

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Дифференциальный усилитель

Учебно-методическое пособие

Томск 2012

**Рассмотрено и утверждено методической комиссией
радиофизического факультета**

Протокол № _____ от _____ декабря _____ 2012 г.

Председатель комиссии _____ В.В. Демин

Учебно-методическое пособие содержит описание лабораторной работы "Дифференциальный усилитель" по курсу "Схемотехника аналоговых электронных устройств".

Пособие разработано для студентов третьего курса радиофизического факультета Томского государственного университета, обучающихся по специальности 210302.65 – РАДИОТЕХНИКА.

Составители:

доцент кафедры радиоэлектроники, к.ф.м.-н.

доцент кафедры радиоэлектроники, к.ф.м.-н.

А. А. Жуков,

Г. М. Дейкова

Дифференциальный усилитель

1. Цель работы

Исследование характеристик дифференциального каскада.

2. Задачи

- Изучение теоретических основ работы дифференциального каскада.
- Исследование дифференциального каскада на постоянном токе в программе *Micro-Cap*. Определение токов транзисторов и делителя, напряжения в узлах схемы и режимов работы транзисторов.
- Исследование дифференциального каскада на переменном токе в программе *Micro-Cap*. Проведение временного, частотного и многовариантного анализов работы схемы для случая внешнего гармонического воздействия.

3. Теоретический материал

3.1. Дифференциальный усилитель

В аналоговой схемотехнике широкое распространение получили схемы с эмиттерно-связанными транзисторами. На таких транзисторах реализуются усилители, схемы перемножения сигналов, схемы регулировки усиления.

Дифференциальный усилитель (ДУ) имеет два входа и усиливает разность входных напряжений. Схема простейшего ДУ на биполярных транзисторах без цепей смещения приведена на рис. 1.

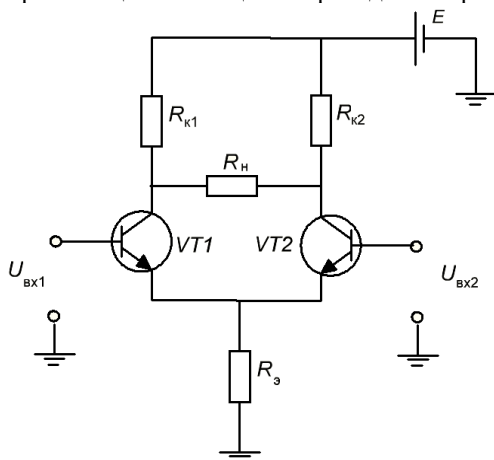


Рис. 1. Схема простейшего дифференциального усилителя

ДУ состоит из двух усилителей на транзисторах $VT1$ и $VT2$ с коллекторными нагрузками R_{k1} и R_{k2} . Эмиттеры транзисторов подключены к общему резистору R_3 , то есть это эмиттерно-связанные транзисторы. Выходной сигнал снимается между коллекторами:

$$U_{\text{вых}} = U_{k1} - U_{k2} = (E - I_{k1}R_{k1}) - (E - I_{k2}R_{k2}) = -I_{k1}R_{k1} + I_{k2}R_{k2} \quad (1)$$

В ДУ используются полностью идентичные по характеристикам транзисторы (согласованные пары) и одинаковые резисторы R_k .

В отсутствие сигнала ($u_{\text{вх}}(t)=0$) для идеально подобранной пары транзисторов постоянные напряжения на входах транзисторов равны $U_{\text{бэ}10} = U_{\text{бэ}20}$, значит, равны коллекторные токи $I_{k10} = I_{k20}$.

При этом из (1) следует, что выходное напряжение схемы $U_{\text{вых}0} = 0$.

Если на оба входа ДУ подать одинаковые сигналы $u_{\text{вх}}(t)$ (синфазный входной сигнал), то напряжения на входах транзисторов будут изменяться на одинаковую величину, так как потенциалы эмиттеров транзисторов одинаковы. То есть, $u_{\text{бэ}1}(t) = u_{\text{бэ}2}(t)$ и переменные составляющие коллекторных токов транзисторов тоже равны $i_{k1}(t) = i_{k2}(t)$. При этом из (1) выходное переменное напряжение $u_{\text{вых}}(t) \approx 0$.

Таким образом, ДУ практически не усиливает синфазный сигнал. Это свойство ДУ обеспечивает помехозащищенность схемы, так как помехи – синфазный сигнал. Это же свойство ослабляет и температурный дрейф токов в обеих ветвях схемы, так как он действует аналогично синфазному сигналу.

Если входной сигнал $u_{\text{вх}}(t)$ подать между базами транзисторов (дифференциальный сигнал), то $U_{\text{бэ}}$ одного из них (например $VT1$) увеличится на $u_{\text{вх}}(t)/2$ а $U_{\text{бэ}2}$ – уменьшится на $u_{\text{вх}}(t)/2$.

Найдем коэффициент усиления ДУ, не используя приближение малого сигнала. Коллекторные токи БТ описываются уравнением транзистора для большого сигнала [1-3], а без учета эффекта Эрли уравнением передаточной характеристики транзистора

$$I_{k1} = I_s \exp \left(\frac{U_{\text{бэ}0} + \frac{u_{\text{вх}}}{2}}{U_T} \right) = I_{k0} \exp \left(\frac{u_{\text{вх}}}{2U_T} \right) = I_{k0} \exp(x) \quad (2)$$

$$I_{k2} = I_s \exp \left(\frac{U_{\text{бэ}0} - \frac{u_{\text{вх}}}{2}}{U_T} \right) = I_{k0} \exp \left(-\frac{u_{\text{вх}}}{2U_T} \right) = I_{k0} \exp(-x).$$

В формулах (2) $I_{k0} = I_S \exp\left(\frac{U_{бэ0}}{U_T}\right)$ – постоянная составляющая токов коллектора, а $\frac{u_{вх}}{2U_T} = x$.

Найдем из (2) ток через общий резистор R_k :

$$I_0 = I_{k1} + I_{k2} = I_0(e^x + e^{-x}) \quad (3)$$

Из (3) выразим I_{k0} и подставим в (2). Тогда коллекторные токи запишутся в виде:

$$I_{k1} = I_0 \frac{e^x}{e^x + e^{-x}}, \quad I_{k2} = I_0 \frac{e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Из последнего выражения найдем разность коллекторных токов и подставим ее в (1). Получим:

$$I_{k1} - I_{k2} = I_0 \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = I_0 th(x) = I_0 th\left(\frac{u_{вх}}{2U_T}\right)$$

$$u_{вых}(t) = -I_0 th\left(\frac{u_{вх}}{2U_T}\right) R_k \quad (4)$$

Из (4) видно, что связь между выходным и входным сигналами нелинейная, так как описывается функцией гиперболического тангенса. Нелинейная передаточная характеристика по переменному току характерна для нелинейного усилителя. Так и должно быть в схемах усилителей для большого сигнала, а для ДУ она описывается выражением (4). Для малых входных сигналов, когда $u_{вх}(t) < 2U_T$ аргумент тангенса – мал, можно заменить функцию гиперболического тангенса на аргумент, то есть $th\left(\frac{u_{вх}}{2U_T}\right) \cong \frac{u_{вх}}{2U_T}$.

Для малых сигналов из (4) получается линейная передаточная характеристика схемы, характерная для линейного усилителя:

$$u_{вых}(t) = -I_0 \frac{R_k}{2U_T} u_{вх}(t) = K_u u_{вх}(t) \quad (5)$$

с коэффициентом усиления по напряжению

$$K_u = -I_0 \frac{R_k}{2U_T} \quad (6)$$

Запишем коэффициент усиления в другом виде. Из (3) в отсутствие сигнала постоянный ток через общий резистор равен $I_0 = 2I_{k0}$.

Величина I_{k0} определяется постоянным напряжением на входе транзисторов $U_{\text{бз}0}$ согласно выражению (2). Крутизна S передаточной характеристики транзисторов в исходной рабочей точке равна:

$$S(U_{\text{бз}0}) = \frac{dI_k}{dU_{\text{бз}}} = \frac{I_{k0}}{U_T} \quad (7)$$

Значит, коэффициент усиления схемы (6) с учетом (7) запишется:

$$K_u = -I_0 \frac{R_k}{2U_T} = -2I_{k0} \frac{R_k}{2U_T} = -S(U_{\text{бз}0})R_k \quad (8)$$

Таким образом, коэффициент усиления ДУ равен коэффициенту усиления одного каскада усилителя с общим эмиттером без внешней нагрузки.

Недостатком схемы простого ДУ является низкое ослабление синфазного сигнала $K_{\text{осс}}$, равное отношению коэффициентов усиления дифференциального и синфазного сигналов. Для уменьшения коэффициента усиления синфазного сигнала нужно увеличивать R_3 – отрицательную обратную связь. Но это приводит к уменьшению коллекторных токов транзисторов, т.е. к уменьшению коэффициента усиления дифференциального сигнала за счет уменьшения крутизны транзисторов. Для исключения этого эффекта в эмиттерную цепь транзисторов вместо R_3 включается источник стабильного тока (ИСТ). ИСТ создает нужное значение тока I_0 при небольшом напряжении источника питания, но имеет высокое выходное дифференциальное сопротивление. При этом коэффициент усиления синфазного сигнала уменьшается, а $K_{\text{осс}}$ увеличивается [1, 3].

Принцип работы ИСТ основан на свойствах БТ в активном режиме. В этом режиме вольт-амперные характеристики БТ – почти горизонтальные прямые, то есть I_k практически не зависит от $U_{\text{кз}}$ [1]. Значит, можно использовать одиночный транзистор в качестве источника постоянного тока, если обеспечить ему активный режим, а вывод коллектора использовать как выходной, подключив к нему внешнюю нагрузку R_n . Установить активный режим БТ можно двумя способами: фиксацией потенциала базы или фиксацией тока базы [1]. Кроме того, для стабилизации I_{k0} нужно ввести отрицательную обратную связь, поставив в эмиттерную цепь БТ резистор R_3 . В результате схема ИСТ будет похожа на усилитель с общим коллектором. Выходным током ИСТ будет коллекторный ток, то есть $I_n = I_{k0}$ в заданной рабочей точке БТ, а выходное сопротивление схемы велико.

4. Исследование дифференциального каскада в программе Micro-Cap

Проведем исследование дифференциального каскада с помощью программы схемотехнического моделирования Micro-Cap. Подробная информация о программе и режимах ее работы приведена в [4]. Исследуемая схема приведена на рис. 2. Настройка генераторов показана на рис. 3а и 3б.

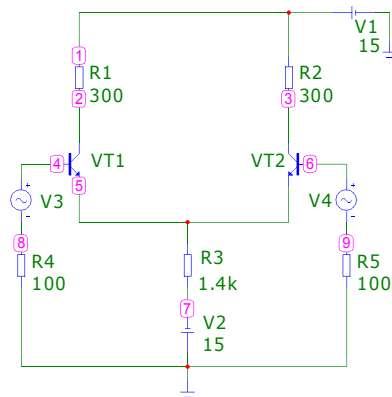


Рис. 2. Исследуемая схема

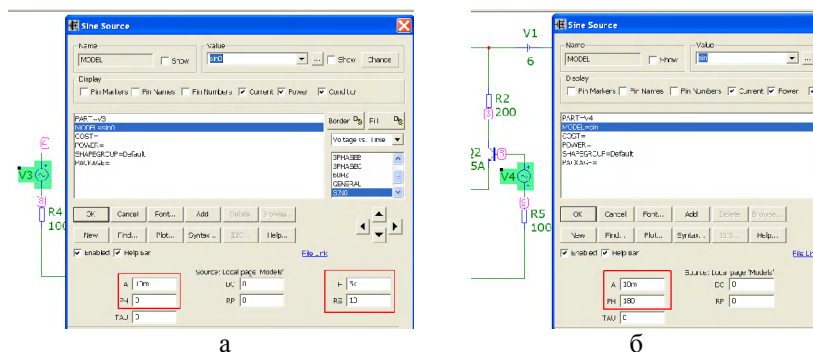


Рис. 3. Настройка генераторов

4.1 Анализ дифференциального каскада на постоянном токе

Проведем анализ работы схемы на постоянном токе, выбрав динамический режим анализа на постоянном токе (Dynamic DC) для

случая синфазных сигналов генераторов $V3$ и $V4$. Результаты анализа приведены на рис. 4а (указаны потенциалы узлов) и 4б (указаны токи в ветвях цепи).

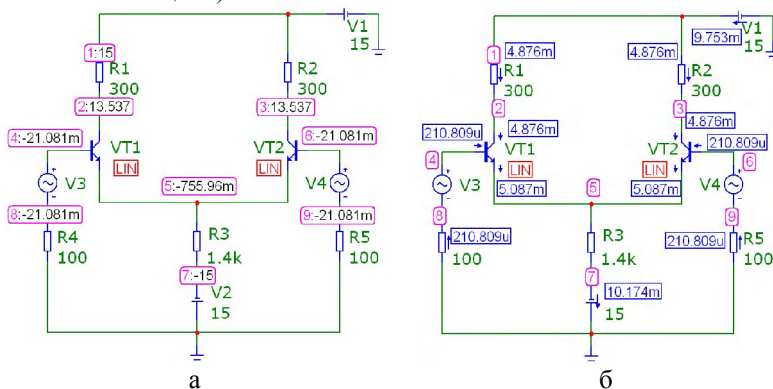


Рис. 4. Результаты анализа исследуемой схемы на постоянном токе

Как видно из рис. 4а разница потенциалов коллекторов транзисторов $VT1$ и $VT2$ равна нулю, а $I_{R3} = I_{R1} + I_{R2} + I_{6VT1} + I_{6VT2}$ и $I_{R1} = I_{R2}$ (рис 4б).

4.2 Анализ переходных процессов в дифференциальном каскаде

Проведем анализ переходных процессов в схеме (Analysis>Transient), предварительно задав параметры анализа (рис. 5).

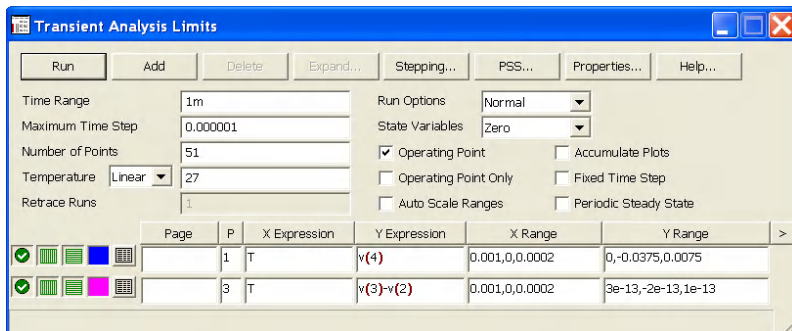


Рис. 5. Ввод параметров анализа переходных процессов в исследуемой схеме

Результаты анализа приведены на рис. 6.

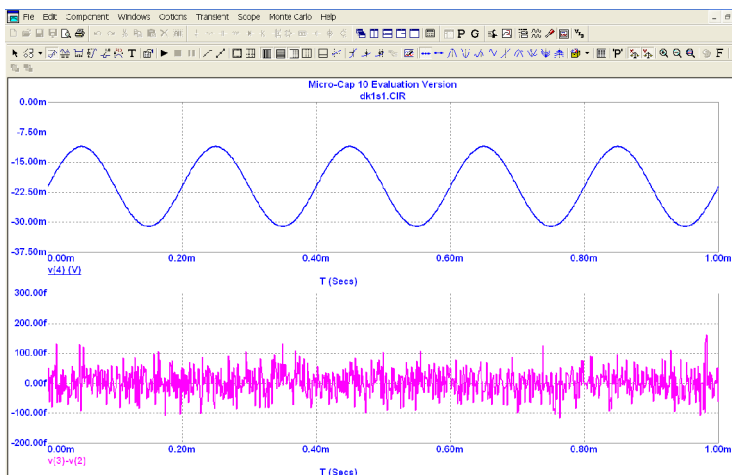


Рис. 6. Результаты анализа переходных процессов в исследуемой схеме для синфазных сигналов генераторов

Если разность фаз сигналов генераторов $V3$ и $V4$ равна 180° , то при анализе схемы на постоянном токе $I_{R1} \neq I_{R2}$, а при анализе переходных процессов получим, что разница потенциалов коллекторов транзисторов $VT1$ и $VT2$ не равна нулю (рис. 7).

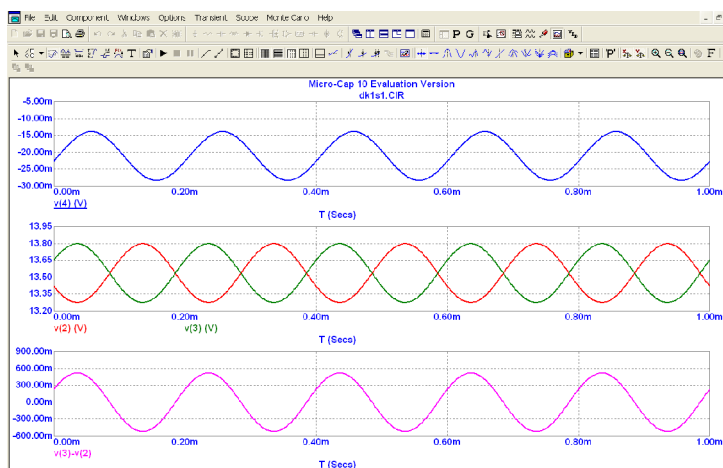


Рис. 7. Результаты анализа переходных процессов в исследуемой схеме для противофазных сигналов генераторов

4.3 Частотный анализ дифференциального каскада

Проведем частотный анализ схеме (Analysis>AC) для случая синфазных сигналов генераторов $V3$ и $V4$, предварительно задав параметры анализа (рис. 8).

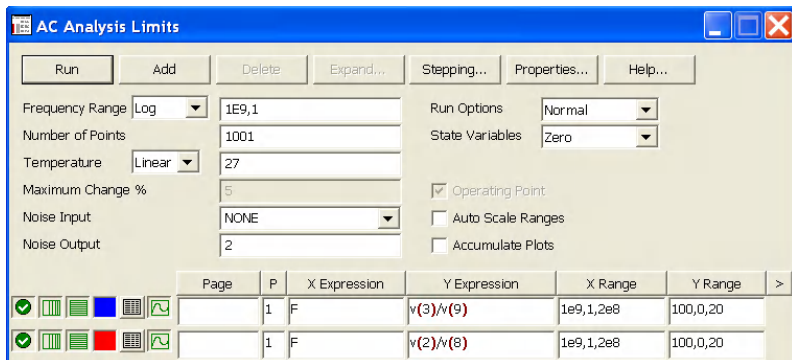


Рис. 8. Ввод параметров частотного анализа исследуемой схемы

Результаты анализа приведены на рис. 9.

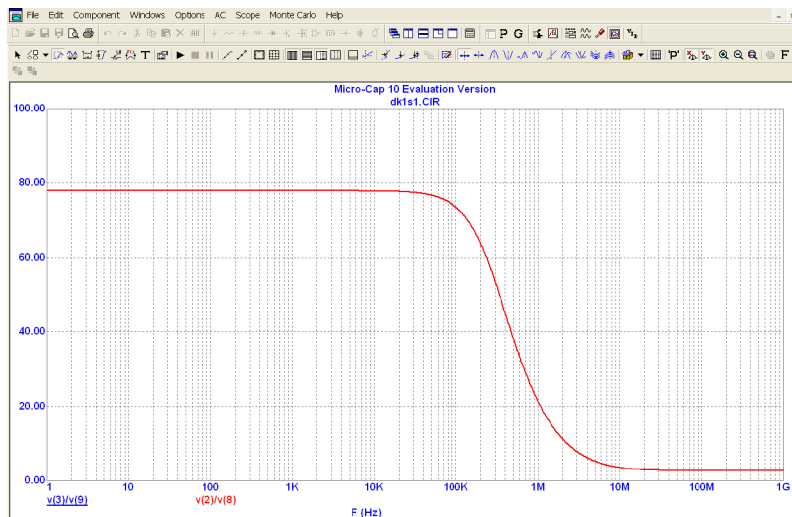


Рис. 9. Результаты частотного анализа исследуемой схемы для синфазных сигналов генераторов

Если разность фаз сигналов генераторов $V3$ и $V4$ равна 180° , то коэффициенты усиления $V(2)/V(8)$ и $V(3)/V(9)$ не совпадают (рис. 10).

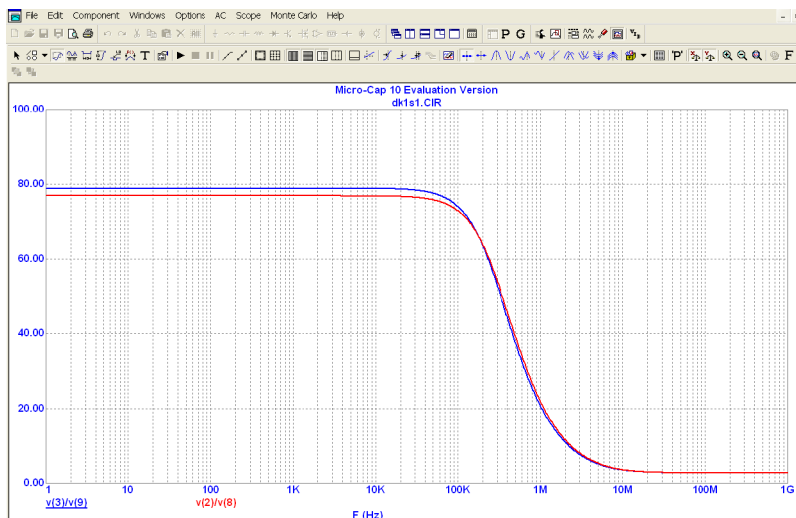


Рис. 10. Результаты частотного анализа исследуемой схемы для противофазных сигналов генераторов

4.4 Многовариантный анализ дифференциального каскада

Исследуем влияние на АЧХ схемы неидентичности значений $\beta(BF)$ транзисторов. Для этого, используя многовариантный анализ, изменим параметр BF транзистора $VT1$. Вызвать окно параметров многовариантного анализа можно из меню *AC* окна анализа, выбрав пункт меню *Stepping...* (рис. 11).

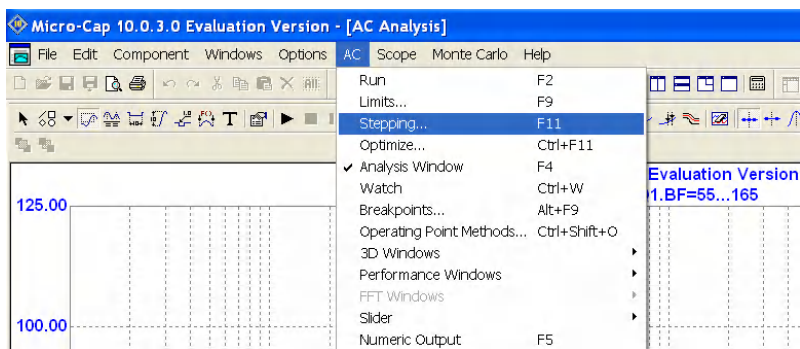


Рис. 11. Вызов окна параметров многовариантного анализа

Установка параметров многовариантного анализа приведена на рис. 12.

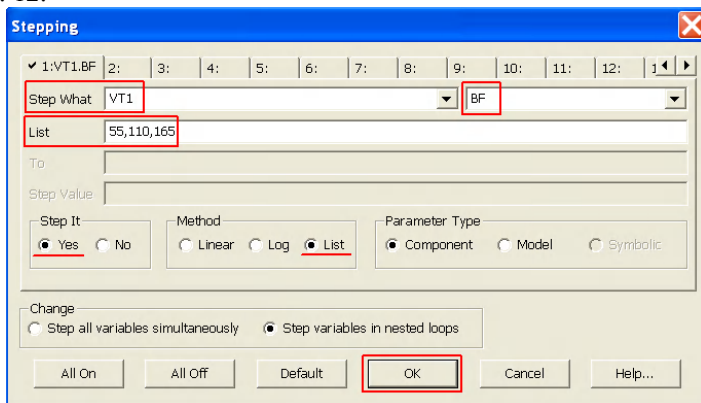


Рис. 12. Вариация параметра BF транзистора Q1

Выбрав расчет АЧХ при значениях параметра BF равных 55, 110 и 165, нажимаем кнопку OK и строим графики коэффициента передачи схемы (рис. 13).

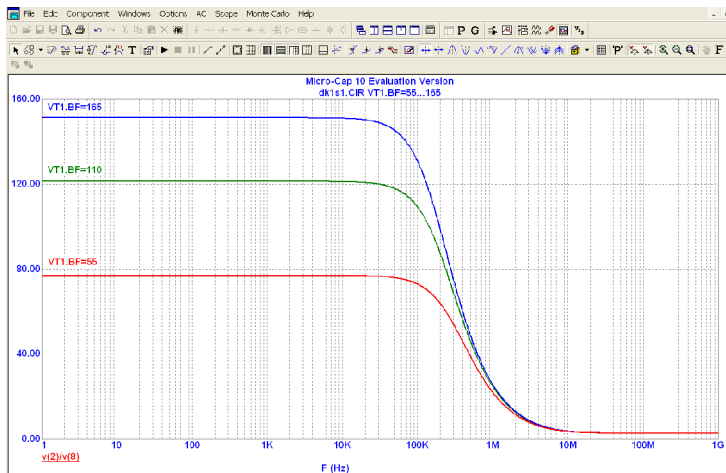


Рис. 13. Результаты частотного анализа исследуемой схемы при вариациях параметра BF транзистора VT1

Исследование влияния других параметров транзистора на работу схему поводится аналогичным образом.

Исследуем дифференциальный усилитель с источником тока (рис. 14).

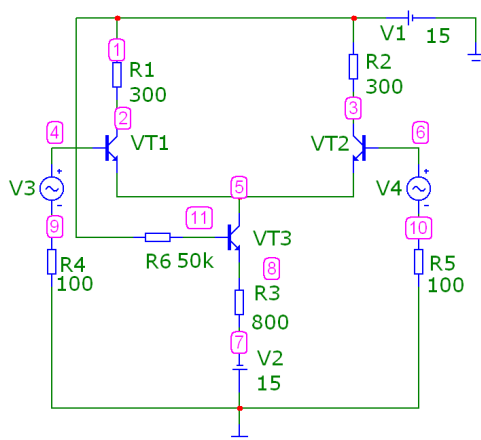


Рис. 14. Дифференциальный усилитель с источником тока

Проведем анализ работы схемы на постоянном токе, выбрав динамический режим анализа на постоянном токе (Dynamic DC) для случая синфазных сигналов генераторов $V3$ и $V4$. Результаты анализа приведены на рис. 15а (указаны потенциалы узлов) и 15б (указаны токи в ветвях цепи).

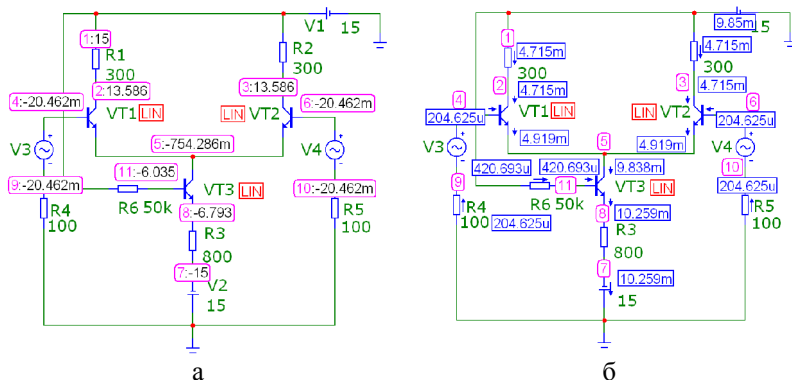


Рис. 15. Результаты анализа исследуемой схемы на постоянном токе для случая синфазных сигналов генераторов $V3$ и $V4$

Как видно из рис. 15а разница потенциалов коллекторов транзисторов $VT1$ и $VT2$ равна нулю, а $I_{R3} = I_{R1} + I_{R2} + I_{6VT1} + I_{6VT2}$ и $I_{R1} = I_{R2}$ (рис. 15б).

Проведем анализ переходных процессов в схеме (Analysis>Transient), предварительно задав параметры анализа (рис. 16).

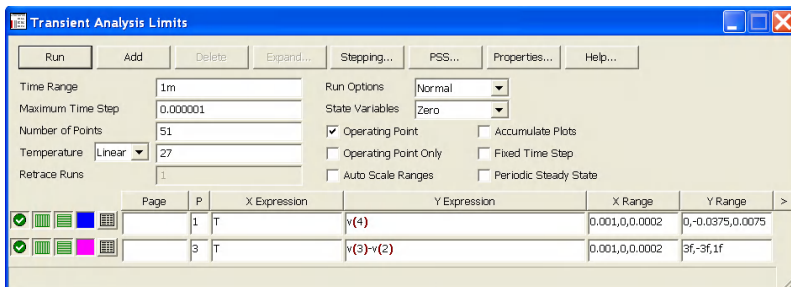


Рис. 16. Ввод параметров анализа переходных процессов в исследуемой схеме

Результаты анализа для случая синфазных сигналов генераторов $V3$ и $V4$ приведены на рис. 17.

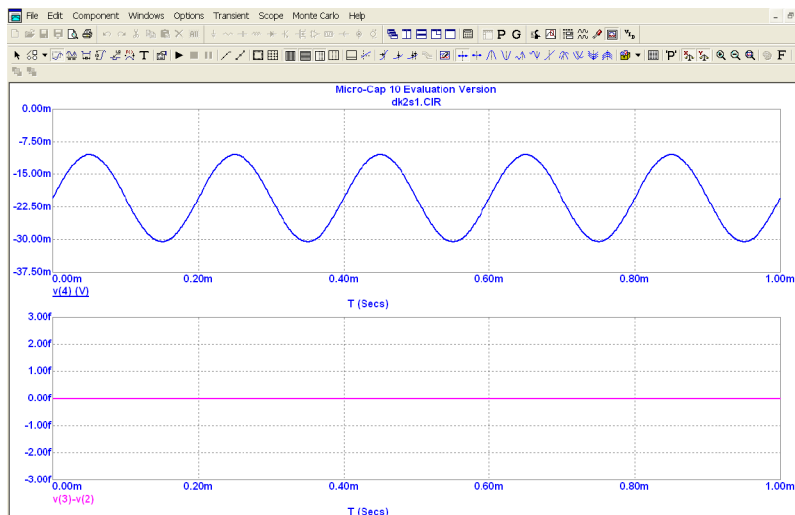


Рис. 17. Результаты анализа переходных процессов в исследуемой схеме для случая синфазных сигналов генераторов

Результаты анализа для случая синфазных сигналов генераторов $V3$ и $V4$ приведены на рис. 18.

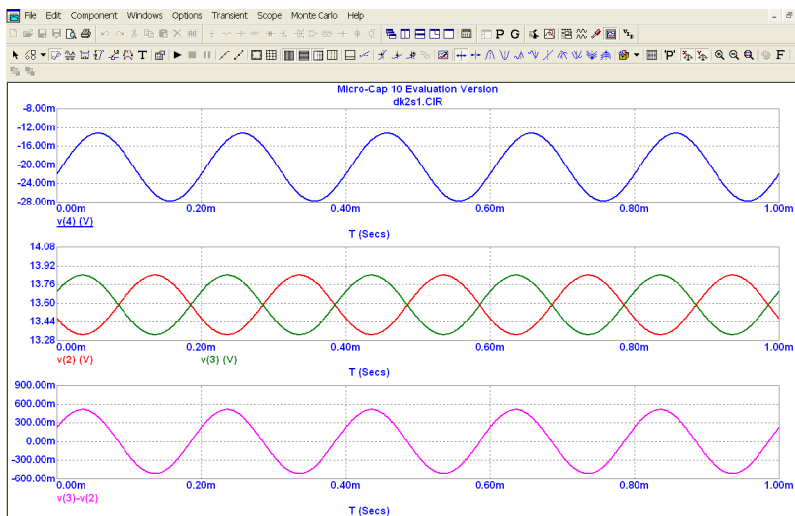


Рис. 18. Результаты анализа переходных процессов в исследуемой схеме для случая противофазных сигналов генераторов

5. Методические указания

1. Провести расчёт дифференциального каскада (определить величины сопротивлений $R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$). Для этого использовать характеристики транзистора, смоделированные в лабораторной работе "Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора" по номеру варианта, указанному преподавателем и рассмотренную выше методику расчета схемы.
2. Исследовать влияние на коэффициент усиления и АЧХ схемы значения $\beta(BF)$ (начальное значение, затем в 2 и 4 раза меньшие значения для обоих транзисторов). Результаты исследования представить в виде графиков.
3. Исследовать влияние на коэффициент усиления и АЧХ схемы неидентичности значений $\beta(BF)$ транзисторов (начальное значение для обоих транзисторов, затем в 2 и 4 раза меньшие значения для одного из них). Результаты исследования представить в виде графиков.

4. Исследовать влияние на коэффициент усиления и АЧХ схемы значение СТС (емкость перехода база-коллектор начальное значение по умолчанию). Значения СТС увеличить в 10 и 100 раз у обоих транзисторов. Результаты исследования АЧХ схемы представить в виде графиков.

Работу выполнить в форме компьютерного моделирования и анализа схемы в программе Micro-Cap.

5. Оформить отчет по работе и отправить его на проверку преподавателю. Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- исследуемые схемы;
- формулировку задачи (по каждому пункту задания);
- таблицы и графики результатов моделирования с достаточным для понимания количеством комментариев;
- **выводы по каждому пункту работы.**

Список использованных источников

1. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.
2. Павлов В.С. Схемотехника аналоговых электронных устройств. – М.: Издательский центр "Академия", 2008. – 288 с.
3. Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. Справочник инженера-схемотехника. – М.: Техносфера, 2008. – 608 с.
4. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.