

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Омский государственный технический университет»

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ
УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ**

Учебно-методическое пособие

Омск
Издательство ОмГТУ
2012

Составители: С. А. Завьялов, канд. техн. наук, доцент;
И. В. Хоменко, канд. техн. наук, ст.преподаватель;
А. Н. Лепетаев, канд. техн. наук, доцент.

Рассматриваются приёмы схемотехнического анализа электрических схем на примере усилителей мощности низкой частоты. Показана методика выполнения анализа основных параметров и характеристик усилителя на основе его модели.

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для студентов очного и заочного обучения радиотехнических специальностей и направлений, изучающих дисциплины: «Основы схемотехники», «Аналоговые электронные устройства», «Усилительные устройства». Авторы пособия ставили цель оказать методическую помощь студентам в освоении приёмов схемотехнического моделирования. Рекомендуется для выполнения заданий по курсовому проектированию и расчётно-графических работ.

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Омского государственного технического университета*

ГОУ ВПО «Омский государственный
технический университет», 2012

ВВЕДЕНИЕ

Умение проводить схемотехнический анализ принципиальных электрических схем и правильно применять базовые схемные конфигурации является важнейшим элементом технического творчества любого специалиста в области радиотехники. Полная проверка работоспособности разработанного устройства и контроль выполнения требований, предъявляемых к его параметрам, может быть осуществлены только после изготовления пробных экземпляров (образцов, макетов) устройства. Однако избежать схемотехнических ошибок и проверить правильность принятых технических решений во время разработки электрической схемы устройства, не прибегая к производству пробного экземпляра, можно с помощью программ схемотехнического моделирования. В настоящее время данный приём широко применяется для сокращения материальных и временных затрат на разработку различных электрических схем. Используя программы схемотехнического моделирования, можно проектировать и анализировать широкий ассортимент электронных устройств, корректировать принятые схемотехнические решения на начальном этапе до производства первых экземпляров. На сегодняшний день существует достаточно много программ, которые позволяют это осуществить: Micro-Cap, Alpac, CircuitMaker, Electronics Workbench, OrCAD и многие другие.

В пособии рассмотрены примеры анализа схем при помощи системы схемотехнического моделирования «Micro-Cap». Выбор этой программы был обусловлен рядом ее достоинств:

- Она не требовательна к ресурсам компьютера и занимает немного места на диске, что может играть существенную роль при использовании ее в учебном процессе или при установке на мобильные компьютеры (нетбуки или ноутбуки);
- Для этой программы имеются руководства по ее использованию на русском языке [1];
- С сайта разработчика можно скачать оценочную, а также бесплатную студенческую версию программы [2];
- Программа Micro-Cap имеет довольно простой интерфейс и достаточно проста в освоении;
- При построении графиков пользователь может задавать любые выражения с использованием большого числа математических функций, что позволяет обойти ограничения, часто возникающие в программах с приборно-ориентированным интерфейсом (как, например, в программе Work Bench);
- Необходимость задавать функции при анализе свойств электронных схем создает предпосылки для более глубокого понимания сущности

исследований, что весьма ценно именно для учебного процесса (хотя может создать трудности использования программы у непрофессионалов);

- Программа является довольно мощным приложением, позволяющим работать с аналоговыми, цифровыми и смешанными видами схем.

В программной среде Micro-Cap используется многооконный интерфейс с ниспадающими и разворачивающимися меню. В основном окне производится рисование электрической принципиальной схемы исследуемого устройства. Для рисования в программе имеется графический редактор схем, достаточно простой в использовании, но имеющий все необходимые средства базового редактирования. После создания электрической принципиальной схемы устройства переходят к расчету его характеристик. Ниже на примере усилителя мощности низкой частоты рассмотрена технология расчёта следующих характеристик и параметров [3]:

Амплитудная характеристика (АХ) – зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения усилителя от амплитуды гармонического входного напряжения;

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость модуля коэффициента усиления от частоты;

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – зависимость сдвига по фазе между выходным и входным параметрами усилителя от частоты;

Переходная характеристика (ПХ) – зависимость выходного напряжения (тока) от времени при скачкообразном (ступенчатом) воздействии входного напряжения (тока);

Коэффициент гармоник – параметр, характеризующий нелинейные искажения синусоидального сигнала, равный отношению среднеквадратичной суммы действующих значений напряжения или тока высших гармоник сигнала, появившихся в результате нелинейных искажений, к действующему значению напряжения или тока основной частоты.

Для проведения расчетов в меню **Analysis** выбирают один из видов анализа:

1. **Transient** (или Alt+1) – расчет переходных процессов.
2. **AC** (или Alt+2) – расчет частотных характеристик.
3. **DC** (или Alt+3) – расчет передаточных функций по постоянному току (при вариации постоянной составляющей одного или двух источников сигналов, вариации температуры или параметров моделей компонентов).
4. **Dynamic DC** (или Alt+4) – расчет режима по постоянному току в динамическом режиме и отображение на схеме в реальном времени узловых потенциалов, токов ветвей и рассеиваемой мощности.

5. **Transfer Function** (или Alt+5) – расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току.

6. **Sensitivity** (или Alt+6) – расчет чувствительности режима по постоянному току.

При построении электрической схемы в приложении MicroCap можно столкнуться с отсутствием моделей отечественных транзисторов. Данная проблема решается путем замены этих транзисторов на зарубежные аналоги. Аналоги транзисторов следует выбирать с близкими параметрами, такими как максимальный ток коллектора $I_{КМАХ}$, крутизна S , максимальное напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭМАХ}$, коэффициент передачи по току $h_{21Э}$, ёмкость коллекторного перехода, предельная частота усиления. Эту задачу можно решить, посетив сайт www.RLocMan.ru, где обзору представлено большое количество отечественных транзисторов и их аналогов, либо по электронному справочнику Виноградова В.Б. «Зарубежные транзисторы и их аналоги».

1. Расчет схемы по постоянному току

Цель: корректировка рабочих точек транзисторов, установка тока покоя и напряжения смещения.

Рисуем схему (рис 1).

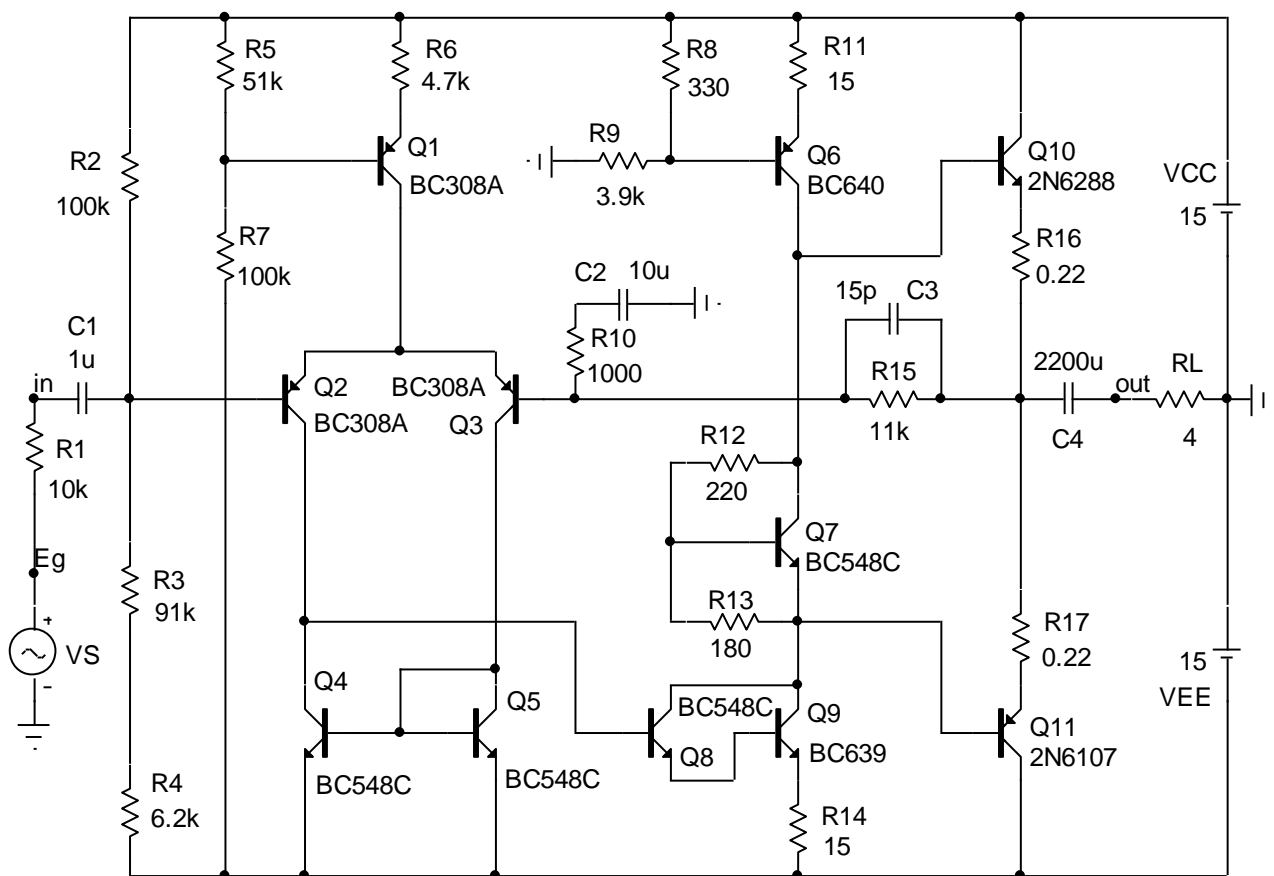



Рисунок 1

В данном примере при проектировании усилителя были применены транзисторы КТ819Б (возможная замена 2N6288), КТ818Б (2N6107), КТ815Б (BC639), КТ814Б (BC640), КТ3107А (BC308А), КТ3102А (BC548С). Изначально указываются номиналы элементов, полученные при расчете усилителя. Значение R1 устанавливается равным заданному сопротивлению источника сигнала. Значение внутреннего сопротивления RS источника сигнала VS следует при этом сделать малым, например, установить его равным 0,1 Ом (или любое другое значение, много меньше значения внутреннего сопротивления). Сопротивление RL равняется сопротивлению нагрузки усилителя. С помощью кнопки «Node Numbers»  на панели управления можно посмотреть на схеме номера узлов, что позволяет увидеть возможные ошибки в соединениях.

Выбираем пункт **Dynamic DC** в меню **Analysis**. Для просмотра напряжений в узлах схемы следует на панели “**Dynamic DC Limits**”, изображённой на рисунке 2, нажать кнопку “**Node Voltages**” (напряжение в узлах схемы).

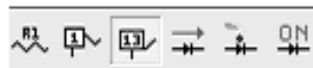


Рисунок 2

После этого на схеме во всех узлах появятся значения напряжений (как показано на рис. 3).

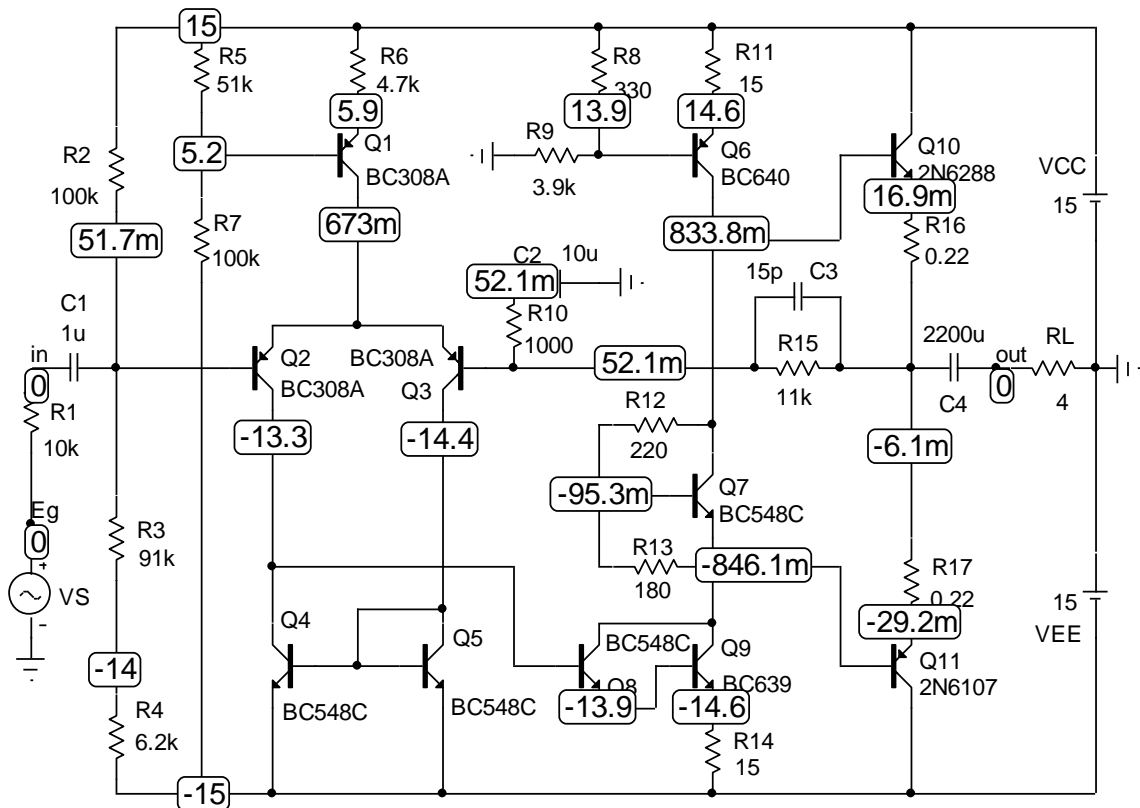


Рисунок 3

Проверяем постоянное напряжение на выходе, которое не должно превышать 100 мВ (в данном случае оно равно -6,1 мВ) и напряжение смещения между базами транзисторов выходного двухтактного каскада (Q10, Q11). Если постоянное напряжение на выходе усилителя (перед разделительным конденсатором с нагрузкой или непосредственно на нагрузке при отсутствии этого конденсатора, что возможно при симметричном двухполярном питании) превысит 100 мВ, то необходимо откорректировать значение сопротивления резистора R4 в цепи делителя на входе дифференциального каскада. Для улучшения симметричности входного дифференциального каскада можно добавить резисторы в цепи эмиттеров транзисторов токового зеркала (Q4, Q5). Значение сопротивлений добавляемых резисторов не должно вызвать насыщения транзисторов токового зеркала.

На приведённой схеме для корректировки напряжения источника смещения можно изменять сопротивления делителя R12, R13. Для просмотра токов ветвей нажмем на кнопку **“Currents”** (токи) на панели **“Dynamic DC Limits”** (см. рис. 2). Проверим величину тока покоя транзисторов выходного каскада (токи через R16, R17), токи источников тока (коллекторные токи транзисторов Q6, Q1), токи в коллекторах транзисторов дифференциального каскада (Q2, Q3). На рисунке 4 показаны результаты расчёта токов в ветвях схемы. Под схемой показана панель управления **“Dynamic DC Limits”** с включенным режимом измерения токов **“Currents”** и отключением показа позиционных обозначений элементов схемы **«Attribute Text»** и их номиналов. При необходимости корректируем значения токов в источниках тока. Функцию источника тока дифференциального каскада, на приведённой схеме, выполняют элементы R5, R6, R7, Q1. Функцию источника тока промежуточного каскада усиления выполняют элементы R8, R9, R11, Q6. В приведённом примере регулировку источника тока дифференциального каскада можно произвести изменением сопротивления резистора R6, а в источнике тока промежуточного каскада изменением сопротивления резистора R11.

Резистор R14 в эмиттере составного транзистора Q8, Q9 является элементом местной отрицательной обратной связи в предварительном каскаде усиления. Увеличение его сопротивления может привести к уменьшению динамического диапазона выходного сигнала. Уменьшая сопротивление резистора R14, в приведённой схеме усилителя, можно увеличить коэффициент усиления предварительного каскада, без изменения токов и напряжения смещения выходного каскада.

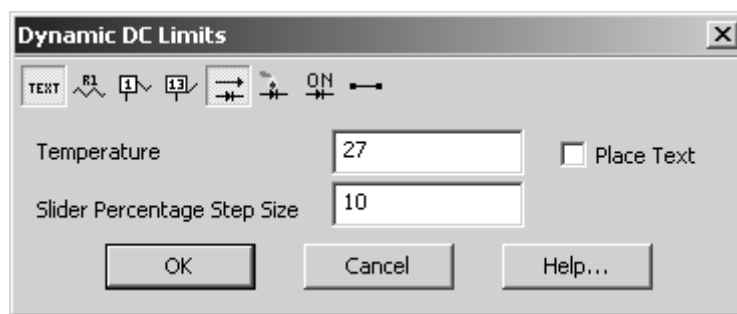
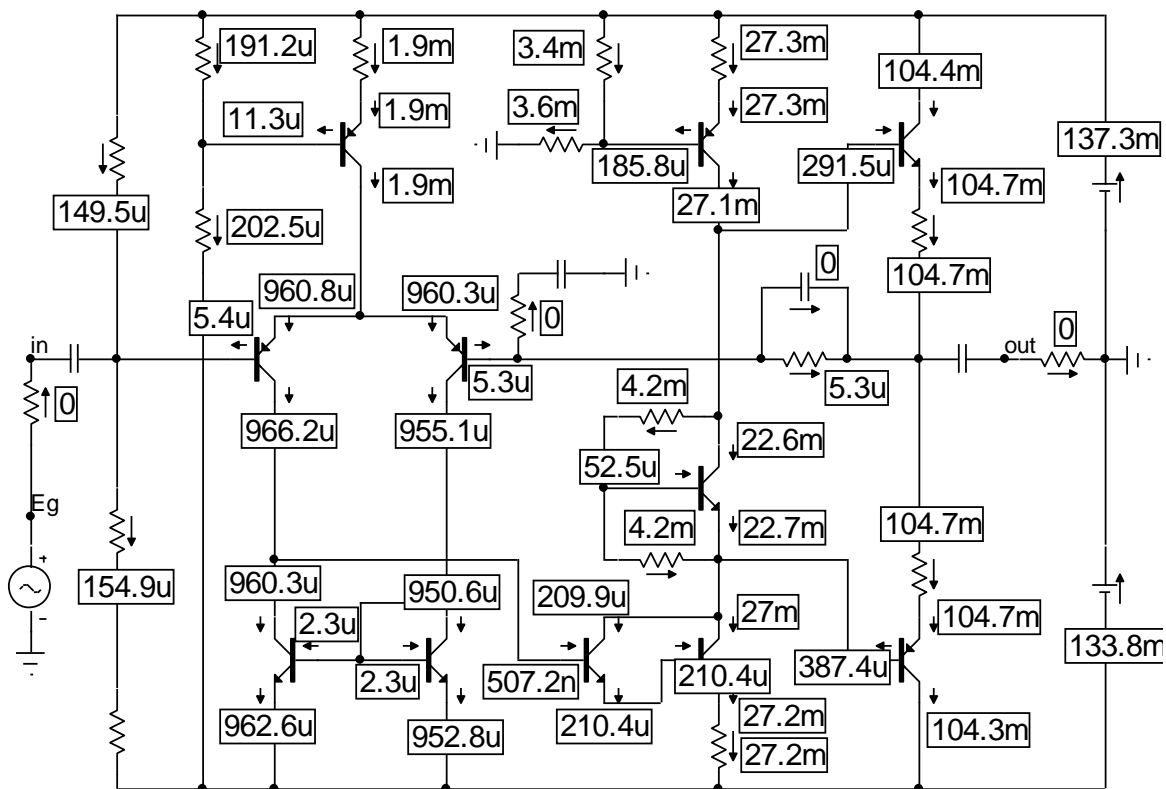


Рисунок 4

Кнопка «**Powers**» предназначена для расчета и отображения на схеме рассеиваемой мощности на элементах схемы. Кнопка «**Conditions**» служит для отображения состояния p-n переходов аналоговых компонентов, либо логического состояния при анализе цифровых схем. Для случая биполярных транзисторов программа выводит на схеме следующие сообщения:

- LIN – транзистор работает в линейном режиме;
- HOT – на транзисторе выделяется значительная мощность;
- OFF – оба перехода транзистора закрыты;
- SAT – транзистор находится в режиме насыщения.

Изменяя значение температуры на панели «**Dynamic DC Limits**» (см. рис.4), можно проверить правильность работы схемы в рабочем диапазоне температур, или оценить предельные значения температуры, при которых значения токов в ветвях схемы, напряжения в узлах и мощности на элементах

схемы остаются в допустимых пределах. Мощность, выделяемая на резисторах, не должны превышать 80% от номинального значения.

2. Построение амплитудной характеристики (АХ)

Цель: определить выходные характеристики усилителя.

Двойным щелчком левой кнопки компьютерной “мыши” по изображению источника **VS** откроем окно параметров источника (см. рис.5).

Здесь **F** – частота источника сигнала, **A** – его амплитуда, **DC** – величина постоянной составляющей на выходе источника, **PH** – начальная фаза, **RS** – внутреннее сопротивление. Параметры **RP** (период повторения) и **TAU** (величина постоянной времени затухания) следует сделать равными нулю, т.к. они нужны только в том случае, если требуется смоделировать последовательность затухающих синусоидальных сигналов.

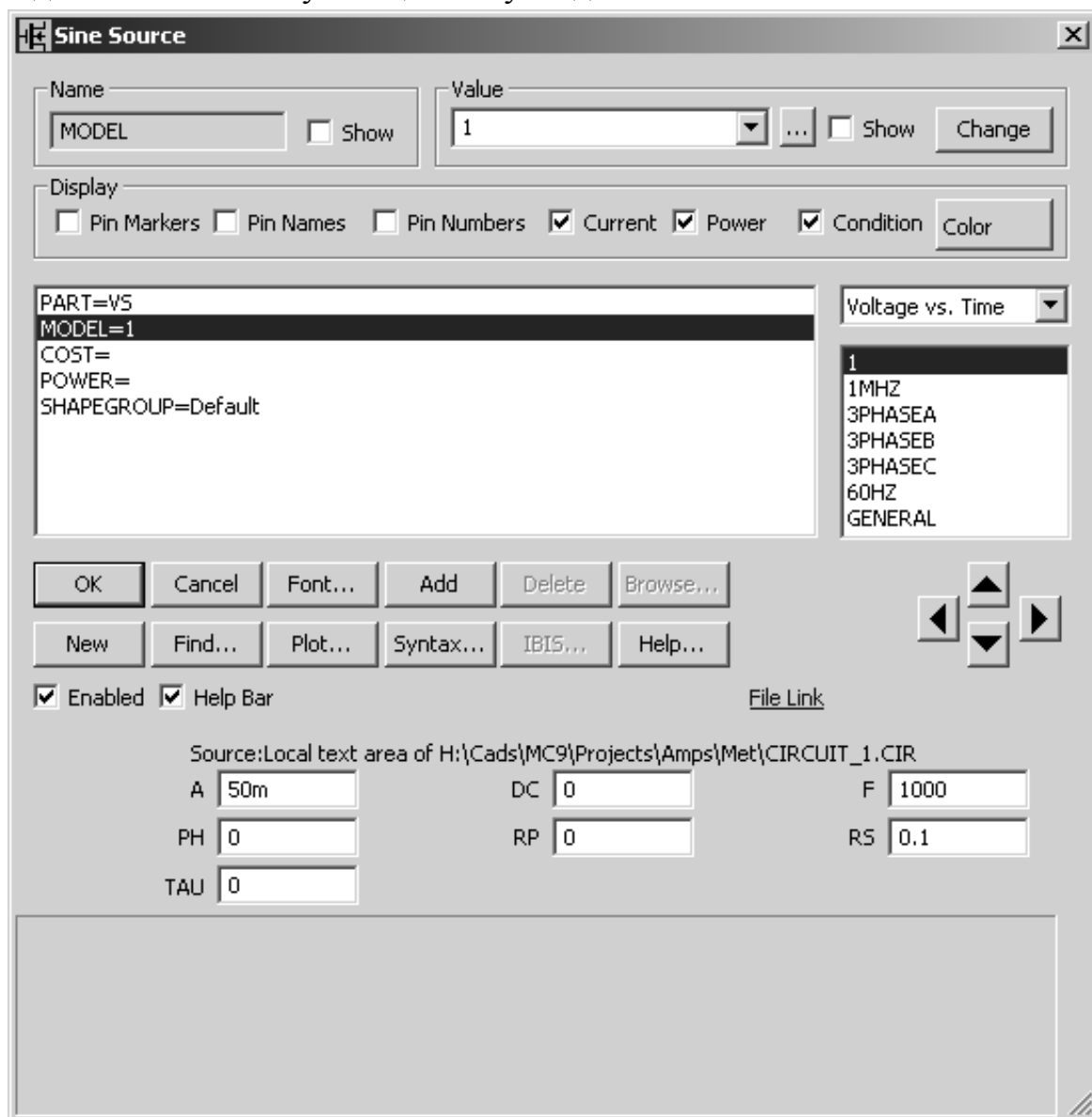



Рисунок 5

Установим значение частоты $F = 1000$ Гц, и амплитуды $A = 50m$. Для построения амплитудной характеристики воспользуемся анализом переходных процессов “**Transient**” (рис. 6). В окне “**Time Range**” установим величину интервала времени анализа, соответствующую периоду частоты источника сигнала. Для построения графиков напряжений в выражении, записываемом в графе «**Y Expression**», нужно указать номера узлов на входе и выходе усилителя или их наименование (в приведённом примере это **Eg** и **out**). Рекомендуется всегда использовать наименования узлов, т.к. при редактировании схемы возможно изменение нумерации узлов (например, при добавлении компонентов или изменении соединений), что не всегда можно заметить.

Набор пиктограмм  позволяет управлять отображением выводимых графиков. Первые две пиктограммы – выбор шкалы по осям **X** и **Y** соответственно (можно выбрать логарифмическую или линейную шкалу). Третья пиктограмма – выбор цвета рисования графика, имеет смысл при отображении на одной координатной сетке нескольких графиков. Четвертая пиктограмма служит для включения режима сохранения графика в виде таблицы с отсчетами. Запись производится в файл <Имя схемы>.ANO.

В столбце **P** указываются номера графиков, которые будут отображаться. Если в ячейке нет цифры, то график не будет рисоваться, если у нескольких графиков одинаковые номера, то они рисуются на одной координатной сетке.

В графе «**X Expression**» необходимо указать аргумент по оси абсцисс. В режиме **Transient** по умолчанию здесь установлено время **t**. Но можно записать любое другое допустимое выражение: это может быть ток ветви, напряжение в узле, температура, либо варьируемый параметр модели. Это справедливо и для графы «**Y Expression**», где указывается выражение по оси ординат.

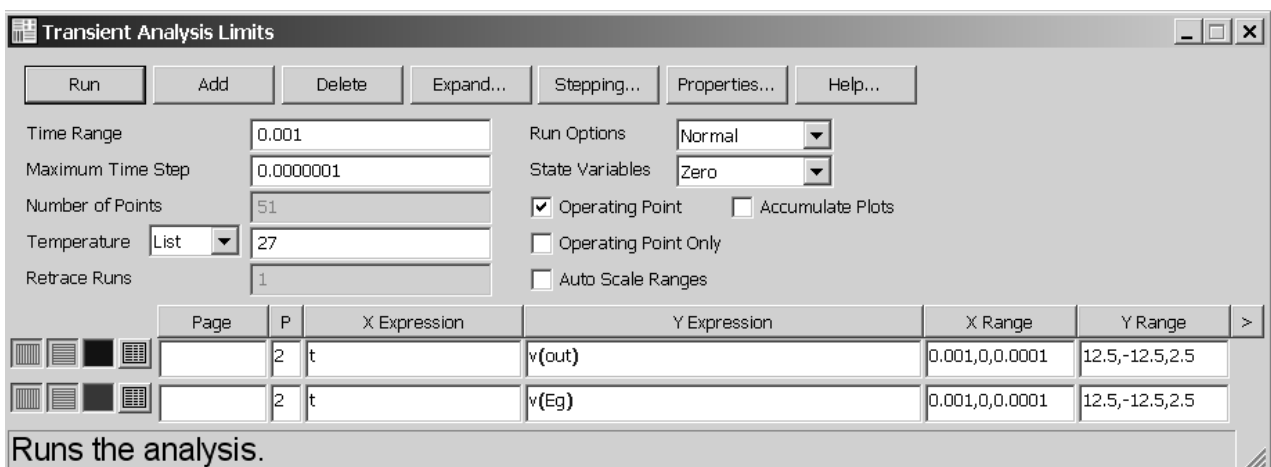


Рисунок 6

Сделайте отметку в окне “**Operating Point**”. Запустите анализ нажатием кнопки “**Run**”. Вы получите графики мгновенных напряжений источника сигнала и напряжения на нагрузке, которые соответствуют осциллограммам напряжения в узлах “**Eg**” и “**out**” (см. рис. 7).

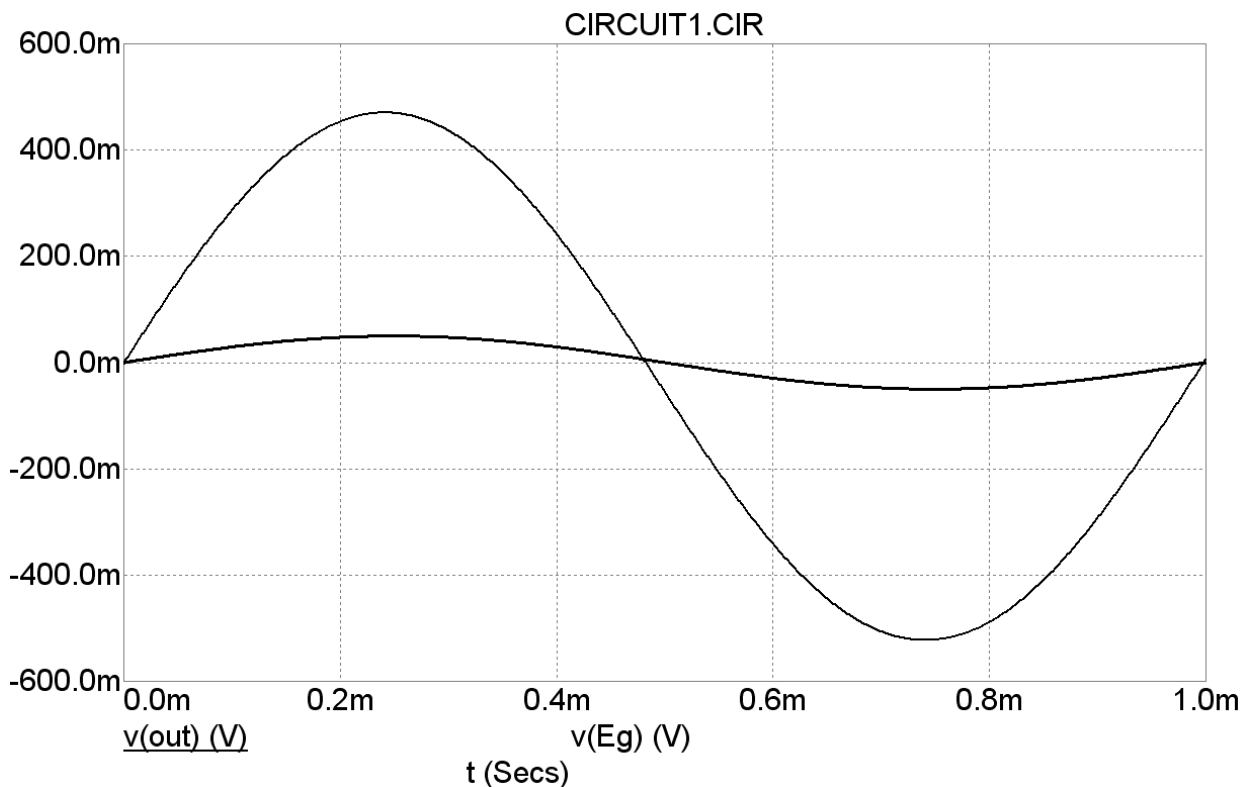


Рисунок 7

Не выходя из анализа “**Transient**” снимите отметку в окне “**Operating Point**” (см. рис. 6) и в окне “**State Variable**” выберите режим “**Leave**”. Запустите несколько раз анализ в этом режиме, нажимая кнопку Run (▶). Это нужно делать до завершения процессов установления напряжений автосмещения в схеме усилителя. Признаком завершения этих процессов является совпадение значений напряжений в начальной и конечной точках интервала времени расчета (рис. 7).

Далее нажимаем кнопку “**Stepping**”, открывая соответствующее окно, и устанавливаем параметры, как показано на рисунке 8. Задаём изменение амплитуды источника сигнала VS от 50 мВ до 1,5 В с шагом 50 мВ. Устанавливаем отметку напротив индикатора “**YES**” в переключателе “**Step It**”. Нажимаем далее “**OK**” и запускаем анализ (“**Run**”). Наблюдаем процесс последовательных расчетов с нарастающей амплитудой входного и выходного сигналов (рис. 9). В приведённом примере нижняя и верхняя полуволна синусоидального сигнала начинают ограничиваться при различных значениях амплитуды входного напряжения.

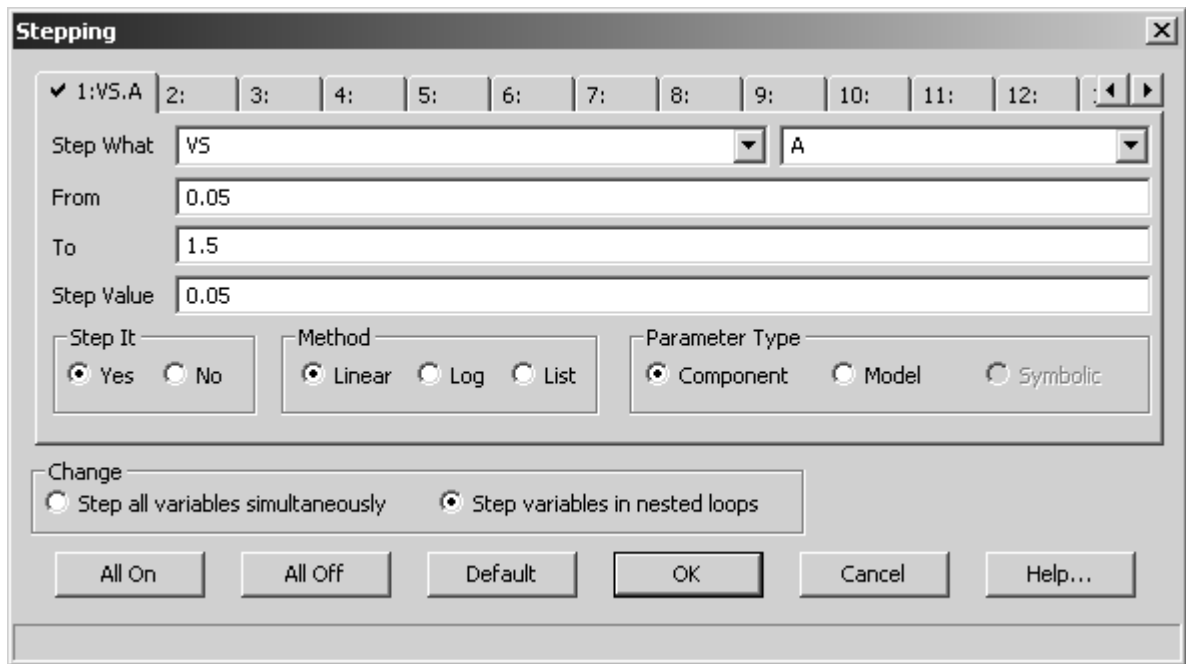


Рисунок 8

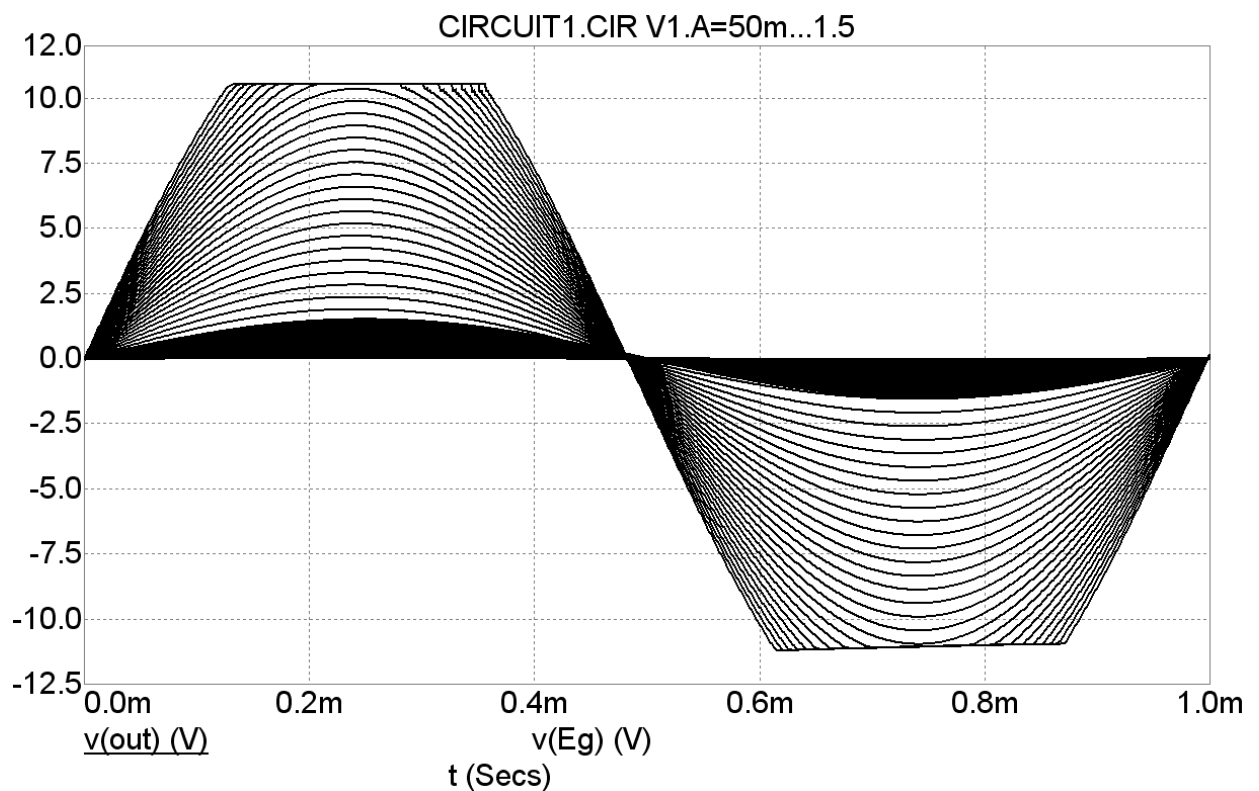


Рисунок 9

Далее через основную панель инструментов выбираем: **Transient**→**Performance Windows**→**Add Performance Window**, далее на открывшейся вкладке “**Plot**” нажимаем клавишу “**Get**” (см рис. 10).

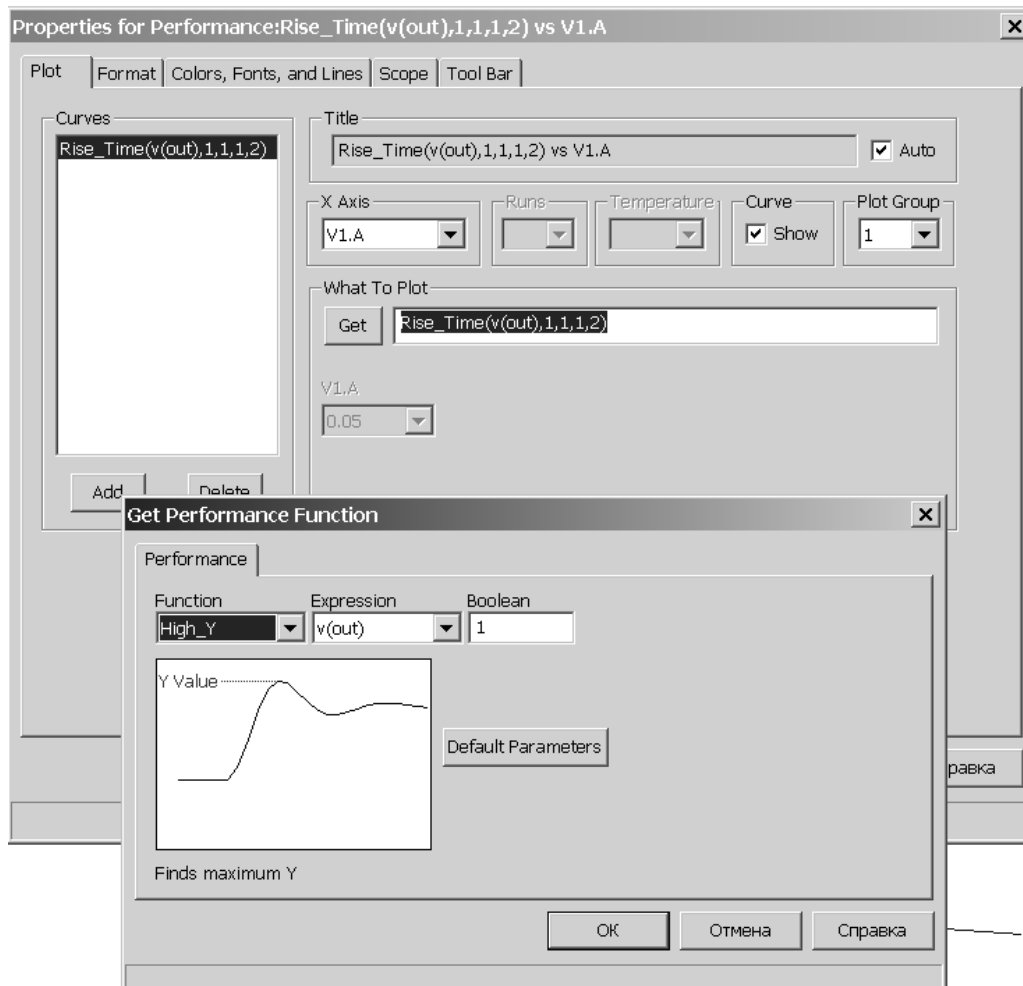


Рисунок 10

В открывшейся панели в поле “**Function**” выбираете “**High Y**” для выражения **V(out)** и нажимаем “**OK**”. Тем самым мы задали построение графика зависимости максимального значения выходного напряжения от амплитуды входного сигнала. Далее в окне “**Properties for performance**” нажимаем кнопку “**Add**” для добавления еще одного графика. Опять нажимаем “**Get**” и выбираем функцию “**Low Y**” (минимальное значение выходного напряжения). Однако для удобства сравнения максимального и минимального напряжений модифицируем последнее выражение, взяв его модуль (т.е. в строке рядом с клавишей “**Get**” должно быть записано **abs(Low_Y(v(out), 1))**). Нажимаем **OK** и получаем график амплитудной характеристики для положительной и отрицательной полувольт сигнала (см. рис. 11).

Как видно из этого графика, величина коэффициента передачи для положительной (сплошная линия) и отрицательной (пунктирная линия) полувольт сигнала незначительно отличаются. Максимальное значение входного напряжения не следует устанавливать более 1 В, поскольку это значение близко к порогу появления нелинейности выходной характеристики, обусловленной насыщением выходных транзисторов.

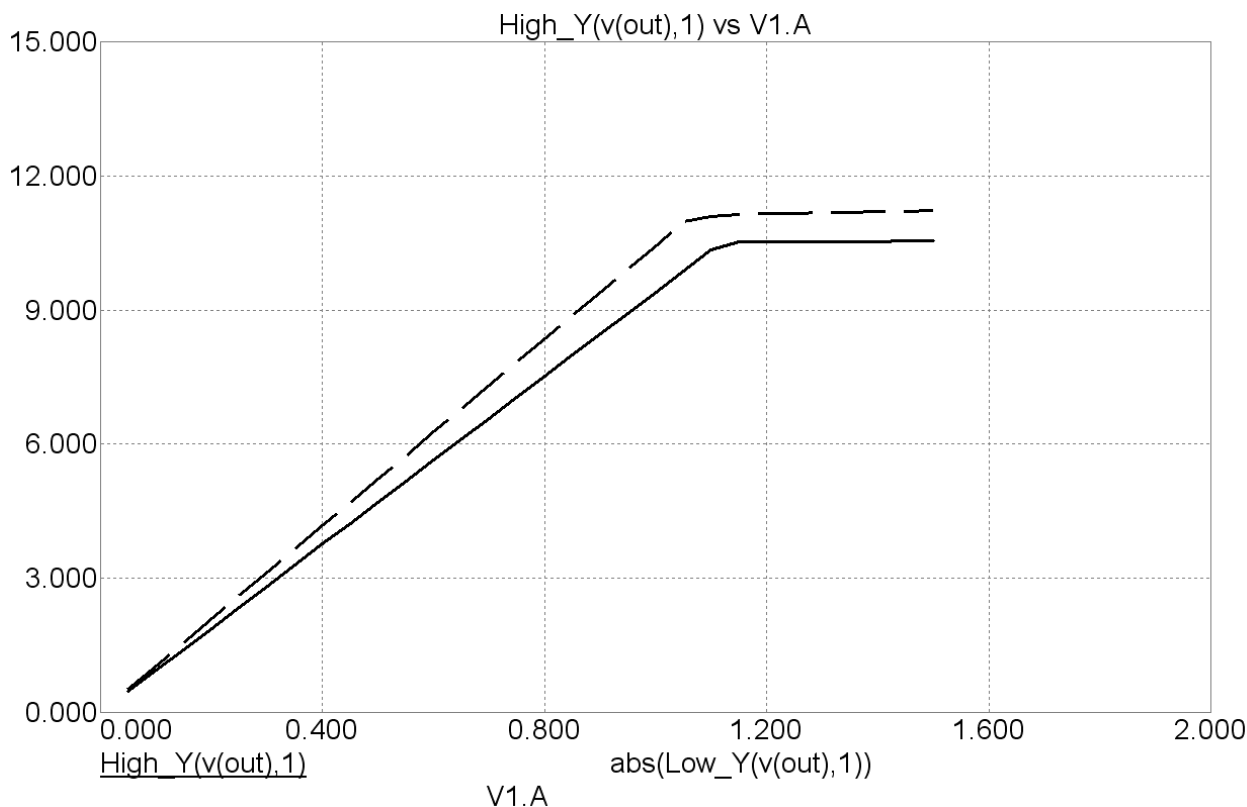


Рисунок 11

Встроенные функции MicroCap позволяют анализировать коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник). Его анализ также осуществляется в режиме “**Transient**”.

3. Расчет коэффициента гармоник

Для расчёта коэффициента гармоник используют функции **THD**, **FFT**, **HARM**. Функции **HARM** и **FFT** рассчитывают спектр сигнала, а **THD** рассчитывает коэффициент гармоник через результаты, полученные при помощи функции **FFT**. Аргументом первой является любой сигнал, второй – спектр любого сигнала. Таким образом, для того, чтобы рассчитать коэффициент гармоник на выходе необходимо выражение **THD(FFT(v(out)))**. На рисунке 12 показано окно задания параметров для анализа спектра и расчёта коэффициента гармоник. Как и в предыдущем случае, первый расчет производится с установленной опцией «**Operating Point**», затем эта опция отключается и проводится серия запусков в режиме «**Leave**».

На рисунке 13 показан спектр сигнала. Первая гармоника рассчитана в отдельном поле, так как её амплитуда намного больше амплитуд высших гармоник.

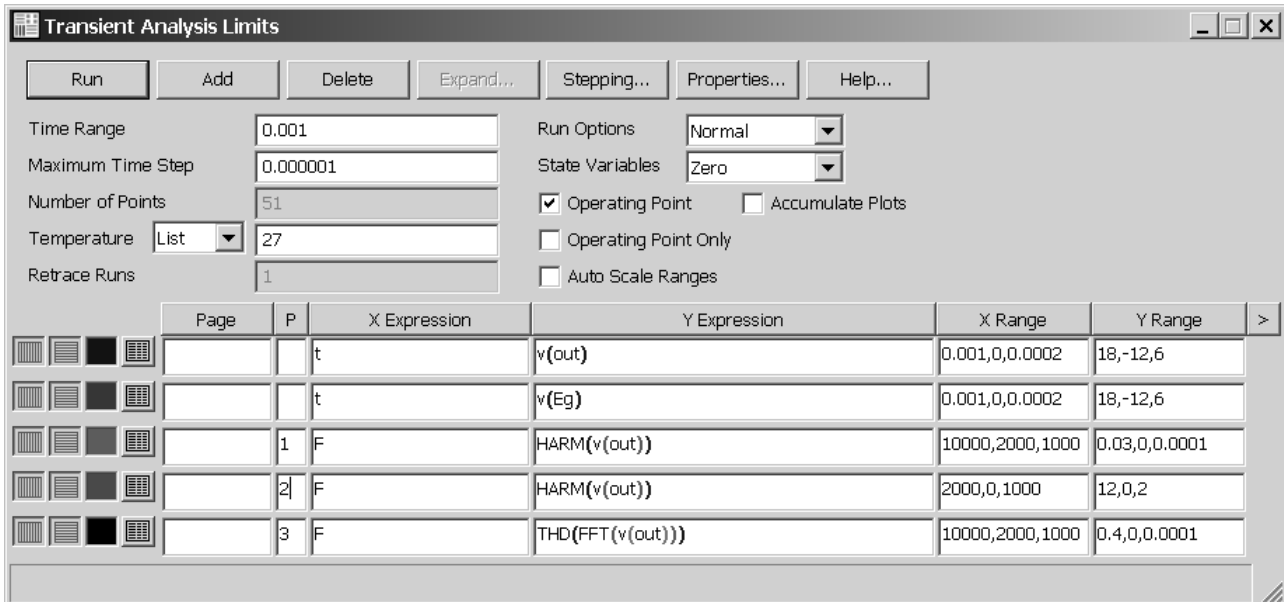


Рисунок 12

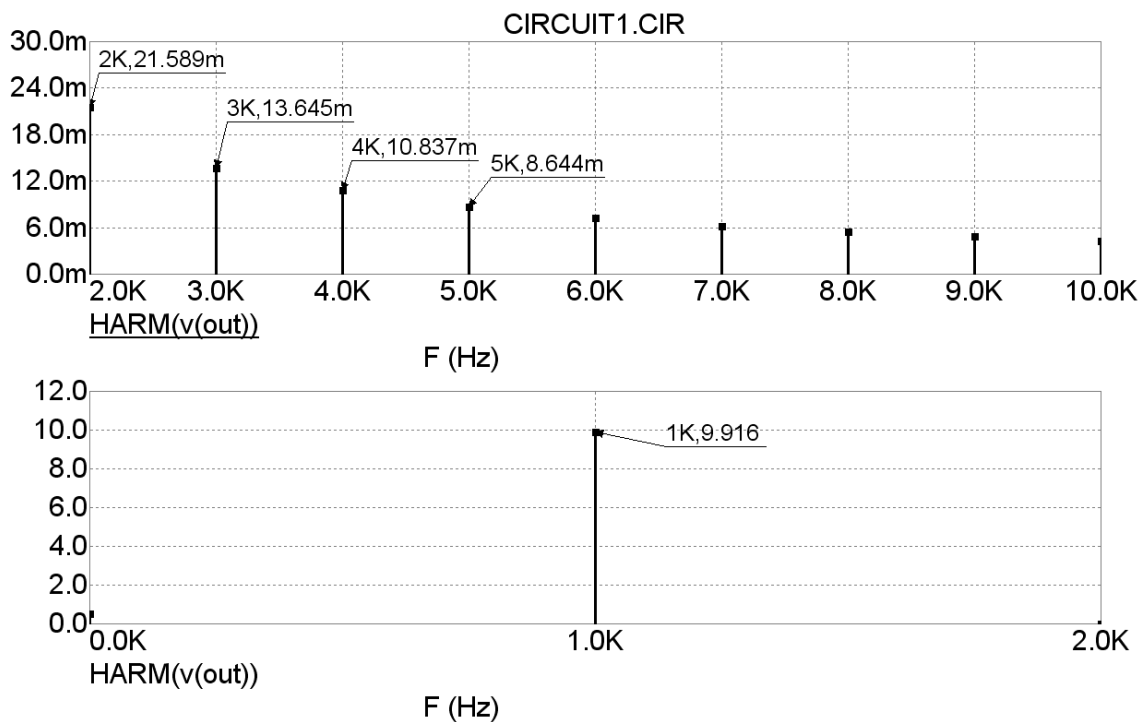


Рисунок 13

По данным результатов, показанных на рисунке 13 можно вычислить коэффициент гармоник. Для расчёта возьмём значения первых 5 гармоник.

$$k_{\bar{a}} = \left(\sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}{U_1^2}} \right) \cdot 100\% \quad ;$$

$$k_{\bar{a}} = \left(\sqrt{\frac{0.021585^2 + 0.013647^2 + 0.010835^2 + 0.008644^2}{9.916^2}} \right) \cdot 100\% = 0.293\%$$

На рисунке 14 показан результат расчёта при помощи функции **THD(FFT(v(out)))**.

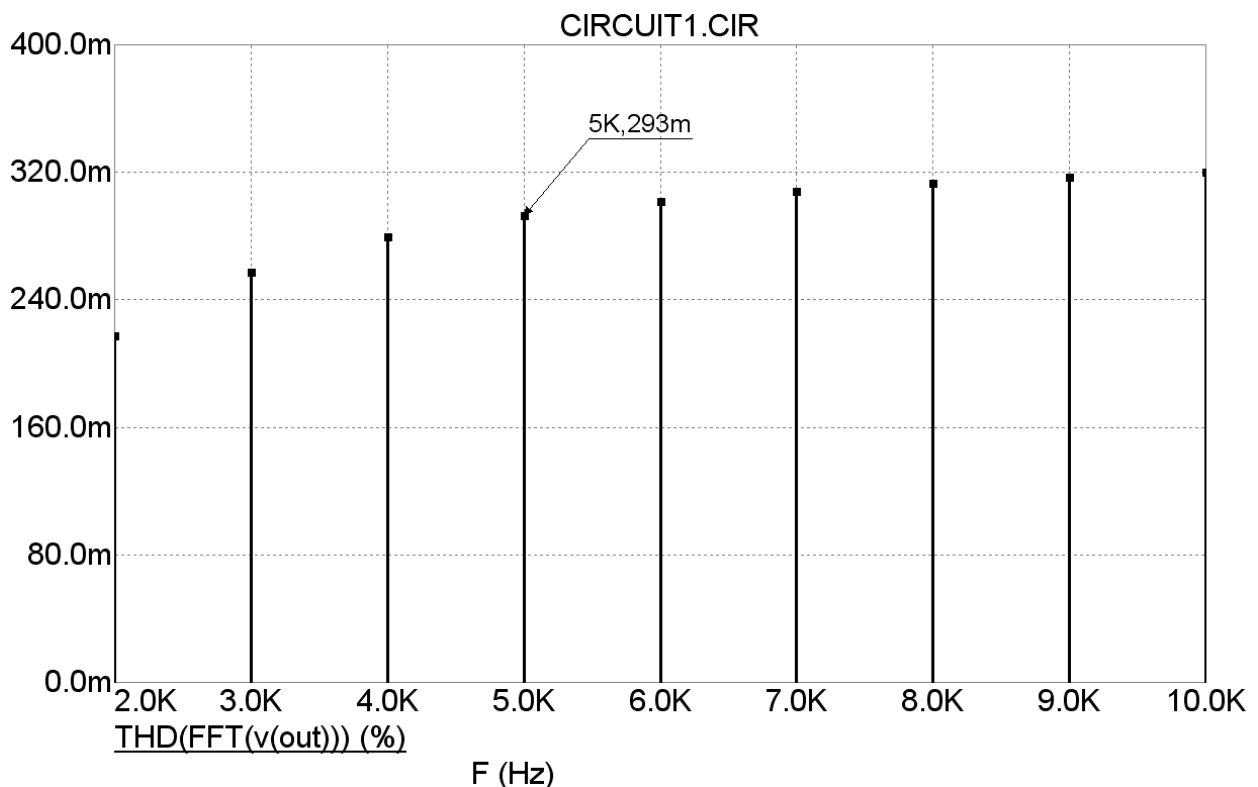


Рисунок 14

Результаты расчёта коэффициента гармоник в Micro-Cap приводятся в соответствие с приведённым выше выражением. Общий результат зависит от количества учитываемых гармоник. На рисунке 14 видно что на частоте 5 кГц, то есть при учёте пяти первых гармоник, коэффициент гармоник равен $k_T=0,293009\%$, при 10 гармониках – $k_T=0,32\%$.

4. Построение частотных характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ)

Цель: установление коэффициента усиления цепи в частотной области, определение сдвига фазы выходного сигнала относительно входного в частотной области, определение запасов устойчивости по фазе и усилению, полосы пропускания усилителя.

Входим в режим **Analisis→AC**, после чего задаем параметры моделирования (рис. 15). Параметры моделирования заданы для расчёта коэффициента усиления напряжения K_U и сквозного коэффициента усиления напряжения K_E в дБ и в относительных единицах.

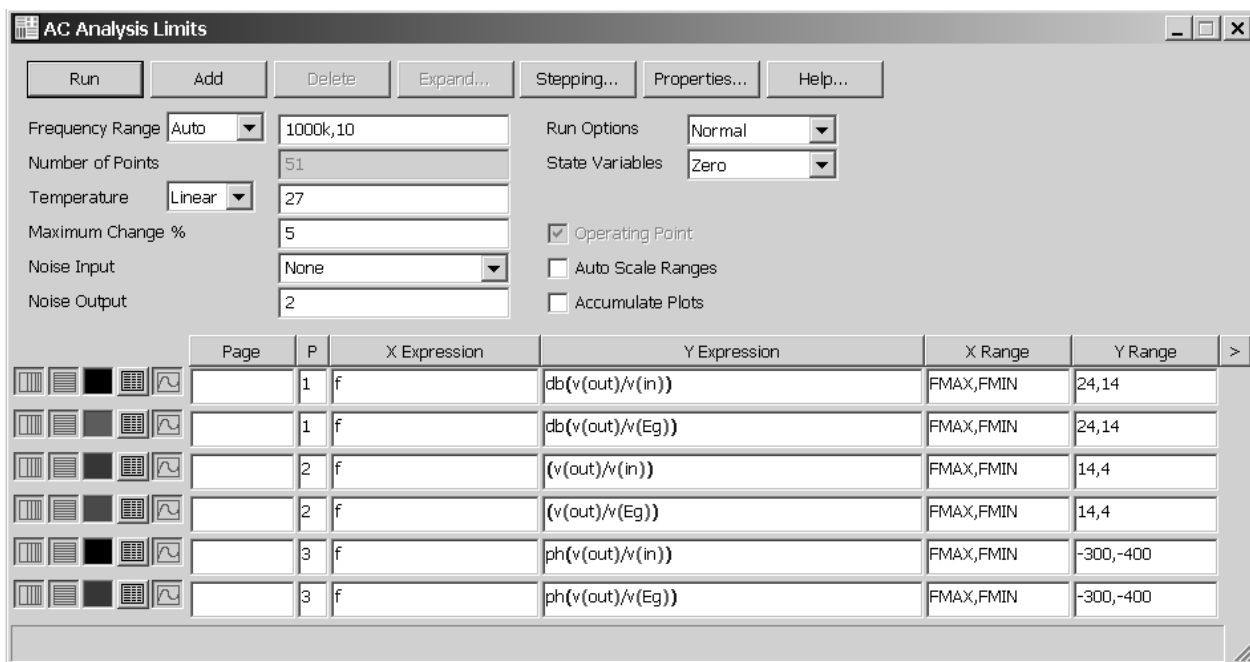


Рисунок 15

Run – начать моделирование.

Add – добавления еще одной строки для построения большего числа графиков.

Stepping – задание вариации параметров элемента схемы (в данном случае не требуется).

Числовые параметры моделирования

Frequency Range – задание диапазона частот, в котором будет проводиться анализ по маске: Fmax, Fmin. Диапазон обычно берется таким, чтобы на его границах фаза устанавливалась в стационарные значения, кратные 90 градусов (т.е. на границах фаза не должна ни расти, ни убывать). В графе **Temperature** устанавливается температура анализа.

Опция “**Auto Scale Ranges**” устанавливается для автоматического масштабирования графиков по осям. Если эта опция выключена, то принимаются масштабы, указанные в графах **X Range**, **Y Range**.

В графе **X Expression** пишется аргумент по оси абсцисс (в AC – анализе по умолчанию это частота **F**). В графе **Y Expression** задается выражение по оси ординат. Это может быть простое выражение типа тока ветви или напряжения в узле, а может быть и сложное выражение, включающее функции, аргументами которых являются другие функции или выражения. В примере на графике №1 использована функция **dB** для расчёта коэффициент усиления по напряжению схемы, выраженного в децибелах. На третьем графике для построения фазо-частотной характеристики используется функция **ph**. После введения параметров моделирования нажимаем кнопку **Run** (рис. 15). На рисунке 16 показаны результаты расчёта.

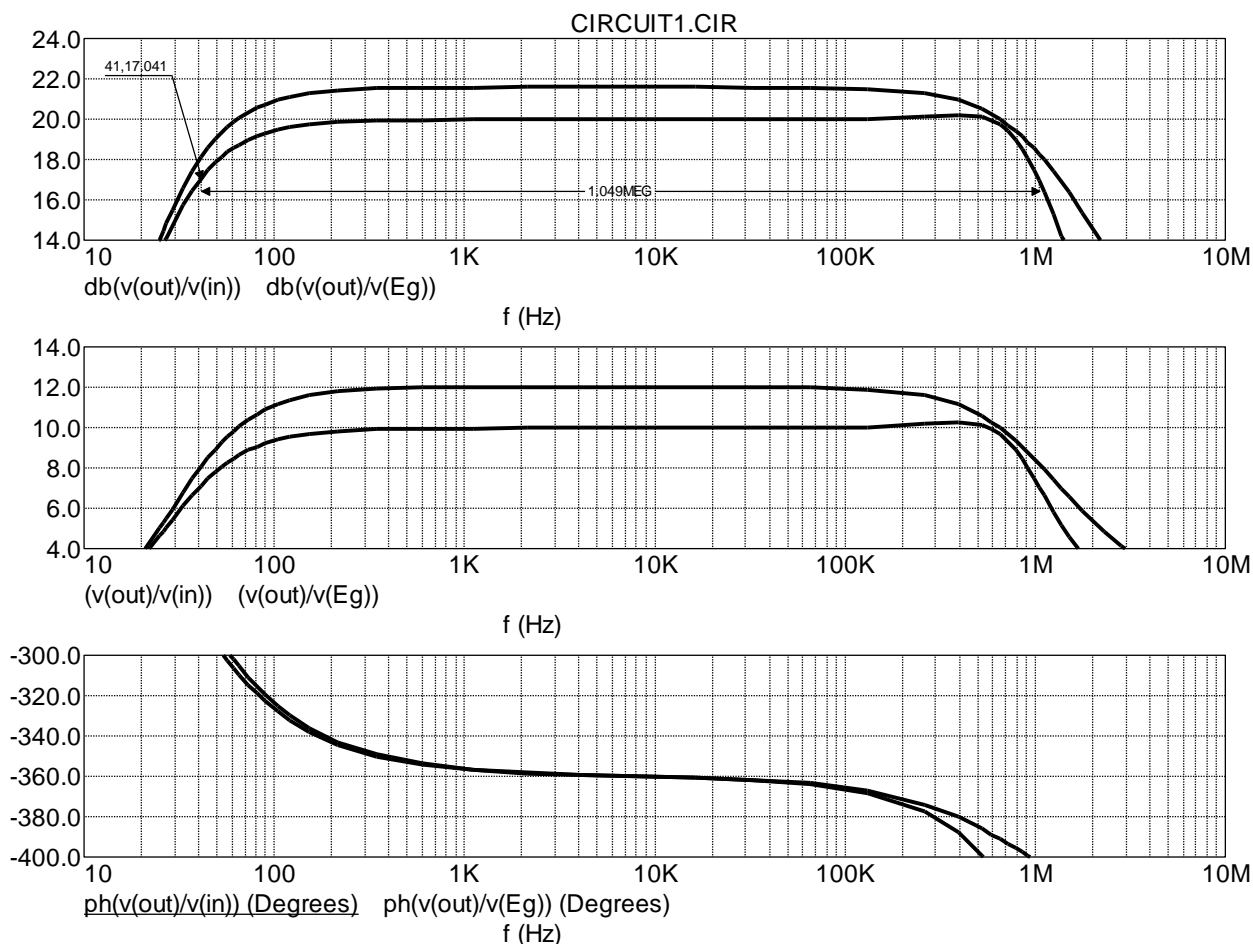


Рисунок 16

Построенные графики логарифмической амплитудно-частотной характеристик (ЛАЧХ) и логарифмической фазо-частотной характеристик (ЛФЧХ) позволяют определить усиление схемы, полосу пропускания, неравномерность АЧХ в этой полосе, сдвиг сигнала по фазе на определенной частоте, устойчивость системы. В приведённом примере усиление сигнала источника (сквозной коэффициент усиления K_E) составляет 20 дБ на частоте 10 кГц, полоса пропускания равна 1,05 МГц, отклонение фазы от идеальной характеристики составляет +35 градусов на частоте 100 Гц и до -7 градусов на частоте 100 кГц. Также можно оценить запасы устойчивости по усилению и по фазе.

Задача обеспечения устойчивой работы усилителя является такой же важной, как обеспечение необходимой стабильности коэффициента усиления в полосе рабочих частот, как обеспечение низкого уровня нелинейных искажений [Остапенко]. Усилитель может перейти в режим самовозбуждения, который сопровождается изменением его основных свойств. Усилитель теряет устойчивость из-за фазовых сдвигов, вносимых как каскадами усилителя, так и цепью ОС, в результате чего предусмотренная в усилителе отрицательная обратная связь, которая предназначена для улучшения его характеристик и параметров, у границ частотного диапазона и за их пределами становится

положительной [3]. На рисунке 17 показаны графики ЛАЧХ (вверху) и ЛФЧХ для схемы, изображённой на рис. 1 в которой ёмкость конденсатора С3 в цепи обратной связи заменили на 2,2 пФ. На графиках видно, что на частоте около 10 МГц сдвиг фазы от идеальной ЛФЧХ составил -540° ($-360^\circ - 180^\circ = -540^\circ$), что соответствует инвертированию сигнала по фазе (-180°) в разомкнутой петле обратной связи. Отрицательная обратная связь на данной частоте превращается в положительную, и при достаточном коэффициенте усиления это может вызвать возбуждение усилителя. Резкое увеличение коэффициента усиления вблизи данной частоты (см. график ЛАЧХ) свидетельствует о возбуждении усилителя на верхних частотах выше границы звукового диапазона. Для устранения возбуждения ёмкость конденсатора, подключенного параллельно в цепи общей отрицательной обратной связи, была увеличена до 12 пФ и между коллекторами транзисторов дифференциального каскада включена RC-цепь местной отрицательной обратной связи (200 Ом, 150 пФ).

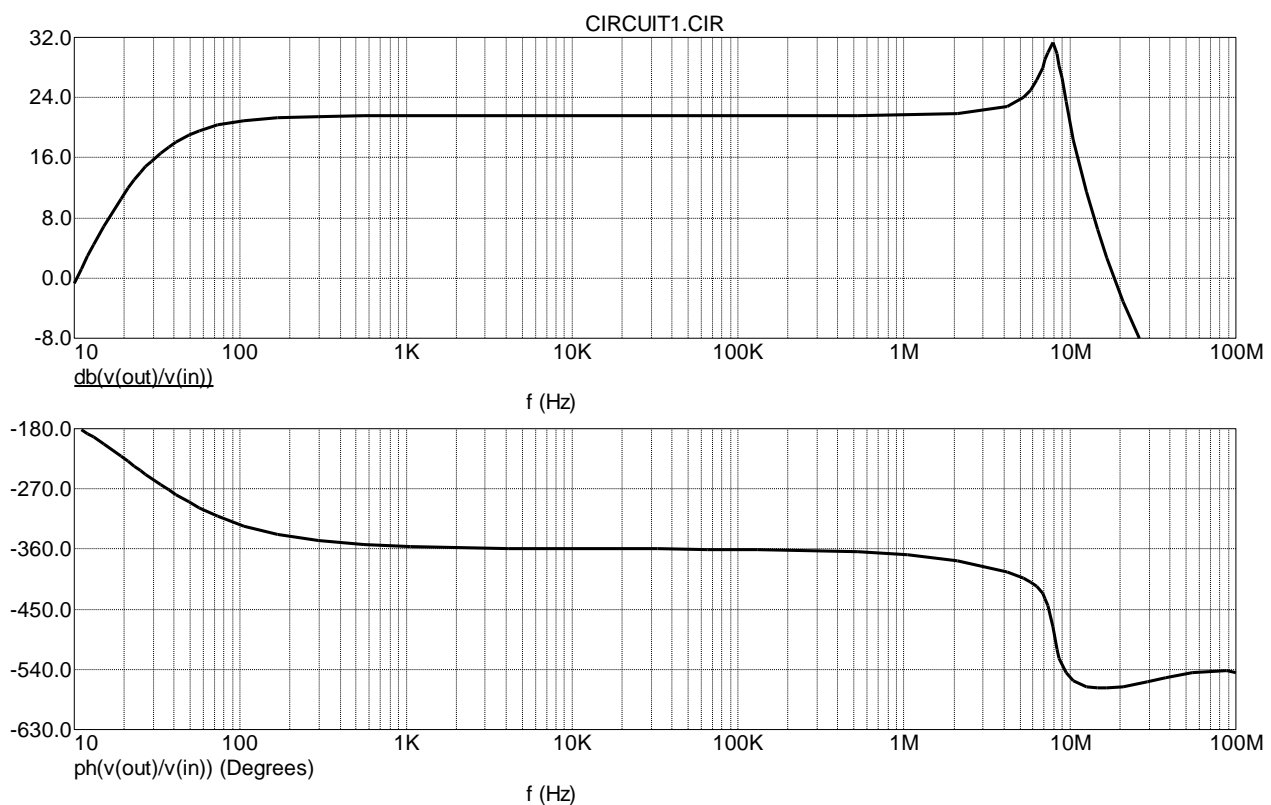


Рисунок 17

Кроме того, исключён разделительный конденсатор в цепи нагрузки и более точно проведена окончательная настройка схемы усилителя по постоянному току (добавлены сопротивления в цепи эмиттеров транзисторов токового зеркала и изменено значение сопротивления резистора R4). В результате введённых изменений схема усилителя имеет вид, показанный на рисунке 18.

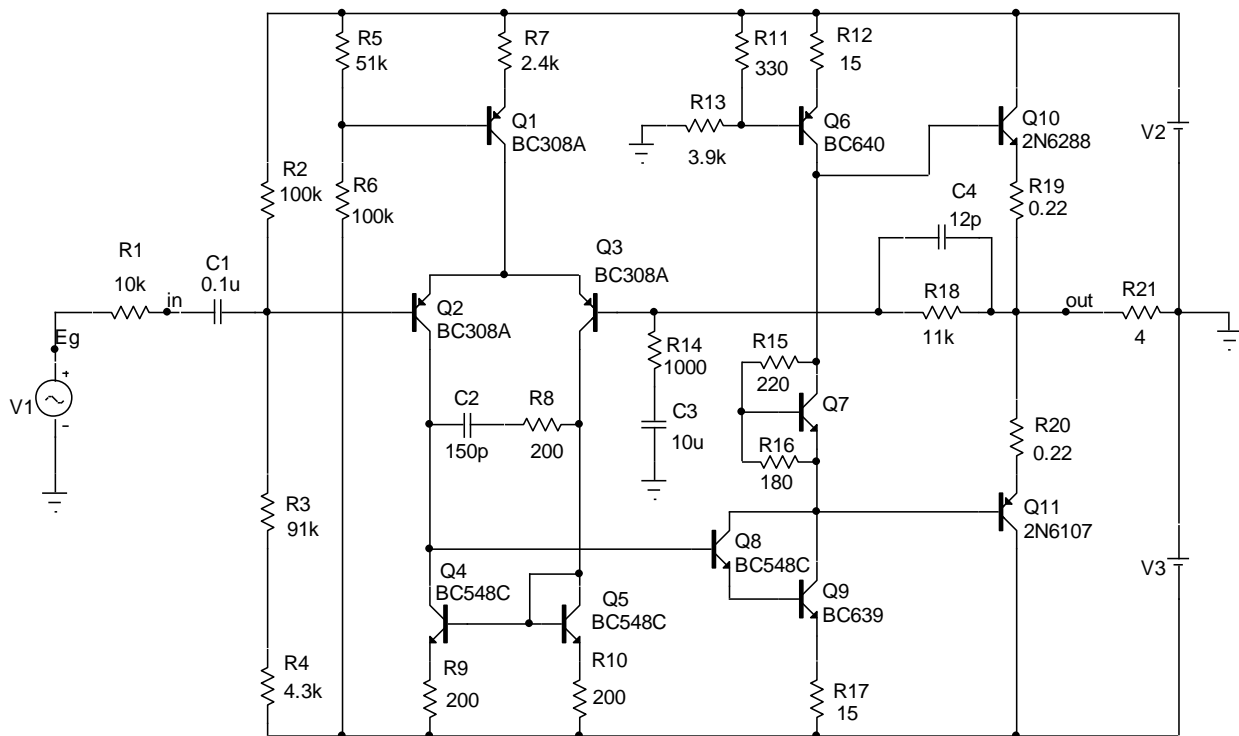


Рисунок 18

Графики ЛАЧХ и ЛФЧХ окончательной схемы усилителя показаны на рисунке 19.

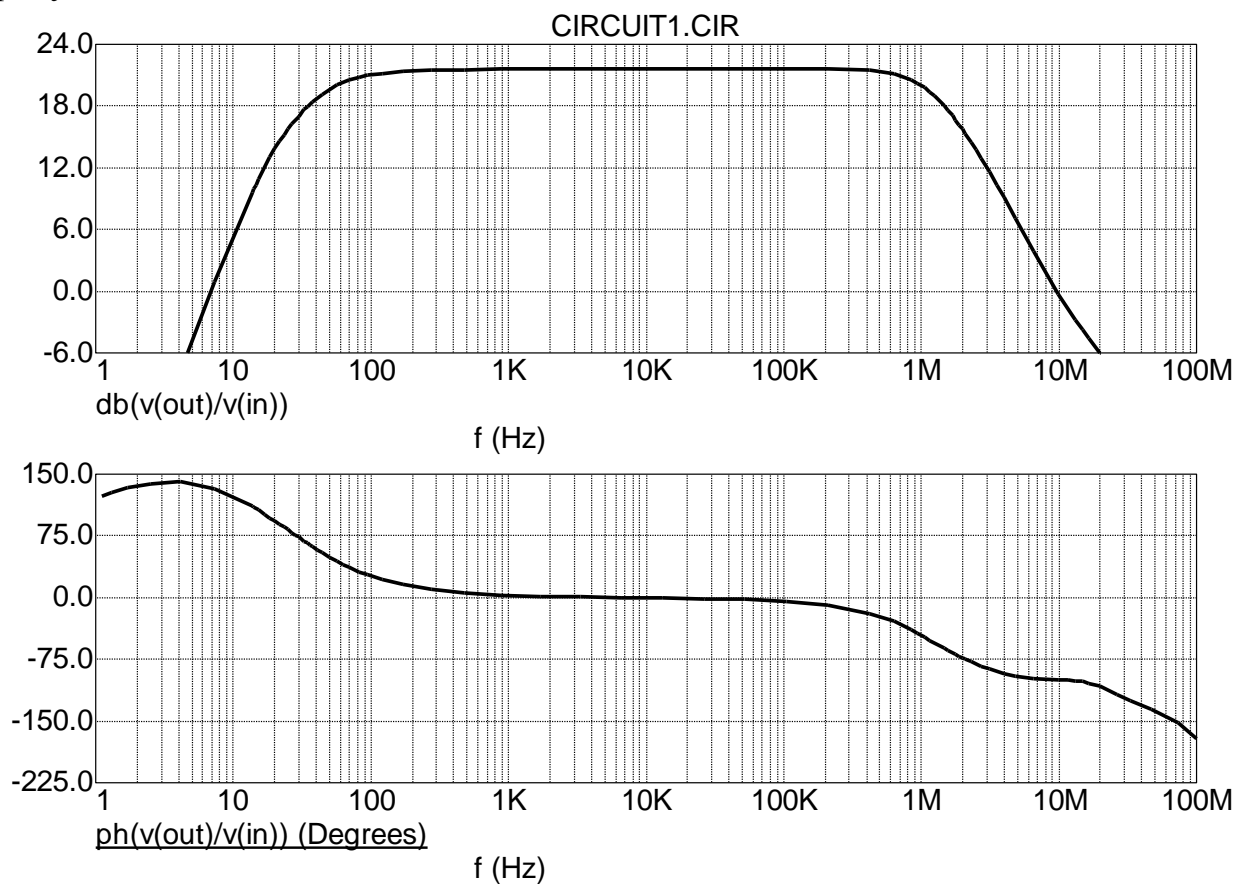


Рисунок 19

Запас устойчивости по фазе на частотах, где коэффициент усиления равен 0 дБ, составляет не менее 45° (см. рис. 19).

5. Построение годографа

Для построения годографа (амплитудно-фазовая характеристика) в графах **X Expression** и **Y Expression** режима **AC** пишем соответственно **Re(v(out)/v(In))** и **Im(v(out)/v(In))**. Анализ коэффициента усиления производим на частотах от 1 Гц до 1 ГГц. Задаём линейные масштабы сетки (по горизонтали и вертикали) и автоматический выбор пределов шкал, после чего запускаем анализ нажатием кнопки «**Run**». Годограф коэффициента усиления схемы (на рис. 18) показан на рисунке 20. Для сравнения на рисунке 21 приведён годограф коэффициента усиления неустойчивой схемы усилителя (рис. 1 с $C3=2,2$ пФ), графики ЛАЧХ и ЛФЧХ которого показаны на рисунке 17.

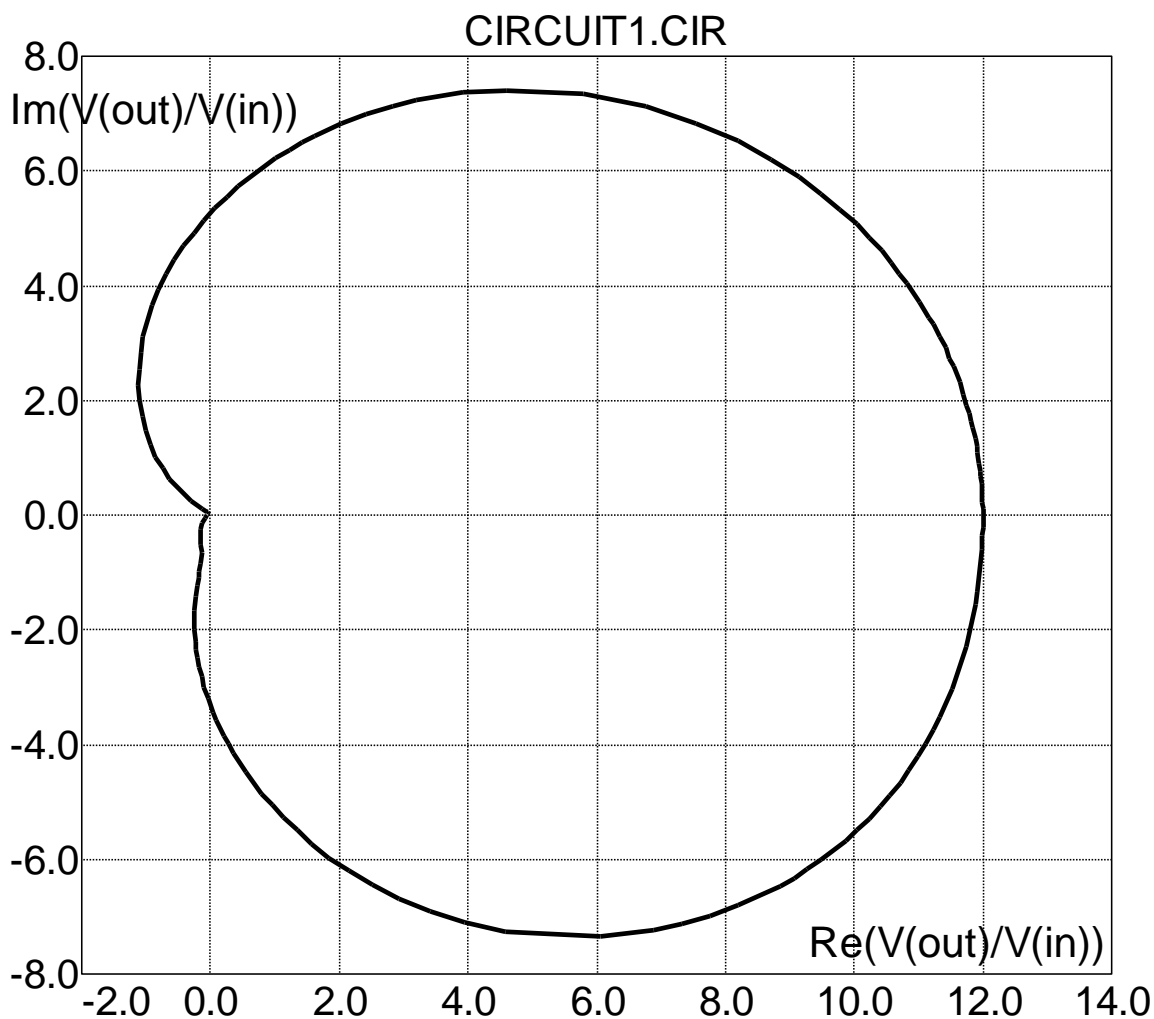


Рисунок 20

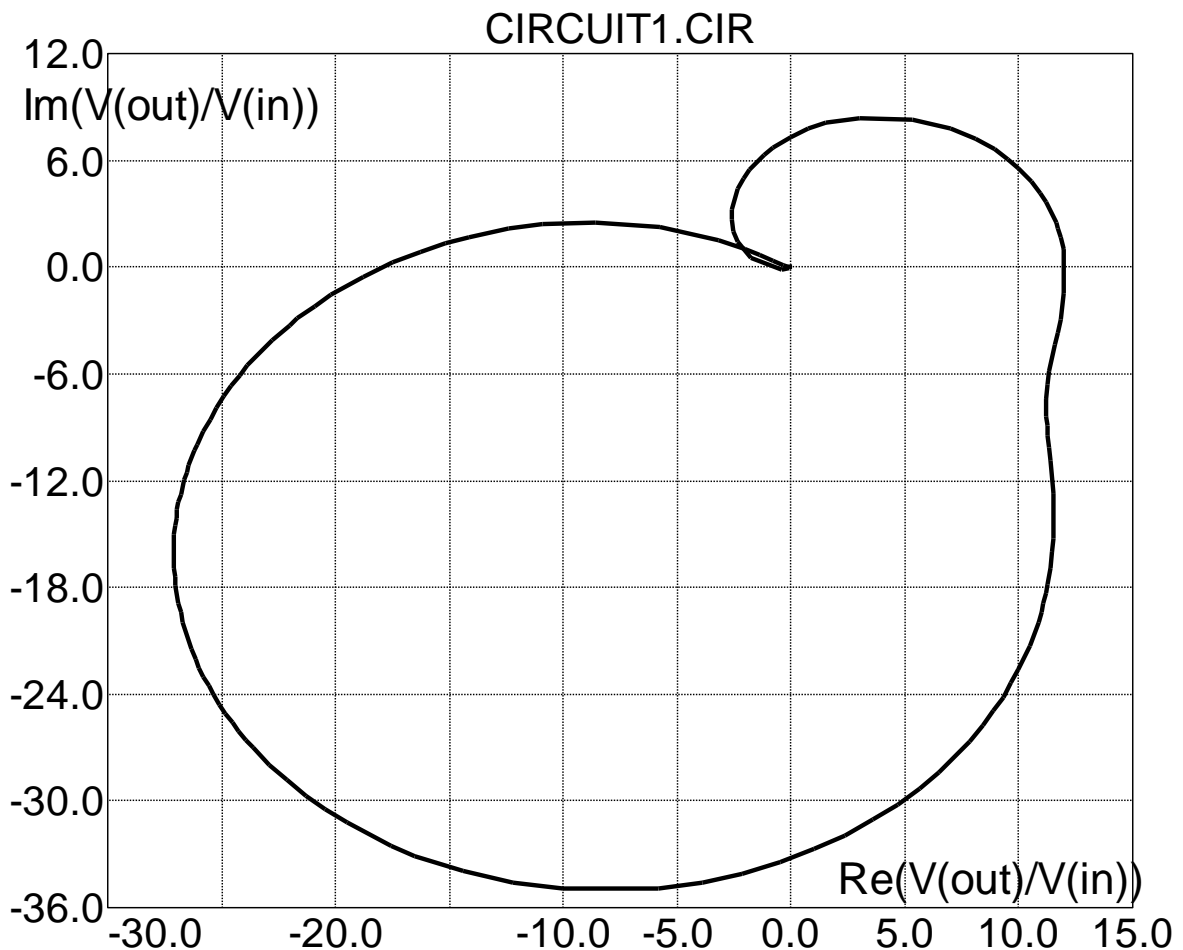


Рисунок 21

Годограф коэффициента усиления неустойчивого усилителя (рис. 21) охватывает точку с координатами $(-1; j0)$.

6. Построение осциллограмм напряжений

Цель: снять осциллограммы напряжений на входе и выходе усилителя, измерение амплитуды и наблюдение формы сигнала на выходе.

Устанавливаем номинальную амплитуду источника сигнала VS на схеме (в приведённом примере равной 1В, см. параметр A на рис.5). Далее запускаем режим расчета **Analisis>Transient** (рис. 22).

Time Range – задание временного диапазона анализа по маске: T_{max}, T_{min}. По умолчанию T_{min} = 0. T_{max} устанавливаем равным двум периодам источника сигнала VS.

Maximum Time Step – максимальное приращение по времени.

Temperature – задание диапазона температур для анализа по маске T°_{max}, T°_{min}, шаг изменения температуры.

Operation Point – включение режима расчета по постоянному току перед началом каждого расчета переходных процессов.

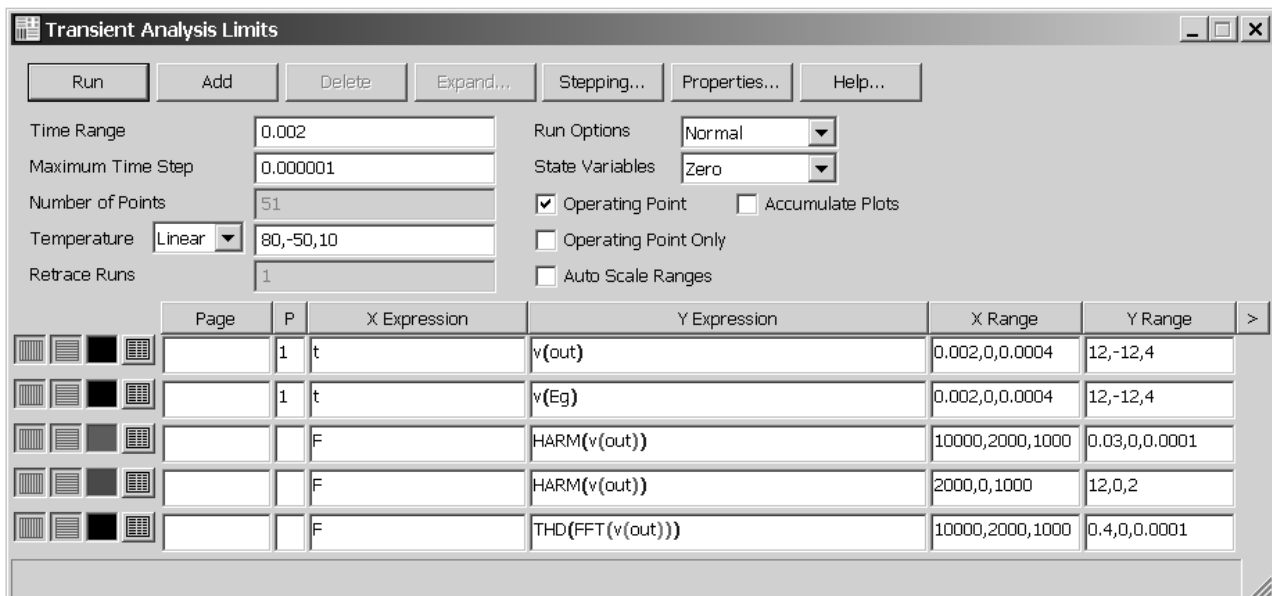


Рисунок 22

Построим осциллограммы напряжений на входе и выходе усилителя в одной координатной сетке. Для этого в столбце **P** ставим 1 для обоих графиков, по оси **X** откладывает время (2 мс – два периода для источника сигнала с частотой 1 кГц), по оси **Y** напряжения на источнике сигнала (**v(Eg)**) и на нагрузке (**v(out)**).

В графе **Temperature** задает диапазон от -50 до 80 с шагом 10.

Запускаем моделирование кнопкой **Run** (рис. 23).

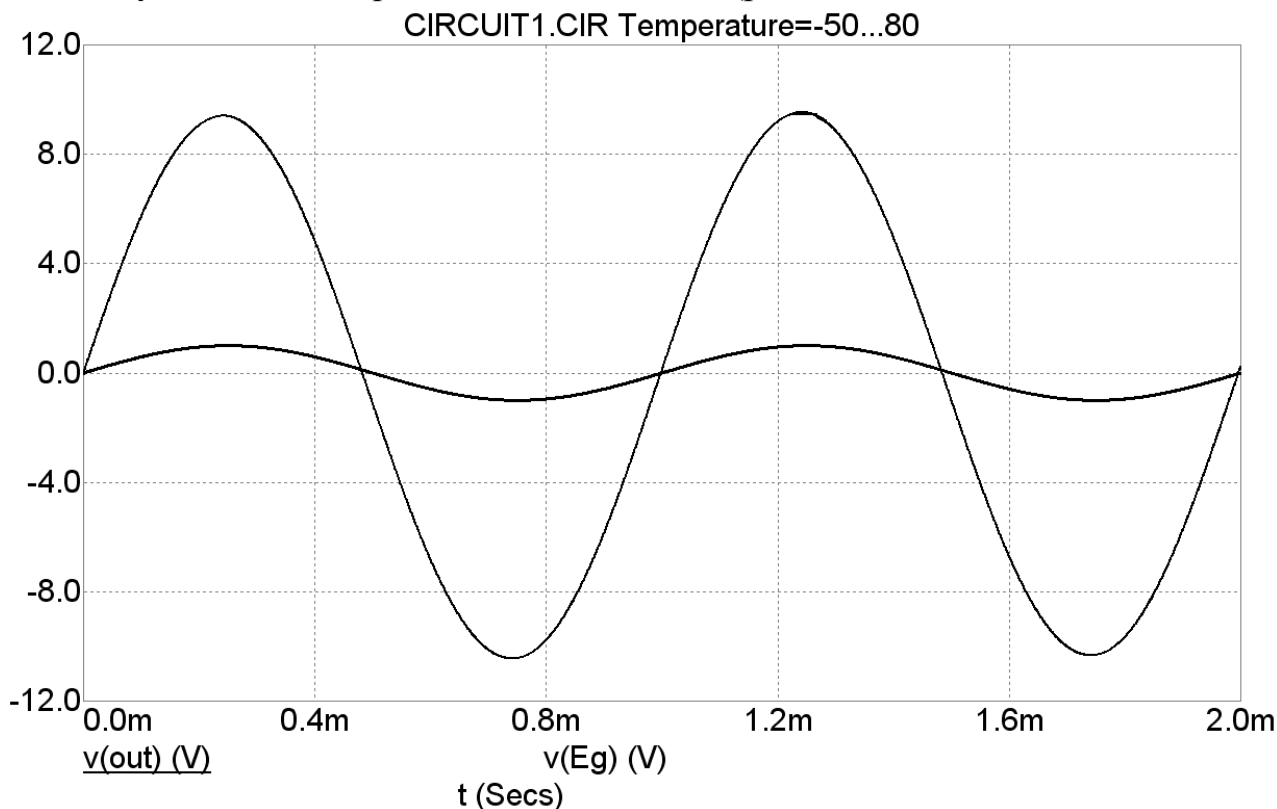



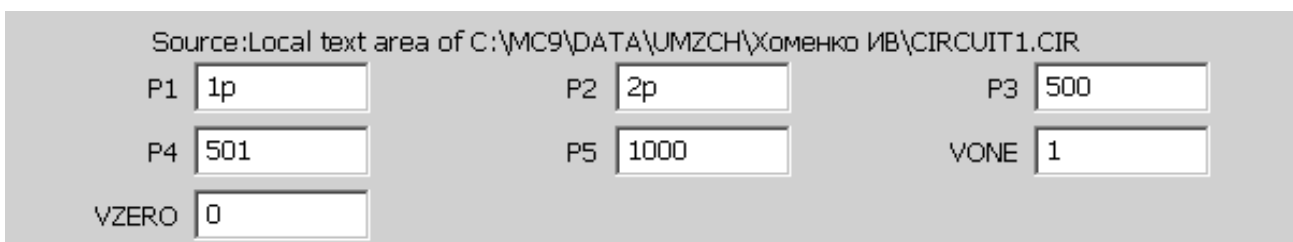
Рисунок 23

По полученным осциллограммам оценивают искажения формы сигнала на выходе и его амплитуду. В данном примере амплитуда выходного сигнала на нагрузке равна 10 В (как это и должно быть). Искажения сигнала возникают при температуре -50 и -40 градусов в виде визуально заметных ограничений верхней полуволны.

7. Построение переходной характеристики

Цель: определить быстродействие усилителя, максимальную скорость нарастания выходного напряжения, определение колебаний на графике переходного процесса установления выходного напряжения.

Воспользуемся режимом **Transient** для расчета переходной характеристики усилителя. Для этого нам потребуется применить модель источника единичного скачка напряжения. Его можно создать на основе источника импульсного напряжения **PULSE** (изображаемый значком ). В свойствах этого источника устанавливаем параметры так, как изображено на рис. 24.



Source: Local text area of C:\MC9\DATA\UMZCH\Хоменко ИВ\CIRCUIT1.CIR					
P1	1p	P2	2p	P3	500
P4	501	P5	1000	VONE	1
VZERO	0				

Рисунок 24

Здесь P1 – начало переднего фронта; P2 – начало по времени плоской вершины импульса; P3 – окончание по времени плоской вершины импульса; P4 – момент достижения уровня VZERO; P5 – период повторения; VONE – напряжение уровня «единицы»; VZERO – напряжение уровня «нуля» (данные напряжения могут принимать любые значения).

Подключаем источник к входу усилителя и выбираем **Analysis>Transient** (рис. 25).

Построим график переходной характеристики для температуры: 27° С. Для этого во вкладке температуры выбираем перечислимый тип List. Первый график – напряжение на нагрузке, второй – вспомогательная линия для определения времени регулирования (Трег – время достижения уровня 95% от установившегося значения). Коэффициент усиления равен 10 или 20дБ по напряжению (см. рисунки 16, 19), поэтому укажем величину равную 9,5.

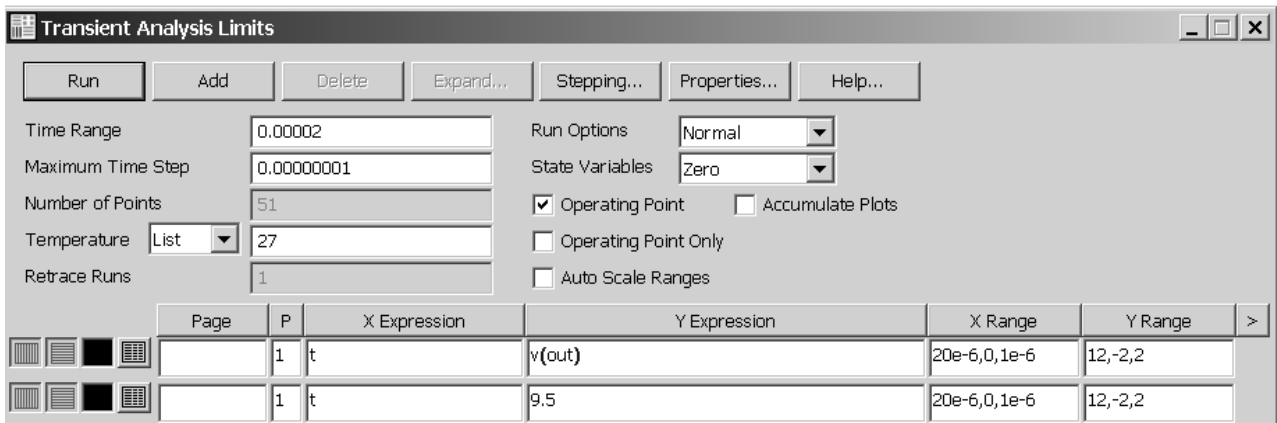


Рисунок 25

Запускаем моделирование кнопкой **Run** (рис. 15). График переходной характеристики определяет быстродействие цепи. Время регулирования (время, после которого переходной процесс не изменяется более чем на 5% от установившегося значения) составило 7,4 мкс для температуры 27 градусов. Скорость нарастания выходного напряжения составляет $9,5 \text{ В}/7,5 \text{ мкс} = 1,27 \text{ В}/\text{мкс}$. График переходной характеристики имеет колебания, не превосходящие 5% от установившегося значения с первого периода колебаний.

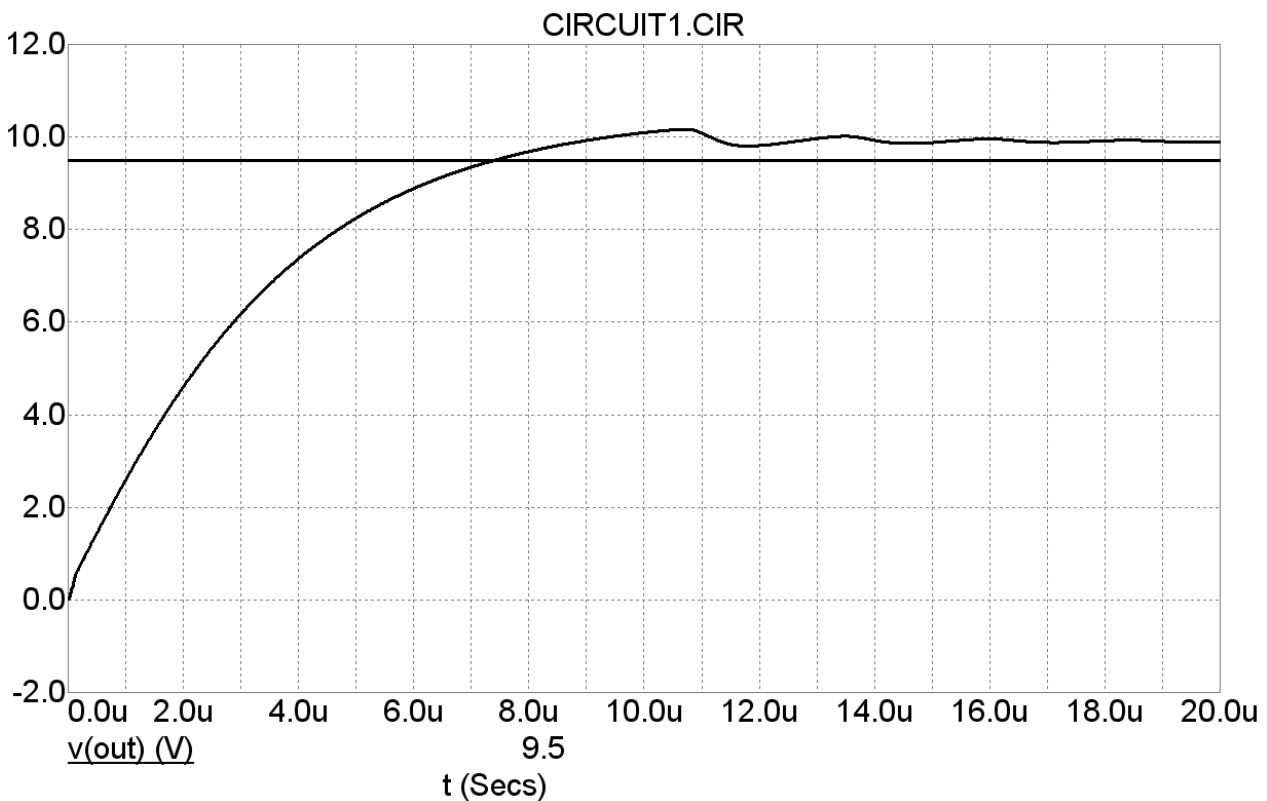


Рисунок 26

Для уменьшения колебаний можно увеличить ёмкость конденсатора обратной связи С4 с 12 пФ до 33 пФ. Результат этого изменения показан на рисунке 27. Скорость нарастания сигнала не изменилась. Вид колебаний на графике переходного процесса с одним переходом вверх через установившееся значение и одним переходом вниз является оптимальным [4].

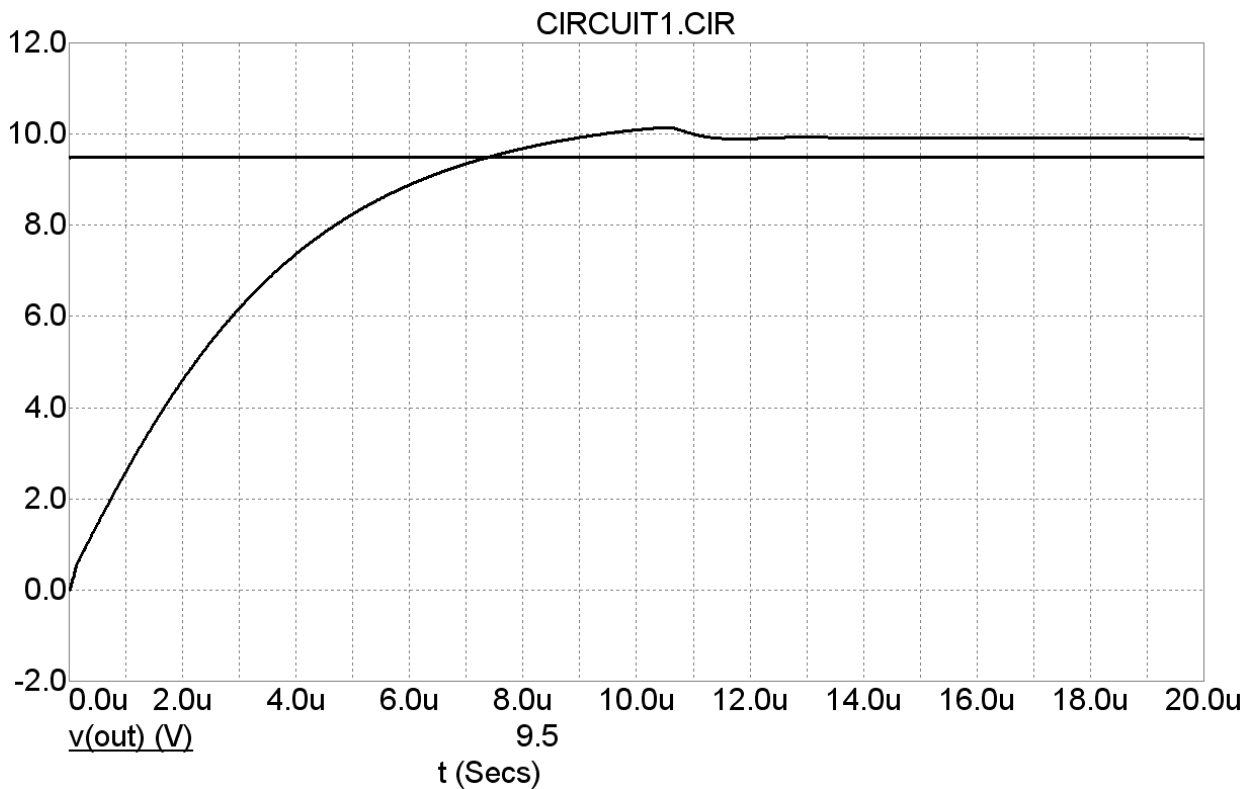


Рисунок 27

Таким же образом, как показано выше, необходимо проверить переходную характеристику на краях рабочего диапазона температур окружающей среды. Для этого в графе “**Temperature**” через запятую надо указать значения крайних температур, например 60, -10.

8. Анализ дрейфа тока покоя при вариации температуры

Цель: проверить ток покоя транзистора выходного каскада во всём диапазоне температур.

Транзисторы выходного каскада исследуемого усилителя работают в классе усиления АВ, с током покоя намного меньше максимального тока через нагрузку ($I_k \leq 0,1 \cdot I_{n_{max}}$). Анализ можно провести в режиме **DC** (рис. 28).

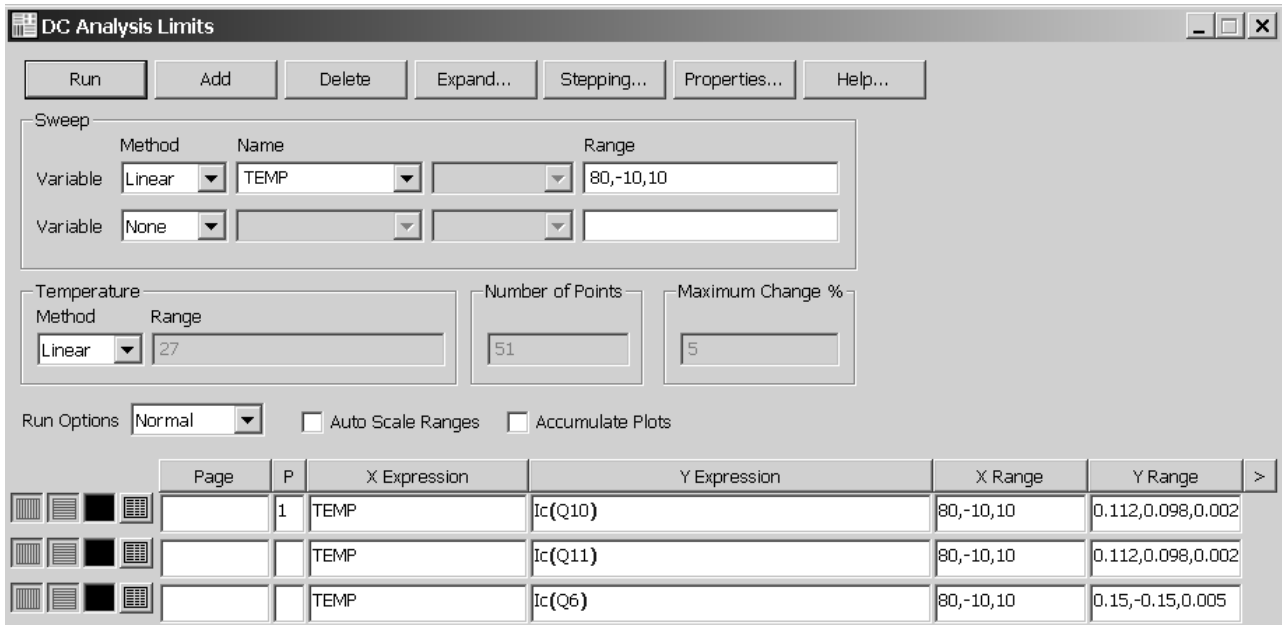


Рисунок 28

В графе **Variable 1** необходимо указать переменную “**TEMP**”, в графе **Range** – температурный диапазон. В графе **X Expression** указывается имя “**TEMP**”, а в графе **Y Expression** - интересующие токи коллекторов транзисторов. Запуск начала моделирования включается нажатием на пиктограмму кнопки “**Run**” (рис. 29).

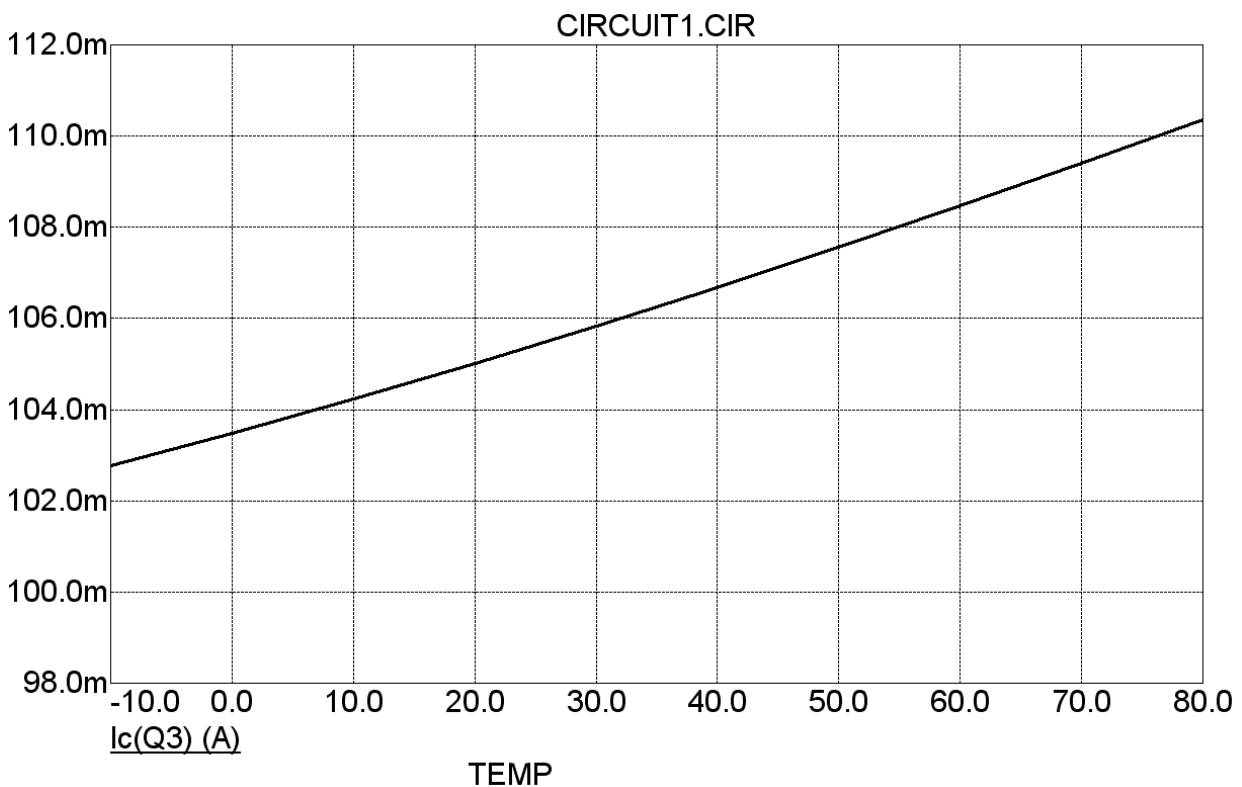


Рисунок 29

График, приведённый на рисунке 29 показывает что при изменении температуры от -10°C до $+80^{\circ}\text{C}$ ток покоя транзистора, работающего в выходном двухтактном каскаде изменяется не более чем на 10%.

9. Оценка входного сопротивления усилителя в частотном диапазоне

Цель: оценить согласование усилителя с источником сигнала во всём рабочем диапазоне частот.

Оценку входного сопротивления можно провести в режиме моделирования **AC Analysis Limits** (рис. 30).

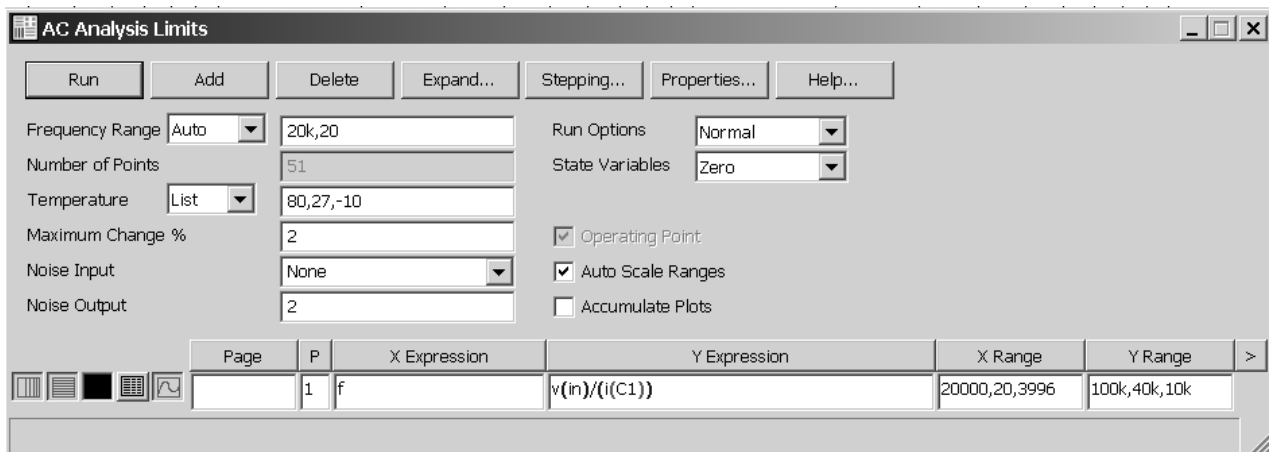


Рисунок 30

В графе **Frequency Range** следует указать границы звукового диапазона частот (20 Гц-20 кГц), В графе **Temperature** – 80, 27, -10 градусов. По оси **X** указываем переменную **f** (частота), по оси ординат – входное сопротивление усилителя через отношение напряжения на входе усилителя (**V(in)**) к току через входной разделительный конденсатор усилителя (**I(C1)**). На рисунке 31 показан график изменения входного сопротивления усилителя в звуковом диапазоне частот. Из графика видно, что на низких частотах входное сопротивление меняется более чем в 1,5 раза. Для уменьшения линейных искажений сигнала на частотах ниже 100 Гц следует увеличить ёмкость разделительного конденсатора C1. При этом желательно применять керамический конденсатор, как элемент с более стабильными параметрами, чем электролитический конденсатор.

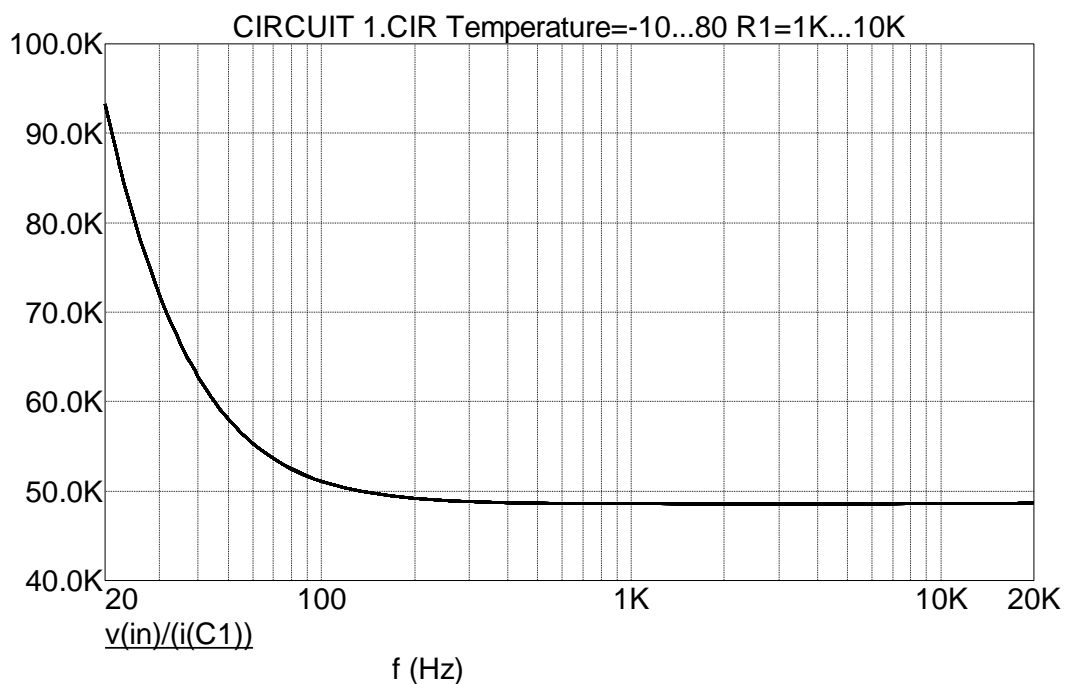


Рисунок 31

На рисунке 32 показана зависимость входного сопротивления усилителя в звуковом диапазоне частот при применении конденсатора C1 с ёмкостью 1 мкФ. Также стоит отметить стабильность входного сопротивления в температурном диапазоне.

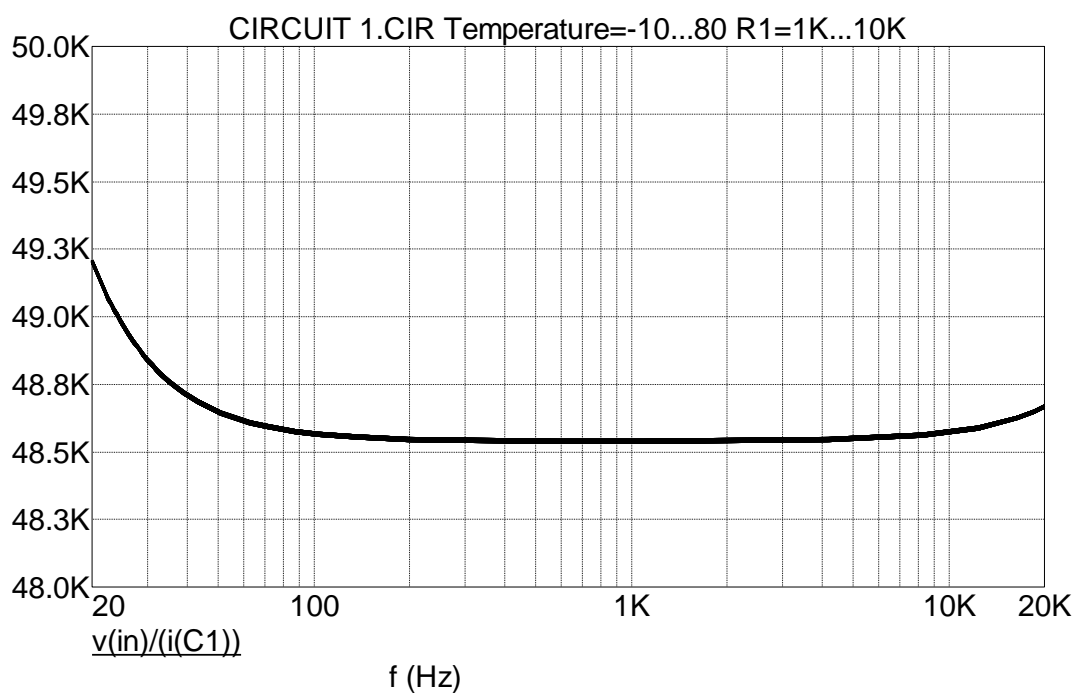


Рисунок 32

Результаты, показанные на рисунках 31 и 32 получены при изменении температуры (-10°, +27°, +80°) и внутреннего сопротивления источника сигнала от 1 кОм до 10 кОм. Входное сопротивление усилителя не зависит от внутреннего сопротивления источника сигнала. Изменение сопротивления R1, для проверки проводимого анализа, можно задать при помощи процедуры “Stepping” включаемой через окно задания параметров AC Analysis Limits (рис. 30).

Библиографический список

1. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap V. / М.: Изд-во: “СОЛОН”, 1997. – 280 с.
2. <http://www.spectrum-soft.com>.
3. Остапенко Г. С. Усилительные устройства: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и Связь, 1989. – 400 с.
4. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / М.: Наука, 1978. – 256 с.

Приложение

Транзисторы, применяемые в усилителях мощности низкой частоты и варианты их замены на транзисторы импортного производства

Транзистор	Аналог	Транзистор	Аналог
КТ368А9	BF599	КТ639В	BD136-16
КТ3102АМ	BC547А	КТ645Б	2N4400
КТ3102БМ	BC547В	КТ814Б	BD136, BC640
КТ3102ВМ	BC548В	КТ814В	BD138
КТ3102ДМ	BC549С	КТ814Г	BD140
КТ3107БМ	BC308А	КТ815Б	BD135, BC639
КТ3107ГМ	BC308А	КТ815В	BD137
КТ3107ДМ	BC308В	КТ815Г	BD139
КТ3107ЖМ	BC309В	КТ817Б	BD233
КТ3107ИМ	BC307В	КТ817В	BD235
КТ3107КМ	BC308С	КТ817Г	BD237
КТ3107ЛМ	BC309С	КТ818Б	2N6107, TIP42
КТ503Д	BC548С	КТ819Б	2N6288, TIP41

Содержание

Введение	3
1. Расчет схемы по постоянному току	5
2. Построение амплитудной характеристики (АХ)	9
3. Расчет коэффициента гармоник	14
4. Построение частотных характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ)	16
5. Построение годографа	21
6. Построение осциллограмм напряжений	22
7. Построение переходной характеристики	24
8. Анализ дрейфа тока покоя при вариации температуры	26
9. Оценка входного сопротивления усилителя в частотном диапазоне	28
Библиографический список	30
Приложение	30

Редактор
Компьютерная верстка

ИД № _____ от 12.01.2 ____

Сводный план 2012 г.
Подписано в печать 31. __. __. Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе. Усл. Печ. Л 2. Уч.-изд. Л. 2.
Тираж 100 экз. Заказ 387.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12
Типография Омгту