

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

ДВУХТАКТНЫЙ БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЗВУКОВОЙ
ЧАСТОТЫ

курсовая работа по дисциплине
«Модели и методы анализа проектных решений»

Выполнил:

студент гр. 583-1

_____ Петрова А.А.

«_____» _____ 2018 г.

Проверил:

к.т.н., доцент каф. КСУП

_____ Черкашин М.В.

«_____» _____ 2018 г.

Томск 2018

РЕФЕРАТ

Курсовая работа 34 с., 12 рис., 3 таблицы, 5 источников.

Ключевые слова: MICRO-CAP, ДВУХТАКТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Целью данной работы является моделирование частотных характеристик и переходных процессов двухтактного бестрансформаторного усилителя звуковой частоты с помощью программы схемотехнического моделирования Micro-CAP.

Отчет по курсовой работе выполнен в текстовом редакторе Microsoft Word 2007.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ(ТУСУР)

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

Утверждаю
Зав. кафедрой КСУП
_____ Ю.А. Шурыгин
«___» _____ 2018 г.

ЗАДАНИЕ
на курсовую работу
по дисциплине «Модели и методы анализа проектных решений»

Выдано: студенту группы 585-1 Петровой Анастасии Александровне

1. Тема: Двухтактный бестрансформаторный усилитель звуковой частоты.
2. Срок сдачи студентом готовой работы: «___» _____ 2016г.
3. Исходные данные к работе:
 - Принципиальная электрическая схема двухтактного бестрансформаторного усилителя звуковой частоты [1].
 - Выполнить моделирование устройства с помощью программы Micro-CAP [2].
4. Пояснительная записка к курсовой работе должна включать в себя следующие разделы:
 - титульный лист;
 - реферат;
 - техническое задание;
 - введение;
 - описание программы Micro-CAP;
 - описание схемы устройства;
 - описание математических моделей активных элементов;
 - моделирование схемы с помощью программы Micro-CAP;
 - заключение;

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ МиМАПР

- список используемых источников;
 - схема устройства электрическая принципиальная;
 - спецификация.
-

Дата выдачи задания: «___»_____ 2018 г

Задание принял к исполнению:

студент гр. 585-1

Петрова А.А. _____

Руководитель:

к.т.н., доцент каф. КСУП

Черкашин М.В. _____

Содержание

1 Введение	6
2 Программа схемотехнического моделирования Micro-CAP.....	7
2.1 Краткие сведения о программе.....	7
2.2 Основные виды анализа.....	8
2.3 Синтез фильтров	9
2.4 Создание моделей компонентов.....	10
2.5 Порядок анализа электронных устройств при помощи Micro-Cap	10
3 Описание схемы устройства.....	12
4 Описание математических моделей активных элементов.....	14
4.1 Модель диода.....	14
4.2 Модель биполярного транзистора.....	15
5 Моделирование устройства.....	19
5.1 Общие сведения.....	19
5.2 Анализ по постоянному току (Dynamic DC)	20
5.3 Анализ частотных характеристик (Режим AC)	22
5.4 Анализ переходных процессов (Режим TRANSIENT)	28
6 Заключение.....	31
Список использованных источников.....	32
Схема электрическая принципиальная.....	33
Спецификация	34

					ФВС КР 583.100.000 ПЗ				
					ДВУХТАКТНЫЙ БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Разраб.		Петрова А.А.			Лит. Масса Масштаб 1 1 : 1				
Провер.		Черкашин М.В.							
					Лист 5 Листов 34				
Н. Контр.					Пояснительная записка к курсовой работе»				
Утверд.									
ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ					МиМАПР				

1 Введение

Автоматизация проектирования имеет огромное значение для развития науки, техники и производства в современном обществе. В настоящее время автоматизация – основной способ повышения производительности и эффективности труда инженерно-технических работников, занимающихся проектированием сложных устройств. Использование автоматизации в проектировании позволяет создавать все более сложные технические объекты и гибко реагировать на появление новых решений и технологий в той или иной области техники.

Практическая реализация методов и идей автоматизированного проектирования происходит в рамках систем автоматизированного проектирования (САПР). Однако мало создать высокопроизводительные современные САПР. Надо уметь их эффективно использовать. Для этого нужны квалифицированные инженеры-пользователи САПР. В рамках современного «компьютеризированного» общества инженер любой специальности, занимающийся разработкой технических устройств, должен уметь использовать средства автоматизированного проектирования. Это позволяет повысить эффективность проектирования, улучшить его качество, снизить материальные затраты и уменьшить число разработчиков.

Таким образом, целью курсовой работы является моделирование работы двухтактного бестрансформаторного усилителя звуковой частоты на основе применения программы схемотехнического моделирования Micro-CAP. Необходимо выполнить основные виды анализа радиоэлектронного устройства: расчет его частотных характеристик, исследование переходных процессов при подключении стандартных тестовых сигналов.

Программа Micro-CAP [1] служит для моделирования электронных аналоговых, цифровых и смешанных устройств на макроуровне. Она обладает интуитивно-понятным интерфейсом, нетребовательностью к вычислительным ресурсам персонального компьютера и большим спектром возможностей.

2 Программа схемотехнического моделирования Micro-CAP

2.1 Краткие сведения о программе

Программа Micro-Cap была разработана в 1982 году фирмой Spectrum Software [1]. Micro-Cap — это универсальная программа схемотехнического анализа, предназначенная для решения широкого круга задач. Характерной особенностью этой программы, впрочем, как и всего семейства программ Micro-Cap [1,3], является наличие удобного и дружелюбного графического интерфейса, что делает его особенно привлекательным для обучения студентов.

Несмотря на достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам ПК (процессор не ниже Pentium II, ОС Windows 95/98/ME или Windows NT4/2000/XP, память не менее 64 Мб, монитор не хуже SVGA), его возможности достаточно велики. С его помощью можно анализировать не только аналоговые, но и цифровые схемы. Возможно также смешанное моделирование аналого-цифровых электронных устройств, а также синтез фильтров, как пассивных, так и активных.

Micro-Cap 11 отличаются от младших представителей своего семейства более совершенными моделями электронных компонентов и алгоритмами расчетов. По возможностям схемотехнического моделирования он находится на одном уровне с интегрированными пакетами ORCAD и PCAD2002 — достаточно сложными в освоении средствами анализа и проектирования электронных устройств, подразумевающими в первую очередь профессиональное использование. Полная совместимость со SPICE-моделями и SPICE-схемами в сочетании с развитыми возможностями конвертирования позволяет использовать в Micro-Cap все разработки и модели, предназначенные для этих пакетов, а полученные навыки моделирования позволят в случае необходимости быстро освоить профессиональные пакеты моделирования.

Micro-Cap 9, 10 предоставляют обширные возможности для анализа силовых преобразовательных устройств. Программа имеет настройки, включение которых оптимизирует алгоритмы для расчета силовых схем, библиотека компонентов содержит большое число обобщенных ШИМ-контроллеров и непрерывных моделей основных типов преобразователей напряжения для анализа устойчивости стабилизированных источников питания на их основе.

Перечисленные достоинства делают программу Micro-Cap весьма привлекательной для моделирования электронных устройств средней степени сложности. Удобство в работе, нетребовательность к ресурсам компьютера и возможность анализировать электронные устройства с достаточно большим количеством компонентов позволяют успешно использовать ее как радиолюбителям и студентам, так и инженерам-разработчикам. Кроме того, программы семейства Micro-Cap активно используются в научно-исследовательской деятельности.

2.2 Основные виды анализа

Программа Micro-CAP позволяет выполнять различные виды схематического моделирования [3]. К основным из них относится:

- Режим **Transient** – расчет переходных процессов при произвольных периодических воздействиях на схему. Данный вид анализа позволяет рассмотреть поведение схемы во временной области. Это дает ответ на вопрос, что произойдет, если к собранной схеме подключить источники питания и источники сигналов и т. п. Полученные графики позволяют просматривать процессы в моделируемой схеме так же, как это в реальности делается при помощи осциллографа или логического анализатора. При проведении анализа предполагается, что схема в общем случае нелинейная, хотя возможно рассчитывать и частный случай - поведение линейных схем во временной области.

- Режим **AC** – расчет частотных характеристик. При данном анализе программа использует для всех компонентов схемы их малосигнальные линеаризованные модели - таким образом, получается малосигнальная линеаризованная схема замещения всего устройства. Такая схема замещения описывается системой линейных алгебраических уравнений с комплексными (зависящими от частоты) коэффициентами. При выполнении анализа программа решает указанную систему для всех частот в пределах заданного диапазона и выводит на экран зависимость заданных переменных состояния схемы от частоты.

- Режим **DC** – расчет передаточных функций по постоянному току (при вариации постоянной составляющей одного или двух источников сигналов, вариации температуры или параметров моделей компонентов). При расчете программа «закорачивает» индуктивности, исключает из схемы конденсаторы и

затем рассчитывает режим по постоянному току при нескольких значениях входных сигналов. Данный режим позволяет построить вольтамперные характеристики полупроводниковых и электронных приборов, а также снять передаточные характеристики усилителей постоянного тока, не содержащих реактивных компонентов.

- Режим **Dynamic DC** – расчет режима по постоянному току и динамическое отображение на схеме узловых потенциалов, токов ветвей и рассеиваемой мощности. После запуска анализа можно производить любые изменения в схеме. Можно добавлять/удалять соединительные проводники, компоненты, изменять значения параметров компонентов и др. Программа в ответ будет рассчитывать новый режим по постоянному току, и отображать на схеме величины, его характеризующие.

- Режим **Dynamic AC** – расчет малосигнальных характеристик при заданных, списке значений частот. И их динамическое отображение на узлах схемы при изменении значений компонентов схемы (резисторов, конденсаторов, катушек и источников сигнала).

- Режим **Sensitivity** вычисляет малосигнальные чувствительности на постоянном токе одного или нескольких выходных выражений к изменению одной или нескольких входных переменных.

- Режим **Transfer Function** – расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току для указанного выходного выражения по отношению к указанному входному источнику, а также рассчитываются входные и выходные сопротивления схемы на постоянном токе.

- Режим **Distortion** – расчет нелинейных искажений усилительных схем с использованием математического аппарата спектрального Фурье-анализа. Данный режим представляет собой разновидность анализа переходных процессов при подключении источника гармонических колебаний на входе схемы, с использованием функций спектрального анализа для расчета нелинейных искажений.

2.3 Синтез фильтров

Программа Micro-CAP имеет в своем составе модуль для синтеза фильтров [1,3]:

- **Синтез фильтров в соответствии с заданными параметрами:** типа фильтра (ФНЧ, ФВЧ, полосно-пропускающего – ФПП, полосно-заграждающего

– ФПЗ, фазового корректора – ФК), полиномиальной аппроксимации (Батерворта, Чебышева 1-го и 2-го рода, Бесселя, Кауэра), параметрами АЧХ (коэффициент передачи, пульсации, ослабление, полоса частот пропускания (задержания)).

– **Синтез пассивных фильтров** в виде последовательного соединения RLC-звеньев.

– **Синтез активных фильтров** в виде **последовательного** соединения различных звеньев 2-го порядка на основе ОУ (Саллена-Ки, с многопетлевой обратной связью MFB, Тоу-Томаса, Флейшера-Тоу, Кервина-ХьюлсманаНьюкомба, Аккерберга-Мосберга, звена 2-го порядка с гиратором на ОУ).

2.4 Создание моделей компонентов

Также программа Micro-CAP включает в себя программный модуль MODEL для создания новых моделей компонентов на основе результатов измерений рабочих параметров устройств [3]:

– **Создание моделей** диодов, биполярных и полевых транзисторов, операционных усилителей, магнитных сердечников на основе справочных или экспериментальных данных с помощью встроенного оптимизатора (функции MODEL).

– **Оформление моделей в виде схем-макроопределений** с обозначенными выводами и списком параметров, которым затем в редакторе компонентов присваивается имя и УГО и тем самым добавляются новые компоненты, доступные для построения схем и моделирования.

2.5 Порядок анализа электронных устройств при помощи Micro-Cap

Для проведения любого расчета при помощи программы Micro-Cap необходимо сначала в окне графического редактора нарисовать электрическую схему устройства (см. рис. 2.1), предусмотреть цепи питания, нагрузочные цепи и источники сигналов (если они нужны). В схеме автоматически будут расставлены номера узлов и позиционные обозначения компонентов. После этого необходимо запустить какой-либо вид анализа. При этом откроется окно для задания параметров анализа и параметров вывода графиков (в большинстве видов анализа). В этом окне задаются узлы, сигналы в которых необходимо вывести на графики, масштабы графиков, время расчета или диапазон частот, а

также другие параметры. Подробно задание параметров для каждого вида анализа будет рассмотрено в соответствующем разделе пояснительной записки.

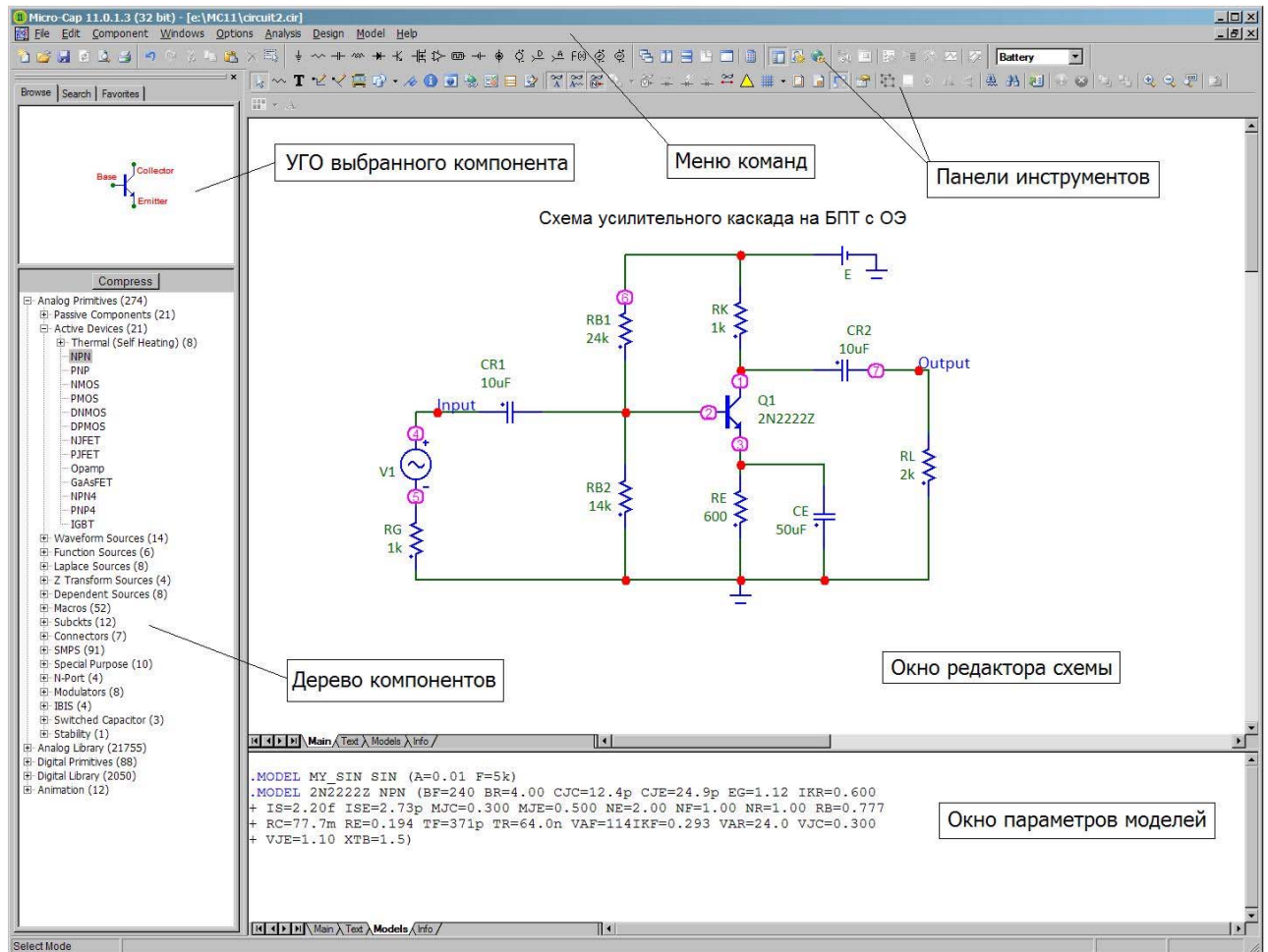


Рисунок 2.1 – Главное окно программы Micro-Cap 11

После этого командой Run запускается режима анализа и программа строит графики (или таблицы) заданных параметров электрической схемы, либо выводит на схему узловые потенциалы и токи компонентов (в режиме динамического анализа по постоянному току). Использование каких-либо виртуальных измерительных приборов не предусмотрено. Все, что нужно выводить на графики – задается в окне параметров анализа (например, для анализа переходных процессов это окно называется Transient Analysis Limits).

3 Описание схемы устройства

В курсовой работе рассматривается моделирование схемы двухтактного бестрансформаторного усилителя звуковой частоты (УЗЧ) [2]. Как правило, УЗЧ используются для преобразования слабых сигналов преимущественно звукового диапазона в более мощные сигналы, приемлемые для непосредственного восприятия через электродинамические или иные излучатели звука.

На рис. 3.1 показана схема двухтактного бестрансформаторного УЗЧ, работу которого мы будем далее анализировать с помощью программы Micro-CAP.

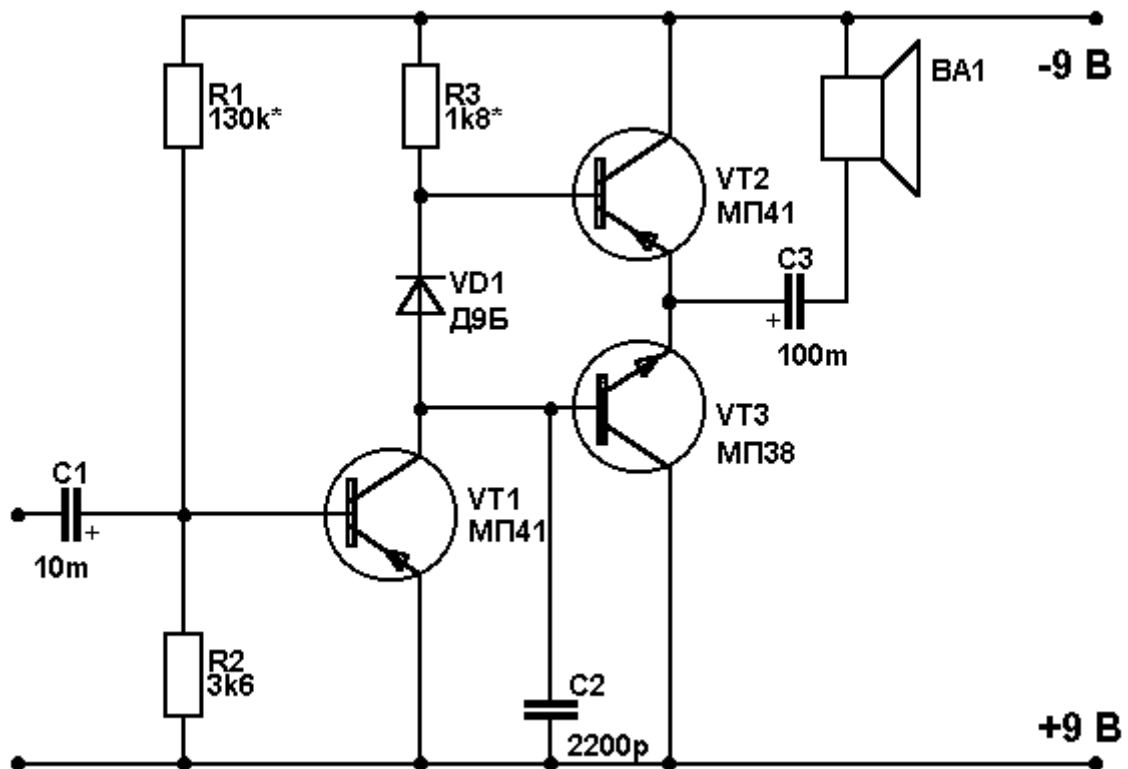


Рисунок 3.1 – Схема двухтактного бестрансформаторного усилителя звуковой частоты

Данный усилитель включает в себя три биполярных транзистора типа МП41 и МП38. Резисторы равны: $R1=130\text{k}\Omega$, $R2=36\text{k}\Omega$, $R3=1.3\text{k}\Omega$, $R4=1\text{k}\Omega$ (динамик), $R5=240\Omega$ (диод). Конденсаторы равны: $C1=10\text{мФ}$, $C2=2200\text{пФ}$, $C3=1\text{мФ}$.

Выходной каскад в этой схеме собран на транзисторах разной проводимости, что позволило максимально упростить выходной каскад. При помощи резистора $R1$ устанавливаем на эмиттерах транзисторов выходного

каскада напряжение, равное половине питания (в данном случае – 4.5 вольта). Коллекторный ток первого каскада устанавливаем резистором R3 (в пределах 2-4 миллиампер). Диод в данной схеме может быть заменен резистором, сопротивлением около 100 Ом, но при этом сильно снизится температурная стабильность усилителя.

Этот усилитель также имеет свои недостатки. Во-первых - низкая (по сравнению с трансформаторным усилителем) экономичность и, во-вторых - небольшой коэффициент усиления (так как транзисторы выходного каскада включены по схеме с общим коллектором, которая не дает усиления по напряжению). С первым недостатком можно смириться, так как экономичность усилителя остается довольно высокой. Для устранения второго недостатка обычно приходится добавлять еще один каскад усиления (можно, например, использовать первый каскад от простейшего однотактного усилителя).

4 Описание математических моделей активных элементов

4.1 Модель диода

В программе Micro-CAP для моделирования полупроводниковых диодов используется модель Эберса-Молла [3]. Эквивалентная схема показана на рис. 4.1.

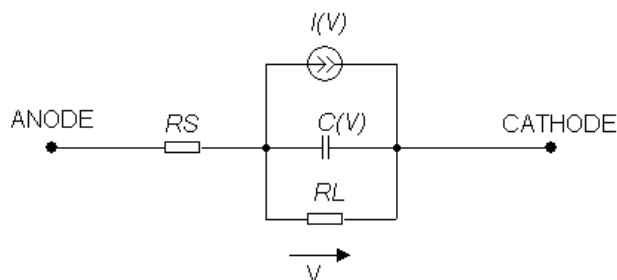


Рисунок 4.1 – Эквивалентная схема замещения диода

Модель диода задается директивой `.MODEL <имя модели> [(параметры модели)]`.

Приведем пример модели диода D104A: `.model D104A D (IS=5.81E-12 RS=8.1 N=1.15 TT=8.28NS CJO=41.2PF VJ=0.71 M=0.33 FC=0.5 EG=1.11 XTI=3)`

Математическая модель диода задается параметрами, перечисленными в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры модели диода

Обозначение	Параметр	Значение по умолчанию	Единица измерения
Level	Тип модели: 1 — SPICE2G, 2 — PSpice	1	—
IS	Ток насыщения при температуре 27°C	10^{-14}	А
RS	Объемное сопротивление	0	Ом
N	Коэффициент эмиссии (неидеальности)	1	—
ISR	Параметр тока рекомбинации	0	А
NR	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для тока ISR	2	
IKF	Предельный ток при высоком уровне инжекции	∞	А
TT	Время переноса заряда	0	с
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении	0	Ф
VJ	Контактная разность потенциалов	1	В
M	Коэффициент плавности р-п перехода (1/2 — для резкого, 1/3 — плавного)	0,5	—
EG	Ширина запрещенной зоны	1,11	эВ
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода	0,5	—

BV	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)	∞	B
IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)	10^{-10}	A
NBV	Коэффициент неидеальности на участке пробоя	1	—
IBVL	Начальный ток пробоя низкого уровня	0	A
NBVL	Коэффициент неидеальности на участке пробоя низкого уровня	1	—
XTI	Температурный коэффициент тока насыщения IS	3	—
TIKF	Линейный температурный коэффициент IKF	0	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
TBV1	Линейный температурный коэффициент BV	0	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
TBV2	Квадратичный температурный коэффициент BV	0	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
TRS1	Линейный температурный коэффициент RS	0	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
TRS2	Квадратичный температурный коэффициент RS	0	$^{\circ}\text{C}^{-2}$
KF	Коэффициент фликкер-шума	0	—
AF	Показатель степени в формуле фликкер-шума	1	—
RL	Сопротивление утечки перехода	∞	Ом
T_MEASURED	Температура измерений	—	$^{\circ}\text{C}$
T_ABS	Абсолютная температура	—	$^{\circ}\text{C}$
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	—	$^{\circ}\text{C}$
T_REL_LOCL	Разность между температурой диода и модели-прототипа	—	$^{\circ}\text{C}$

С уравнениями, по которым производится расчет при моделировании диодов и прочих полупроводниковых приборов при необходимости можно ознакомиться в [4].

4.2 Модель биполярного транзистора

В программе Micro-CAP используется схема замещения биполярного транзистора в виде модели Гуммеля-Пуна, которая автоматически упрощается до более простой модели Эберса-Молла, если опустить некоторые параметры [3]. Эквивалентная схема замещения биполярного транзистора показана на рис. 4.2.

При моделировании схемы УЗЧ, были использованы аналоги транзисторов МП41 и МП38. Транзистор МП41 был заменен на транзистор КТ3107А и транзистор МП38 также был заменен на транзистор КТ3102В. Список параметров математической модели для этих транзисторов приведен в табл. 4.2.

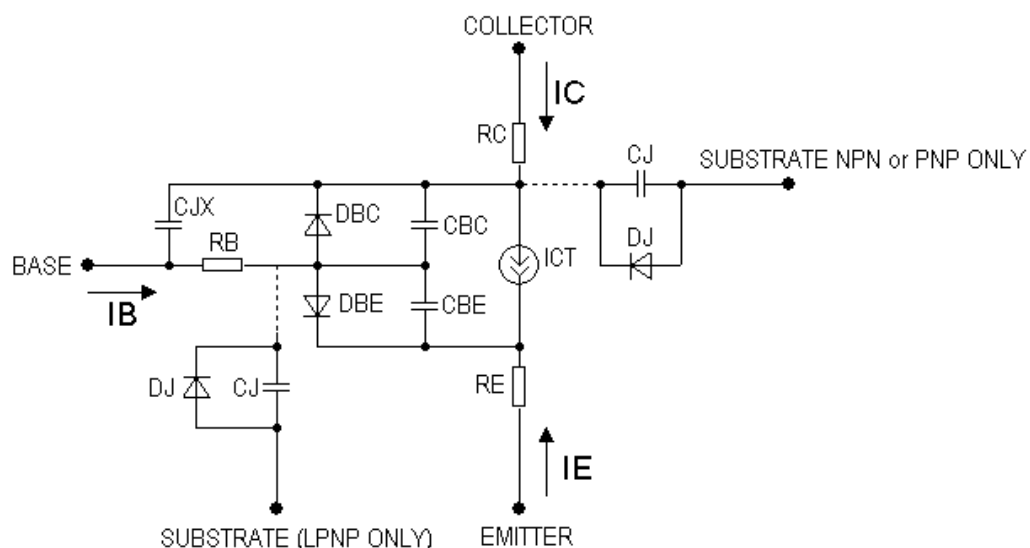


Рисунок 4.3 – Эквивалентная схема замещения биполярного транзистора

Таблица 4.2 – Параметры моделей транзисторов

Обозначение	Параметры	Размерность	Значения для	
			КТ3107А	КТ3102В
Level	Тип модели: 1-SPICE2G, 2 – Pspice	--	1	1
AF	Показатель степени в формуле фликер-шума	--	1	1
BF	Максимальный коэффициент усиления тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ (без учета токов утечки)	--	105.5	303
BR	Максимальный коэффициент усиления тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ	--	1.62	3.201
CJC	Емкость коллекторного перехода при нулевом смещении	ФФ	12.8p	11.02p
CJE	Емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении	ФФ	12.6p	13.31p
CJS	Емкость перехода коллектор-подложка при нулевом смещении	ФФ	0	0
EG	Ширина запрещенной зоны	эВ	1.11	1.11
FC	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямо смещенных переходов	--	.5	.5
IKF	Ток начала спада зависимости BF от тока коллектора в нормальном режиме	АА	.186m	96.35m
IKR	Ток начала спада зависимости BF от тока коллектора в инверсном режиме	АА	12m	.1
IRB	Ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50% полного перепада между RB и RBM	АА	0	0
IS	Ток насыщения при температуре 27	АА	6.545f	3.63f
ISC	Ток насыщения утечки перехода база-коллектор	АА	3.35p	5.5p

ISE	Ток насыщения утечки перехода база-эмиттер	AA	7.735n	43.35n
ISS	Ток насыщения р-п-перехода подложки	AA	0	0
ITF	Ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора при больших токах	AA	56m	.12
KF	Коэффициент, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход	--	0	0
MJC	Коэффициент, учитывающий плавность коллекторного перехода	--	.33	.33
MJE	Коэффициент, учитывающий плавность эмиттерного перехода	--	.35	.33
MJS	Коэффициент, учитывающий плавность перехода коллектор-подложка	--	0	0
NC	Коэффициент эмиссии тока утечки коллекторного перехода	--	2	2
NE	Коэффициент эмиссии тока утечки эмиттерного перехода	--	8.56	13.47
NF	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для нормального режима	--	1	1
NK	Коэффициент перегиба при больших токах	--	500m	500m
NR	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для инверсного режима	--	1	1
NS	Коэффициент эмиссии тока р-п-перехода подложки	--	1	1
PTF	Дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора	--	0	0
RB	Объемное сопротивление базы (макс.) при нулевом смещении перехода база-эмиттер	оОм	39.1	37
RBM	Минимальное сопротивление базы при больших токах	ООм	0	0
RC	Объемное сопротивление коллектора	ООм	.71	1.12
RE	Объемное сопротивление эмиттера	ООм	0	0
T_ABS	Абсолютная температура	°C	-	-
T_MEASURED	Температура измерений	°C	-	-
TF	Время переноса заряда через базы в нормальном режиме	с	477.5p	-
TR	Время переноса заряда через базу в инверсном режиме	с	30.5n	-
TRB1	Линейный температурный коэффициент RB	°C ⁻¹	0	493.4p
TRB2	Квадратичный температурный коэффициент RB	°C ⁻²	0	41.67n
TRC1	Линейный температурный коэффициент RC	°C ⁻¹	0	0
TRC2	Квадратичный температурный коэффициент RC	°C ⁻²	0	0
TRE1	Линейный температурный коэффициент RE	°C ⁻¹	0	0
TRE2	Квадратичный температурный коэффициент RE	°C ⁻²	0	0
TRM1	Линейный температурный коэффициент RBM	°C ⁻¹	0	0
TRM2	Квадратичный температурный коэффициент RBM	°C ⁻²	0	0
VAF	Напряжение Эрли в нормальном режиме	B	86.5	0
VAR	Напряжения Эрли в инверсном режиме	B	32	0

VJC	Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	B	.65	72
VJE	Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	B	.69	30
VJS	Контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка	B	750m	.65
VTF	Напряжение, характеризующее зависимость TF база-коллектор	B	35	.69
XCJC	Коэффициент расщепления барьерных емкостей прямо смещенных переходов	-	1	750m
XTB	Температурный коэффициент BF и BR	-	1.5	50
XTF	Коэффициент, определяющий зависимость TF база-коллектор	-	2	1
XTI	Температурный экспоненциальный коэффициент для тока IS	-	3	1.5

5 Моделирование устройства

5.1 Общие сведения

Составим схему двухтактного бестрансформаторного УЗЧ в графическом редакторе программы Micro-CAP (см. рис. 5.1). Ко входу схемы подключим источник гармонического сигнала (V8), параметры источника показаны на рис. 5.2

Выполним анализ схемы УЗЧ в следующих режимах моделирования:

- 1) в режиме Dynamic DC выполним анализ по постоянному току для установки рабочей точки транзисторов;
- 2) в режиме AC проведем анализ характеристик в частотной области;
- 3) в режиме Transient выполним анализ переходных процессов при гармоническом воздействии.

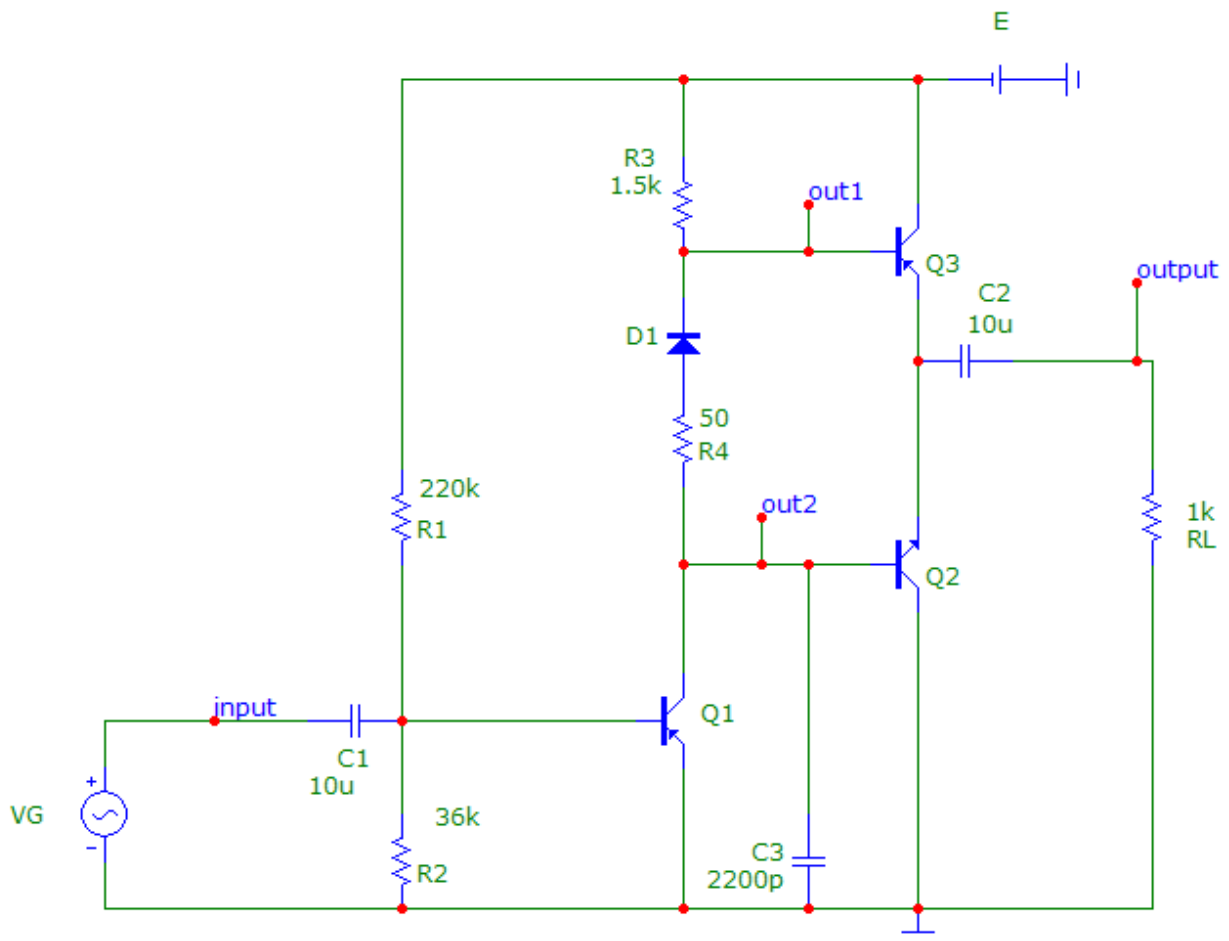


Рисунок 5.1- Схема двухтактного бестрансформаторного УЗЧ в редакторе программы Micro-CAP

5.2 Анализ по постоянному току (Dynamic DC)

Карту постоянных токов и напряжений в схеме можно посмотреть с помощью анализа в режиме Dynamic DC (Alt+4). При вызове этого режима появляется окно установки параметров моделирования Dynamic DC Limits (рис. 5.2), в котором следует указать температуру среды +27 °С.

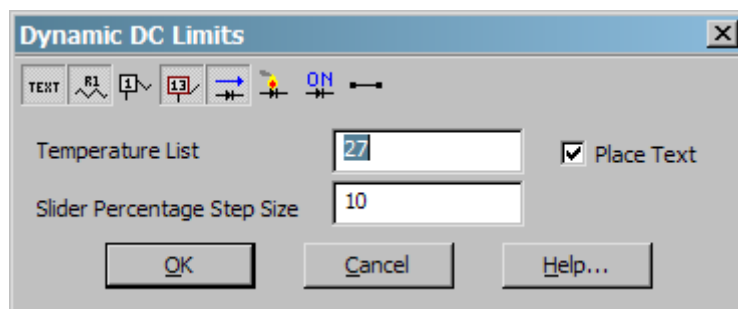











Рисунок 5.2 – Окно параметров анализа Dynamic DC Limits

Кнопки в этом окне  управляют выводом информации на схеме:

-  – переключение режима вывода тестовых меток в схеме;
-  – переключение режима отображения текстовых атрибутов элементов;
-  – переключение режима отображения номеров узлов;
-  – переключение режима отображения узловых потенциалов в схеме;
-  – переключение режима отображения токов через элементы в схеме;
-  – переключение режима отображения мощности на элементах в схеме;
-  – переключение режима отображения состояния полупроводниковых приборов в схеме;
-  – переключение режима отображения связей в схеме.

Результаты моделирования по постоянному току схемы показаны на рис. 5.3

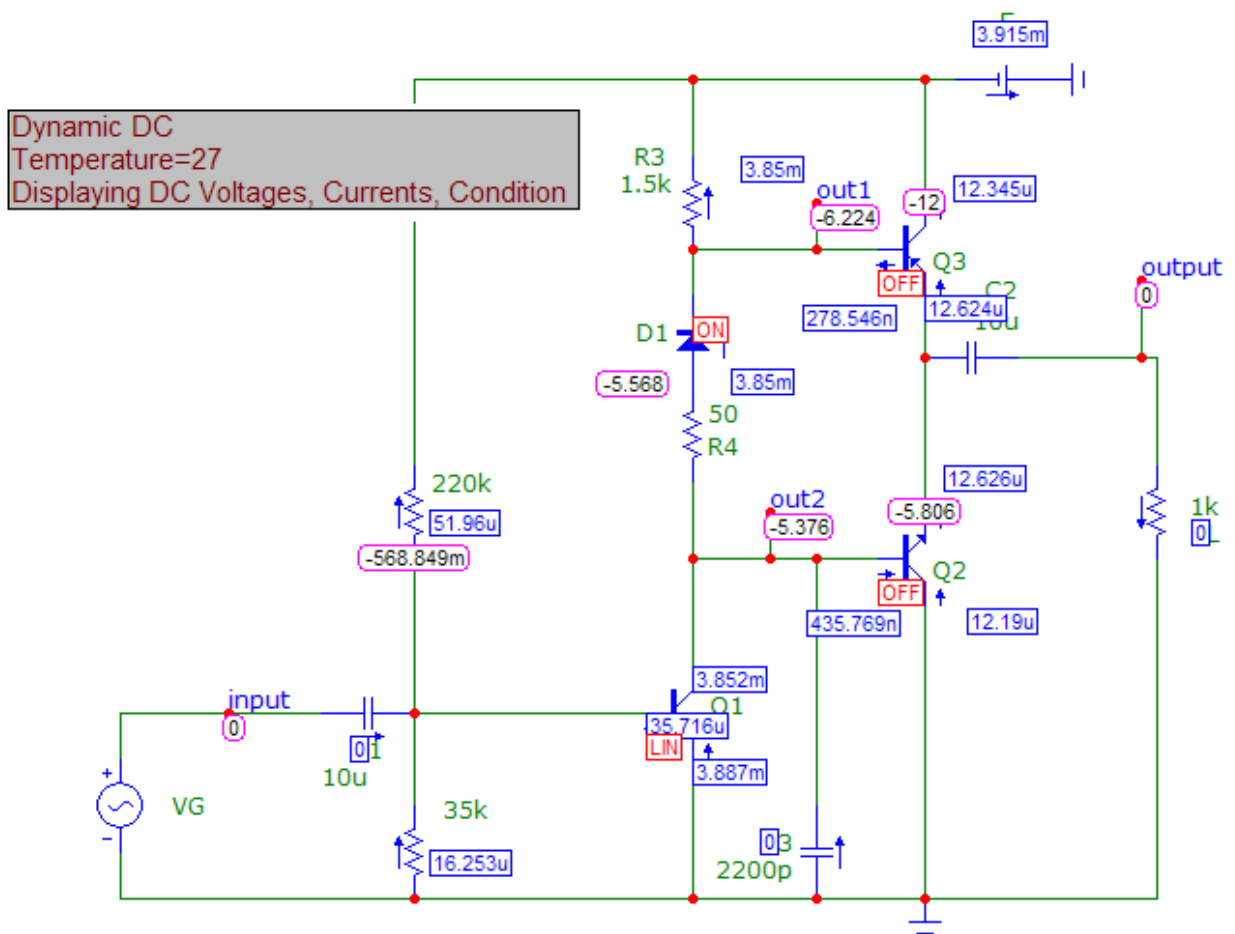


Рисунок 5.3 – Карта токов и напряжений в режиме Dynamic DC

В результате анализа данной карты можно сказать следующее:

- 1) Первый каскад УЗЧ находится в активном режиме (ON), ток коллектора Q1 в рабочей точке равен 3.85 мА;
- 2) Выходные транзисторы (Q2 и Q3) закрыты (OFF), напряжения К-Э на них равны половине напряжения питания (около 6 В), что обеспечивает их работу в режиме класса В.

Необходимо отметить, что значения некоторых элементов схемы пришлось изменить, чтобы выставить «нужную» рабочую точку, в частности, увеличено сопротивление резистора R1 до 220 кОм.

Далее переходим к частотному моделированию устройства.

5.3 Анализ частотных характеристик (Режим АС)

Анализ характеристик в частотной области производится в режиме АС (Alt+2) и включает в себя расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристик (ФЧХ). При расчете частотных характеристик сначала необходимо задать параметры моделирования, определяющие пределы анализа и точность решения системы уравнений. Данные параметры задаются в окне «AC Analysis Limits» (см. рис. 5.4).

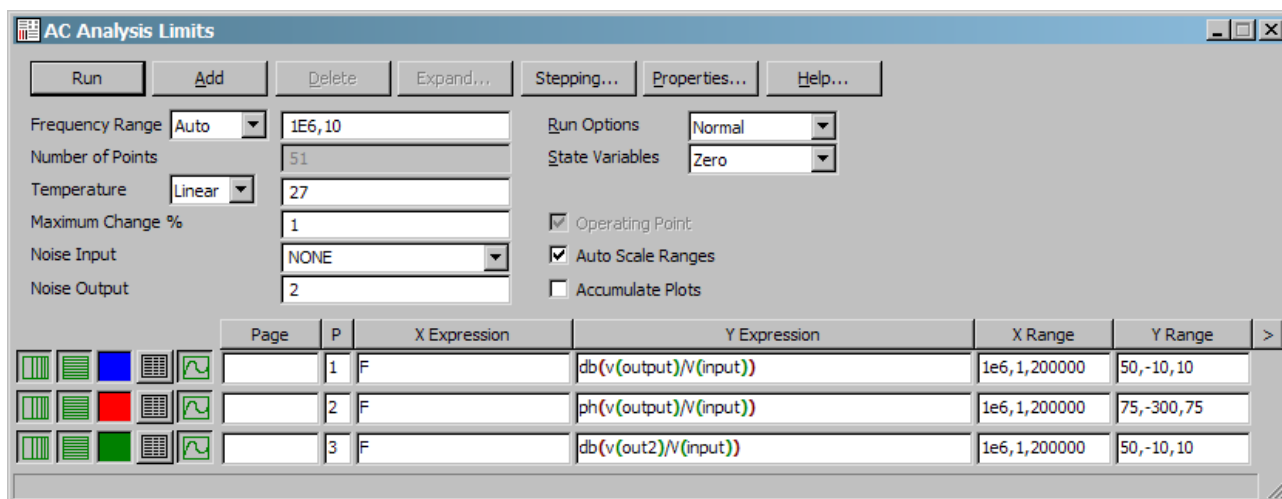


Рисунок 5.4 – Диалоговое окно задания параметров моделирования режима АС

Рассмотрим значения этих параметров подробнее [3]:

- **Frequency Range** – определение конечной и начальной частоты диапазона в котором выполняется моделирования по формату F_{max}, F_{min} .

Отрицательные и нулевые значения частот не допускаются. Если значение F_{min} не указано, то расчет не производится;

- **Number of Points** – количество точек по частоте (N_f), в которых производится расчет частотных характеристик. Минимальное значение равно 5. В связи с тем, что в режиме АС не производится интерполяция, то в таблицы и на графики выводятся все данные, полученные при расчете;

- **Temperature** – диапазон изменения температуры в градусах Цельсия. При изменении температуры изменяются параметры компонентов, имеющие ненулевые температурные коэффициенты ТС, а также ряд параметров полупроводниковых приборов;

- **Maximum Change, %** - максимально допустимое приращение графика первой функции на интервале шага по частоте (в процентах от полной шкалы);

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ МиМАПР

– **Noise Input** – имя входного источника сигнала, используемого при расчете шумовых параметров. Если в качестве источника входного сигнала включается источник напряжения, то на вход пересчитывается спектральная плотность напряжения, а если источник тока, то спектральная плотность тока;

– **Noise Output** – номера узлов выходных зажимов цепи, в которых вычисляется спектральная плотность напряжения выходного шума цепи;

– **Plot Group** – в графе Р числами от 1 до 9 указывается номер графического окна, в котором должна быть построена данная функция. Все функции, помеченные одним и тем же номером, выводятся в одном окне. Если это поле пусто, график функции не строится;

– **X Expression** – имя переменной, откладываемой по оси X;

– **Y Expression** – математическое выражение для переменной, откладываемой по оси Y;

– **X Range** – максимальное и минимальное значение переменной X на графике. Для автоматического выбора диапазона переменных в этой графе указывается Auto.

– **Y Range** – максимальное и минимальное значение переменной Y на графике, для автоматического выбора диапазона переменных в этой графе указывается Auto.

Для построения частотных характеристик УЗЧ на рис. 5.1 введем в окне задания параметров расчета частотных характеристик, показанном на рис. 5.4, следующие данные:

- 1) частотный диапазон для анализа от 10 Гц до 1 МГц;
- 2) для построения графика АЧХ: модуль передаточной функции – отношение потенциала выходного узла V(output) к потенциалу входного узла V(input), выраженный в дБ $\text{db}(v(\text{output})/v(\text{input}))$;
- 3) для построения ФЧХ: фазу передаточной функции по напряжению между выходным V(output) и входным V(input) узлами: $\text{ph}(v(\text{output})/v(\text{input}))$;
- 4) для построения графика АЧХ первого каскада: модуль передаточной функции – отношение потенциала выходного узла V(out2) к потенциалу входного узла V(input), выраженный в дБ $\text{db}(v(\text{out2})/v(\text{input}))$.

Выполнив моделирование в режиме АС получим графики АЧХ и ФЧХ УЗЧ, представленные на рис. 5.5.

В Micro-CAP существует режим Scope (F8) для считывания показаний с графиков. С помощью двух курсоров по графику АЧХ можно определить значение коэффициента усиления и полосу пропускания нашего УЗЧ.

В нашем случае УЗЧ имеет следующие параметры:

- коэффициенту усиления в полосе пропускания: 39.3 дБ;
- полоса пропускания: 30 Гц ... 30 кГц.

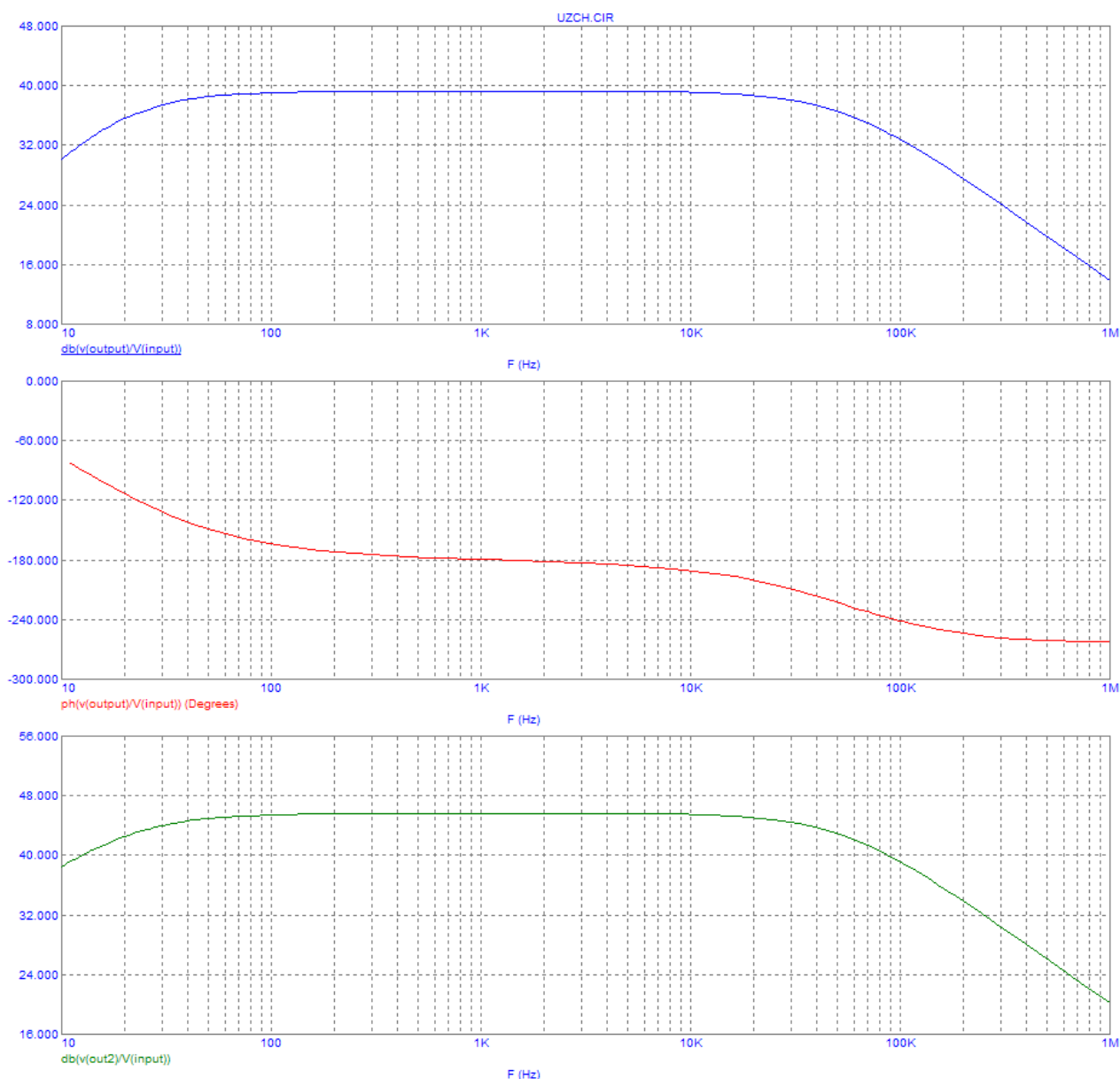


Рисунок 5.5 – Частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) УЗЧ

Также в программе Micro-CAP есть возможность проведения многовариантного анализа при изменении любого параметра компонента схемы или его модели. Для этого в окне задания параметров «AC Analysis Limits» нажмем на кнопку «Stepping», после чего открывается окно «Stepping» для ввода параметров многовариантного анализа (см. рис. 5.6).

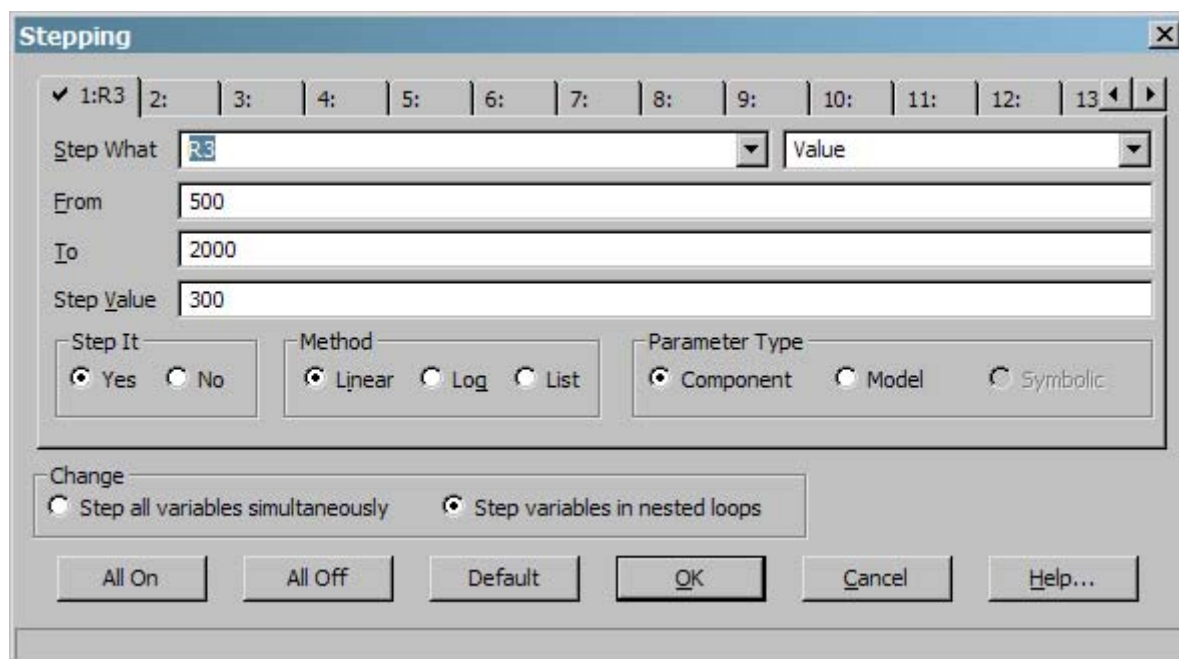


Рисунок 5.6 – Диалоговое окно «Stepping» для ввода параметров многовариантного анализа

Сначала в списке «Parameter Type» выберем тип варьируемого параметра «Component». Это означает, что будет варьироваться значение параметра компонента схемы. Также существуют другие типы варьируемых параметров:

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

Затем в строке Step What указывают имя варьируемого элемента (R3), на последующих строках пределы его изменений и в графе Step It устанавливают флажок Yes.

В полях «From», «To» и «Step Value» зададим пределы сопротивления резистора от 500 до 2000 с шагом 300 Ом, соответственно, и в области «Step It» установим флажок в положение «Yes».

Таким образом, процесс моделирования будет запущен 5 раз (пока величина сопротивления R3 не станет больше 2000 Ом) и на экране можно будет увидеть 5 графиков исследуемой характеристики устройства (см. рис. 5.7).

По графику на рис. 5.7 видно, что при увеличении сопротивления R3 усиление в полосе несколько увеличивается, но не превышает максимального значения 40 дБ

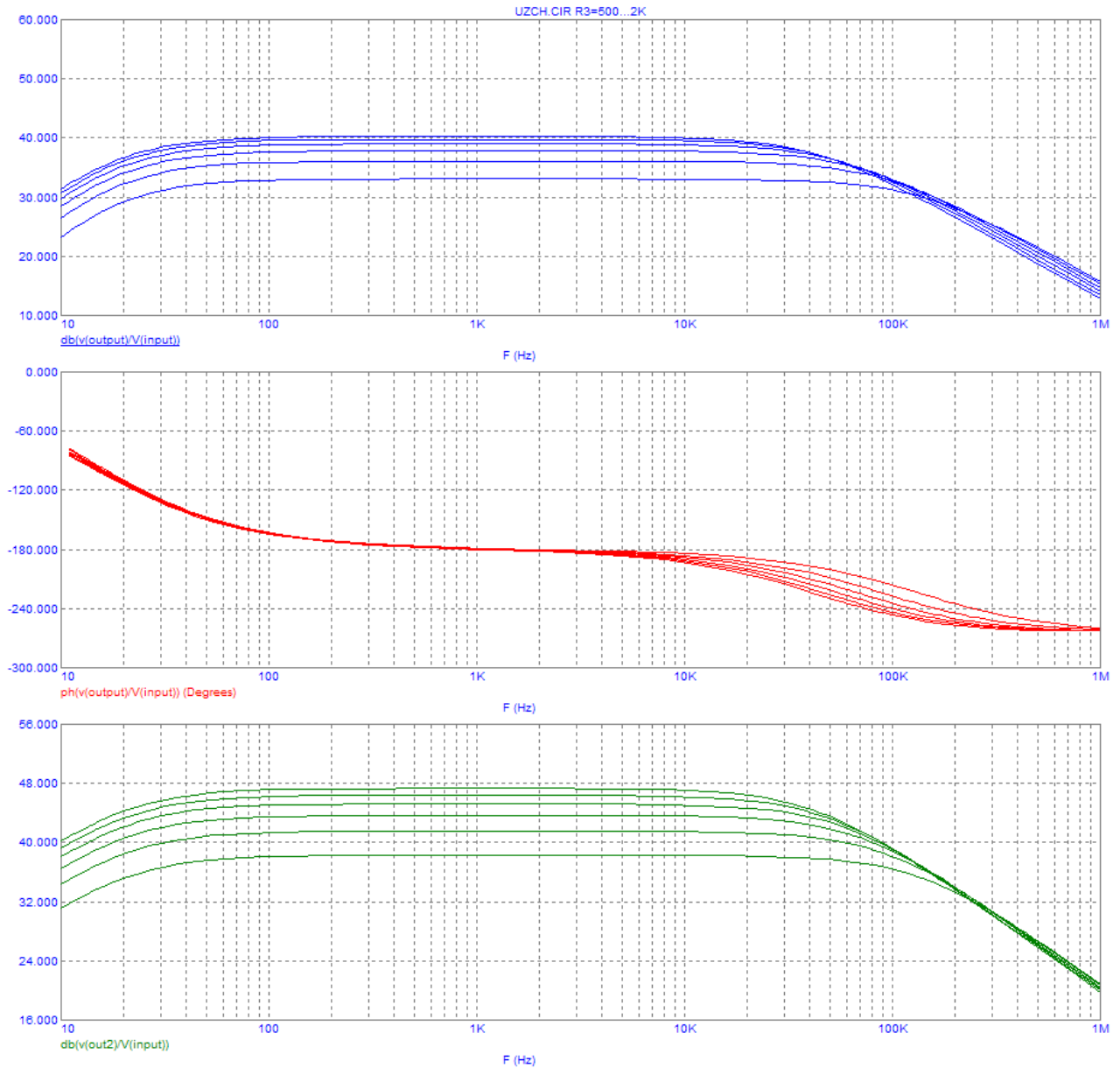


Рисунок 5.7 – Частотные характеристики УЗЧ при вариации сопротивления резистора R3

Аналогичным образом выполним многовариантный анализ при изменении емкости конденсатора C2 в пределах от 1000 до 5000 пФ с шагом 1000 пФ. Результаты моделирования приведены на рис. 5.8.

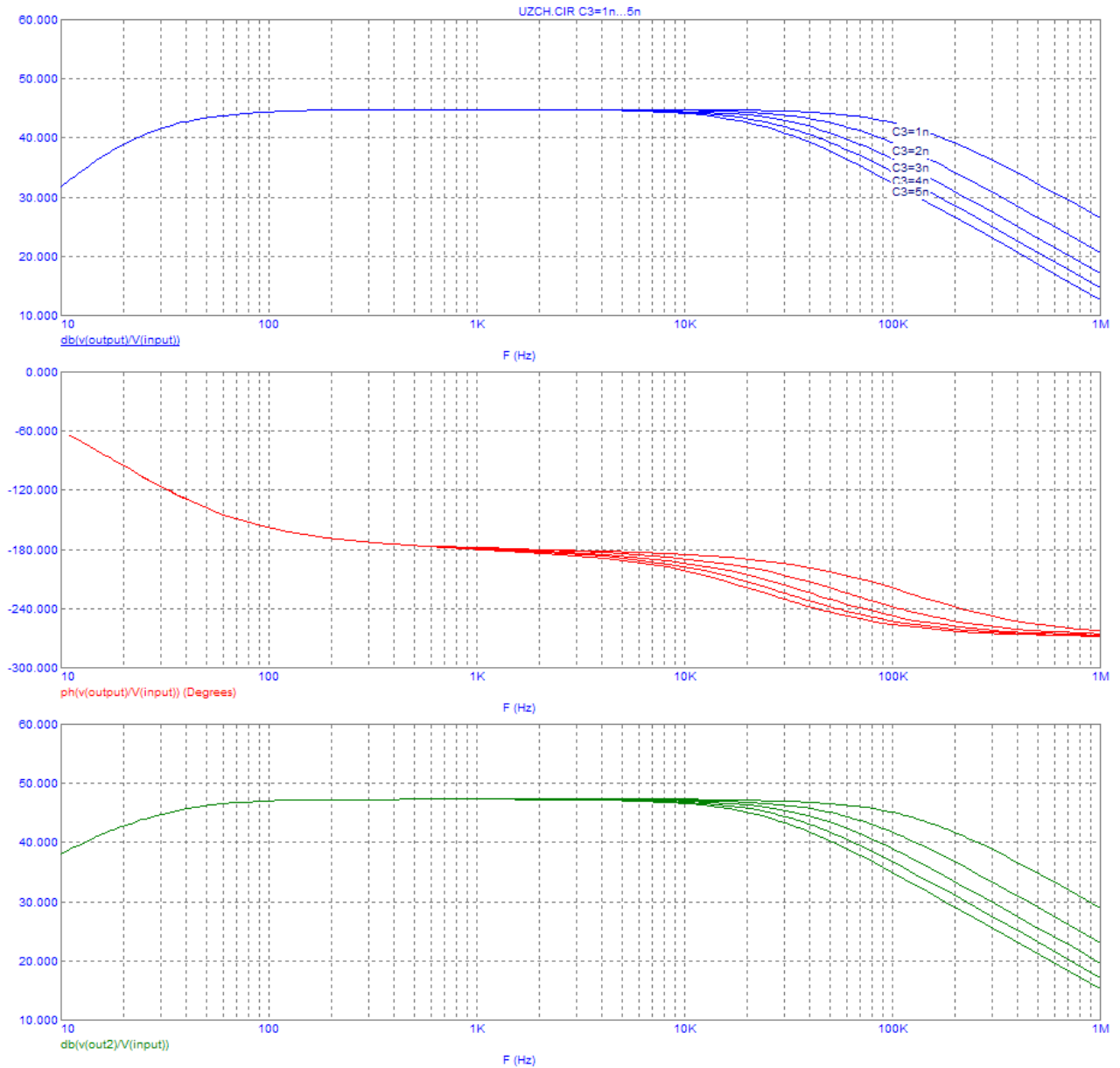


Рисунок 5.8 – Частотные характеристики УЗЧ при вариации емкости конденсатора $C2$

По графику на рис. 5.8 видно, что при увеличении емкости $C2$ полоса пропускания УЗЧ уменьшается. Это вызвано уменьшением усиления в области верхних частот, что приводит к уменьшению верхней граничной частоты полосы пропускания f_B .

5.4 Анализ переходных процессов (Режим TRANSIENT)

Анализ переходных процессов производится в режиме Transient (Alt+1), который основан на решении конечно-разностных уравнений во временной области, как правило, с автоматически изменяющимся шагом. Данный вид анализа позволяет наглядно проследить и исследовать временные зависимости токов и напряжений в схеме при воздействии на нее сигналов различной формы.

Параметры моделирования переходных процессов задаются в окне «Transient Analysis Limits» (см. рис. 5.9).

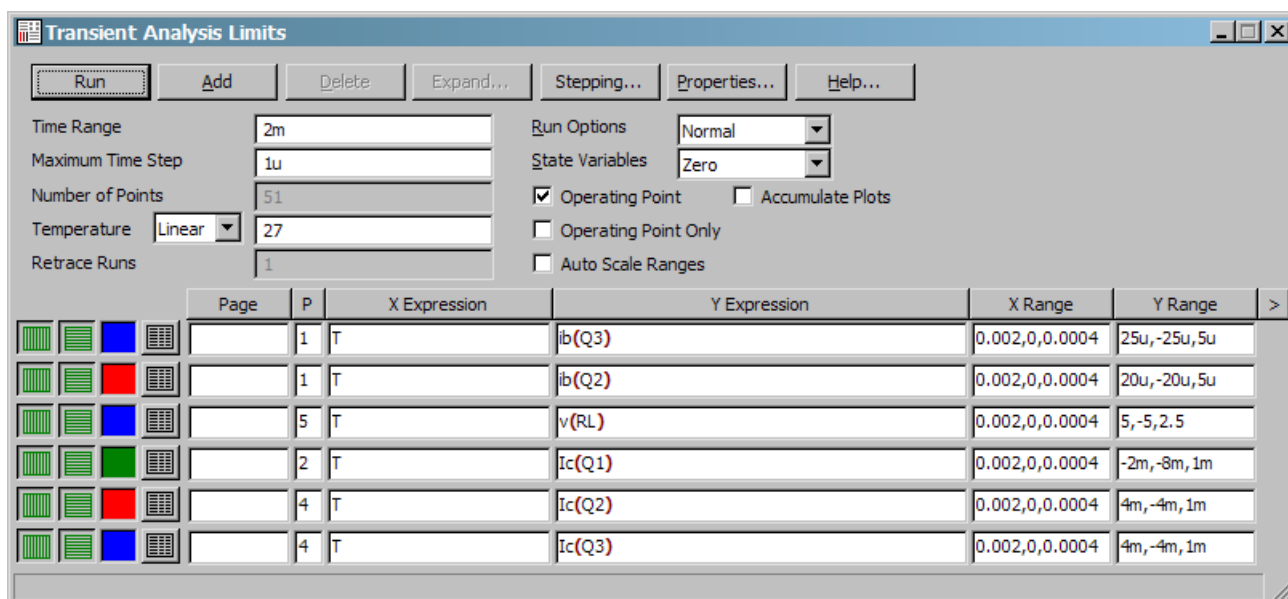


Рисунок 5.9 – Диалоговое окно ввода параметров моделирования в режиме Transient

Рассмотрим значения этих параметров [3]:

- **Time Range** – спецификация конечного и начального времени расчета переходных процессов по формату Tmax[,Tmin]; по умолчанию назначается Tmin=0 (отрицательные значения моментов времени недопустимы);
- **Maximum Time Step** – максимальный шаг интегрирования;
- **Number of Points** – количество точек, выводимых в таблицы;
- **Temperature** – диапазон изменения температуры в градусах Цельсия;
- **X Expression** – имя переменной, откладываемой по оси X. Обычно при анализе переходных процессов по этой оси откладывается время (переменная T);
- **Y Expression** – математическое выражение для переменной, откладываемой по оси Y. В данном случае используется простая переменная

напряжения в узле V(5);

– **X Range** – максимальное и минимальное значение переменной X на графике по формату High[,Low[,Step]];

– **Y Range** – максимальное и минимальное значение переменной Y на графике.

При анализе схемы УЗЧ, в режиме Transient получим графики переходных процессов при гармоническом воздействии на схему. Параметры источника сигнала и его вид приведены на рис. 5.10

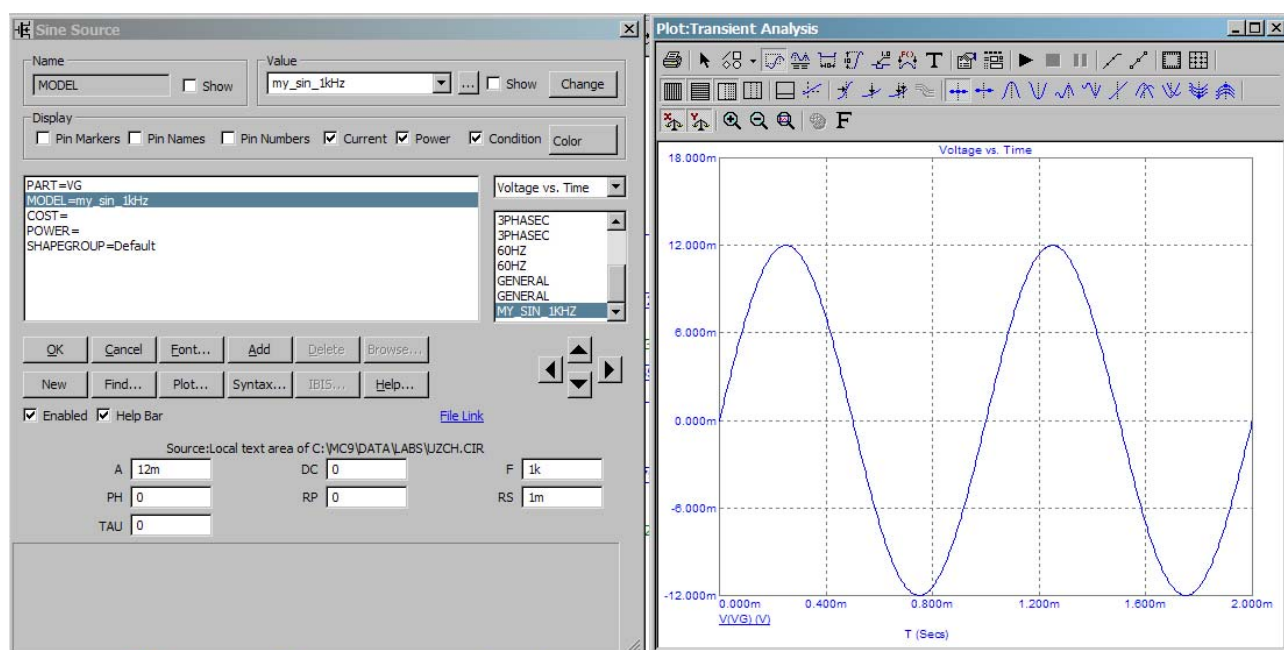


Рисунок 5.10 – Источник гармонического сигнала

Исследуем поведение схемы УЗЧ во временной области для следующих элементов:

- токи базы выходных транзисторов Q2 и Q3 – задаются в окне Analysis Limits в строке Y Expression как Ib(Q2) и Ib(Q3);
- токи коллектора выходных транзисторов Q2 и Q3 – задаются как Ic(Q2) и Ic(Q3);
- ток коллектора транзистора Q1 – задается как Ic(Q1);
- напряжение на выходе – задается как V(RL).

Результаты моделирования показаны на рис. 5.11

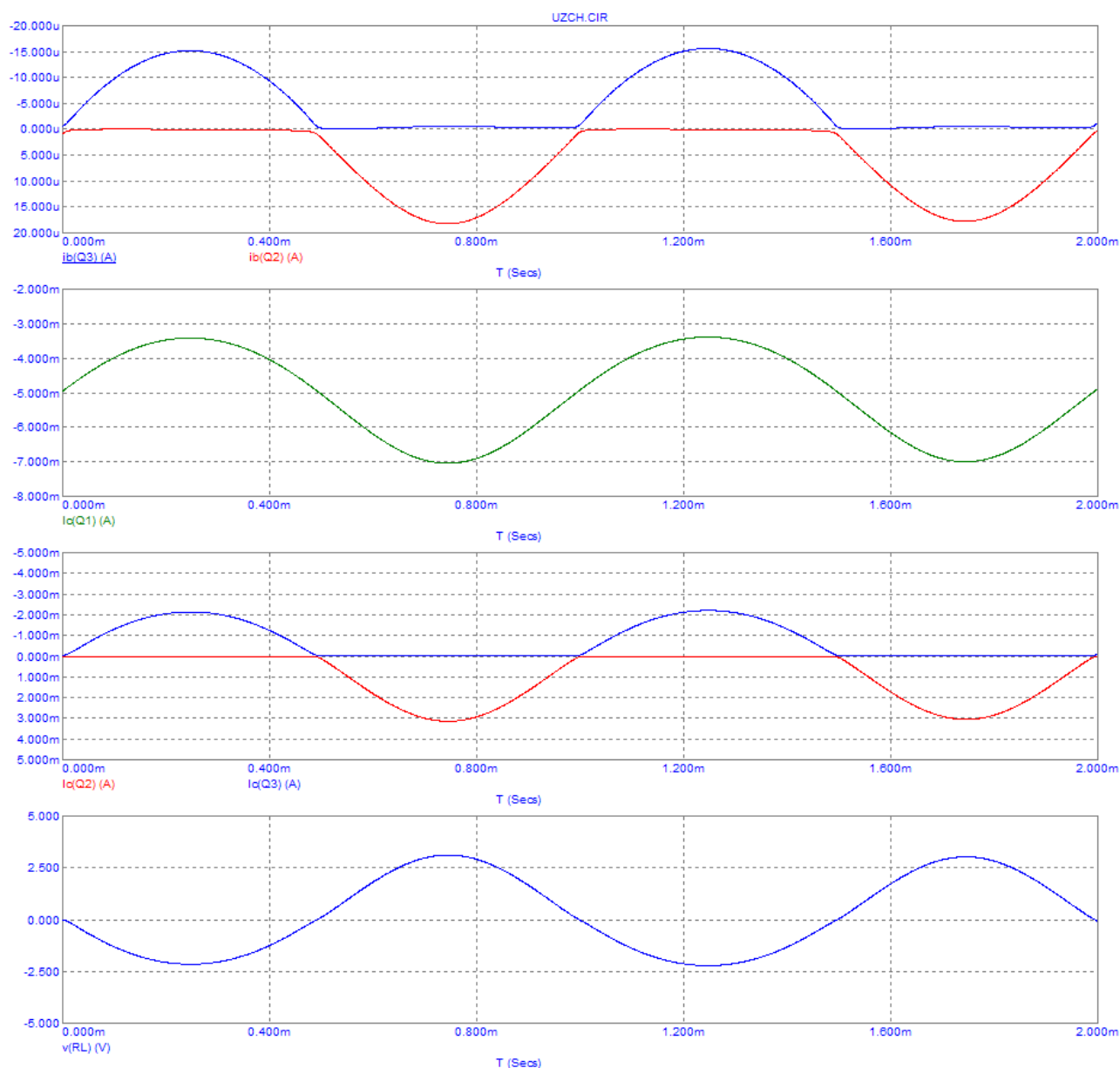


Рисунок 5.11 – Вид переходных процессов в схеме УЗЧ при гармоническом воздействии

По результатам моделирования схемы УЗЧ в режиме Transient можно сделать следующие выводы:

- первый каскад УЗЧ (транзистор Q1) работает в линейном режиме, так как ток имеет форму синусоиды;
- выходные каскады работают в режиме класса В, так как пропускают только половину сигнала – Q2 – положительную полуволну, а Q3 – отрицательную;
- выходной сигнал (неискаженный) равен величине порядка 5 В, что составляет примерно 40% от напряжения питания.

6 Заключение

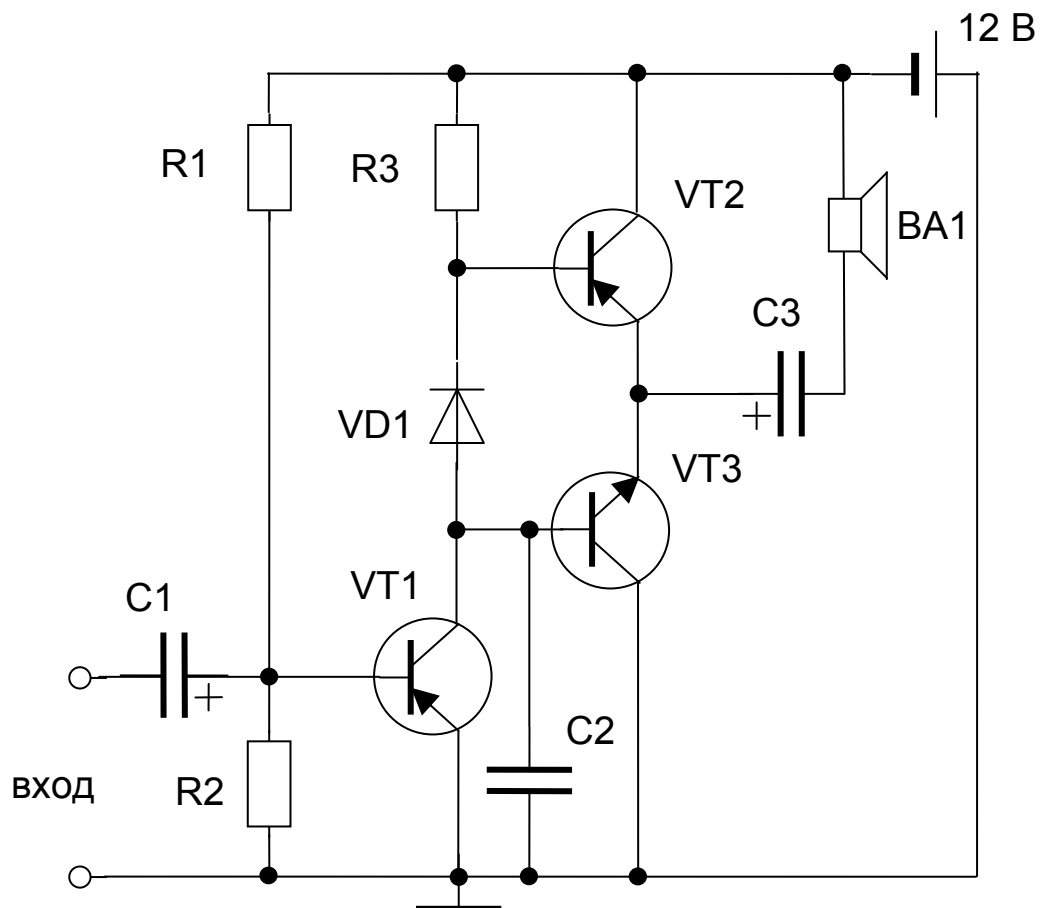
В результате выполнения курсовой работы было выполнено моделирование схемы двухтактного бестрансформаторного усилителя звуковой частоты с непосредственными связями с помощью пакета схемотехнического моделирования Micro-CAP. В режиме AC были получены частотные характеристики, в режиме Transient – сделан анализ переходных процессов в схеме при гармоническом воздействии.

По результатам моделирования можно сказать, что схема обладает заданными характеристиками (усиление 40 дБ в полосе частот 30...30000 Гц) и может выступать в качестве усилителя звуковой частоты.

Также выполнялось исследование влияния изменения некоторых элементов схемы (резистора R3 и конденсатора C2) на его характеристики (многовариантный анализ). Было показано, что параметры R3 и C2 влияют на полосу пропускания и коэффициент передачи УЗЧ.

Список использованных источников

1. Программа схемотехнического моделирования Micro-CAP. Фирма Spectrum-Soft. [электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.spectrum-soft.com>
2. Двухтактный бестрансформаторный усилитель звуковой частоты [электронный ресурс]. – режим доступа: <http://radiocon-net.narod.ru/page28.htm>
3. Амелина, М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. [электронный ресурс] / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – СПб.: Лань, 2014. – 632 с. – режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/53665>
4. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7. 2008. – М.: Горячая линия-Телеком. – 368 с.
5. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля Общие требования и правила оформления. Образовательный стандарт ВУЗа. ОС ТУСУР 01-2013. [электронный ресурс]. – режим доступа: https://storage.tusur.ru/files/40668/rules_tech_01-2013.pdf



					ФВС КР 583.100.000 ЭЗ													
					ДВУХТАКТНЫЙ БЕСТРАНСФОРМАТОРНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ													
												Лит.			Масса		Масштаб	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата											1		1 : 1	
Разраб.		Петрова А.А																
Провер.		Черкашин М.В.																
												Лист 33			Листов 34			
					Схема принципиальная электрическая													
Н. Контр.												ФВС ТУСУР зр. 583-1						
Утверд.		Шурыгин Ю.А.																

Поз. обозн.		Наименование			Кол.	Примечание		
		Резисторы						
R1		180 кОм			1			
R2		36 кОм			1			
R3		1.5 кОм			1			
		Конденсаторы						
C1, C3		1 мкФ			2			
C2		2200 пФ			1			
		Транзисторы						
VT1-VT2		КТ3107А			2			
VT3		КТ3102В			1			
		Диоды						
VD1		Д220А			1			