

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Знакомство с программой схемотехнического моделирования Micro-Cap

1 Цель работы

Целью данной лабораторной работы является знакомство с программой схемотехнического моделирования Micro-Cap, освоение графического редактора для ввода электрической схемы и исследование частотных и переходных характеристик усилительного каскада на биполярном транзисторе.

2 Теоретические сведения

Micro-Cap 12 представляет собой профессиональную программу аналогового, цифрового и смешанного моделирования и анализа цепей электронных устройств средней степени сложности.

Интуитивно понятный интерфейс, нетребовательность к вычислительным ресурсам персонального компьютера и большой спектр возможностей послужили основой популярности *Micro-Cap* среди радиолюбителей, студентов и преподавателей микроэлектроники. Алгоритм работы включает в себя создание электрической цепи в графическом редакторе, задание параметров анализа и изучение полученных данных. Программа самостоятельно составляет уравнения цепи и проводит моментальный расчет. Любое изменение схемы или параметров элементов приводит к автоматическому обновлению результатов.

Графический редактор опирается на библиотеки электронных компонентов, которые можно пополнять на основе экспериментальных или справочных данных с помощью встроенного модуля **Shape Editor**. Все номиналы и параметры элементов могут быть как неизменными, так и зависящими от температуры, времени, частоты, состояния схемы, параметров других компонентов. Анимированные детали (светодиоды, реле, семисегментные индикаторы и т.д.) изменяют состояние в соответствии с поступающими на них сигналами.

Моделирование включает в себя целый набор различных анализов: переходных процессов, передаточных характеристик по постоянному току, малосигнальных частотных характеристик, чувствительностей по постоянному току, нелинейных искажений, метода Монте-Карло и многих других.

Опытные пользователи могут создавать свои макромодели, которые облегчают имитационное моделирование без потерь информации. Допускается одновременно использовать различные стандарты элементов схемы, а полная

поддержка SPICE-моделей позволяет применять проекты из других программ (DesignLab, OrCAD, P-CAD).

По умолчанию программа устанавливается на диск C:\, после установки дистрибутива Micro-Cap 12 (в дальнейшем MC12) программа располагается в трех каталогах – корневом каталоге **MC12**, а также подкаталогах **DATA** и **LIBRARY**. В подкаталоге MC12\DATA хранятся файлы схем и результатов моделирования, в подкаталоге MC12\LIBRARY – файлы математических моделей компонентов.

Запуск программы MC12 производится двойным щелчком мыши по пиктограмме (ярлыку) на рабочем столе или из главного меню Windows «ПУСК».

После вызова MC12 на экране появится *основное окно программы* (рисунок 1), сверху которого помещена строка системного меню, в которой размещены имена основных команд: **File, Edit, Component, Windows, Options, Analysis, Design, Model, Help**. Ниже под этой строкой расположены панели инструментов с пиктограммами кнопок команд. Вызов большинства команд может быть выполнен с помощью трех равноценных вариантов: с помощью команды меню, комбинации «горячих» клавиш или кнопки на панели инструментов.

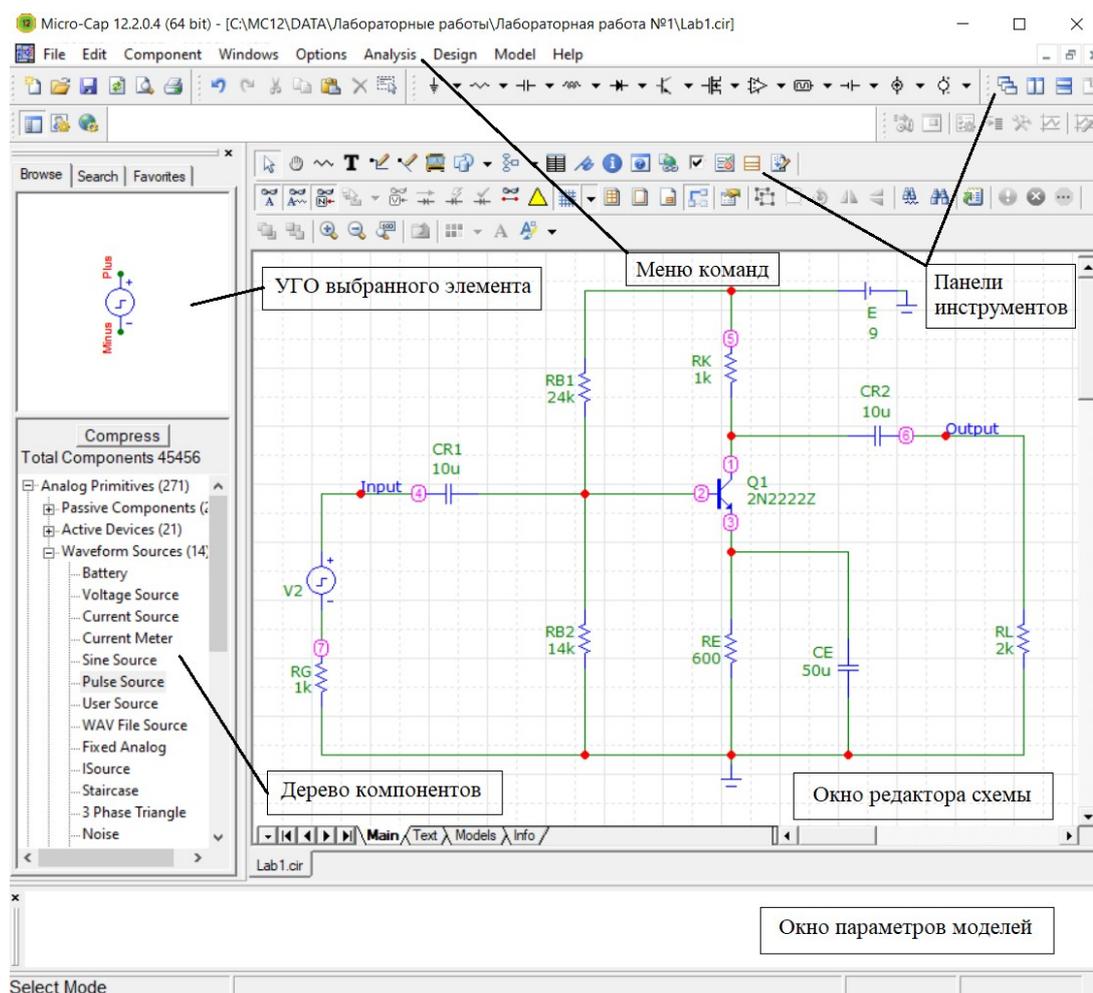


Рисунок 1 – Скриншот главного окна программы Micro-Cap 12

Окно программы на рисунке 1 разделено на две части выбором в меню Windows команды **Split Horizontal**, чтобы в нижнем окне можно было просмотреть (и при необходимости отредактировать) текстовое описание математических моделей компонентов схемы: в данном примере – источника импульсных сигналов и биполярного транзистора 2N2222Z.

После загрузки программы в системном меню главного окна MC12 необходимо выбрать команду системного меню **File > New...** (Ctrl+N), вызывающую диалоговое окно **New**, в котором предлагается сделать выбор для создания нового документа (создание чертежа схемы, файла с описанием макромодели, текстового файла с описанием модели, текстового файла с описанием схемы в формате языка SPICE, файла с библиотеками компонентов в формате языка PSPICE, бинарного файла библиотек или файла для создания и

оптимизации параметров моделей компонентов МС7). Для загрузки уже существующих документов (схем, моделей компонентов и др.) следует выбрать команду меню **File > Open** (Ctrl+O). При этом в окне редактора схем будет показано содержимое документа, который планируется открыть.

Чертеж схемы создается добавлением в окно редактора компонентов цепи из панели элементов (или системного меню) и их объединением между собой с помощью проводников или других элементов.

Компоненты, из которых строится схема, могут выбираться либо через главное системное меню **Components...**, либо через дерево компонентов (при этом можно пользоваться вкладкой поиска **Search**), либо через кнопки на

панели инструментов: , которые содержат наиболее часто используемые компоненты.

При добавлении каждого компонента в схему необходимо задать его *атрибуты*: позиционное обозначение (наименование в схеме), которое осуществляется автоматически, но впоследствии его можно изменить, номинальное значение и (или) модель. Для задания этих параметров открывается специальное окно (рисунок 2). Для всех компонентов Micro-Cap эти окна имеют примерно одинаковую структуру. Для большинства пассивных компонентов модель указывать не обязательно (хотя возможно и такое). Если указана модель, то активными становятся поля с ее параметрами в нижней части окна (на рисунке 2 не показаны).

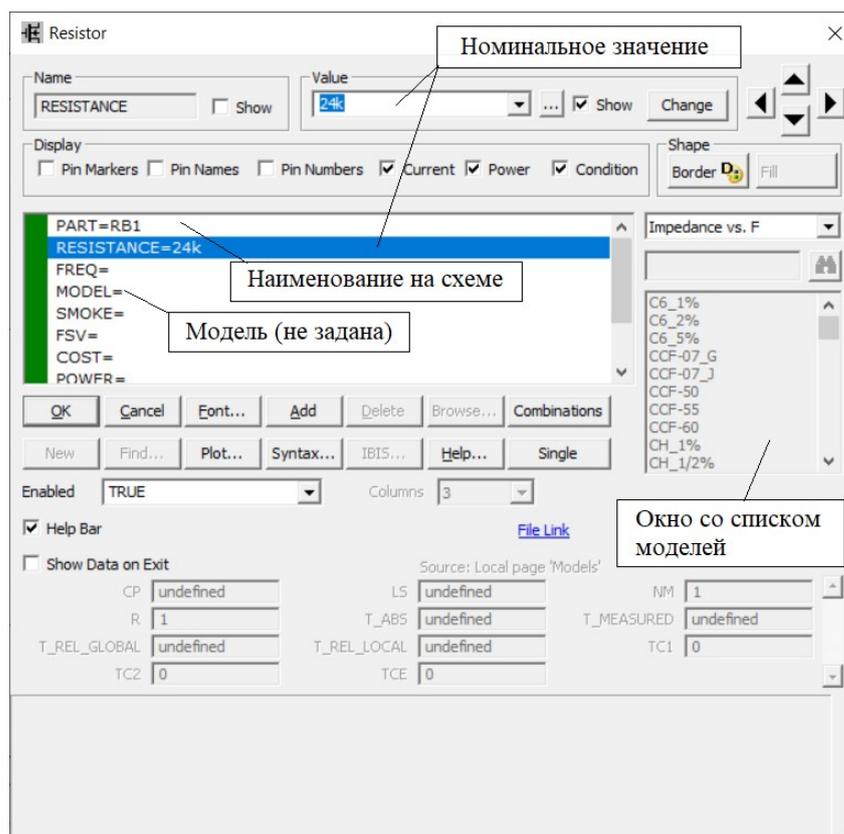


Рисунок 2 – Скриншот диалогового окна для ввода параметров пассивных элементов (в данном случае элемент – Resistor)

Ввод номинальных значений компонентов осуществляется в системе СИ, за исключением катушки с магнитным (нелинейным) сердечником. Номинальные значения компонентов задаются либо непосредственно в численном виде (например, 2600 или 10.2), либо в показательной форме (2.3E3 или 2.3e-3), либо условными буквенными обозначениями (50k или 1.25MEG).

Для всех активных и некоторых пассивных компонентов обязательно нужно задавать *модель*. Модель выбирается из списка в правой части окна. Если на этапе построения схемы непонятно, какую модель нужно использовать, или нужной модели нет в списке, можно использовать обобщенную модель для данного типа компонента — **\$Generic** (она, как правило, первая в списке). В дальнейшем ее можно будет заменить любой другой моделью.

При необходимости можно ввести *свою модель активного элемента*. Для этого следует параметру MODEL задать новое значение, не присутствующее в

списке, и отредактировать (изменить) все параметры новой модели. Также можно задать свою модель через текстовый файл формата SPICE. Для этого в окне **Models** (переключается вкладкой внизу окна редактора) необходимо набрать (или скопировать) текстовое описание новой модели.

При внесении *текста* в схему выбирается режим **Text Mode** (нажатием на специальную кнопку на панели инструментов или комбинацией клавиш Ctrl+T). Курсор мыши устанавливается в то место экрана, где будет выводиться текст, и нажимается левая кнопка мыши. После этого появляется диалоговое окно, в котором пользователь может ввести текст.

Удалить любой выделенный объект (или группу объектов) в окне редактора можно с помощью клавиши **Del**.

Перемещение объектов производится с помощью мыши после их выделения, при этом связи (проводники) между элементами разрываются. Если включить режим **Rubberbanding** (специальная кнопка на панели инструментов или комбинация клавиш Ctrl+Shift+R), то при перемещении элементов проводники не будут разрываться.

Для *переопределения параметров элементов схемы или текста* необходимо подвести курсор к редактируемому объекту и дважды нажать левую кнопку мыши. В появившемся диалоговом окне можно ввести новые значения параметров или исправить текст.

После создания чертежа схемы его следует *записать в файл*, используя кнопку сохранения или пункты горизонтального меню **File/Save** (Ctrl+S) или **File/Save as ...**. Программа запрашивает имя файла, который при сохранении будет помещен в текущий каталог (по умолчанию это каталог MC12\DATA). Расширение .CIR система присваивает файлу схемы автоматически.

После создания в редакторе программы Micro-Cap принципиальной схемы устройства переходят к *расчету характеристик (анализу)*, выбирая в разделе главного меню **Analysis** один из доступных видов моделирования:

- **Transient** (Alt+1) – расчет переходных процессов (анализ во временной области);
- **AC** (Alt+2) – расчет малосигнальных частотных характеристик (анализ в частотной области);
- **DC** (Alt+3) – расчет передаточных функций по постоянному току (при вариации постоянной составляющей одного или двух источников сигналов, вариации температуры или параметров моделей компонентов);
- **Dynamic DC** (Alt+4) – расчет по постоянному току и динамическое отображение на схеме узловых потенциалов, токов ветвей и рассеиваемой мощности;
- **Dynamic AC** (Alt+5) – расчет по переменному току и динамическое отображение на схеме узловых потенциалов, токов ветвей и рассеиваемой мощности для некоторой заданной частоты;
- **DC OP Worst Case** (Alt+6) – режим расчета по постоянному току с учетом разброса параметров элементов (режим наихудшего случая);
- **Transfer Function** (Alt+7) – расчет малосигнальных передаточных функций по переменному току;
- **Harmonic Distortion** (Alt+8) – расчет нелинейных искажений в режиме большого сигнала;
- **Intermodulation Distortion** (Alt+9) – расчет нелинейных искажений (интермодуляционных) при бигармоническом воздействии;
- **Stability** (Alt+0) – оценка устойчивости схемы (построение годографа Найквиста).

В режиме моделирования по переменному току (режим AC) сначала выполняется расчет схемы по постоянному току, затем *линеаризуются все нелинейные компоненты* (пассивные компоненты с нелинейными параметрами, диоды, транзисторы, нелинейные управляемые источники) и выполняется расчет комплексных амплитуд узловых потенциалов и токов ветвей. При линеаризации цифровые компоненты заменяются их входными и выходными

комплексными сопротивлениями, передача сигналов через них не рассматривается.

К входу схемы должен быть подключен *источник синусоидального SIN, импульсного сигнала PULSE или сигнала USER*, форма которого задается пользователем. Этот источник в данном режиме (AC) задает место подключения гармонического возмущения с частотой, значение которой варьируется согласно заданию на моделирование.

При расчете частотных характеристик комплексная амплитуда этого сигнала автоматически полагается равной 1 В, начальная фаза нулевая (независимо от того, какие заданы значения параметров модели источника сигнала), а частота меняется в пределах, задаваемых в параметрах диалогового окна **AC Analysis Limits**. Возможно также подключение независимых источников напряжения *V* или тока *I* в формате языка SPICE, для которых значения амплитуды и фазы могут быть заданы пользователем.

Переход в режим расчета частотных характеристик осуществляется командой **Analysis > AC (Alt+2)**. Задание на расчет формируется в диалоговом окне **AC Analysis Limits** (рисунок 3), вызываемом также из текущего режима анализа с помощью нажатия клавиши F9 или специальной кнопки на панели инструментов.

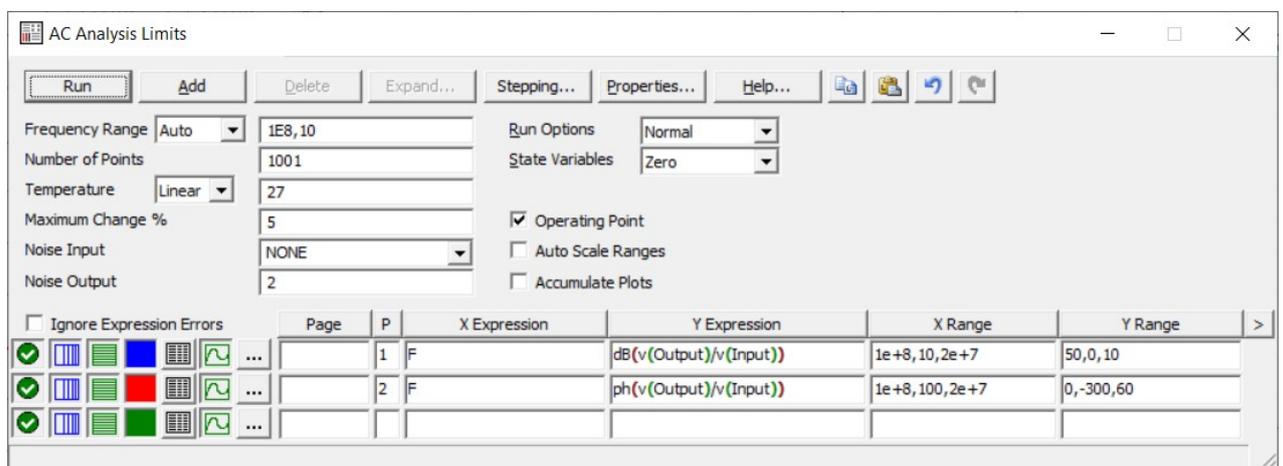


Рисунок 3 – Скриншот диалогового окна задания параметров моделирования в режиме AC

В режиме моделирования АС производится расчет *малосигнальных частотных характеристик* исследуемой цепи. Чаще всего в данном режиме проводят расчет коэффициента передачи цепи $K(f) = \frac{U_{\text{вых}}(f)}{U_{\text{вх}}(f)} = |K(f)| * e^{-\Phi(f)}$ в виде *амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $|K(f)|$ и фазочастотной характеристики (ФЧХ) $\Phi(f) = \arg K(f)$* ; *группового времени запаздывания (ГВЗ) $GD = \frac{-d\Phi}{df}$* – данная характеристика показывает скорость изменения ФЧХ (для линейной зависимости фазы от частоты график ГВЗ представляет собой прямую линию); зависимости *входного $Z_i(f)$ и выходного сопротивлений $Z_{\text{out}}(f)$* от частоты, а также *шумовые характеристики* схемы (шумовое напряжение VNOISE или шумовой ток INOISE).

Очень полезна возможность проведения *многовариантного анализа при вариации любого параметра компонента схемы или его модели*. Для этого в диалоговом окне задания параметров **AC Analysis Limits** нажатием на кнопку **Stepping...** (F11) или специальную на пиктограмму открывают диалоговое окно Stepping для задания варьируемых параметров (рисунок 4).

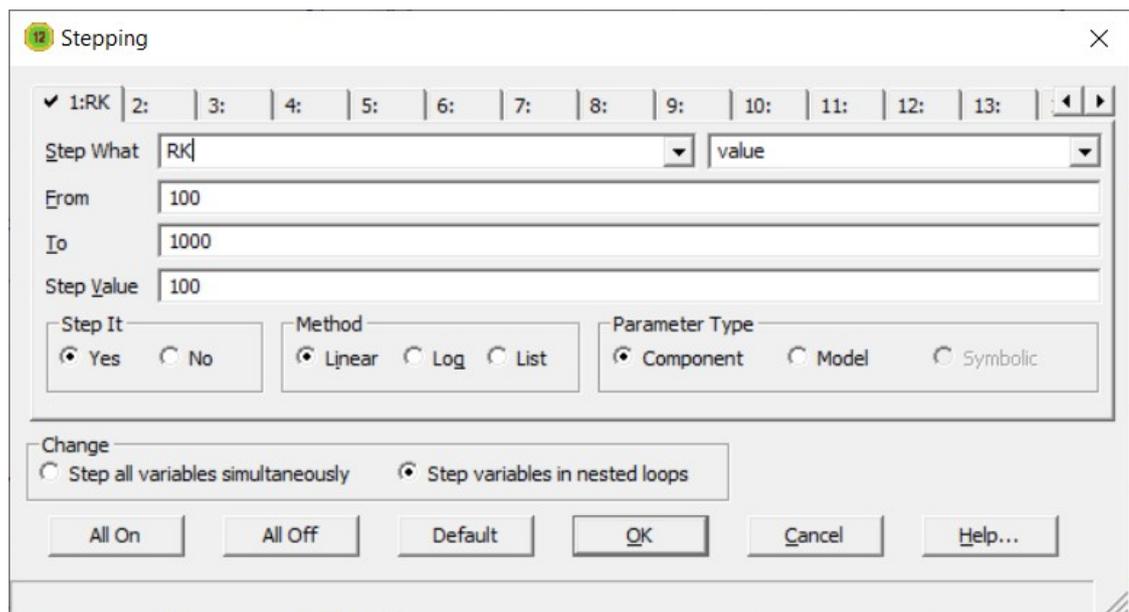


Рисунок 4 – Скриншот диалогового окна Stepping для ввода параметров вариации модели

Сначала в графе **Parameter Type** выбирают тип варьируемого параметра:

- *Component* – значение параметра компонента схемы;
- *Model* – параметр математической модели компонента;
- *Symbolic* – значение параметра, определенного по директиве `.define`.

Затем в строке **Step What** указывают имя варьируемого компонента, на последующих строках – пределы его изменений, а в области **Step It** устанавливают флажок в положение **Yes**.

Режим анализа переходных процессов (режим **Transient**) запускается при выборе команды системного меню **Analysis > Transient (Alt+1)**. В данном режиме производится *анализ переходных процессов при воздействии на схему сигналов различной формы*. Анализ переходных процессов позволяет наглядно проследить и исследовать физические процессы, происходящие в схеме (от начального до установившегося значения). Он основан на численном решении системы дифференциальных или конечно-разностных уравнений, как правило, с автоматически меняющимся шагом во времени.

В качестве расчетных переменных принимаются напряжение в узлах (либо между двумя узлами), ток, текущий через ветвь между двумя узлами, мощность или энергия в заданной ветви схемы.

Перед началом моделирования необходимо задать *входной источник (или источники) сигнала*.

При входе в режим анализа переходных процессов на экран выводится диалоговое окно **Transient Analysis Limits** для задания параметров моделирования (рисунок 5). Данное диалоговое окно также можно вызвать нажатием на специальную кнопку или клавишу F9.

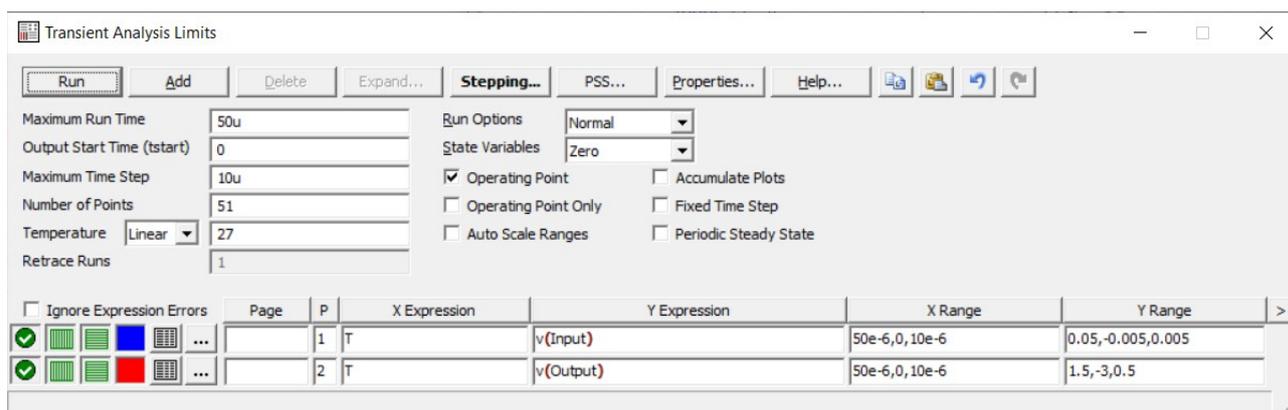


Рисунок 5 – Скриншот диалогового окна задания параметров моделирования в режиме Transient

После выполнения команды **Run** (F2) начинается моделирование схемы, и в процессе получения результатов на экран выводятся *графики заданных функций*. После нажатия на клавишу P (**Pause**) в нижней части графического окна справа от обозначения каждой переменной выводятся их *текущие численные значения*. Этот способ удобен для контроля моделирования медленно протекающих процессов, диапазон изменения которых заранее не известен (так что текущие результаты могут быть не видны на экране). Однако моделирование при этом значительно замедляется, поэтому после просмотра наиболее интересного фрагмента данных следует выключить этот режим повторным нажатием клавиши P.

3 Постановка задачи

Вариант №14

1. Ввести в графическом редакторе Micro-CAP схему усилительного каскада, принципиальная схема которого представлена на рисунке 6.

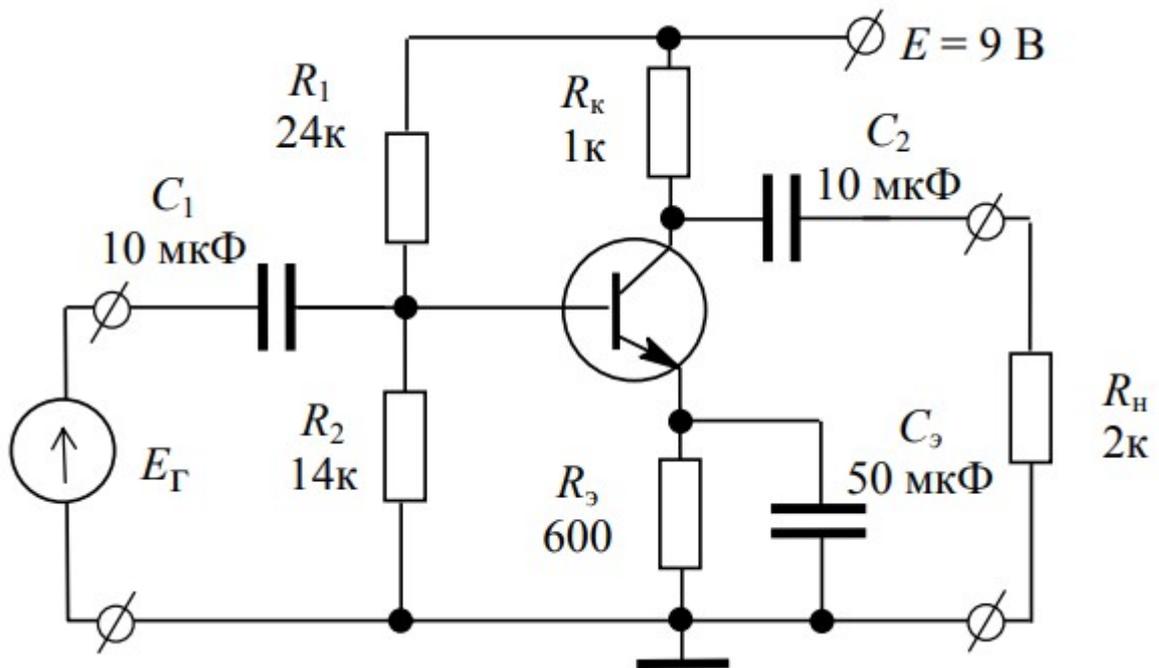


Рисунок 6 – Схема усилительного каскада на транзисторе 2N2222Z

2. Выполнить анализ усилительного каскада по переменному току (режим AC) Исследовать влияние отдельных элементов схемы на частотные характеристики, используя процедуру Stepping. По графикам качественно оценить влияние варьлируемых элементов на АЧХ и ФЧХ каскада.

Варьлируемые элементы схемы – R_k и C_1 .

3. Получить вид переходных процессов на входе и выходе каскада (режим Transient) при подключении ко входу источника синусоидального напряжения с параметрами:

- частота $F = 5$ кГц;
- амплитуда сигнала $A = 0,01$ В;

- уровень постоянной составляющей $DC = 0 \text{ В}$;
 - внутреннее сопротивление источника $R_G = 1 \text{ кОм}$.
4. Построить переходные процессы на входе и выходе каскада (режим Transient) при подключении к входу усилителя источника импульсных сигналов. Исследовать влияние заданных варьируемых элементов схемы на форму переходного процесса, используя процедуру Stepping.

Параметры источника импульсных сигналов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры источника импульсных сигналов STEP

Задержка начала импульсов t_0 , (мкс)	Длительность переднего фронта t_1 , (мкс)	Длительность плоской вершины импульса t_2 , (мкс)	Длительность заднего фронта t_3 , (мкс)	Период повторения импульсов T , (мкс)	Амплитуда импульсного сигнала A , (В)
1,5	0,4	4	0,3	10	0,05

4 Ход выполнения работы

Согласно заданию №1, в графическом редакторе Micro-Cap 12 введена схема усилительного каскада (рисунок 7).

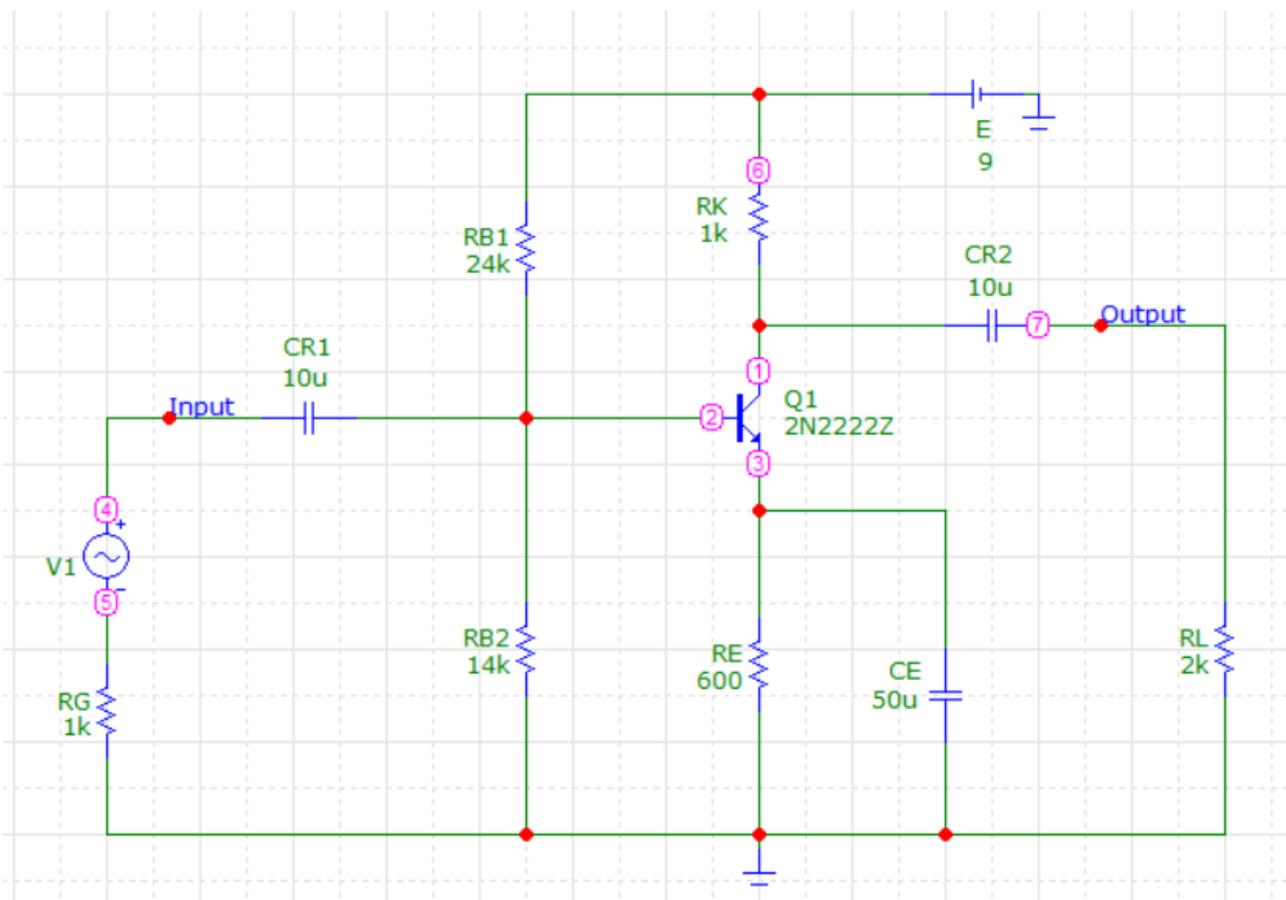


Рисунок 7 – Скриншот схемы усилительного каскада на транзисторе 2N2222Z

Согласно заданию №2, произведен анализ усилительного каскада по переменному току (режим AC).

Для этого выполнены следующие шаги:

- 1) сочетанием клавиш Alt+2 открыто диалоговое окно AC Analysis Limits;
- 2) в данном диалоговом окне указаны параметры проведения анализа X Expression (переменная частоты F), Y Expression (модуль передаточной функции в децибелах – для АЧХ, фаза передаточной функции по напряжению

между узлами «Output» и «Input» – для ФЧХ), максимальное и минимальное значение переменной X на графике X_Range, а также максимальное и минимальное значение переменной Y на графике Y_Range, как показано на рисунке 8;

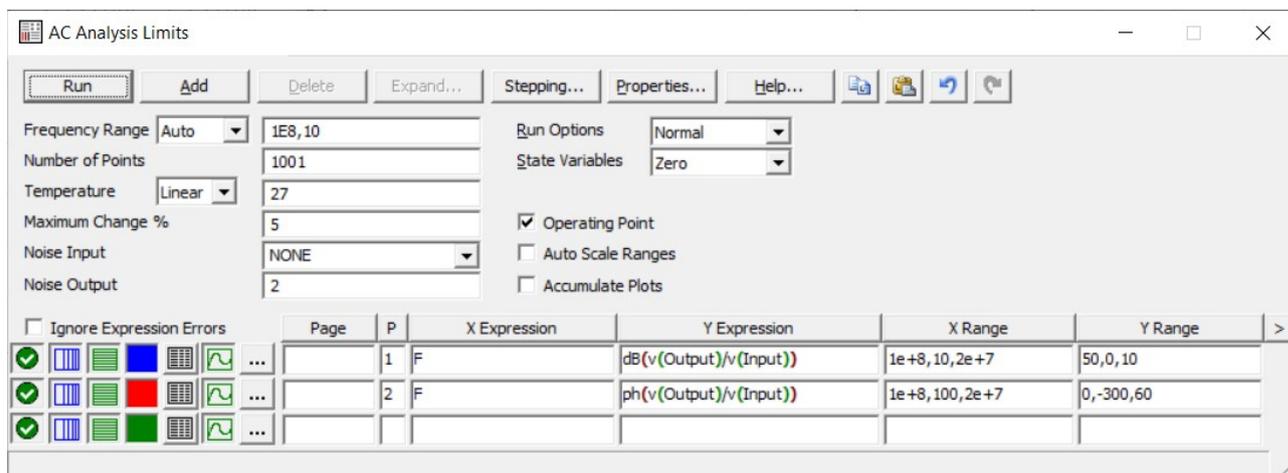


Рисунок 8 – Скриншот диалогового окна AC Analysis Limits с заданными параметрами расчета частотных характеристик

3) нажатием на кнопку Run диалогового окна AC Analysis Limits запущено моделирование.

Результаты анализа усилительного каскада по переменному току представлены на рисунке 9.

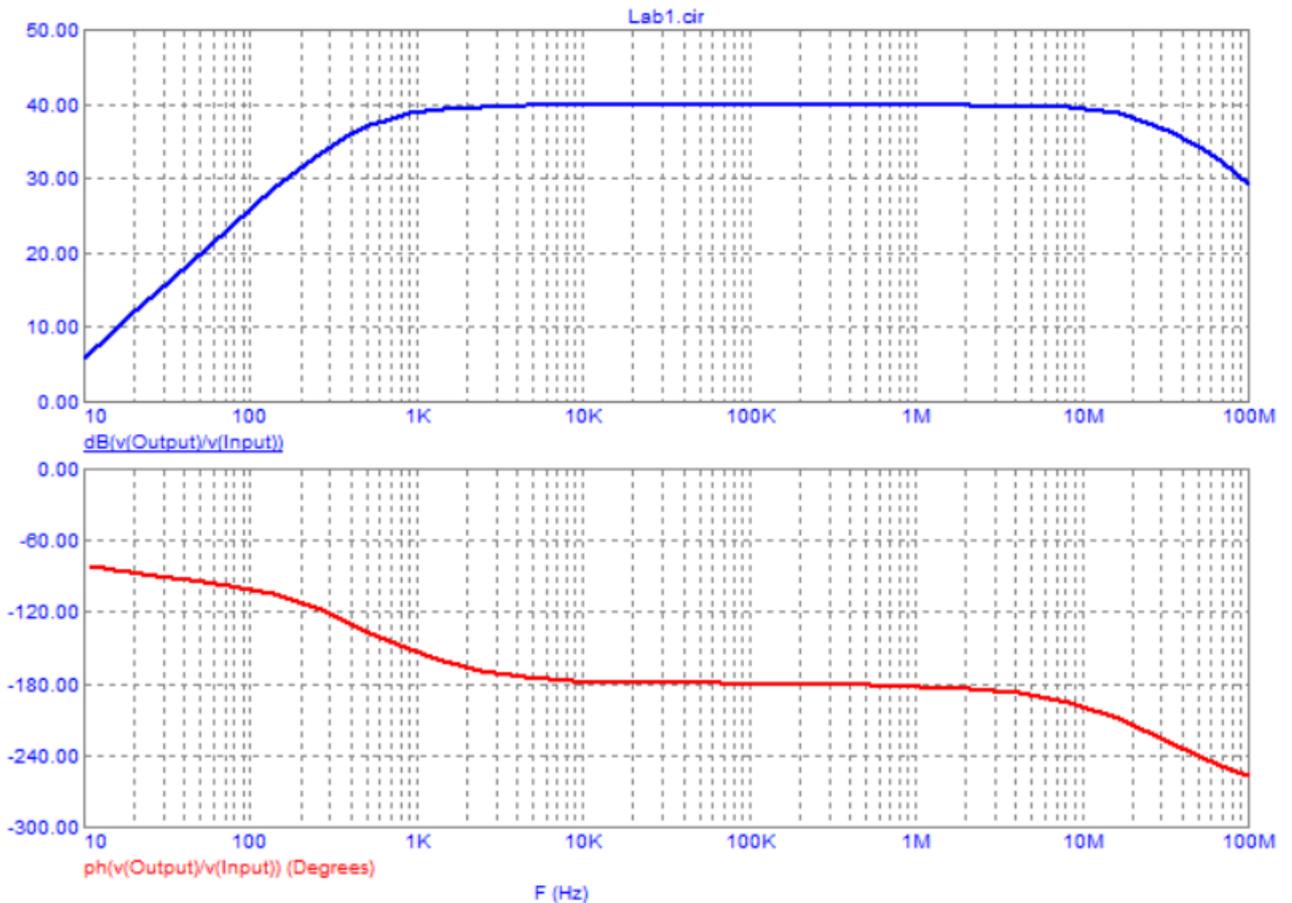


Рисунок 9 – Графики АЧХ и ФЧХ усилительного каскада

Далее исследовано влияние отдельных элементов схемы R_k и C_1 на частотные характеристики.

Для этого использована процедура Stepping:

- 1) в диалоговом окне AC Analysis Limits выбрана опция Stepping...;
- 2) в строке Step What выбраны имена варьируемых параметров схемы (в данном случае R_k и C_1), как показано на рисунках 10 – 11;
- 3) указаны начальные и конечные значения варьируемых параметров, а также шаг их изменения;
- 4) выбран тип варьируемых параметров (в данном случае для обоих параметров указан тип Component – значение параметра компонента схемы);
- 5) в разделе Step It флажок переведен в положение Yes;
- 6) подтверждены вышеописанные изменения нажатием на кнопку «ОК» диалогового окна Stepping;

7) нажатием на кнопку Run в разделе AC главного меню программы запущен процесс моделирования.

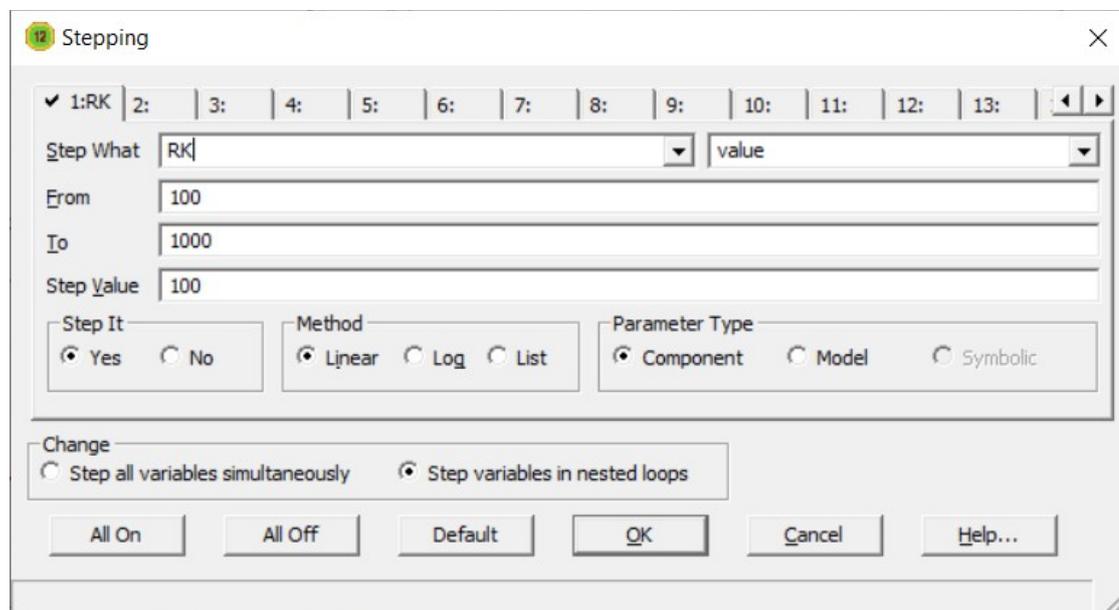


Рисунок 10 – Скриншот диалогового окна Stepping с указанными параметрами проведения многовариантного анализа при вариации элемента схемы R_K

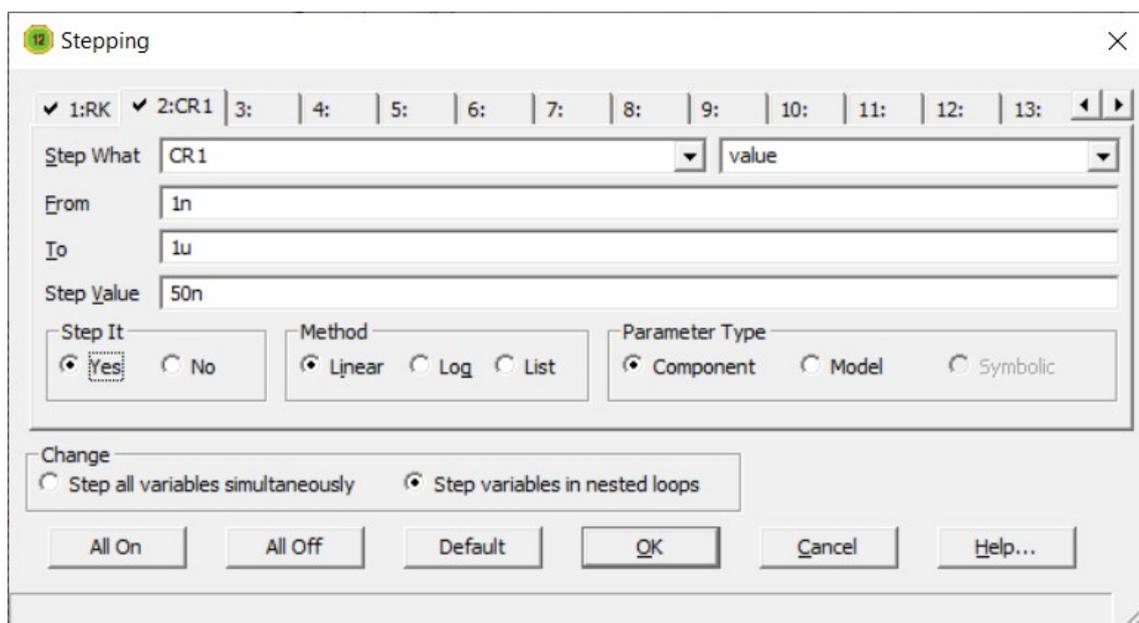


Рисунок 11 – Скриншот диалогового окна Stepping с указанными параметрами проведения многовариантного анализа при вариации элемента схемы C_1

Результаты проведения многовариантного анализа частотных характеристик усилительного каскада при вариации элементов схемы R_k и C_1 приведены на рисунках 12 – 13. Построенные графики позволяют оценить влияние варьируемых элементов схемы на АЧХ и ФЧХ усилительного каскада. По графику АЧХ усилителя можно определить максимальное значение коэффициента усиления, полосу пропускания (нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания обычно измеряются на уровне -3 дБ от максимального значения АЧХ), а также неравномерность АЧХ в заданной полосе частот. По графику ФЧХ усилителя определяется нелинейность фазы в заданном интервале частот (отклонение от линейной зависимости).

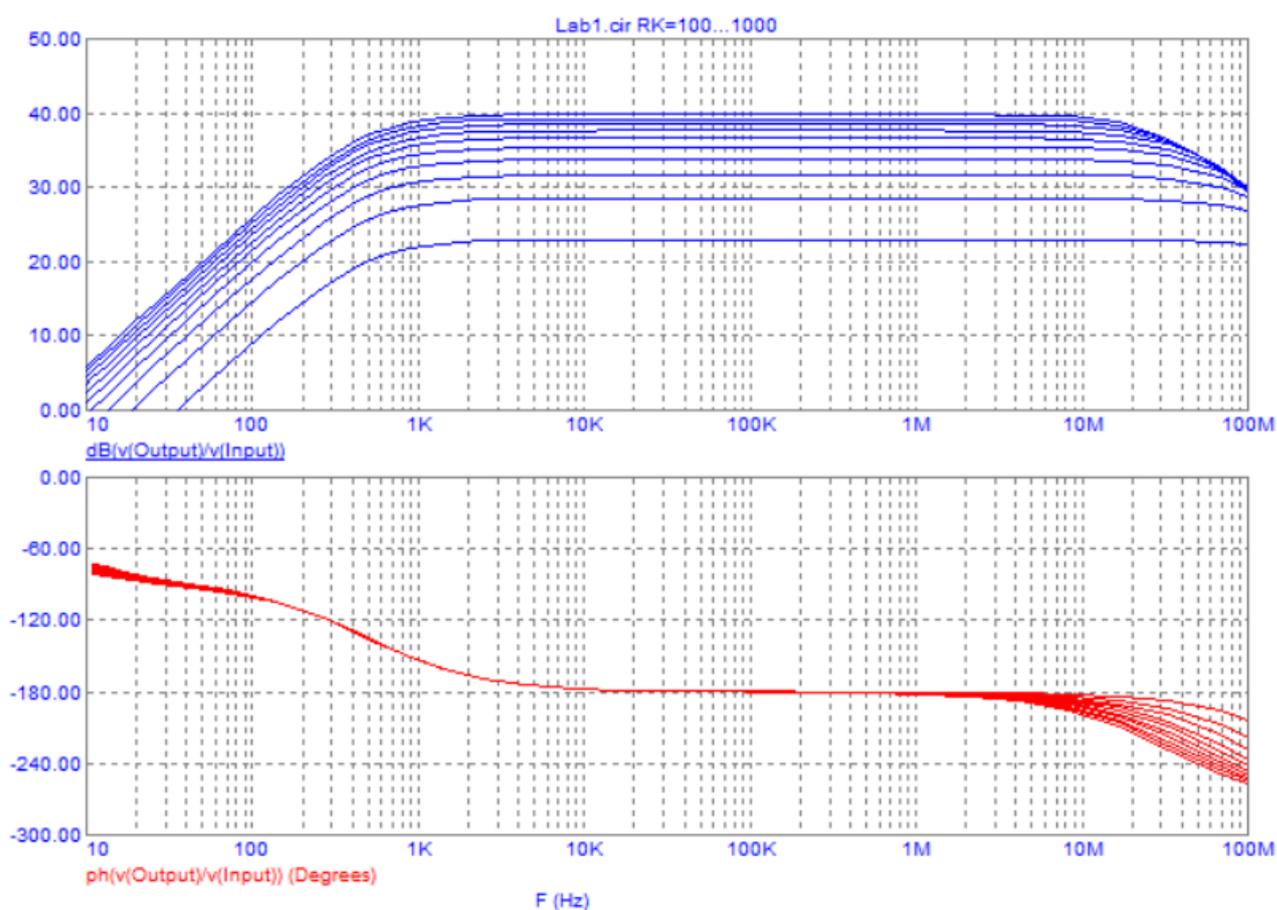


Рисунок 12 – Влияние элемента схемы R_k на усилительный каскад

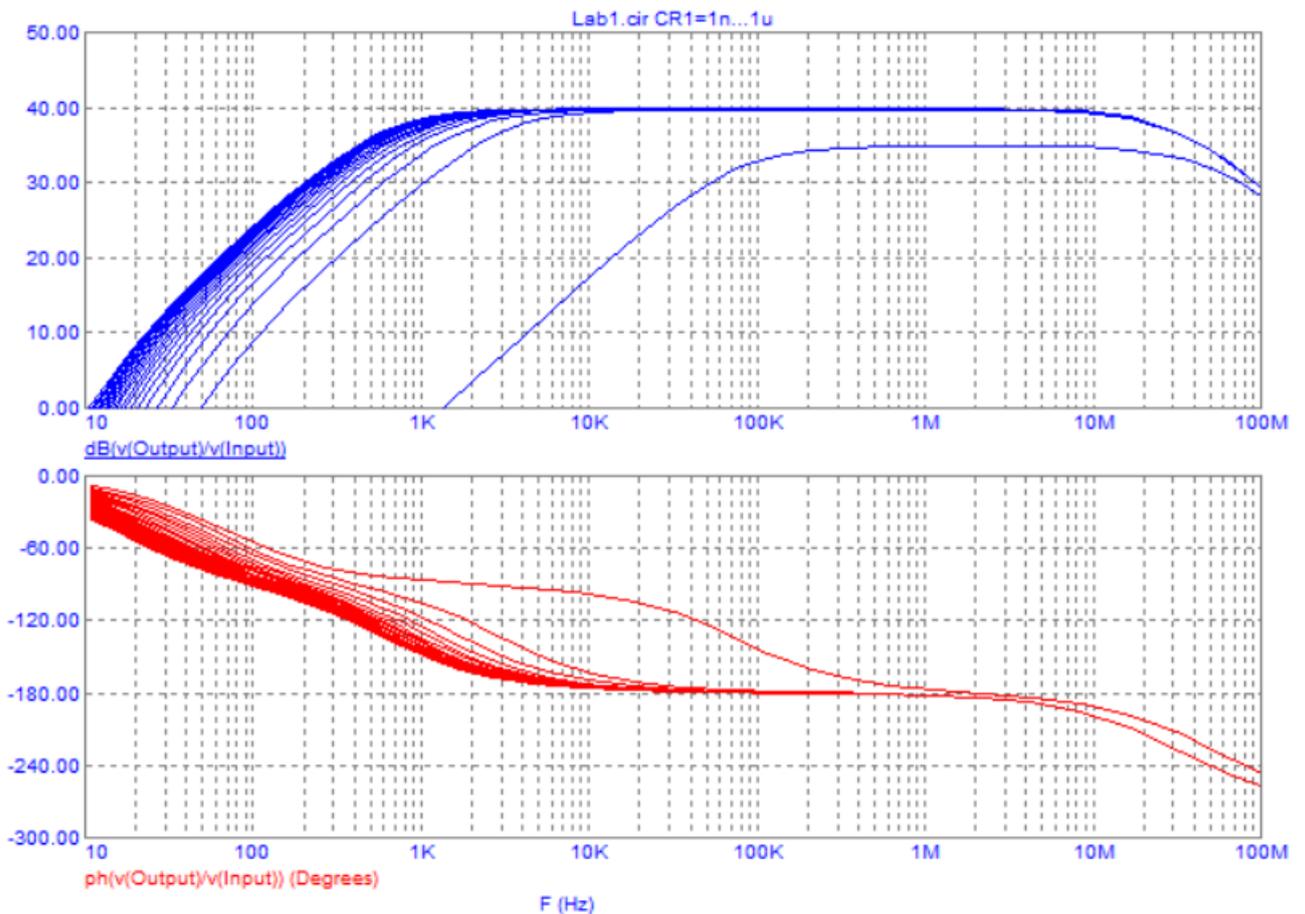


Рисунок 13 – Влияние элемента схемы C_1 на усилительный каскад

Согласно заданию №3, получен вид переходных процессов на входе и выходе каскада (режим Transient) при подключении к входу источника синусоидального напряжения с параметрами:

- частота $F = 5\text{кГц}$;
- амплитуда сигнала $A = 0,01\text{ В}$;
- уровень постоянной составляющей $DC = 0\text{ В}$;
- внутреннее сопротивление источника $R_G = 1\text{ кОм}$.

Для этого проделаны следующие шаги:

1) к входу усилительного каскада подключен источник синусоидального напряжения $V1$ с вышеперечисленными параметрами, как показано на рисунке 14;

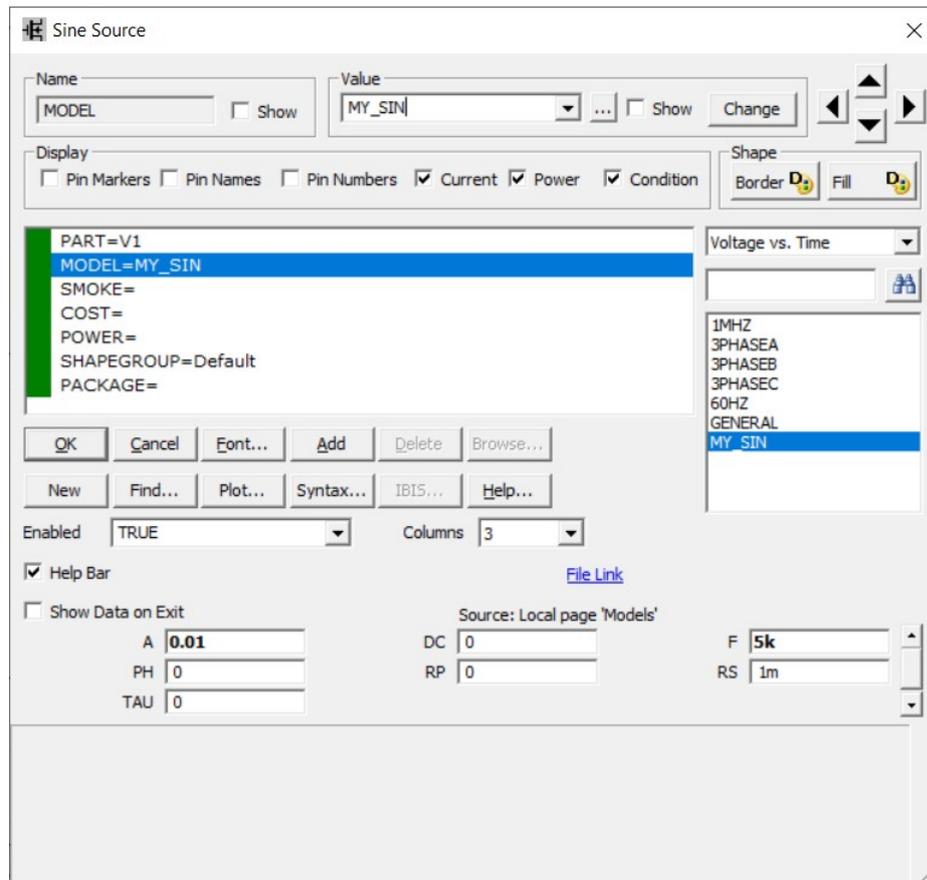


Рисунок 14 – Скриншот подключения источника синусоидального напряжения к входу усилительного каскада

2) сочетанием клавиш Alt+1 открыто диалоговое окно Transient Analysis Limits (рисунок 15);

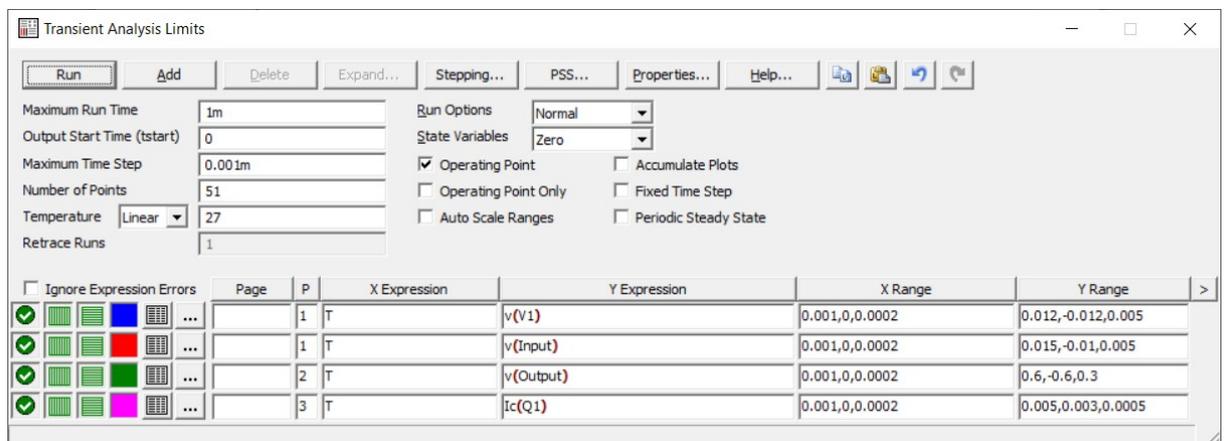


Рисунок 15 – Скриншот диалогового окна Transient Analysis Limits с заданными параметрами расчета переходных процессов на входе и выходе каскада

3) в данном диалоговом окне указаны параметры проведения анализа X Expression (переменная времени T), Y Expression (входные напряжения V_1 и V(Input), напряжение на выходе каскада V(Output), ток коллектора транзистора $I_c(Q_1)$), максимальное и минимальное значение переменной X на графике X_Range, а также максимальное и минимальное значение переменной Y на графике Y_Range;

4) нажатием на кнопку Run диалогового окна Transient Analysis Limits запущено моделирование.

Результаты построения переходных процессов на входе и выходе усилительного каскада при подключении к входу источника синусоидального напряжения представлены на рисунке 16.

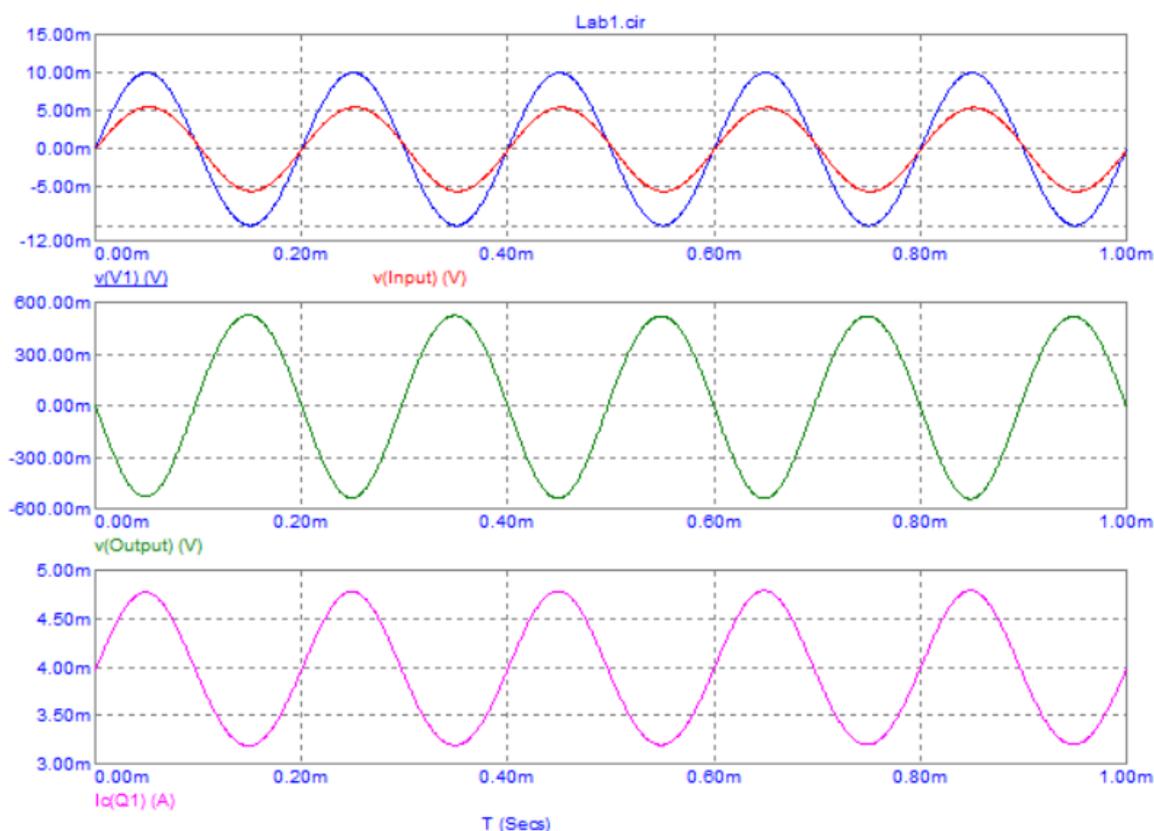


Рисунок 16 – Скриншот графиков переходных процессов на входе и выходе усилительного каскада при подключении к входу источника синусоидального напряжения

Согласно заданию №4, построены переходные процессы на входе и выходе усилительного каскада (режим Transient) при подключении к входу усилителя источника импульсных сигналов.

Для этого выполнена следующая последовательность действий:

5) к входу усилителя подключен источник импульсных сигналов V2, параметры которого предварительно пересчитаны из длительностей (таблица 1) в соответствующие задержки от начала импульсов, как показано на рисунке 17;

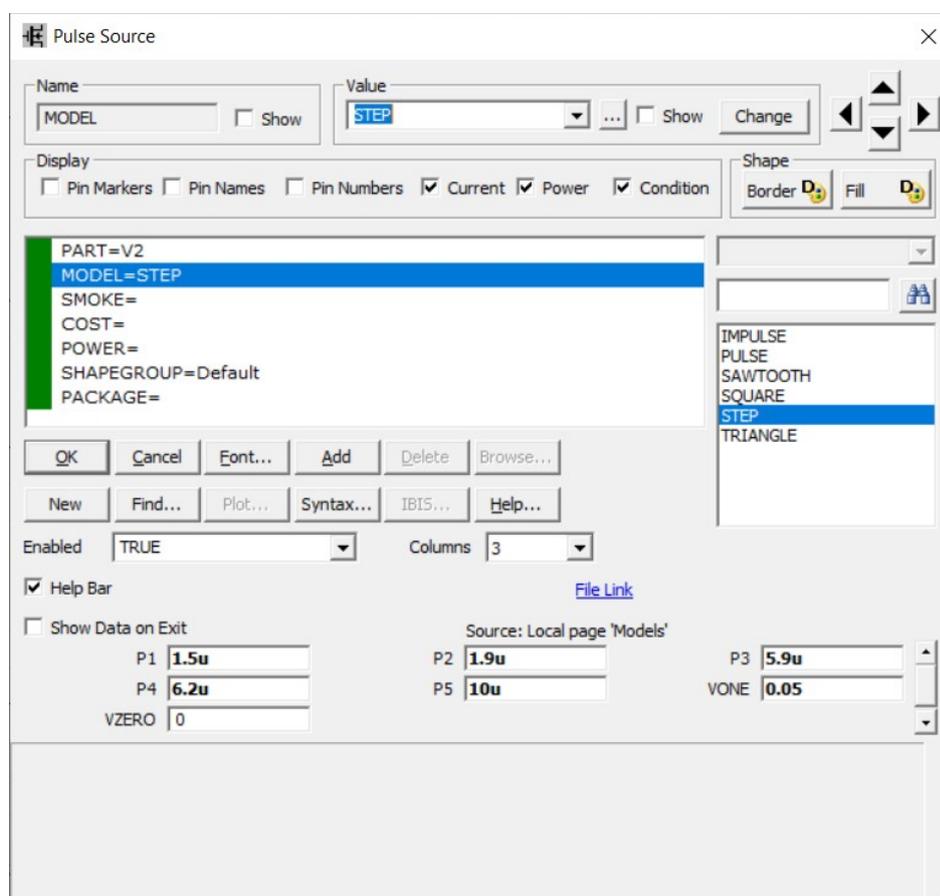


Рисунок 17 – Скриншот подключения источника импульсных сигналов к входу усилителя

6) сочетанием клавиш Alt+1 открыто диалоговое окно Transient Analysis Limits (рисунок 18);

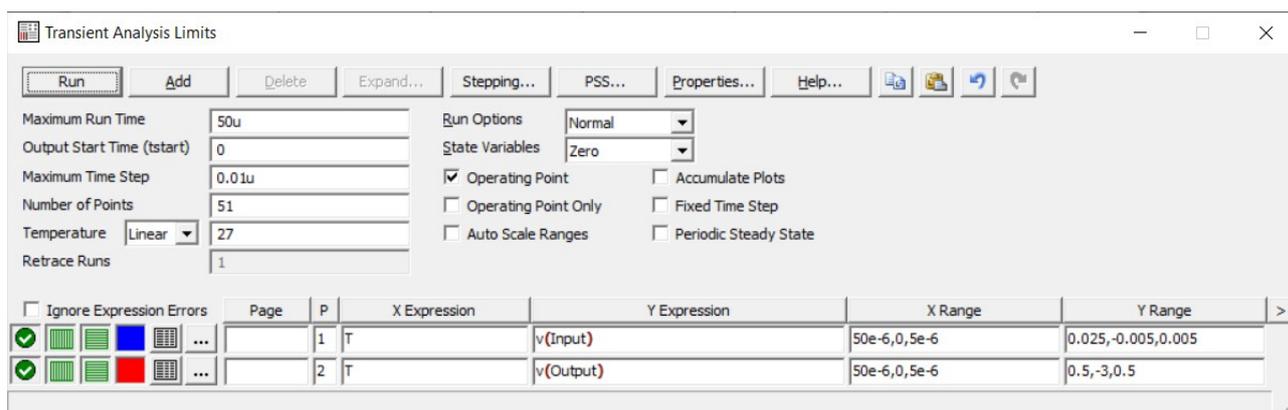


Рисунок 18 – Скриншот диалогового окна Transient Analysis Limits с заданными параметрами расчета переходных процессов на входе и выходе каскада

7) в данном диалоговом окне указаны параметры проведения анализа X Expression (переменная времени T), Y Expression (входное напряжения V(Input) и напряжение на выходе каскада V(Output)), максимальное и минимальное значение переменной X на графике X_Range, а также максимальное и минимальное значение переменной Y на графике Y_Range;

8) нажатием на кнопку Run диалогового окна Transient Analysis Limits запущено моделирование.

Результаты построения переходных процессов на входе и выходе усилительного каскада при подключении к входу усилителя источника импульсных сигналов представлены на рисунке 19.

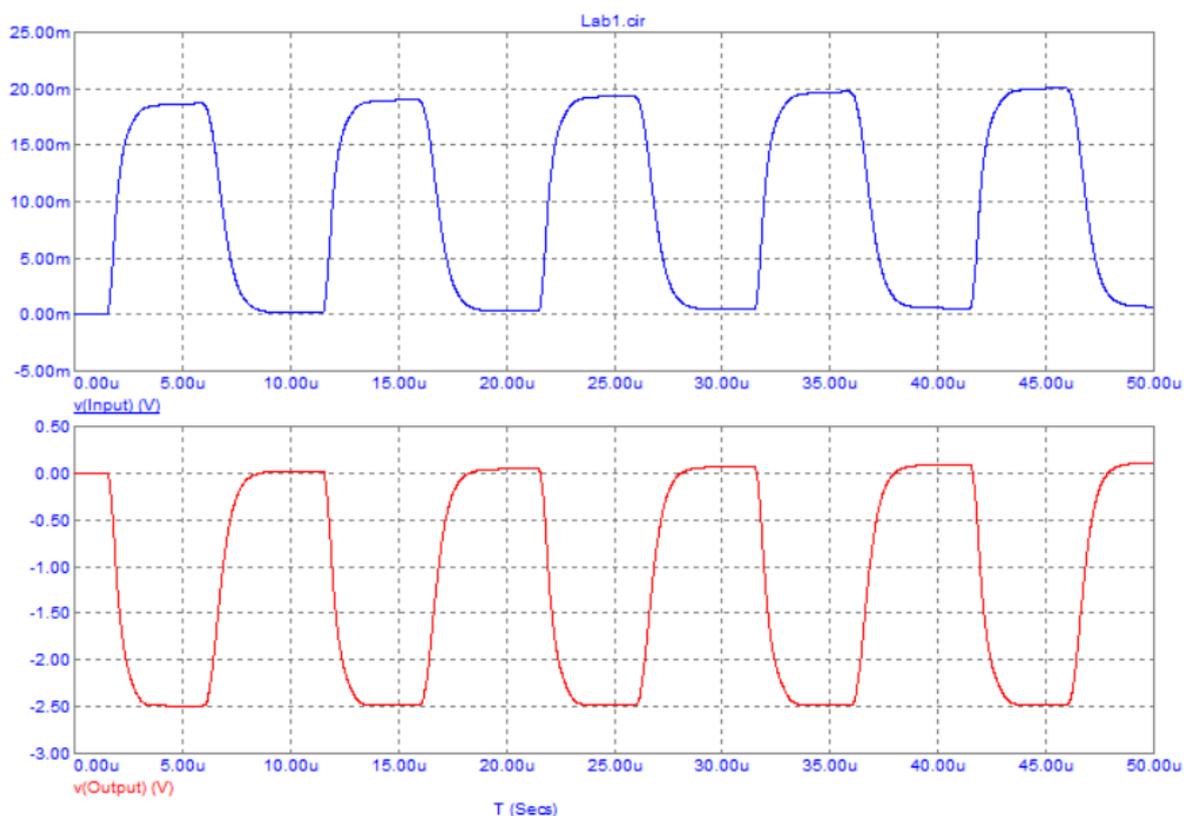


Рисунок 19 – Скриншот графиков переходных процессов на входе и выходе усилительного каскада при подключении к усилителю источника импульсных сигналов

Затем исследовано влияние заданных варьируемых элементов схемы R_K и C_1 на форму переходного процесса.

Для этого использована процедура Stepping:

- 8) в диалоговом окне Transient Analysis Limits выбрана опция Stepping...;
- 9) в строке Step What выбраны имена варьируемых параметров схемы (в данном случае R_K и C_1);
- 10) указаны начальные и конечные значения варьируемых параметров, а также шаг их изменения;
- 11) выбран тип варьируемых параметров (в данном случае для обоих параметров указан тип Component – значение параметра компонента схемы);
- 12) в разделе Step It флажок переведен в положение Yes;

13) подтверждены вышеописанные изменения нажатием на кнопку «ОК» диалогового окна Stepping;

14) нажатием на кнопку Run в разделе Transient главного меню программы запущен процесс моделирования.

Результаты проведения многовариантного анализа переходных процессов на входе и выходе усилительного каскада при вариации элементов схемы R_k и C_1 приведены на рисунках 20 – 21. Построенные графики позволяют получить представление о влиянии варьируемых элементов схемы на форму переходного процесса. По графику временных зависимостей напряжения на выходе каскада можно определить время нарастания переходного процесса (обычно измеряется от уровня 0.1 до 0.9 относительно установившегося значения), число и величину выбросов (переколебаний), время затухания выбросов и др.

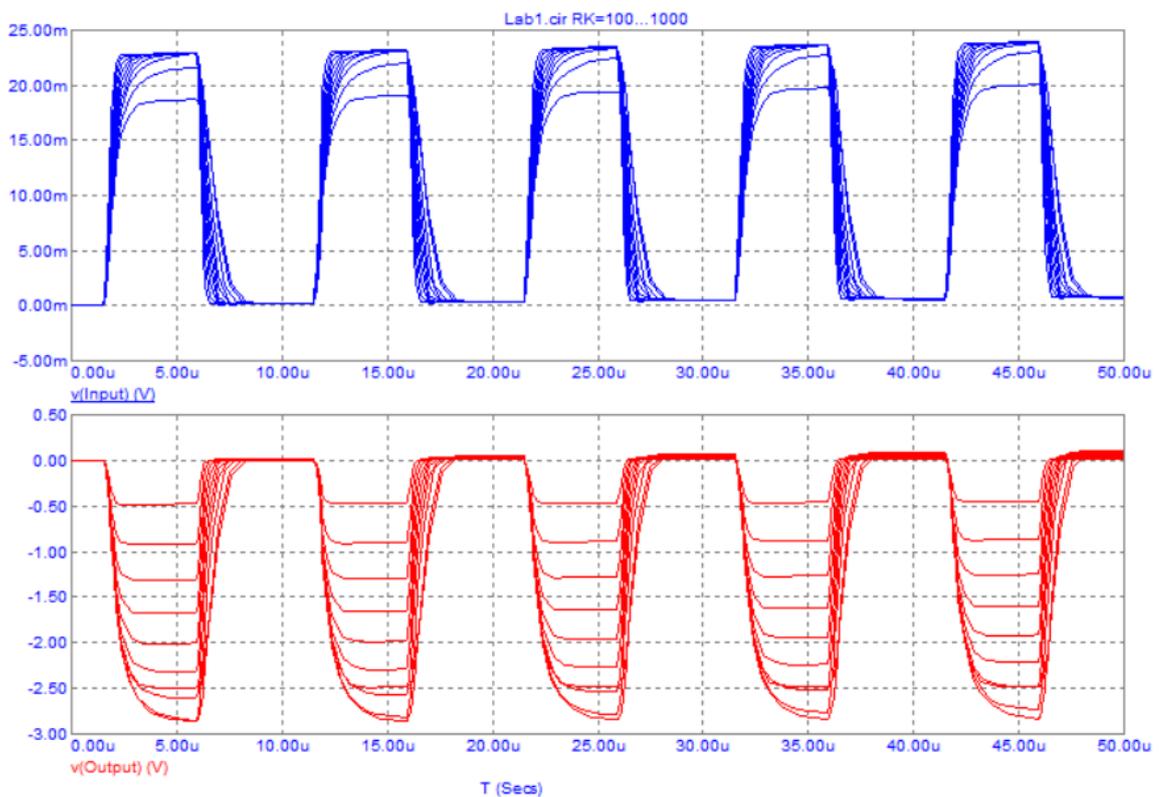


Рисунок ... – Влияние элемента схемы R_k на форму переходного процесса

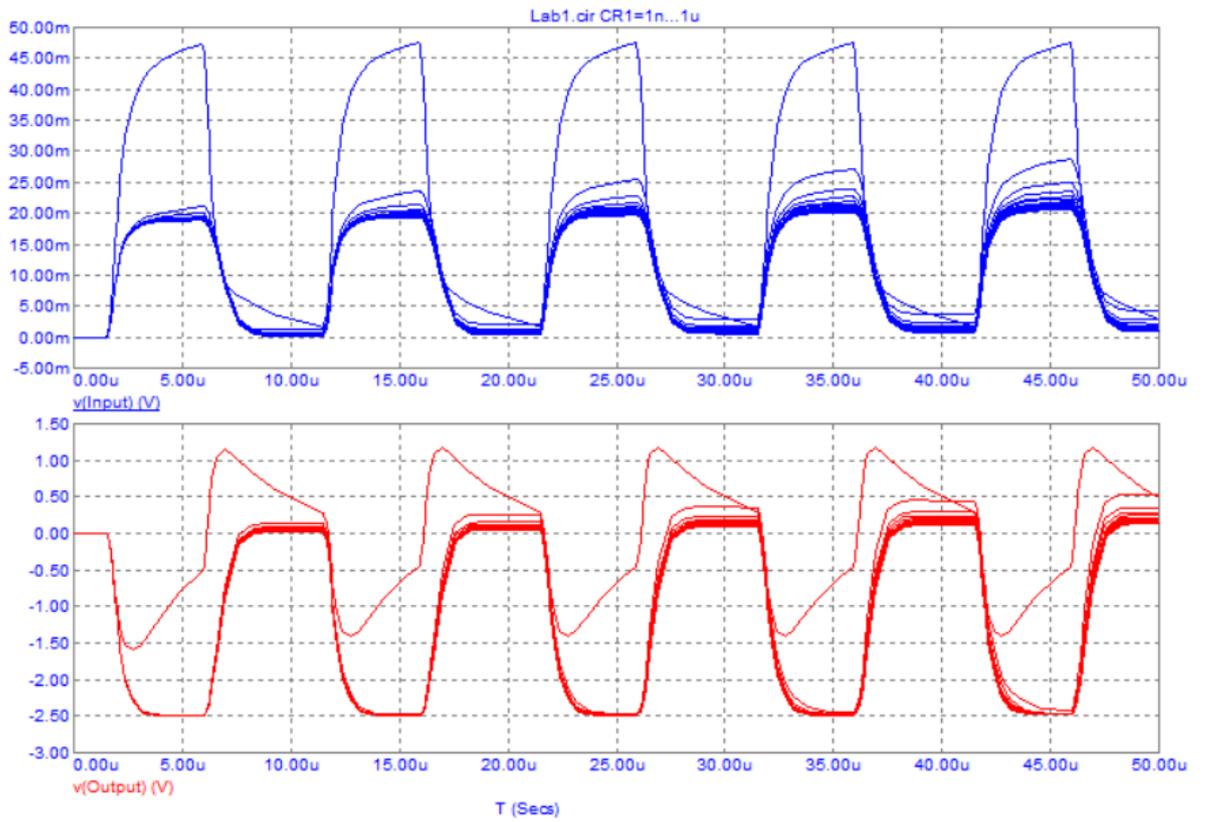


Рисунок ... – Влияние элемента схемы C_1 на форму переходного процесса

5 Вывод

В данной лабораторной работе осуществлено знакомство с программой схемотехнического моделирования Micro-Cap, освоен графический редактор для ввода электрической схемы, исследованы частотные и переходные характеристики усилительного каскада на биполярном транзисторе.

В ходе выполнения лабораторной работы в графическом редакторе программы Micro-Cap создана схема усилительного каскада на биполярном транзисторе 2N2222Z, выполнен анализ данного усилительного каскада по переменному току (режим AC), с помощью процедуры Stepping оценено влияние отдельных элементов схемы β и $C_1\beta$ на частотные характеристики. Получен вид переходных процессов на входе и выходе каскада (режим Transient) при подключении к входу усилителя источника синусоидального напряжения и источника импульсных сигналов, а также исследовано влияние заданных варьируемых элементов схему на форму переходного процесса с применением процедуры Stepping.