примем $I_{R2} = 2I_{B_{XO}}$. Тогда

$$R_2 = \frac{U_{B_{XO}}}{2I_{B_{XO}}} = \frac{0,708}{2 \cdot 107 \cdot 10^{-6}} \approx 3,5 \text{ кОм}, \quad (26)$$

$$R_1 = \frac{E - U_{B_{XO}}}{3I_{B_{XO}}} = \frac{11,3}{3 \cdot 107 \cdot 10^{-6}} \approx 37 \text{ кОм}. \quad (27)$$

В рассматриваемой модели входное сопротивление имеет значение

$$R_{B_{X.ИСХ}} = \frac{U_{B_{X.ИСХ}}}{I_{B_{X.ИСХ}}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{28,44 \cdot 10^{-6}} = 351 \text{ Ом}, \quad (28)$$

что несколько меньше, чем на исходной модели. Однако разница по входным сопротивлениям мала, что позволяет активно применять такой вариант смещения на практике.

3.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОБ НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

3.2.1. РАЗРАБОТКА ИСХОДНЫХ МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОБ НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

На рисунке 16 представлен снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОБ, в котором в качестве источника начального смещения $E_{см}$ используется батарея элементов питания GB3 с напряжением 708 мВ, что соответствует середине линейного участка статической амплитудной характеристики, то есть постоянное напряжение $U_{вых0}$ на коллекторе, измеренное вольтметром PV1, составляет около половины напряжения источника питания GB2.

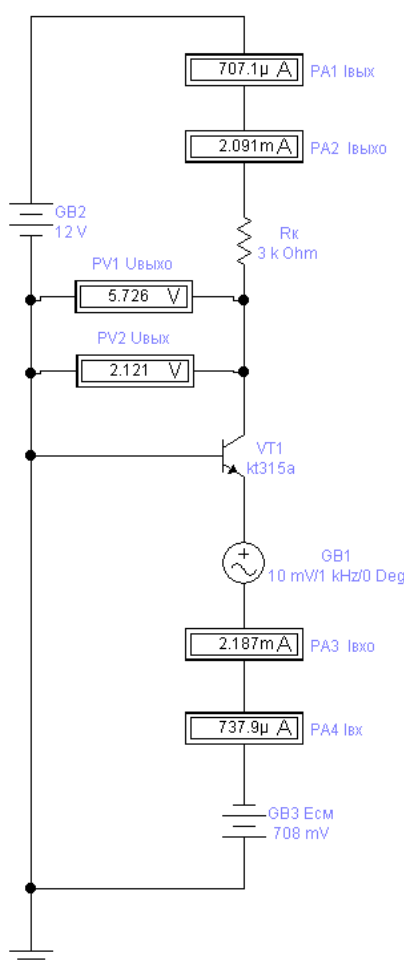


Рис. 16. Снимок с экрана исходной модели резистивного усилителя с ОБ

В исходной модели входное сопротивление имеет значение

$$R_{вх.исх} = \frac{U_{вх.исх}}{I_{вх.исх}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{737,9 \cdot 10^{-6}} = 1,36 \text{ Ом.} \quad (29)$$

3.2.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ С ФИКСИРОВАННЫМ ТОКОМ БАЗЫ ПО СХЕМЕ ОБ

Получить необходимую полярность источника смещения GB3, представленную на рисунке 16, с помощью резистивного делителя напряжения невозможно. Поэтому источник смещения переносят в базовую цепь для того, чтобы изменить его полярность относительно корпуса, как показано на рисунке 17.

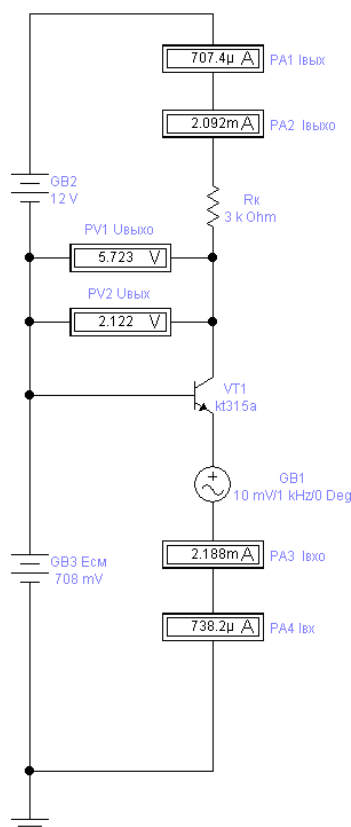


Рис. 17. Снимок с экрана исходной модели резистивного усилителя с переносом источника смещения GB3 в базовую цепь для схемы ОБ по переменной составляющей

В результате такой операции схема входной цепи по постоянной составляющей становится аналогичной для каскада ОЭ, представленной на рисунке 13. Однако по переменной составляющей база соединяется с землей через нулевое сопротивление идеального источника напряжения, поэтому она представляет собой схему ОБ по переменной составляющей.

На рисунке 18 представлена схема модели резистивного усилителя с ОБ и фиксированным током смещения в цепи базы.

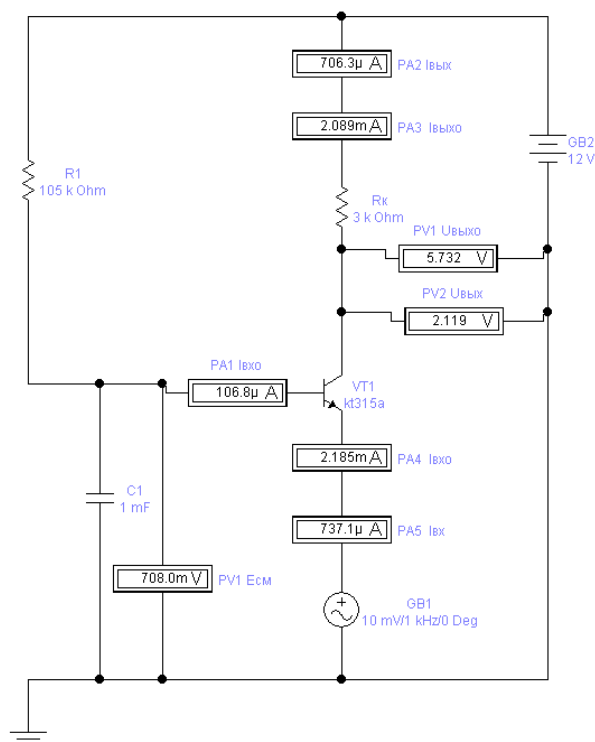


Рис. 18. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОБ и фиксированным током смещения в цепи базы

По переменной составляющей база соединяется с землей через конденсатор $C1$, поэтому она представляет собой схему ОБ.

В представленной модели (рисунок 18) показания всех приборов в пределах статистической погрешности совпадают с показаниями приборов в исходной модели (рисунки 16 и 17). Поэтому и $R_{\text{вх.исх}} \approx R_{\text{вх}}$. Отсюда следует, что исходная модель практически полностью соответствует схеме модели, представленной в данном подпункте.

3.2.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ С ФИКСИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ НА БАЗЕ ПО СХЕМЕ С ОБ

Также как и в предыдущем случае получить необходимую полярность источника смещения, как представлено на рисунке 16, с помощью резистивного делителя напряжения невозможно. Поэтому и в этом случае источник смещения также переносят в базовую цепь, чтобы изменить его полярность. В результате такой операции схема входной цепи по постоянной составляющей становится аналогичной для каскада ОЭ по схеме с фиксированным напряжением, представленной на рисунке 15.

На рисунке 19 представлена схема модели резистивного усилителя с ОБ и фиксированным напряжением смещения в цепи базы.

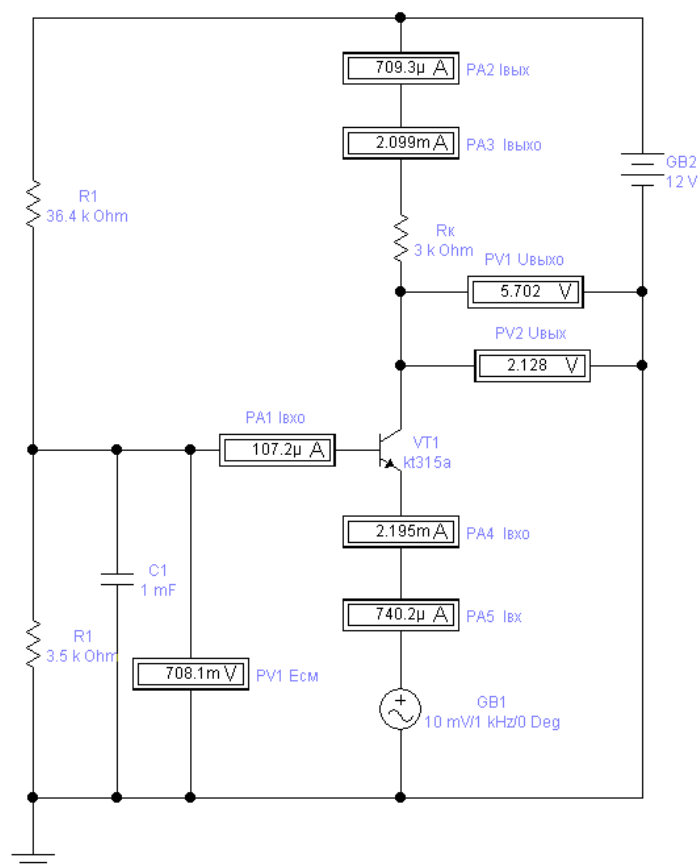


Рис. 19. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОБ и фиксированным напряжением смещения в цепи базы

По переменной составляющей база соединяется с землей через конденсатор $C1$, поэтому она представляет собой схему ОБ.

В представленной модели (рисунок 19) показания всех приборов в пределах статистической погрешности совпадают с показаниями приборов в исходной модели (рисунки 16 и 17). Поэтому $R_{\text{вх.исх}} \approx R_{\text{вх}}$. Отсюда следует, что исходная модель практически полностью соответствует схеме модели, представленной в данном подпункте.

3.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОК НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

3.3.1. РАЗРАБОТКА ИСХОДНЫХ МОДЕЛЕЙ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОК НА БИПОЛЯРНОМ N-P-N ТРАНЗИСТОРЕ

На рисунке 20 представлен снимок с экрана исходной модели резистивного усилителя с ОК, в котором в качестве источника начального смещения $E_{\text{см}}$ используется батарея элементов питания GB1 с напряжением 6 В, что соответствует середине линейного участка статической амплитудной характеристики, то есть постоянное напряжение $U_{\text{вых0}}$ на резисторе R_3 в цепи

эмиттера и измеренное вольтметром PV2 составляет около половины напряжения источника питания GB3.

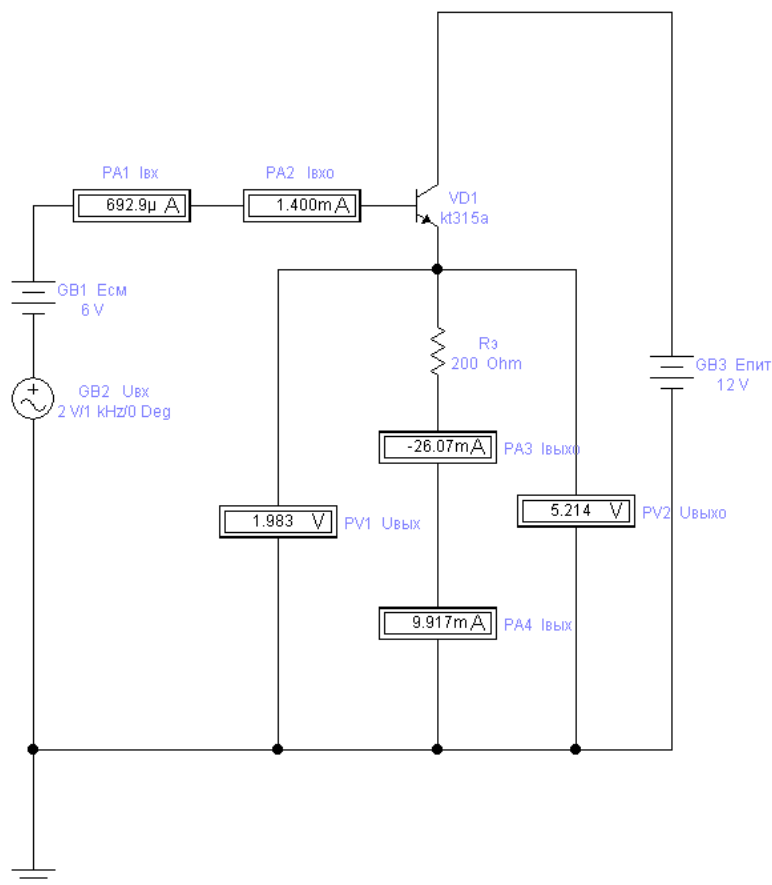


Рис. 20. Снимок с экрана исходной модели резистивного усилителя с ОК

Линейный участок динамической амплитудной характеристики по выходу обычно находится в пределах от 1 В до $(E_{\text{пит}} - 1)$ 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 $U_{\text{вых}} = 1,983$ В.

Тогда сопротивление участка база-эмиттер $R_{б-э}$ транзистора будет равно

$$R_{б-э} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{2 - 1,983}{692,9 \cdot 10^{-6}} = 25 \text{ Ом}, \quad (30)$$

что согласуется с соответствующими теоретическими положениями.

Напряжение смещения обычно получают на основе резистивных делителей напряжения источника питания. Существуют три схемы таких делителей напряжения для каскадов с ОК: фиксированным током, фиксированным напряжением и следящей связью.

3.3.2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ С ФИКСИРОВАННЫМ ТОКОМ

В процессе моделирования необходимо представить такую схему, чтобы она обеспечивала минимально возможные отличия по токам и напряжениям от исходной модели, представленной на рисунке 20. Схема смещения с фиксированным током базы приведена на рисунке 21.

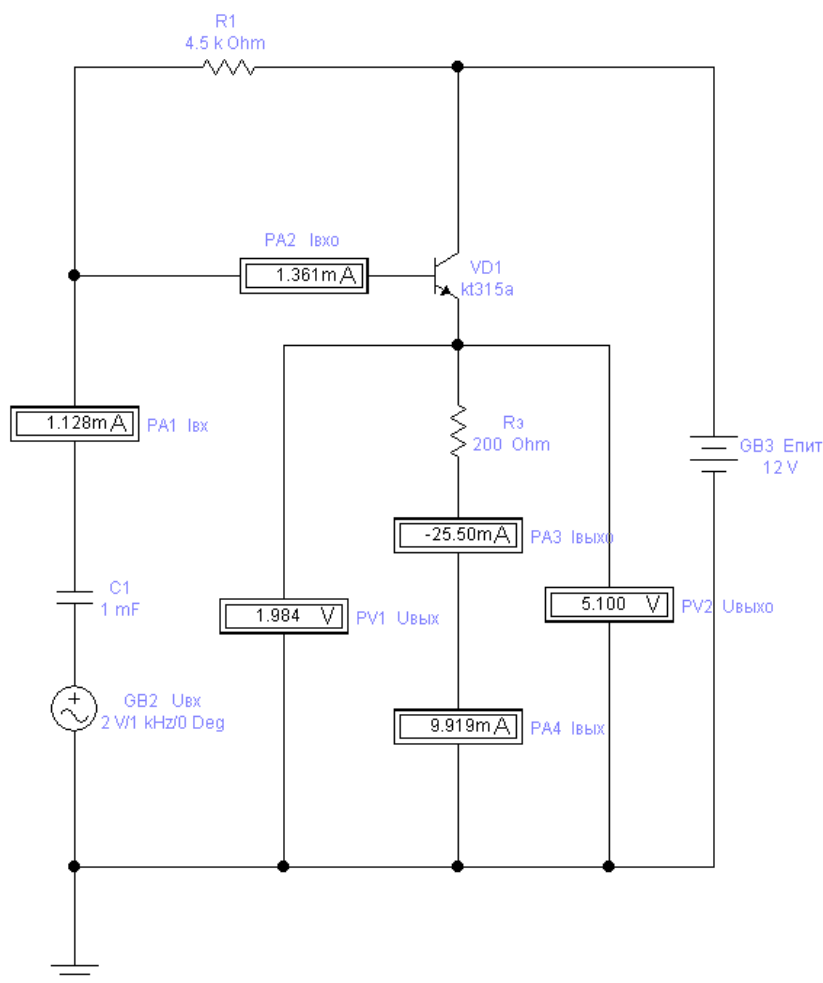


Рис. 21. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОК и фиксированным током смещения

Смещение в этой схеме обеспечивается от источника GB3 через делитель на резисторе R1 и участке цепи между базой и корпусом. Необходимая величина резистора R1 определяется выражением

$$R1 = \frac{E_{\text{пит}} - E_{\text{см}}}{I_{\text{вхо}}} = \frac{12 - 6}{1,4 \cdot 10^{-3}} = 4,3 \text{ кОм}, \quad (31)$$

где $E_{\text{см}}$ - напряжение смещения на исходной модели (рисунок 5);

$I_{\text{вхо}}$ - постоянный входной ток на исходной модели.

Показания всех приборов на этой модели практически совпадают с показаниями для исходной модели, кроме показания приборов РА1: 693 мкА и 1128 мкА, отличие на $\Delta I_{\text{вх}} = 435 \text{ мкА}$. Это связано с протеканием тока источника сигнала GB2 с напряжением $U_{\text{вх}} = 2 \text{ В}$ через резистор R1, который отсутствовал в исходной схеме

$$\Delta I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R1} = \frac{2}{435 \cdot 10^{-6}} = 4,5 \text{ кОм}, \quad (32)$$

что и требовалось доказать.

Увеличение входного тока приводит к уменьшению входного сопротивления каскада, что является отрицательным моментом. В исходной модели входное сопротивление имело значение

$$R_{\text{вх.исх}} = \frac{U_{\text{вх.исх}}}{I_{\text{вх.исх}}} = \frac{2}{693 \cdot 10^{-6}} = 2,9 \text{ кОм}, \quad (33)$$

а в текущей модели величина этого сопротивления снизилось и стало равным

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{2}{1128 \cdot 10^{-6}} = 1,8 \text{ кОм}. \quad (34)$$

Схема смещение фиксированным током базы отличается минимальным числом деталей и малым потреблением тока от источника питания. При этом стабильность режима работы схемы высокая, так как каскад ОК охвачен почти 100% отрицательной обратной связью.

3.3.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ ПО СХЕМЕ ОК НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ С ФИКСИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Ток делителя не следует выбирать слишком большим из соображений экономичности, так как чем больше ток $I_{\text{д}}$, тем более мощным должен быть источник питания GB3.

Ток делителя выбирается из соотношения $I_{\text{д}} \approx (2-5)I_{\text{вхо}}$. Примем $I_{\text{д}} = 2I_{\text{вхо}} = 2 \cdot 1,4 = 2,8 \text{ мА}$. Тогда сумма сопротивлений резисторов делителя $R1 + R2$ будет равна

$$R1 + R2 = \frac{E_{\text{пит}}}{I_{\text{д}}} = \frac{12}{2,8 \cdot 10^{-3}} = 4,3 \text{ кОм}. \quad (35)$$

Воспользовавшись возможностью программы и подберем величины этих резисторов из условия сохранения показаний всех приборов относительно модели на рисунке 20, кроме показания амперметра РА1 для измерения входного тока схемы $I_{\text{вх}}$. Результаты моделирования представлены на рисунке 22.

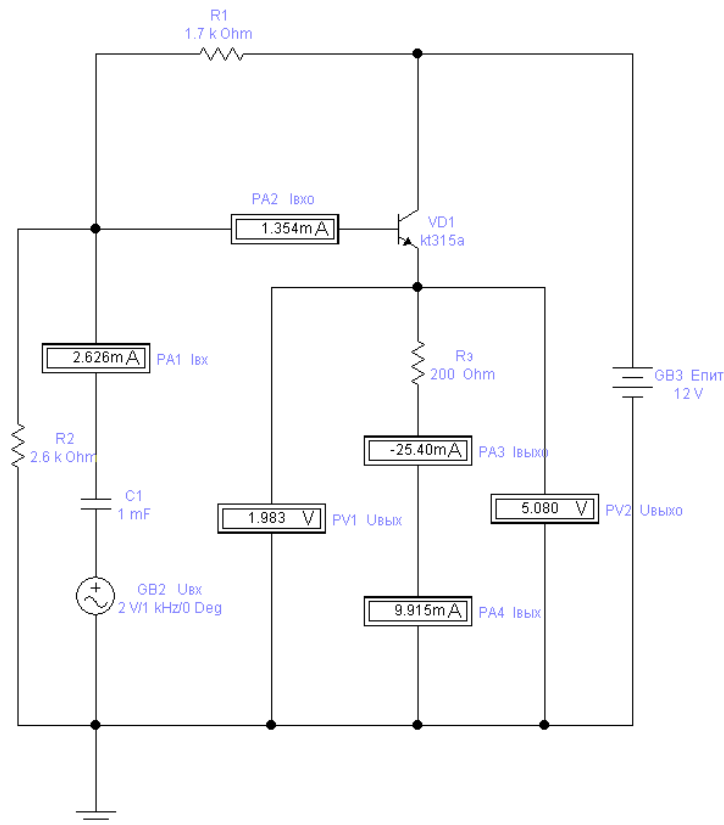


Рис. 22. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОК и фиксированным напряжением смещения

Из схемы, приведенной на рисунке 22, видно, что сопротивление R_2 делителя включено параллельно входному сопротивлению транзистора. Кроме того, пренебрегая малым внутренним сопротивлением источника питания, можно считать, что R_1 и R_2 включены параллельно друг другу. Поэтому необходимо, чтобы

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \gg R_{\text{вх}}, \quad (36)$$

т. е. делитель, образованный резисторами R_1 и R_2 должен обладать достаточно большим сопротивлением (порядка нескольких килоом). В противном случае входное сопротивление каскада окажется недопустимо малым.

Проверим последнее условие, учитывая, что $R_{\text{вхисх}} = 2,9 \text{ кОм}$

$$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,6 \cdot 1,7}{2,6 + 1,7} = \frac{4,42}{4,3} \approx 1 \text{ кОм}. \quad (37)$$

Это условие не выполняется, поэтому такую схему с фиксированным напряжением смещения нежелательно использовать.

При этом входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ такой схемы, как следует из показания приборов на рисунке 22, будет равно

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{2}{2,626 \cdot 10^{-3}} \approx 760 \text{ Ом}, \quad (38)$$

что еще меньше, чем аналогичный параметр (1,8 кОм) в схеме с фиксированным током смещения.

Основное преимущество смещения фиксированным напряжением базы - относительная стабильность режима при изменении температуры практически нивелируется, так как каскад ОК охвачен почти 100 % отрицательной обратной связью. Следует иметь в виду, что ток делителя нельзя выбирать слишком большим, поскольку в делителе расходуется дополнительная энергия, и чем больше ток I_d , тем более мощным должен быть источник питания E_k . Поэтому в большинстве практических исполнений таких усилителей предпочтение отдается смещению фиксированным током базы.

3.3.4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВХОДНОЙ ЦЕПИ ОДНОКАСКАДНОГО РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПО СХЕМЕ ОК НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ СО СЛЕДЯЩЕЙ СВЯЗЬЮ

Применение делителя напряжения в цепи базы снижает входное сопротивление схемы. В этом случае входное сопротивление определяется параллельным соединением большого входного сопротивления эмиттерного повторителя и сравнительно малого сопротивления, определяемого параллельным соединением резисторов делителя напряжения. Поэтому часто во входную цепь такого каскада включается следящая обратная связь (рисунок 23).

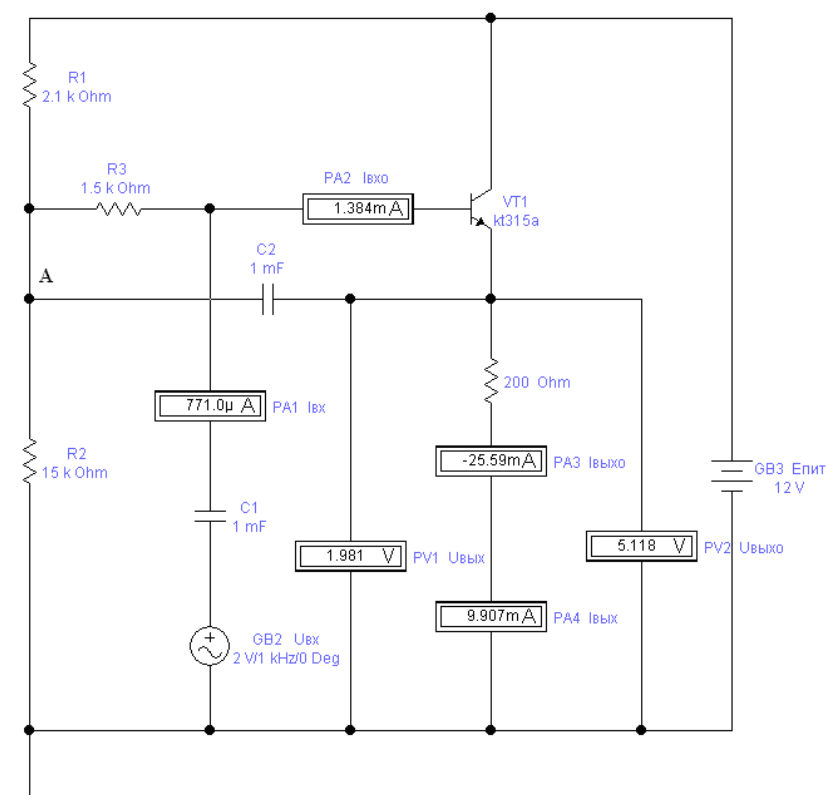


Рис. 23. Снимок с экрана модели резистивного усилителя с ОК и следящей связью

Элементами этой обратной связи являются конденсатор С2 и резистор R3.

При подаче на вход каскада входного переменного напряжения 2 В от источника GB2 почти такое же напряжение будет действовать на выходе $U_{\text{вых}} = 1,981 \text{ В}$ (коэффициент усиления эмиттерного повторителя примерно равен единице и фаза сигнала не меняется) и при правильном выборе емкости конденсатора С2 будет передаваться в точку А. Таким образом, на обоих концах резистора R3 будет действовать одно и то же переменное напряжение, следовательно, переменный ток через него будет близок к нулю. Это означает, что входное сопротивление каскада будет определяться входным сопротивлением транзистора, т. е. в данном случае оно будет соответствовать входному сопротивлению исходной модели, представленной на рисунке 5.

Входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ такой схемы, как следует из показания приборов на рисунке 23, будет равно

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{2}{771 \cdot 10^{-6}} \approx 2,6 \text{ кОм}, \quad (39)$$

что близко к значению этого параметра ($R_{\text{вхисх}} = 2,9 \text{ кОм}$) для исходной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные методические указания направлены на изучение работы входных и выходных цепей 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. Моделирование входных цепей однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах	3
1.1. Цель лабораторной работы	3
1.2. Содержание работы	3
2. Краткие теоретические сведения	3
2.1. Цепи смещения в каскадах биполярных транзисторов по схемам ОЭ и ОБ	3
2.2. Исследование влияния цепей смещения на входные сопротивления в каскадах на биполярных транзисторах по схемам ОЭ и ОБ.....	5
2.3. Цепи смещения в каскадах биполярных транзисторов по схемам ОК.....	8
2.4. Исследование влияния цепей смещения на входные сопротивления в каскадах на биполярных транзисторах по схеме ОК.....	11
3. Разработка схем входных цепей однокаскадных усилителей на биполярном транзисторе	14
3.1. Разработка моделей однокаскадного резистивного усилителя по схеме ОЭ на биполярном n-p-n транзисторе	14
3.1.1. Разработка исходных моделей однокаскадного резистивного усилителя по схеме ОЭ на биполярном n-p-n транзисторе.....	14
3.1.2. Разработка модели входной цепи однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей с фиксированным током	16
3.1.3. Разработка модели входной цепи однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей с фиксированным напряжением	17
3.2. Разработка моделей однокаскадного резистивного усилителя по схеме ОБ на биполярном n-p-n транзисторе.....	18
3.2.1. Разработка исходных моделей однокаскадного резистивного усилителя по схеме ОБ на биполярном n-p-n транзисторе.....	18
3.2.2. Разработка модели входной цепи однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей с фиксированным током базы по схеме ОБ.....	19
3.2.3. Разработка модели входной цепи однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей с фиксированным напряжением на базе по схеме с ОБ	20
3.3. Разработка моделей однокаскадного резистивного усилителя по схеме ОК на биполярном n-p-n транзисторе	21

3.3.1. Разработка исходных моделей однокаскадного резистивного усилителя по схеме ОК на биполярном n-p-n транзисторе.....	21
3.3.2. Разработка модели входной цепи однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей с фиксированным током	23
3.3.3. Разработка модели входной цепи однокаскадного резистивного усилителя на биполярных транзисторах по схеме ОК на основе резистивных делителей с фиксированным напряжением.....	24
3.3.4. Разработка модели входной цепи однокаскадного резистивного усилителя по схеме ОК на биполярных транзисторах на основе резистивных делителей со следящей связью	26
Заключение.....	27
Библиографический список.....	28

Схемотехника аналоговых электронных устройств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторной работы № 2
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. 1,6.

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