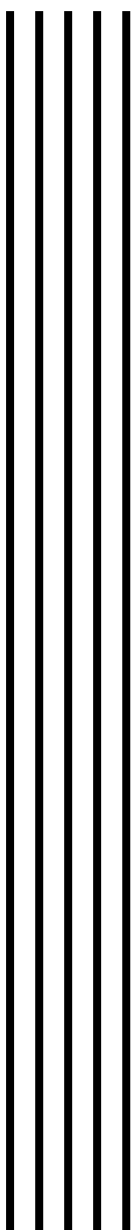


Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
Лабораторный практикум по дисциплине
“Синтез линейных радиотехнических цепей”
для студентов дневной формы обучения
направления 6.050901 — “Радиотехника”

Севастополь
2011

УДК 621.3.011.73

Методические указания. Лабораторный практикум по дисциплине “Синтез линейных радиотехнических цепей” для студентов дневной формы обучения направления 6.050901 — “Радиотехника” / Сост. С. Р. Зиборов. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. — 56 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении лабораторных работ по дисциплине “Синтез линейных радиотехнических цепей”, а также в изучении специальных пакетов прикладных программ, предназначенных для схемотехнического моделирования электрических схем.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций (протокол № 5 от 2 декабря 2010 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний для студентов

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Савочкин А. А.

Ответственный за выпуск: заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникаций, доктор техн. наук, профессор Гимпилевич Ю. Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Принятые сокращения	4
Введение	5
1. Лабораторная работа № 1 Изучение системы команд программы <i>Micro-Cap</i> .	7
2. Лабораторная работа № 2 Исследование модели цепи с помощью программы <i>Micro-Cap</i>	17
3. Лабораторная работа № 3 Синтез и исследование пассивных двухполюсников с помощью программы <i>Micro-Cap</i>	27
4. Лабораторная работа № 4 Синтез и исследование аналоговых фильтров с помощью программы <i>Micro-Cap</i>	35
5. Лабораторная работа № 5 Синтез и исследование аналоговых фильтров с помощью программы <i>Filter Solutions</i>	44
Библиографический список.....	54
Приложение А Образец титульного листа	55

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика

ГВЗ — групповое время задержки

ЗФ — заграждающий фильтр

ППФ — полосно-пропускающий фильтр

ФВЧ — фильтр верхних частот

ФНЧ — фильтр нижних частот

ФЧХ — фазочастотная характеристика

ВВЕДЕНИЕ

Порядок выполнения лабораторных работ

Каждая лабораторная работа выполняется на персональном компьютере в течение двухчасового занятия бригадой из 1...2 студентов.

Перед выполнением лабораторной работы студенты обязаны:

- до начала занятия самостоятельно изучить методические указания к предстоящей лабораторной работе;
- в начале занятия представить и защитить отчет по предыдущей лабораторной работе, а затем ответить на контрольные вопросы, связанные с выполняемой следующей работы.

Студенты, не выполнившие вышеуказанные требования, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

В начале выполнения первой лабораторной работы необходимо открыть программу **Word** и создать файл, присвоив его имени свою фамилию, номер группы и номер лабораторной работы (например, **Иванов_P41д_ЛР1.doc**). Данный файл следует сохранить в директории, указанной преподавателем, и использовать в качестве **электронного протокола** лабораторной работы. В процессе выполнения лабораторной работы в электронный протокол копируются результаты моделирования (вид модели, временные диаграммы, частотные характеристики, результаты расчета, различные пояснения и т. п.). После завершения работы электронный протокол необходимо показать преподавателю, а затем скопировать на личный носитель информации (дискету, флэш-память и т. п.) и использовать при оформлении отчета по лабораторной работе.

При выполнении компьютерного моделирования рекомендуется сначала произвести несколько пробных пусков модели без записи результатов, что позволяет убедиться в ее работоспособности и выявить общий вид исследуемых временных или частотных зависимостей. При этом следует выбрать диапазоны изменения времени или частоты, а также интервал (шаг) дискретизации так, чтобы выявить характерные участки исследуемых зависимостей. Затем производится пуск модели с фиксацией результатов моделирования, которые заносятся в электронный протокол лабораторной работы.

Защита отчета по лабораторной работе производится каждым студентом индивидуально на очередном лабораторном занятии. В процессе защиты проверяются: правильность оформления отчета, умение студентов пояснять выполненные расчеты, знание ими методики моделирования, умение пояснить полученные зависимости и обосновать выводы по работе.

Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по работе оформляется в соответствии с общими требованиями кафедры [1] к оформлению текстовых документов и должен содержать:

- титульный лист;
- постановку задачи исследования;
- модели исследованных электрических цепей;
- результаты расчетов и моделирования (расчетные формулы, временные диаграммы, частотные характеристики и т. п.);

— выводы.

Образец титульного листа приведен в Приложении А.

При постановке задачи исследования необходимо указать цель работы и задание, которое необходимо выполнить для достижения этой цели.

При выполнении расчетов следует привести исходные данные для расчета, расчетные соотношения и полученные результаты. Все расчеты и результаты моделирования должны сопровождаться соответствующими пояснениями.

В отчете необходимо привести схемы исследованных моделей и результаты моделирования в виде частотных и временных характеристик. Все рисунки должны быть пронумерованы и иметь подробные подрисуночные надписи.

Не следует подменять выводы перечислением выполненных пунктов лабораторной работы. Выводы должны носить конкретный характер и соответствовать полученным результатам. Необходимо пояснить особенности полученных зависимостей и их взаимосвязь с условиями моделирования. Следует оценить соответствие расчетных данных и результатов моделирования, а в случае их расхождения указать возможные причины этого.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ КОМАНД ПРОГРАММЫ *MICRO-CAP*

1.1. Цель лабораторной работы

Целью работы является изучение системы команд программы *Micro-Cap* и приобретение навыков исследования модели электрических цепей, созданной с помощью этой программы.

1.2. Основные сведения о программе Micro-Cap

Программа *Microcomputer Circuit Analysis Program*, более известная по ее сокращенному названию *Micro-Cap*, позволяет моделировать аналоговые, цифровые, а также смешанные аналого-цифровые цепи и устройства, содержащие до нескольких сотен элементов.

Программа *Micro-Cap* содержит библиотеку элементов (резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов, интегральных схем и т. п.), а также функциональных устройств, наиболее часто используемых в радиотехнических устройствах и системах. Кроме того, программа позволяет пользователю пополнять библиотеку новыми готовыми к использованию элементами, а также создавать библиотечные элементы и функциональные устройства.

Процесс создания модели отображается на экране монитора персонального компьютера.

Если модель составлена правильно, то программа позволяет:

- исследовать переходные процессы и частотные характеристики модели, а также спектр узловых напряжений и токов ветвей моделируемой схемы;
- определять чувствительность характеристик модели к изменениям параметров элементов;
- оптимизировать характеристики моделей при изменении одного или нескольких параметров элементов модели.

Если в процессе создания модели была допущена ошибка, то программа вырабатывает комментарий с указанием вида ошибки, причины и места ее возникновения.

Программа содержит раздел встроенной помощи на английском языке, в который входят:

- описание программы;
- предметный указатель и система поиска, позволяющие целенаправленно вызывать нужный раздел помощи;
- небольшие учебные анимационные видеофильмы, демонстрирующие правила создания моделей и работы с ними.

Русскоязычное описание программы можно найти в работах [2, 3].

1.3. Интерфейс программы Micro-Cap

1.3.1. Структура окна модели

На рис. 1.1 изображено рабочее окно модели, которое появляется на экране монитора после запуска программы *Micro-Cap* и предназначено для создания модели электрической цепи.

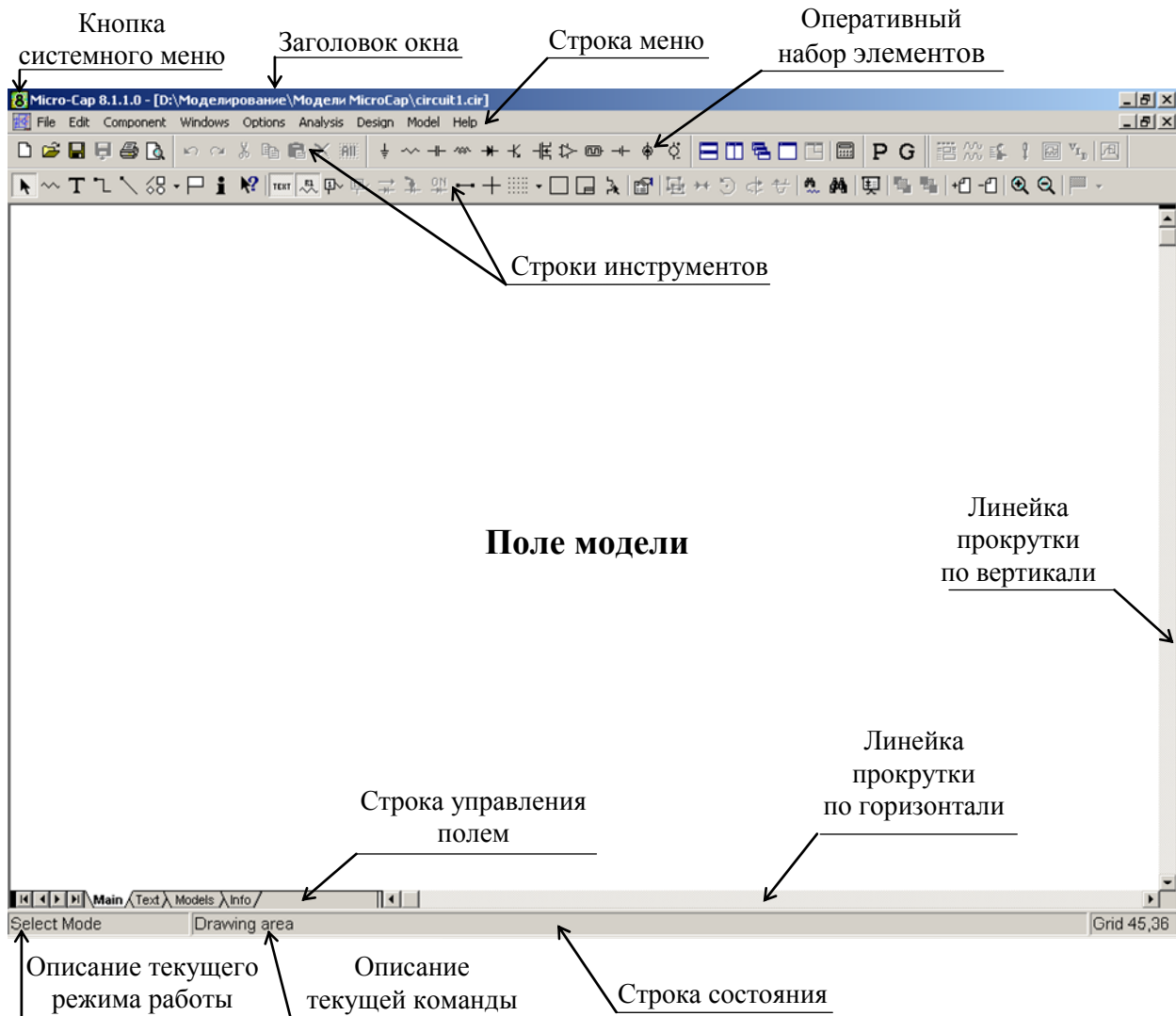


Рис. 1.1 — Рабочее окно модели

В левом верхнем углу окна расположена кнопка системного меню , содержащего команды, с помощью которых сворачивают, разворачивают и закрывают окно (рис. 1.2). Слева от кнопки системного меню находится заголовок окна с указанием имени открытого файла и каталога, в котором он расположен. Если открыто рабочее окно анализа характеристик модели, то указывается вид выполняемого анализа.

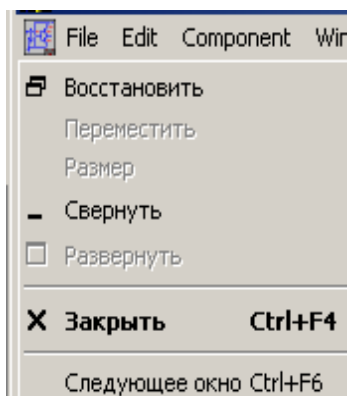


Рис. 1.2 — Системное меню

Под заголовком окна располагается строка меню, содержащая кнопки: , **File**, **Edit**, **Component**, **Windows**, **Options**, **Analysis**, **Design**, **Help**, каждая из которых открывает спадающее меню с набором команд, соответствующих названию кнопки.

Кнопки , расположенные в правом верхнем углу окна, предназначены для изменения размеров открытого окна и его закрытия.

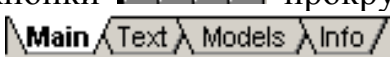
Под строкой меню расположены строки инстру-

ментов, в которых располагаются кнопки, соответствующие наиболее часто используемым командам. В первой строке инструментов расположены кнопки , аналогичные по своему назначению таким же кнопкам окна программы *Microsoft Office Word*, а также оперативный набор элементов, наиболее часто используемых в исследуемых моделях. Во второй строке инструментов кнопка  включает режим выбора, который используется для выделения элемента или части модели.

Среди команд, кнопки которых расположены в строках инструментов, есть команды немедленного действия, кнопки которых остаются нажатыми непродолжительное время и затем восстанавливают исходное положение, и команды режимов работы окна, кнопки которых остаются нажатыми до момента смены режима.

Ниже второй командной строки располагается главное поле, в котором могут располагаться исследуемая модель, результаты моделирования, текстовая информация.

Справа от главного поля расположена линейка прокрутки содержимого поля по вертикали.

Под главным полем расположена строка управления полем модели, в левой часть которой находятся кнопки  прокрутки листов многостраничной модели, а также кнопки  для вызова следующих полей:

— **Main** — главное поле, в котором располагается исследуемая модель и результаты моделирования;

— **Text** — текстовое поле, в котором размещается описание математических моделей элементов;

— **Models** — текстовое поле, в котором находятся директивы модели;

— **Info** — информационное поле, в котором находится дополнительная информация.

В правой части строки управления полем расположена линейка прокрутки содержимого поля по горизонтали.

В нижней части окна находится строка состояния, в которой отображается описание текущего режим работы программы и текущей команды. В частности, на рис. 1.1 изображен вид окна в режиме выбора элементов (*Select mode*) при выполнении команды создания модели (*Drawing Area*).

Кнопка  по своему назначению аналогична кнопке системного меню и используется только при работе с рабочим окном модели.

1.3.2. Меню *File*

Кнопка **File** открывает меню (рис. 1.3), содержащее следующие команды:

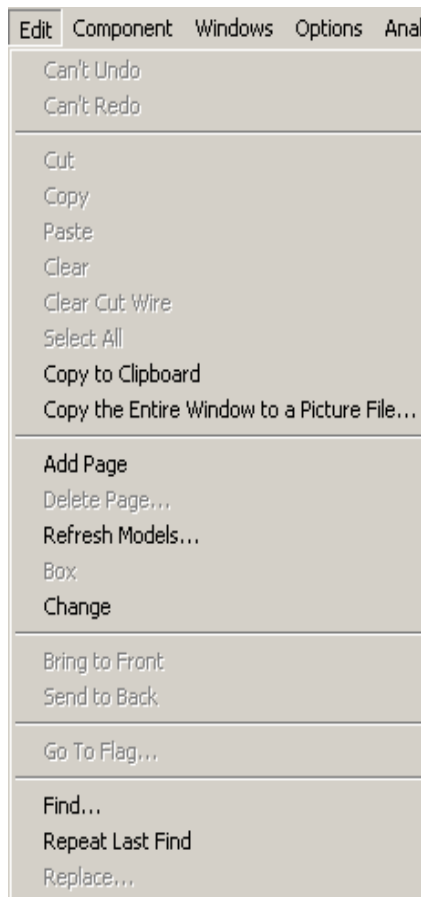
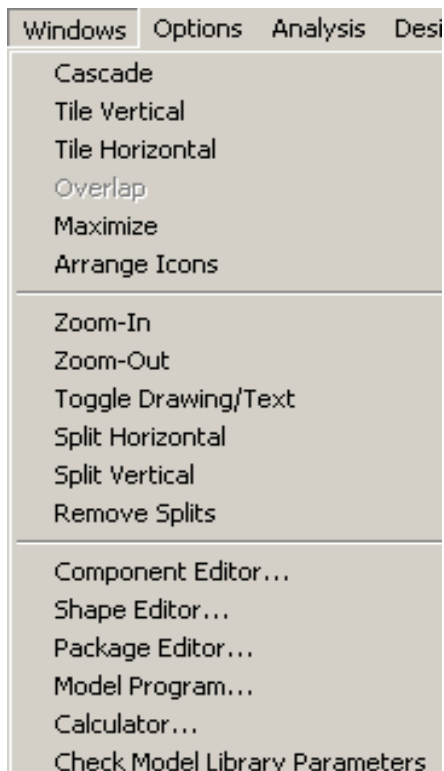
— **New...** — создать новую модель схему;

— **Open...** — открыть уже созданную модель,

— **Save** — сохранить файл;

— **Save as...** — присвоить название файлу и сохранить;

— **Translate** — преобразовать файл из одной версии *Micro-Cap* в другую;

Рис. 1.4 — Меню *Edit*Рис. 1.5 — Меню *Windows*

— *Load MC File...* — загрузить файл программы *Micro-Cap*;

— *Close* — закрыть файл;

— *Print Preview...* — предварительный просмотр печати;

— *Print...* — печать;

— *Print Setup...* — включить режим печати;

— *Exit* — закрыть файл.

Некоторые команды выполняются сразу после их выбора. Команды, отмеченные многоточием “...” требуют ввода дополнительной информации. Например, команда *Save as...* (сохранить как) вызывает появление дополнительного окна, куда следует ввести имя сохраняемого файла.

1.3.3. Меню *Edit*

Кнопка *Edit* открывает меню (рис. 1.4), которое содержит команды:

— *Can't Undo* — отменить последнюю команду;

— *Can't Redo* — выполнить предыдущую команду;

— *Cut* — удалить выбранный объект;

— *Copy* — копировать выбранный объект в буфер обмена;

— *Paste* — вставить объект из буфера обмена в открытое окно;

— *Clear* — удалить выбранный объект без копирования в буфер обмена;

— *Select All* — выделить все объекты;

— *Copy to Clipboard* — копировать содержимое поля в буфер обмена.

1.3.4. Меню *Component*

Кнопка *Component* открывает библиотеку аналоговых и цифровых элементов, называемых в программе *Primitives*.

1.3.5. Меню *Windows*

Кнопка *Windows* (рис. 1.5) открывает меню, которое содержит следующие команды:

— *Cascade* — расположить открытые окна каскадно;

— *Tile Vertical* — расположить открытые окна по вертикали;

- **Tile Horizontal** — расположить открытые окна по горизонтали;
- **Overlap** — наложить окно с результатами моделирования поверх окна с моделью схемы;
- **Maximize** — максимизировать выбранное окно;
- **Arrange Icons** — упорядочить иконки свернутых окон в нижней части экрана;
- **Zoom In (Zoom Out)** — увеличить (уменьшить) масштаб изображения;
- **Toggle Drawing/Text** — открыть окно текста вместо окна схемы или наоборот;
- **Split Horizontal** — разделить рабочее окно по горизонтали на окно модели и окно текста;
- **Split Vertical** — разделить рабочее окно по вертикали на окно модели и окно текста;
- **Remove Splits** — устранить разделение окна на две части;
- **Component Editor** — редактировать свойства элемента;
- **Shape Editor** — редактировать графику символов;
- **Package Editor** — редактировать условные обозначения элементов;
- **Model Program** — идентифицировать параметры моделей;
- **Calculator** — вызвать встроенный в программу калькулятор.

1.3.6. Меню *Options*

Поскольку команды меню **Options** при выполнении лабораторных работ не используются, то их описание не приводится. При необходимости подробные сведения об указанных командах можно найти в литературе [2, 3].

1.3.7. Меню *Analysis*

Кнопка **Analysis** открывает меню (рис. 1.6), в состав которого входят команды, соответствующие различным видам анализа:

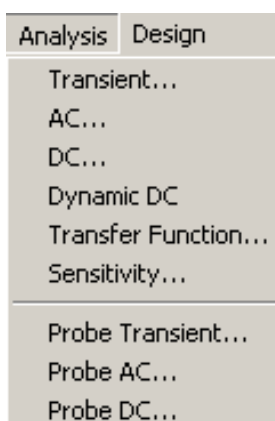


Рис. 1.6 — Меню *Analysis*

- **Transient** — анализ модели во временной области (анализ временных диаграмм);
- **AC** — анализ модели в частотной области (анализ частотных характеристик);
- **DC** — анализ передаточных функций модели по постоянному току в режиме больших сигналов;
- **Dynamic DC** — расчет режима работы модели по постоянному току и отображение на схеме узловых потенциалов;
- **Transfer Function** — расчет передаточной функции по постоянному току в режиме малых сигналов;
- **Sensitivity** — расчет чувствительности исследуемых переменных к изменению параметров модели;
- **Probe Transient, Probe AC, Probe DC** — режимы анализа, аналогичные **Transient**, **AC**, **DC**, при выполнении которых на одной части экрана отображаются результаты моделирования, а на другой — модель

цепи.

Если в меню *Analysis* выбрать команду *Transient*, то открывается рабочее окно *Transient Analysis* (рис. 1.7) анализа модели во временной области, внутри которого находится диалоговое окно *Transient Analysis Limits*.

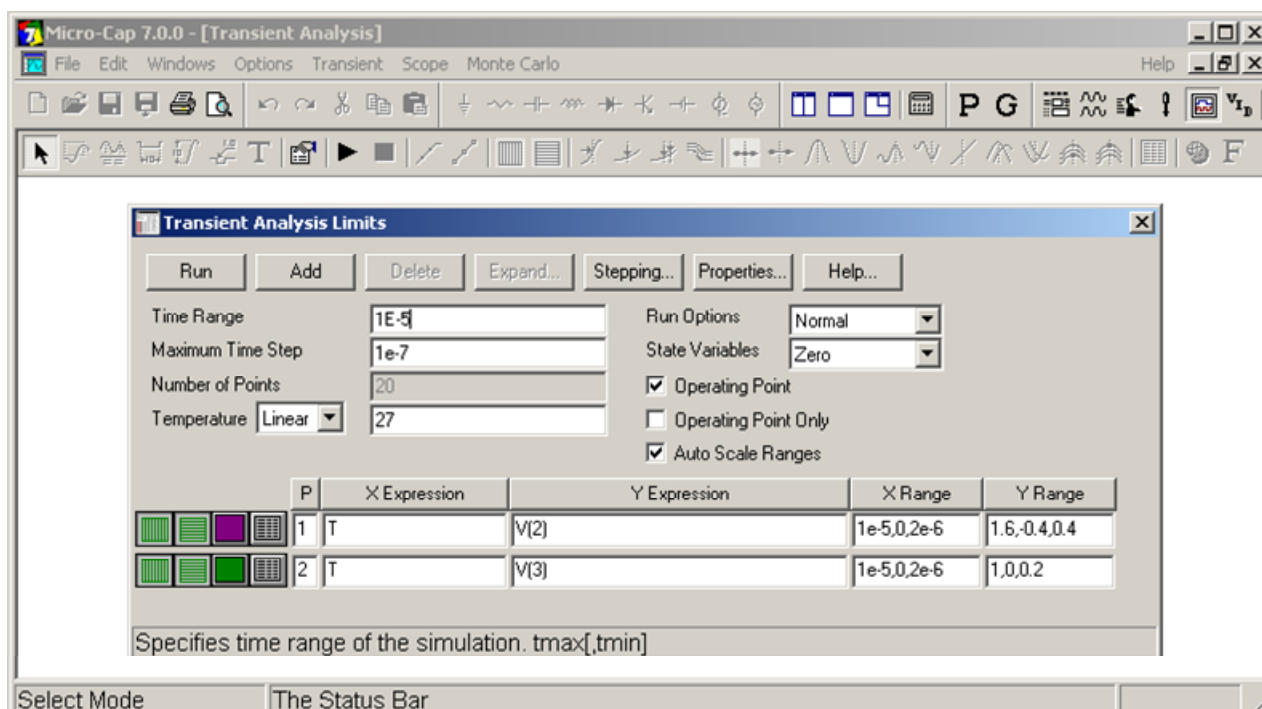


Рис. 1.7 — Рабочее окно *Transient Analysis* до выполнения команды **Run**

В верхней строке рабочего окна *Transient Analysis* расположены кнопки: *File*, *Edit*, *Windows*, *Options*, *Transient*, *Scope*, *Monte Carlo*.

Кнопки *File*, *Edit*, *Windows*, *Options* открывают меню, аналогичные кнопкам рабочего окна модели (см. рис. 1.1).

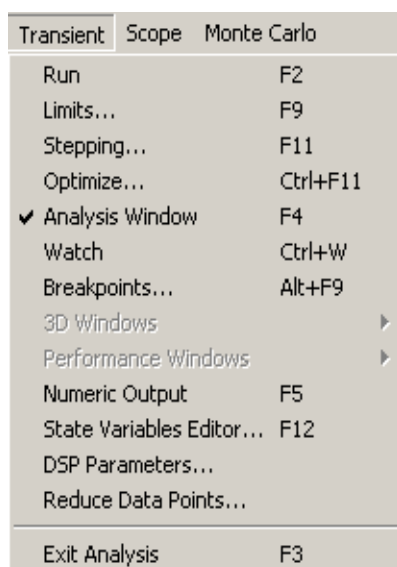


Рис. 1.8 — Меню *Transient*

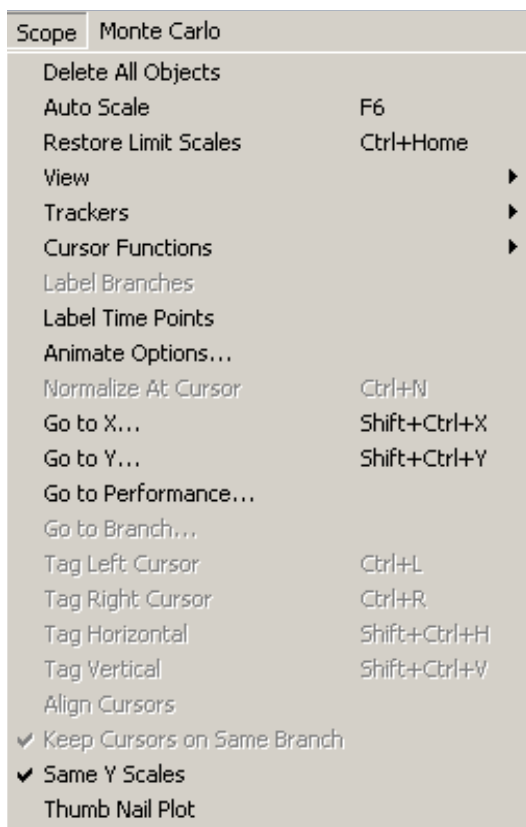
Кнопка *Transient* открывает меню (рис. 1.8), содержащее следующие команды:

- **Run** — запустить моделирование;
- **Limits** — открыть диалоговое окно *Transient Analysis Limits* для задания режима моделирования;
- **Stepping** — открыть окно для задания пошагового изменения параметров элементов модели;
- **Optimize** — открыть окно для выбора параметров оптимизации модели.

Остальные команды данного меню носят вспомогательный характер.

Кнопка *Scope* открывает меню (рис. 1.9), содержащее команды:

- Delete All Objects** — удалить все объекты, добавленные при анализе временных диаграмм;
- Auto Scale** — выполнить автоматическое масштабирование временных диаграмм;

Рис. 1.9 — Меню *Scope*

Restore Limit Scale — восстановить исходный масштаб временных диаграмм;

Остальные команды данного меню позволяют выполнять более детальный анализ исследуемых характеристик модели.

Кнопка **Monte Carlo** открывает меню, содержащее команды позволяющие исследовать характеристики модели при случайных изменениях параметров элементов в соответствии с методом статистических испытаний **Monte Carlo**. Поскольку такие исследования в данных лабораторных работах не выполняются, то описание указанных команд не приводится. Подробную информацию о работе программы в режиме статистических испытаний **Monte Carlo** можно найти в литературе [2, 3].

Диалоговое окно **Transient Analysis Limits** (см. рис. 1.7) предназначено для установки параметров анализа. В верхней строке диалогового окна **Transient Analysis Limits**

находятся кнопки следующих команд:

- **Run** — запустить моделирование;
- **Add** — добавить новую строку в списке наблюдаемых зависимостей;
- **Delete** — удалить строку в списке наблюдаемых зависимостей;
- **Expand** — расширить окно ввода данных;
- **Stepping** — пошаговое изменение параметров элементов;
- **Properties** — открыть диалоговое окно для изменения свойств окна;
- **Help** — вызвать раздел помощи **Transient Analysis**.

В средней части диалогового окна **Transient Analysis Limits** расположены поля ввода параметров режима анализа и списка наблюдаемых временных диаграмм:

- **Time Range** — временной диапазон наблюдения;
- **Maximum Time Step** — максимальный шаг дискретизации;
- **Temperature** — температурный диапазон;
- **P** — номер временной диаграммы;
- **XExpression** — наименование переменной, откладываемой по оси **X**;
- **YExpression** — выражение для величины, откладываемой по оси **Y**;
- **XRange, YRange** — диапазоны анализа величин **X** и **Y** соответственно.
- **Operating Point** — расчет постоянных напряжений и токов;
- **Auto Scale Ranges** — автоматический выбор масштаба по оси **Y**.

Примечание.

При задании временного интервала наблюдения (**Time Range**) первым указывается максимальное значение времени, а затем минимальное. Например,

временной интервал от 1,1 мкс до 100,5 мкс следует задавать в виде: 100.5u, 1.1u или 100.5e-6, 1.1e-6 и т. п.

В нижней части диалогового окна **Transient Analysis Limits** располагается строка помощи с текстом, поясняющим назначение выбранного поля ввода и порядок ввода в него данных.

Для запуска модели необходимо щелкнуть кнопку **Run** в окне **Transient Analysis Limits** либо в меню **Transient**. После запуска модели появляются рабочее окно **Transient Analysis** (рис. 1.10) с временными диаграммами исследуемых величин

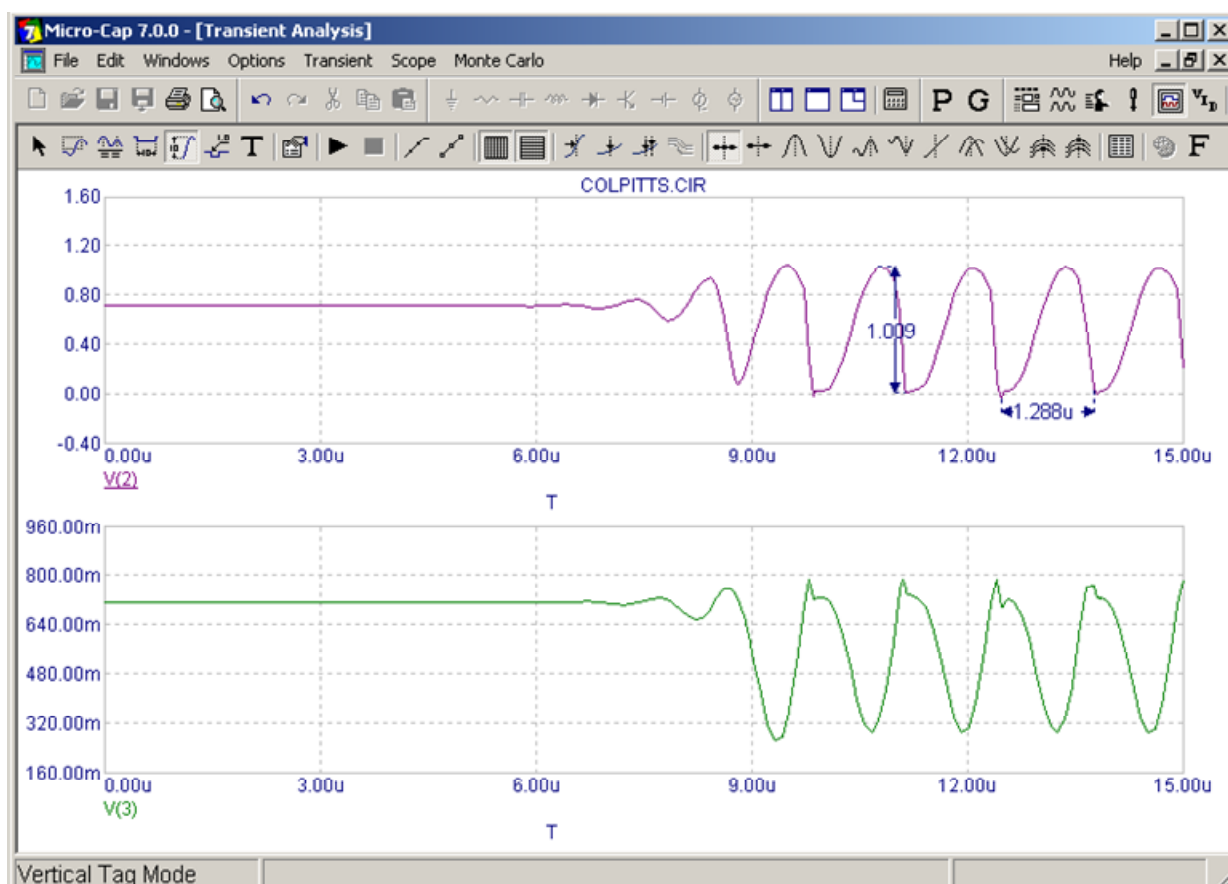


Рис. 1.10 — Рабочее окно **Transient Analysis** после выполнения команды **Run**

Рабочие и диалоговые окна анализа модели в частотной области (AC), по постоянному току (DC) и др. построены аналогично рабочему и диалоговому окнам анализа модели во временной области.

1.3.8. Меню **Design**

Кнопка **Design** открывает меню из двух команд (рис 1.11): **Active Filters** — синтез активных фильтров, **Passive Filters** — синтез пассивных фильтров.



Рис. 1.11 — Меню **Design**

Исполнение команд **Active Filters** или **Passive Filters** вызывает появление диалогового окна для ввода параметров синтезируемого фильтра. Описание этого окна приведено в четвертом разделе (см. п. 4.3, стр. 36 — 40).

1.3.9. Меню *Help*

Кнопка *Help* открывает меню помощи, содержащей документы с описанием программы, а также обучающие видеоролики, имеющие в своем названии слово “*Demo*”.

1.4. Задание на лабораторную работу

При выполнении работы необходимо:

- внимательно прочитать введение (см. стр. 5 — 6);
- изучить систему команд программы *Micro-Cap*;
- исследовать библиотечную модель аналоговой цепи.

1.5. Изучение системы команд программы *Micro-Cap*

1.5.1. Включить персональный компьютер и подготовить электронный протокол лабораторной работы (см. во введение порядок выполнения лабораторных работ).

1.5.2. На рабочем столе монитора навести курсор на пиктограмму  программы *Micro-Cap* и дважды щелкнуть левой клавишей мыши.

1.5.3. Изучить меню программы *Micro-Cap*, используя сведения, изложенные в п. 1.3.

1.6. Исследование модели аналоговой цепи

1.6.1. В строке меню щелкнуть левой клавишей мыши кнопку *File* и в открывшемся меню выбрать команду *Open*. При этом открывается вспомогательное окно *Открыть* с открытой папкой *Data*, в которой хранятся библиотечные модели программы *Micro-Cap*.

1.6.2. В библиотеке моделей найти модель “*Bandpass Filter.cir*” и открыть ее. Модель представляет собой пассивный полосно-пропускающий фильтр.

1.6.3. Скопировать содержимое главного поля в электронный протокол. Для копирования главного поля в буфер обмена используется команда меню *Edit: Copy to Clipboard/Copy the Visible of Window BMP Format*. После копирования необходимо открыть электронный протокол и вставить содержимое буфера обмена в протокол, используя команду *Вставить* из меню *Правка*.

1.6.4. В строке меню щелкнуть левой клавишей мыши кнопку *Analysis* и в открывшемся меню выбрать команду *AC*.

1.6.5. В диалоговом окне *AC Analysis Limits* щелкнуть кнопку *Run*, после чего в окне отображаются амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики фильтра.

1.6.6. Скопировать содержимое главного поля окна *AC Analysis* в электронный протокол.

1.6.7. По АЧХ фильтра определить его полосу пропускания по уровню 0,7 и центральную частоту полосы пропускания.

1.6.8. В строке меню щелкнуть левой клавишей мыши кнопку *AC* и в открывшемся меню выбрать команду *Exit Analysis*, после чего программа выходит из режима *Analysis* и открывает окно с исследуемой моделью.

1.6.9. Дважды щелкнуть левой клавишей мыши условное обозначение ис-

точника напряжения *Sine Source* и в открывшемся диалоговом окне *Sine Source* задать в поле ввода F частоту источника, равную средней частоте полосы пропускания, найденной в п. 1.6.7.

1.6.10. В строке меню щелкнуть левой клавишей мыши кнопку *Analysis* и в открывшемся меню выбрать команду *Transient*.

В диалоговом окне *Transient Analysis Limits* задать следующие параметры:

— в поле ввода *Time range* — интервал времени, необходимый для наблюдения переходного процесса;

— в поле ввода *Maximum Time Step* — шаг дискретизации по времени, который должен быть на порядок меньше периода колебаний входного сигнала;

— в поле *Transient Analysis* — поставить “птичку”;

— в первую и вторую строки столбца *YExpression* записать выражения для входного $V(In)$ и выходного $V(Out)$ напряжений исследуемой цепи.

1.6.11. Щелкнуть левой клавишей мыши кнопку *Run* и, после появления рабочего окна *Transient Analysis* с временными диаграммами, скопировать его главное поле в протокол (см. п. 1.6.3.).

1.6.12. По полученным временным диаграммам определить и записать в протокол:

— амплитуды входного и выходного напряжений в установившемся режиме;

— период колебания огибающей выходного напряжения;

— время установления выходного напряжения.

1.7. Содержание отчета

Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями, приведенными во введении. В выводах следует отметить особенности найденных характеристик модели и указать возможные области применения полосно-пропускающих фильтров.

1.8. Вопросы для самоконтроля

1.8.1. Дайте определение электрической цепи.

1.8.2. Чем отличаются элементы машинной модели цепи от элементов реальной цепи?

1.8.3. Назовите основные временные и частотные характеристики линейных цепей и поясните взаимосвязь, существующую между ними.

1.8.4. Поясните, какие параметры линейной электрической цепи можно определить по ее временным и частотным характеристикам.

1.8.5. Поясните причины возникновения переходных процессов в электрических цепях.

1.8.6. Перечислите основные возможности программы *Micro-Cap*.

1.8.7. Охарактеризуйте цепь, модель которой исследуется в лабораторной работе, и опишите возможные области ее применения.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ *MICRO-CAP*

2.1. Цель лабораторной работы

Целью работы является приобретение практических навыков создания и исследования моделей электрических цепей с помощью программы *Micro-Cap*.

2.2. Создание модели цепи с помощью программы *Micro-Cap*

Элементы моделей, создаваемых с помощью программы *Micro-Cap*, можно выбирать либо из оперативного набора элементов (рис. 2.1), либо из библиотеки элементов (рис. 2.2).

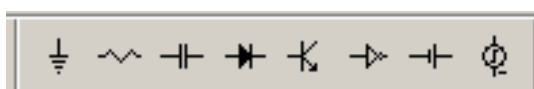


Рис. 2.1 — Оперативный набор элементов

Оперативный набор элементов находится посередине первой строки инструментов рабочего окна модели (рис. 1.1) и содержит пиктограммы наиболее часто употребляемых элементов (заземление, сопротивление, емкость, индуктивность, диод и др.).

Библиотека элементов открывается нажатием кнопки *Component*, которая находится в верхней командной строке рабочего окна модели. Библиотека

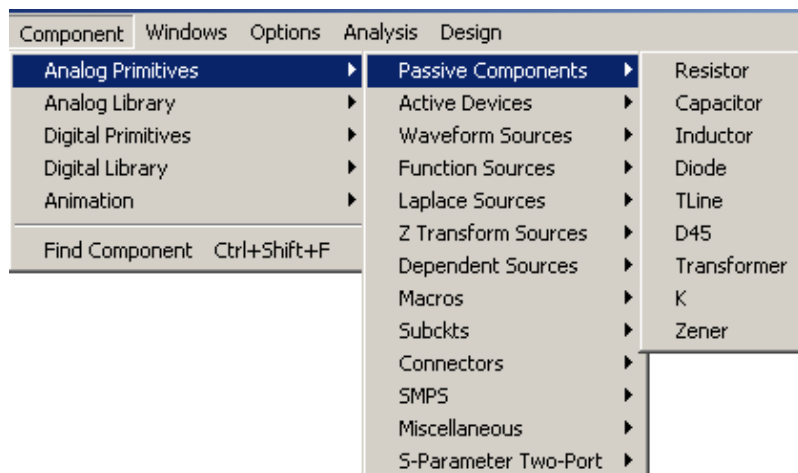


Рис. 2.2 — Библиотека элементов

имеет иерархическую структуру и содержит аналоговые и цифровых элементы, называемых в программе *Primitives*. Разделы библиотеки, отмеченные знаком в виде треугольника ►, имеют собственное меню, открывающееся справа от основного меню.

Для выбора библиотечного элемента необходимо навести на него курсор, щелкнуть левой клавишей

мышью, освободить клавишу и перевести мышью курсор в область рабочего окна. При этом курсор принимает вид графического изображения элемента. Если затем курсор переместить на место предполагаемого расположения элемента и щелкнуть левую клавишу мыши, то на месте расположения курсора останется графическое изображение элемента и одновременно с этим появляется диалоговое окно выбранного элемента, в котором необходимо задать значения его параметров.

Для поворота элемента в нужное положение необходимо навести на него курсор, нажать левую клавишу мыши и, не отпуская нажатую клавишу, щелкнуть правой клавишей. Каждый щелчок вызывает поворот графического изо-

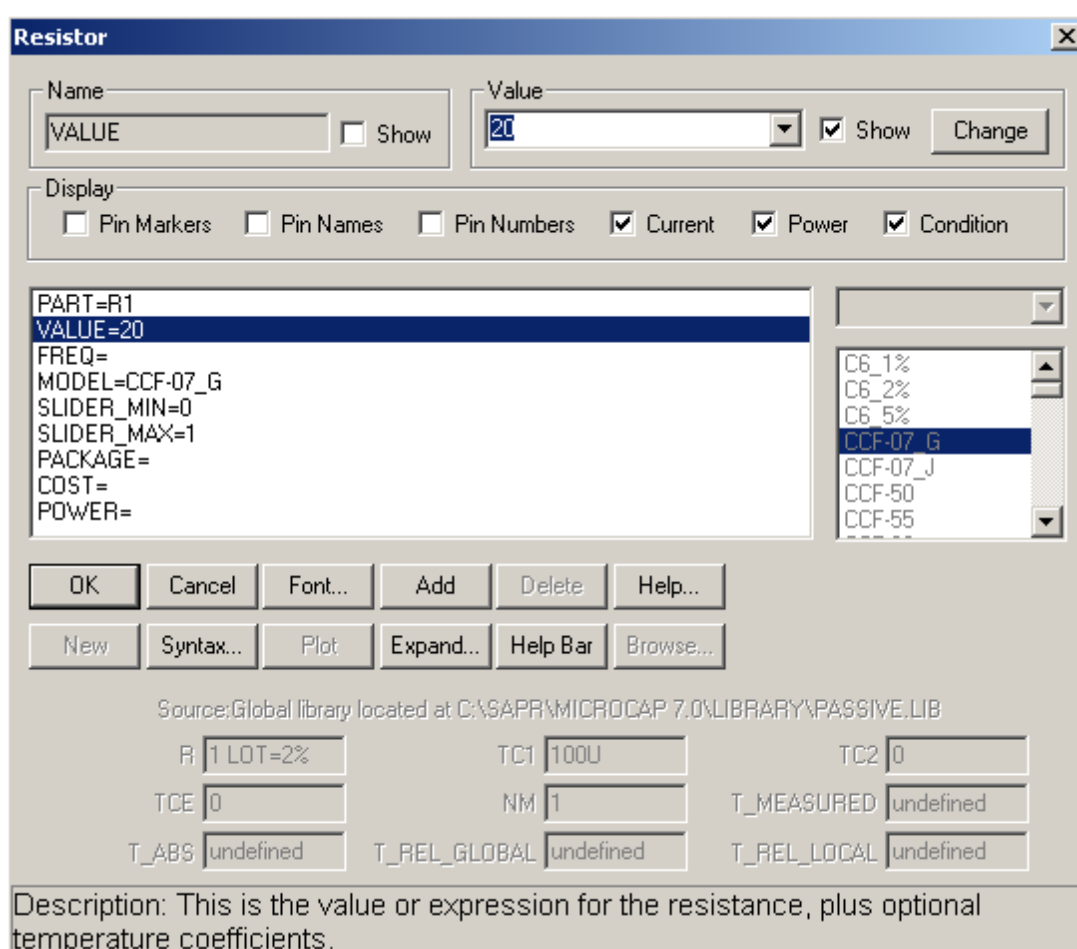
бражения элемента на 90°.

Для соединения элементов проводниками под прямыми углами используется команда *Wire Mode*, вызываемая с помощью кнопки , а под произвольными углами — команда *Diagonal Wire Mode*, вызываемая с помощью кнопки .

Внимание! При создании модели необходимо, чтобы хотя бы один ее узел был заземлен путем присоединения к нему символа $\perp$. При отсутствии данного символа в составе модели программа Micro-Cap выводит сообщение об ошибке.

Библиотеки *Analog Primitives* и *Digital Primitives* содержат модели элементов без указания их параметров.

На рис. 2.3 показано диалоговое окно *Resistor* для ввода параметров резистора.



Resistor

Name: ☐ Show

Value: ☒ Show

Display:

☐ Pin Markers ☐ Pin Names ☐ Pin Numbers ☒ Current ☒ Power ☒ Condition

Attributes:

- PART=R1
- VALUE=20
- FREQ=
- MODEL=CCF-07_G
- SLIDER_MIN=0
- SLIDER_MAX=1
- PACKAGE=
- COST=
- POWER=

Models:

- C6_1%
- C6_2%
- C6_5%
- CCF-07_G
- CCF-07_J
- CCF-50
- CCF-55

Buttons: OK, Cancel, Font..., Add, Delete, Help..., New, Syntax..., Plot, Expand..., Help Bar, Browse...

Source: Global library located at C:\SAPR\MICROCAP 7.0\LIBRARY\PASSIVE.LIB

Parameters:

R	1 LOT=2%	TC1	100U	TC2	0
TCE	0	NM	1	T_MEASURED	undefined
T_ABS	undefined	T_REL_GLOBAL	undefined	T_REL_LOCAL	undefined

Description: This is the value or expression for the resistance, plus optional temperature coefficients.

Рис. 2.3 — Диалоговое окно *Resistor*

В средней части диалогового окна расположен список атрибутов (свойств) резистора:

- **PART** — наименование (на рис. 2.3 введено наименование *R1*);
- **VALUE** — значение сопротивления (на рис. 2.3 введено значение 20 Ом);
- **FREQ** — функция, определяющая зависимость сопротивления от частота (при вводе в эту строку выражения, оно заменяет значение **Value** при рабо-

те в режиме *AC Analysis*);

— **MODEL** — модель резистора из списка, расположенного в правой части окна, который доступен при активации команды **MODEL** (на рис. 2.3 выбрана модель резистора *CCF-07_G*);

— **SLIDER MIN** и **SLIDER MAX** — минимальное и максимальное значения сопротивления переменного резистора (потенциометра);

— **PACKAGE** — компоновка (тип корпуса и габариты);

— **COST** — цена;

— **POWER** — максимальная рассеиваемая мощность.

Если в рамке **Show**, расположенным справа от строки **VALUE**, поставлена отметка, то содержимое строки **VALUE** будет отображено на поле модели.

В нижней части диалогового окна **Resistor** расположены команды:

— **OK** — подтвердить окончание ввода и закрыть окно;

— **Cancel** — отменить ввод и закрыть окно;

— **Font** — выбрать типа шрифта для отображаемых параметров резистора;

— **Add** — добавить новый атрибут к списку;

— **Delete** — удалить атрибут из списка;

— **Help** — вызвать помощь;

— **New** — добавить лист для новой модели;

— **Syntax...** — вызвать раздел помощи с описанием элемента;

— **Plot** — показать график выбранной характеристики элемента;

— **Expand** — расширить окно ввода параметра;

— **Help Bar** — добавить строку оперативной помощи, которая видна в нижней части окна **Resistor** (рис. 2.3), с кратким пояснением вводимого параметра.

Значения параметров элемента задаются без указания их размерности, используя точку в качестве разделителя целой и дробной частей числа. В таблице 2.1 представлены обозначения целых степеней 10, используемые в программе *Micro-Cap*.

Таблица 2.1 — Обозначения целых степеней по основанию 10

Обозначение	Наименование	Число
F	фемто	10^{-15}
P	пико	10^{-12}
N	нано	10^{-9}
U	микро	10^{-6}
M	милли	10^{-3}
K	кило	10^3
MEG	мего	10^6
G	гига	10^9
T	тера	10^{12}

Примечание. Сокращения, указанные в первом столбце таблицы 2.1, мо-

гут быть записаны как прописными, так и строчными латинскими буквами. Например сопротивление 103 Ом можно задать одним из следующих образов: 103, 1.03e2, .103K и т. п.

После ввода необходимых параметров элемента следует щелкнуть кнопку **ОК**. При этом окно ввода параметров закрывается.

Диалоговое окно для ввода параметров других элементов (емкости C , индуктивности L , коэффициента связи K между индуктивностями, источника напряжения и т. п.) построены аналогично диалоговому окну резистора.

Источники напряжения содержатся в библиотеке элементов по пути **Component—Analog Primitives—Wave Sources**. При выполнении лабораторной работы необходимо использовать следующие источники напряжения:

- **Battery** — источник постоянного напряжения;
- **Sine Source** — источник синусоидального напряжения;
- **Pulse Source** — источник импульсного напряжения.

Для выбора нужного источника напряжения следует навести курсор на его наименование в каталоге и щелкнуть левой клавишей мыши. Размещение выбранного источника в рабочем окне модели выполняется аналогично описанному выше размещению элемента. В качестве примера на рис. 2.4 показано диалоговое окно источника синусоидального напряжения **Sine Source**.

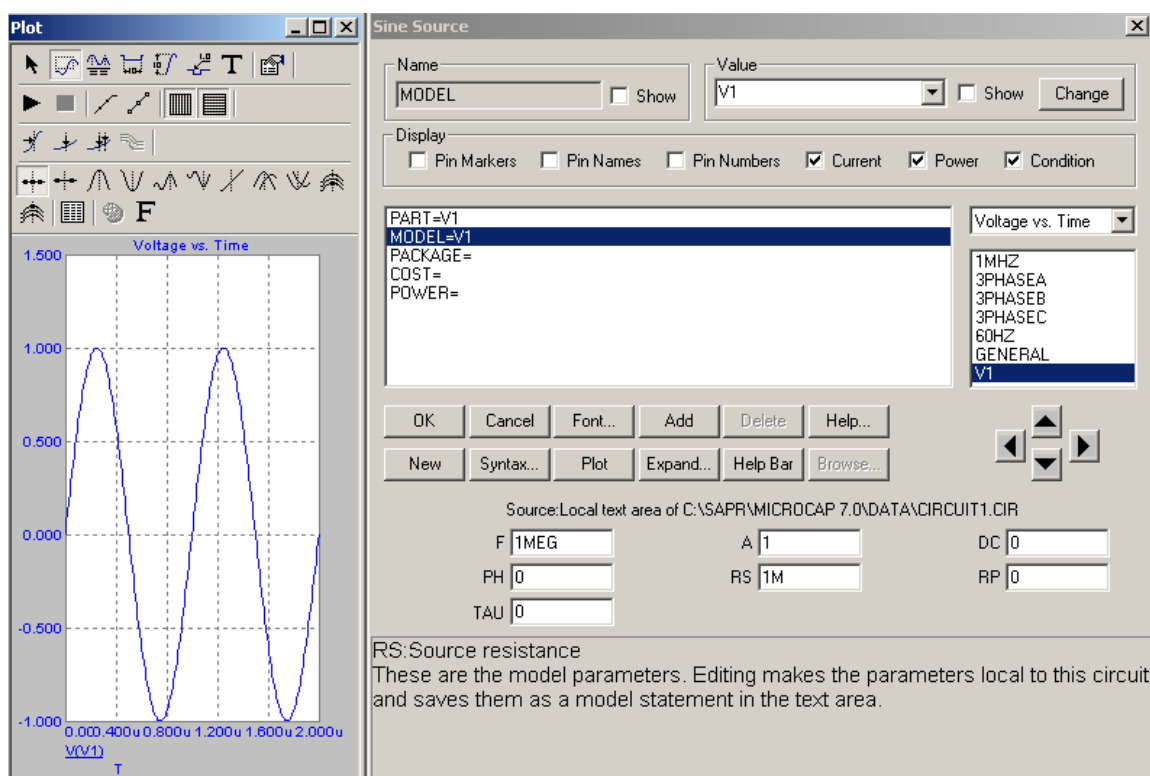


Рис. 2.4 — Диалоговое окно источника синусоидального напряжения

В средней части окна расположен список атрибутов источника: **PART** — наименование; **MODEL** — вид модели; **PACKAGE** — тип корпуса; **COST** — цена; **POWER** — мощность. Для отображения выбранного атрибута в главном

поле модели необходимо поставить отметку в рамке **Show**.

В правой части окна расположен список моделей источников синусоидального напряжения (1 **MHZ**, **3PHASEA**, **3PHASEB**, **3PHASEC** и др.).

В отдельные рамки панели **Source local text area** вводятся значения параметров источника напряжения, описание которых представлено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Параметры модели **Sine Source**

Обозначение	Наименование	Размерность
F	Частота	Гц
A	Амплитуда	В
DC	Постоянная составляющая	В
PH	Начальная фаза	град
RS	Внутреннее сопротивление	Ом
RP	Период повторения огибающей	с
TAU	Постоянная времени огибающей	с

Для получения незатухающего синусоидального напряжения необходимо ввести параметры **DC**, **PH**, **RP** и **TAU**, равными нулю. При нажатии кнопки **Plot** открывается окно с изображением временной диаграммы выходного напряжения источника. В нижней части окна расположена строка, содержащая пояснение атрибута источника или кнопки окна, на которые наведен курсор.

На рис. 2.5 показано диалоговое окно источника **Pulse Source**, а на рис. 2.6 — формируемое им напряжение.

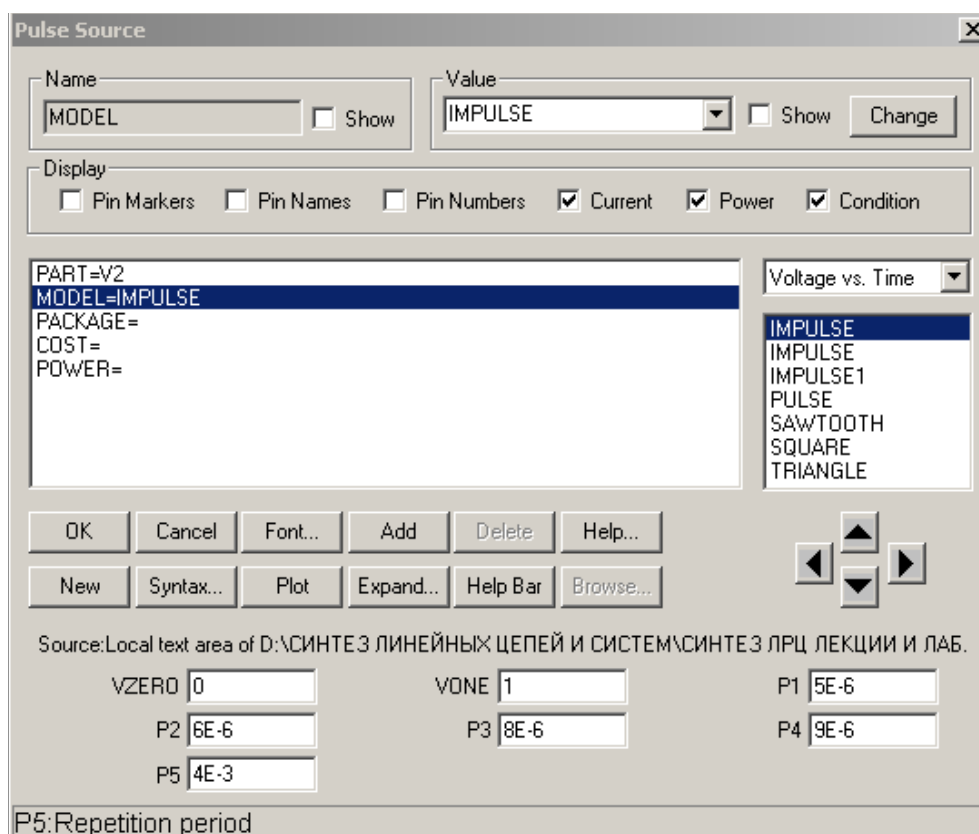


Рис. 2.5 — Диалоговое окно источника импульсного напряжения

Из рис. 2.6 следует, что значения времени $P1, P2, \dots, P5$, соответствующие характерным точкам временной диаграммы должны удовлетворять условию $P1 \leq P2 \leq P3 \leq P4 \leq P5$.

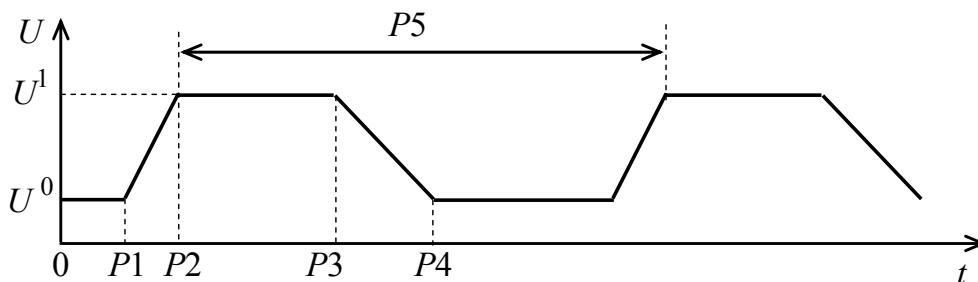


Рис. 2.6 — Временная диаграмма сигнала источника импульсного напряжения

Параметры модели источника импульсного напряжения *Pulse Source*, которые устанавливаются по умолчанию, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Параметры модели *Pulse Source* по умолчанию

Обозначение	Наименование	Размерность
<i>VZERO</i>	Напряжение U^1 , соответствующее логической единице	В
<i>VONE</i>	Напряжение U^0 , соответствующее логическому нулю	В
<i>P1</i>	Начало переднего фронта импульса	с
<i>P2</i>	Начало плоской вершины импульса	с
<i>P3</i>	Конец плоской вершины импульса	с
<i>P4</i>	Конец заднего фронта импульса	с
<i>P5</i>	Период повторения импульсов	с

Для индикации номеров узлов модели необходимо навести курсор на кнопку , которая находится во второй строке инструментов рабочего окна модели, и щелкнуть левой клавишей мыши, после чего рядом с каждым узлом модели индицируется его номер.

2.3. Задание на лабораторную работу

При выполнении лабораторной работы необходимо:

- изучить методику создания модели электрической цепи;
- составить модель заданной цепи;
- исследовать частотные характеристики модели;
- исследовать временные характеристики модели.

2.4. Создание модели пассивного полосно-пропускающего фильтра

2.4.1. Включить персональный компьютер, на рабочем столе системы навести курсор на пиктограмму  программы *Micro-Cap* и дважды щелкнуть левой клавишей мыши.

2.4.2. В строке меню щелкнуть левой клавишей мыши кнопку **Help** и в открывшемся меню выбрать команду **General Demo**. Дважды щелкнув левой клавишей мыши, запустить демонстрационную подпрограмму.

Просмотреть демонстрационный материал, обратив внимание на последовательность действий, выполняемых при создании модели и анализе результатов моделирования. Для временной остановки подпрограммы следует нажать клавишу клавиатуры **Pause/Break**, для возобновления работы программы — любую клавишу клавиатуры, для выхода из подпрограммы — клавишу **Esc**.

2.4.3. В строке меню щелкнуть левой клавишей мыши кнопку **File** и в открывшемся меню выбрать команду **New**. В открывшемся окне **New** поставить точку в строке **Schematic** и щелкнуть кнопку **OK**.

2.4.4. В главном поле рабочего окна составить модель полосно-пропускающего LC-фильтра, показанную на рис. 2.7.

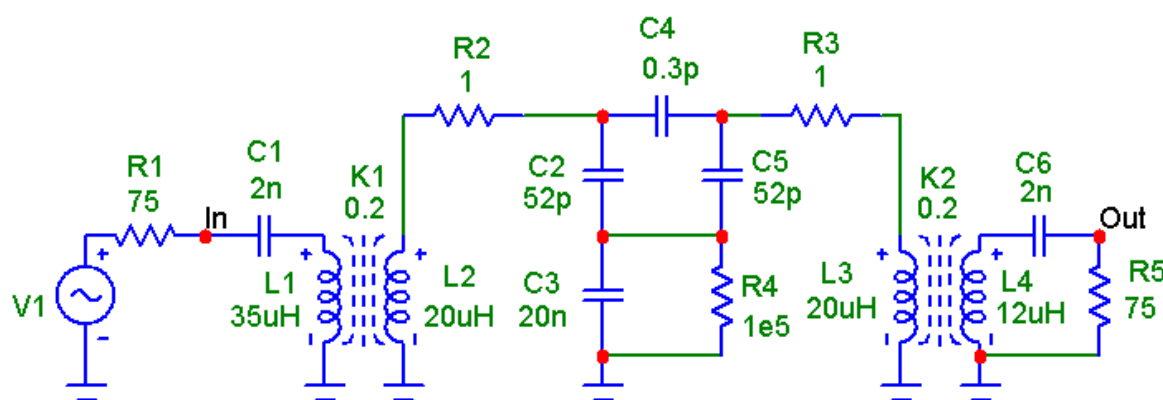


Рис. 2.7 — Модель полосно-пропускающего LC-фильтра

Для моделирования взаимной индуктивности необходимо использовать элемент **K**, который имеет условное обозначение в виде сердечника и находится в библиотеке элементов, которая открывается командой **Component** по пути, показанном на рис. 2.8.

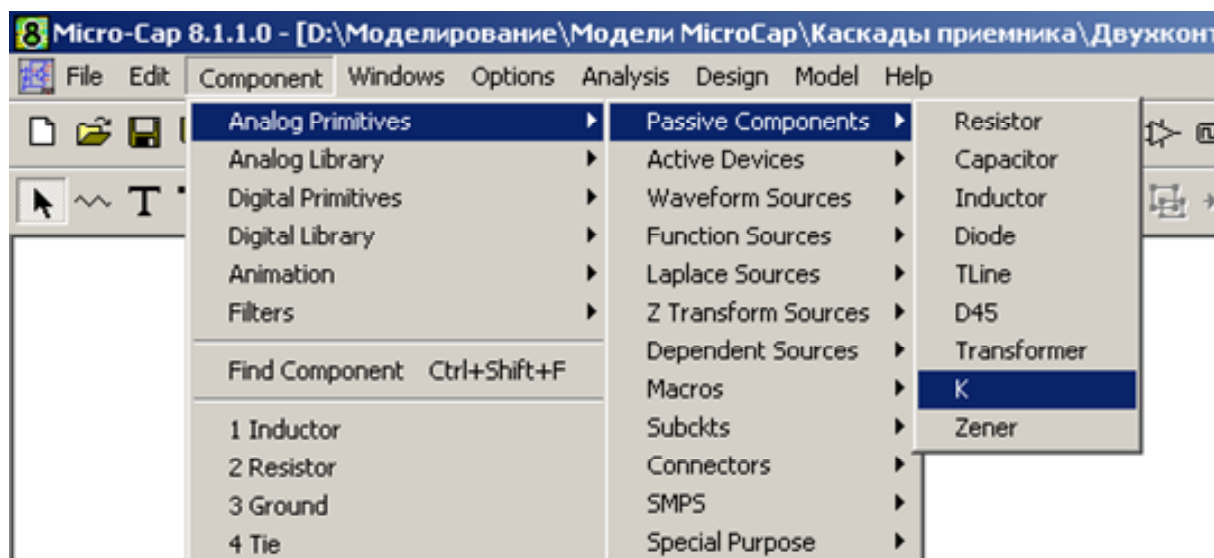


Рис. 2.8 — Расположение элемента **K** в библиотеке элементов

После выделения элемента **K** и щелчка по нему курсором мыши открывается диалоговое окно взаимной индуктивности **Mutual Inductance** (рис. 2.9), в котором в строке **Inductors** необходимо указать через пробел индуктивности, связанные между собой с помощью элемента **K**, а в строке **Coupling** — значение коэффициента связи, указанное для каждого элемента **K** на рис. 2.7.

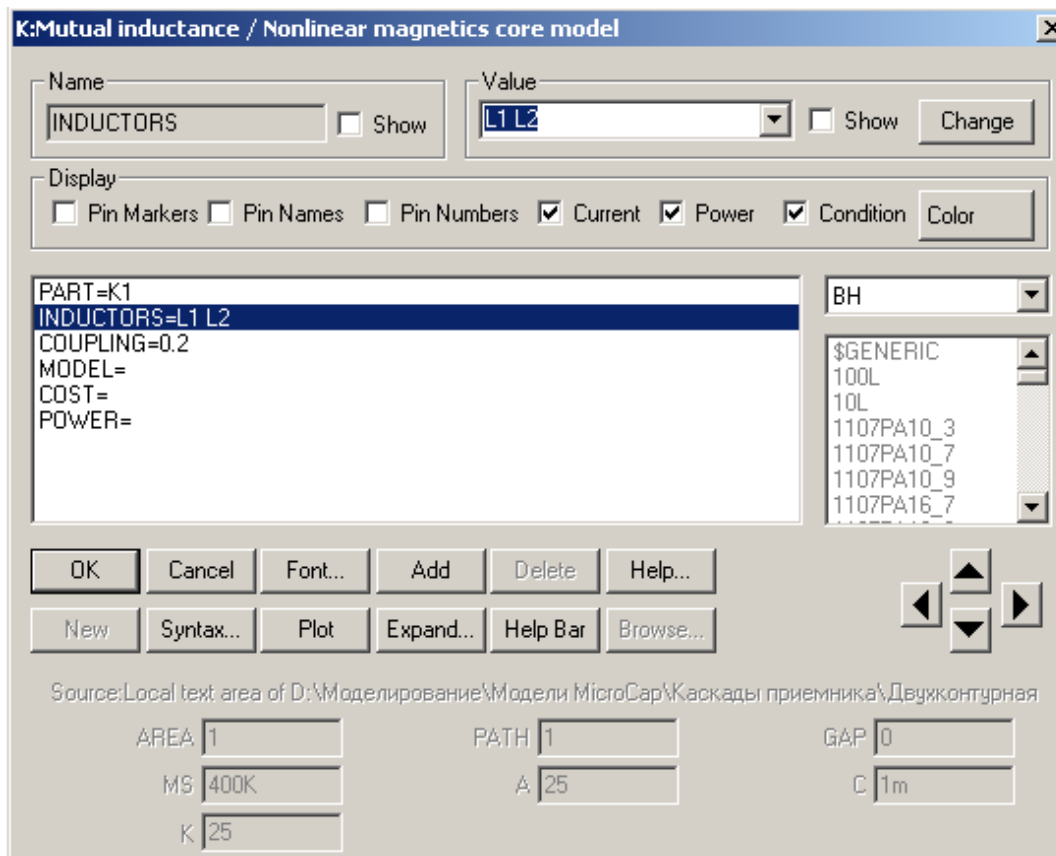


Рис. 2.9 — Диалоговое окно взаимной индуктивности

2.4.5. После того, как модель составлена, необходимо скопировать содержимое главного поля окна в электронный протокол (см. п. 1.6.3.).

2.5. Исследование частотных характеристик фильтра

2.5.1. В строке меню щелкнуть левой клавишей мыши кнопку **Analysis** и в открывшемся меню выбрать команду **AC** (режим анализа частотных характеристик, см. п. 1.3.8).

В открывшемся диалоговом окне **AC Analysis Limits** выбрать пределы изменения частоты (**Frequency Range**) от 4,8 до 5,2 МГц и задать число точек (**Number of Points**), используемых для построения графиков, не менее 1000 или указать относительное приращение частоты (**Maximum Change %**) не более 0,1.

Для наблюдения АЧХ необходимо в первую строку столбца **YExpression** ввести выражение для модуля коэффициента передачи цепи в виде отношения выходного и входного напряжений $V(Out)/V(In)$. Для наблюдения фазочастной характеристики (ФЧХ) необходимо во вторую строку столбца **YExpression** ввести выражение для аргумента коэффициента передачи цепи в виде

$ph(V(Out)/V(In))$. После ввода выражений щелкнуть кнопку **Run**.

2.5.2. Скопировать содержимое главного поля окна **AC Analysis** в электронный протокол лабораторной работы (см. п. 1.6.3.).

2.5.3. Определить центральную частоту f_0 настройки фильтра, значения его полосы пропускания $\Pi_{0,7}$ и $\Pi_{0,1}$ на уровнях 0,7 и 0,1 соответственно, а также коэффициент передачи фильтра на центральной частоте.

2.5.4. В строке меню щелкнуть кнопку **AC** и в открывшемся меню выбрать команду **Exit Analysis**, после чего программа выходит из режима **Analysis** и открывает рабочее окно модели.

2.5.5. Используя полученные данные, рассчитать значения следующих величин:

- период повторения входного сигнала $T_0 = 1/f_0$;
- коэффициент прямоугольности АЧХ $K_{пр} = \Pi_{0,1}/\Pi_{0,7}$;
- добротность фильтра $Q = f_0/\Pi_{0,7}$;
- ожидаемую длительность переходного процесса при включении входного сигнала $T_{уст} \approx 3/(2\pi\Pi_{0,7})$.

Найденные значения занести в протокол лабораторной работы.

2.6. Исследование импульсной характеристики фильтра

2.6.1. Навести курсор на графическое изображение источника напряжения **V1** и щелкнуть левой клавишей мыши. В открывшемся окне **Sine Source** (рис. 2.6) в поле ввода **F** ввести найденное ранее значение частоты настройки фильтра, а в другие поля ввода — значения, указанные на рис. 2.6. Щелкнуть кнопку **OK**.

2.6.2. В строке меню рабочего окна модели щелкнуть левой клавишей мыши кнопку **Analysis** и в открывшемся меню выбрать команду **Transient**.

2.6.3. В открывшемся диалоговом окне **Transient Analysis Limits** (рис. 1.9) задать параметры анализа:

- временной диапазон **Time Range** — не менее $T_{уст}$;
- шаг дискретизации **Maximum Time Step**, не более $0,1T_0$.

2.6.4. В поля ввода **P** ввести номера диаграмм. В строки столбца **YExpression** ввести наименования наблюдаемых узловых напряжений (например, **V(In)**, **V(Out)** или **V(14)**, где **In**, **Out**, 14 — условные буквенно-цифровые обозначения узлов).

2.6.5. Щелкнуть левой клавишей мыши кнопку **Run** и скопировать содержимое главного поля окна **Transient Analysis** в электронный протокол лабораторной работы (см. п. 1.6.3.).

2.6.6. По временным диаграммам определить время установления $T_{уст}$ выходного напряжения. Результаты занести в электронный протокол лабораторной работы (см. п. 1.6.3.).

2.6.7. В командной строке окна щелкнуть левой клавишей мыши кнопку **Transient** и в открывшемся меню выбрать команду **Exit Analysis**, после чего от-

крывается рабочее окно модели.

2.6.8. Заменить источник синусоидального напряжения *Sine Source* источником импульсного напряжения *Pulse Source* и открыть его диалоговое окно (рис. 2.7). Ввести в это окно параметры, позволяющие наблюдать импульсную характеристику фильтра. Для этого содержимое полей ввода *VZERO* и *VONE* следует оставить без изменения. В поля ввода *P1...P5* ввести значения моментов времени, соответствующих периодической последовательности импульсов, длительность которых удовлетворяет условию $(P2 - P3) \leq 0,1T_0$, а период повторения — условию $P5 \geq 1,5T_{уст}$. После ввода необходимых значений щелкнуть кнопку **OK**.

2.6.9. Повторить действия по п. п. 2.6.2....2.6.5.

2.7. Содержание отчета

Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями, приведенными во введении. В выводах следует отметить особенности найденных характеристик модели фильтра и пояснить взаимосвязь между ними.

2.8. Вопросы для самоконтроля

2.8.1. Дайте определение резонанса электрической цепи.

2.8.2. Поясните особенности частотных и временных характеристик параллельного колебательного *LC*-контура.

2.8.3. Поясните возможные области применения электрических фильтров.

2.8.4. Приведите примеры схем простейших электрических *RC*- и *LC*-фильтров.

2.8.5. Поясните, какими параметрами должна обладать модель источника синусоидального сигнала *Sine Source* при анализе частотных характеристик и временных диаграмм модели полосно-пропускающего фильтра.

2.8.7. Поясните, какими параметрами должна обладать модель источника импульсов *Pulse Source* при анализе импульсной характеристики модели полосно-пропускающего фильтра.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MICRO-CAP

3.1. Цель лабораторной работы

Целью работы является синтез пассивных двухполюсников по заданной операторной функции и исследование частотных характеристик синтезированных двухполюсников с помощью программы схемотехнического моделирования *Micro-Cap*.

3.2. Основные теоретические сведения

Операторными функциями двухполюсника называются его операторное сопротивление $Z(p)$ и операторная проводимость $Y(p) = 1/Z(p)$. Операторная функция пассивного двухполюсника представляет собой дробно-рациональную функцию [4, 5]. Например, операторное сопротивление пассивного двухполюсника имеет вид

$$Z(p) = \frac{A(p)}{B(p)} = H \frac{p^n + a_{n-1}p^{n-1} + a_{n-2}p^{n-2} + \dots + a_1p + a_0}{p^m + b_{m-1}p^{m-1} + b_{m-2}p^{m-2} + \dots + b_1p + b_0}. \quad (3.1)$$

где $p = \sigma + j\omega$ — комплексная переменная; σ и ω — вещественная и мнимая части комплексной переменной p соответственно; $H, a_0, a_1, \dots, a_{n-1}, b_0, b_1, \dots, b_{m-1}$ — постоянные коэффициенты, которые зависят от параметров элементов двухполюсника.

Реализуемая операторная функция должна удовлетворять следующим условиям:

- степени полиномов числителя и знаменателя функции должны отличаться не более чем на единицу, а коэффициенты этих полиномов должны быть положительными вещественными числами;
- полюса и нули функции должны располагаться в левой полуплоскости переменной p , причем полюса и нули, расположенные на вещественной оси либо на мнимой оси, должны быть простыми, т. е. первого порядка, и чередоваться;
- реализуемая функция должна быть положительной вещественной функцией.

Если все нули и полюса операторной функции простые и расположены на отрицательной вещественной полуоси, то функция реализуется в виде пассивной *RL*- или *RC*-цепи.

Если все нули и полюса операторной функции простые и расположены на мнимой оси, то функция реализуется в виде пассивной *LC*-цепи.

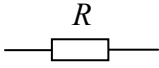
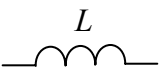
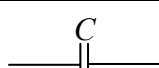
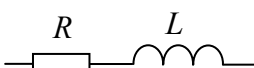
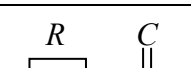
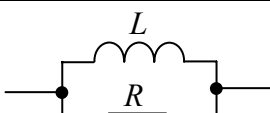
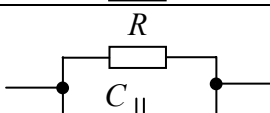
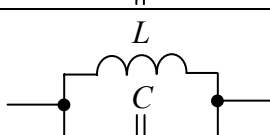
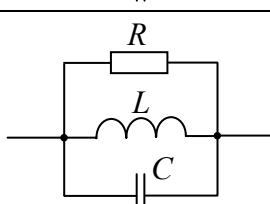
Если операторная функция имеет комплексно сопряженные нули и полюса, расположенные в левой полуплоскости, то она реализуется в виде пассивной *RLC*-цепи.

Способы синтеза двухполюсников по заданной операторной функции ос-

нованы на ее разложении в виде суммы простых функций, каждая из которых реализуется непосредственно в виде элементарного двухполюсника (см. таблицу 3.1).

Параметры $\beta = R/L$, $\gamma = 1/RC$ имеют размерность частоты и являются величинами обратными постоянным времени RL - и RC -цепей соответственно. Параметр $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ является резонансной частотой LC -контура.

Таблица 3.1 — Операторные функции элементарных двухполюсников

№	Схема двухполюсника	Операторная функция двухполюсника	
		$Z(p)$	$Y(p)$
1		R	$\frac{1}{R}$
2		pL	$\frac{1}{pL}$
3		$\frac{1}{pC}$	pC
4		$L(p + \beta)$, где $\beta = \frac{R}{L}$	$\frac{1}{L(p + \beta)}$
5		$\frac{R(p + \gamma)}{p}$, где $\gamma = \frac{1}{RC}$	$\frac{p}{R(p + \gamma)}$
6		$\frac{L(p^2 + \omega_0^2)}{p}$, где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\frac{p}{L(p^2 + \omega_0^2)}$
7		$\frac{Rp}{p + \beta}$, где $\beta = \frac{R}{L}$	$\frac{p + \beta}{Rp}$
8		$\frac{1}{C(p + \gamma)}$, где $\gamma = \frac{1}{RC}$	$C(p + \gamma)$
9		$\frac{p}{C(p^2 + \omega_0^2)}$, где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\frac{C(p^2 + \omega_0^2)}{p}$
10		$\frac{p}{C(p^2 + \gamma p + \omega_0^2)}$, где $\gamma = \frac{1}{RC}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\frac{C(p^2 + \gamma p + \omega_0^2)}{p}$

Если заданная функция (3.1) представляет собой **правильную дробь** ($m > n$), имеющую однократные полюса, то она может быть представлена в виде

$$Z(p) = \sum_{i=1}^m \frac{HD_i}{p - p_i}, \quad (3.2)$$

где m — число полюсов;

$$D_i = \frac{A(p_i)}{\left. \frac{dB(p)}{dp} \right|_{p=p_i}}$$

— вычет функции $Z(p)$ в полюсе $p = p_i$.

Из (3.2) следует, что эта функция реализуется в виде последовательного соединения элементарных двухполюсников, реализующих отдельные слагаемые суммы. Вид схемы и параметры элементарных двухполюсников определяются путем сравнения слагаемых разложения (3.2) с операторными сопротивлениями этих двухполюсников.

В разложении (3.2) **простому вещественному полюсу** $p_i = \sigma_i$ будет соответствовать слагаемое вида

$$Z_i(p) = \frac{HD_i}{p - \sigma_i}, \quad (3.3)$$

паре простых комплексно сопряженных мнимых полюсов $p_l = j\omega_l$ и $p_{l+1} = -j\omega_l$ в разложения (3.2) — слагаемое вида

$$Z_l(p) = \frac{2D_l p}{p^2 + \omega_l^2}. \quad (3.4)$$

а паре комплексно сопряженных полюсов $p_k = \sigma_k + j\omega_k$, $p_{k+1} = \sigma_k - j\omega_k$, имеющих отрицательную вещественную часть $\sigma < 0$ будет соответствовать слагаемое вида

$$F_k(p) = \frac{D_k p}{p^2 - 2\sigma_k p + \sigma_k^2 + \omega_k^2} = \frac{D_k p}{p^2 + p + \omega_0^2}. \quad (3.5)$$

Сравнение функций (3.3) — (3.5) с сопротивлениями элементарных двухполюсников, приведенными в таблице 3.1, показывает, что функция (3.3) реализуется в виде RC -двухполюсника № 8, функция (3.4) — в виде LC -двухполюсника № 9, а функция (3.5) — в виде RLC -двухполюсника № 10. В частности, нулевому полюсу $p_i = 0$ с учетом (3.3) будет соответствовать слагаемое $Z_i(p) = HD_i/p$, которое реализуется в виде емкости (двухполюсник № 3).

Рассмотренный способ реализации называется **первой формой Фостера**.

Если функция (3.1) представляет собой **неправильную дробь** ($m < n$), то путем деления числителя на знаменатель она может быть преобразована к виду

$$Z(p) = Hp + HZ_1(p), \quad (3.6)$$

где Hp — целая часть, которая в соответствии с таблицей 3.1 реализуется в виде индуктивности $L = H \text{ Гн}$; $Z_1(p) = \frac{Q(p)}{B(p)}$ — остаток деления представляет собой правильную дробь и может быть разложен аналогично (3.2) и затем реализован выше описанным способом.

Если в качестве исходной функции использовать не сопротивление, а проводимость $Y(p) = 1/Z(p)$, то она также может быть разложена на простые дроби аналогично (3.2). Данный способ реализации называется **второй формой Фостера**. В этом случае слагаемые разложения сравнивают с проводимостями элементарных двухполюсников, приведенными в таблице 3.1, и исходная функция проводимости реализуется в виде параллельного соединения найденных элементарных двухполюсников.

Кауэром был предложено два способа синтеза реактивных двухполюсников по заданной операторной функции, которые называются **первой и второй формами Кауэра**. При этом заданная операторная функция должна иметь степень полинома числителя больше степени полинома знаменателя.

Рассмотрим реализацию по Кауэру функции (3.1), которая после подстановки $p = j\omega$ становится мнимой, что возможно в случае, если числитель функции является четным полиномом переменной p , а знаменатель — нечетным или наоборот. Пусть числитель заданной функции является четным полиномом, а знаменатель — нечетным полиномом.

В случае синтеза реактивного двухполюсника по первой форме Кауэра полином числителя функции (3.1) делят на полином знаменателя, начиная со старшего члена числителя, в результате чего получают разложение в виде

$$Z(p) = Hp + Z_1(p) = Hp + \frac{1}{Y_1(p)}, \quad (3.7)$$

где $Y_1(p) = 1/Z_1(p)$ — функция обратная остатку деления $Z_1(p)$.

Поскольку знаменатель остатка $Z_1(p)$ остается таким же, как у исходной функции, и является нечетным полиномом, то в результате деления степень полинома числителя должна уменьшиться, но остаться четным числом, что возможно, если она уменьшится на два. В противном случае остаток деления будет нереализуем. Таким образом, остаток $Z_1(p)$ будет представлять собой правильную дробь. Тогда функция $Y_1(p)$, обратная остатку, будет представлять собой неправильную дробь, которую можно преобразовать аналогично (3.7)

$$Y_1(p) = H_1p + Y_2(p) = H_1p + \frac{1}{Z_2(p)}. \quad (3.8)$$

где $Z_2(p) = 1/Y_2(p)$ — функция обратная остатку деления $Y_2(p)$.

Подставляя (3.8) в (3.7), получаем

$$Z(p) = Hp + \frac{1}{H_1p + \frac{1}{Z_2(p)}}.$$

Выполняя описанный процесс деления, можно исходную операторную функцию представить в виде непрерывной дроби

$$Z(p) = Hp + \frac{1}{H_1p + \frac{1}{H_2p + \frac{1}{H_3p + \dots}}}. \quad (3.9)$$

Описанное разложение выполняют до тех пор, пока последний остаток деления в выражении (3.9) не примет вид, реализуемый в виде одного из элементарных реактивных двухполюсников, приведенных в таблице 3.1.

Сравнивая составляющие разложения (3.8) с функциями элементарных двухполюсников, приведенными в таблице 3.1, видно, что первое слагаемое Hp реализуется в виде индуктивности $L = H$ Гн, слагаемое знаменателя, являющееся проводимостью, реализуется в виде емкости $C = H_1$ Ф и т. д. В результате непрерывная дробь (3.9) реализуется в виде LC -цепи, изображенной на рис. 3.1.

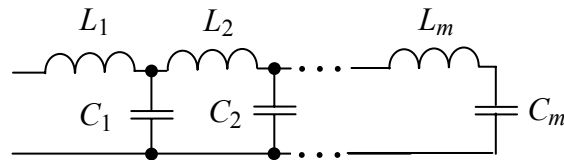


Рис. 3.1 — Реализация реактивного сопротивления по первой форме Кауэра

Если **степень многочлена числителя заданной функции меньше степени многочлена знаменателя** $n < m$, то функцию инвертируют, а затем преобразуют в непрерывную дробь.

В случае синтеза реактивного двухполюсника по второй форме Кауэра деление полинома числителя на полином знаменателя выполняется, начиная с младшего члена полинома числителя. В результате такого деления получается дробь

$$Z(p) = \frac{d_1}{p} + \frac{1}{\frac{d_2}{p} + \frac{1}{\frac{d_3}{p} + \frac{1}{\frac{d_4}{p} + \dots}}}, \quad (3.10)$$

где $d_1, d_2, \dots, d_n$ — постоянные коэффициенты.

Функция (3.10) реализуется также в виде лестничной LC -цепи, которая от-

личается от цепи, показанной на рис. 3.1, тем, что в ней индуктивности и емкости меняются местами.

3.3. Задание на лабораторную работу

При выполнении работы необходимо:

- по заданным операторным функциям синтезировать двухполюсники, используя методы Фостера и Кауэра;
- с помощью программы *Micro-Cap*, создать модели синтезированных двухполюсников и исследовать их частотные характеристики.

3.4. Синтез и исследование пассивного двухполюсника с потерями

3.4.1. Разложить в соответствии с **первой формой Фостера** операторное сопротивление

$$Z(p) = \frac{p^2 + 4p + 3}{p^2 + 2p}. \quad (3.11)$$

3.4.2. Используя полученное разложение, реализовать функцию (3.11) в виде пассивного *RC*-двухполюсника и определить значения параметров его элементов. Нарисовать схему двухполюсника на листе бумаги, указав на ней параметры элементов.

3.4.3. Оценить предельные значения постоянной времени $\tau_{max} = R_{max}C_{max}$ и $\tau_{min} = R_{min}C_{min}$ двухполюсника, где $R_{max}C_{max}$ и $R_{min}C_{min}$ — максимальные и минимальные значения сопротивления и емкости элементов двухполюсника. Рассчитать граничные частоты $f_{min} \approx 0,1/\tau_{max}$ $f_{max} \approx 10/\tau_{min}$ испытательного сигнала, определяющие диапазон исследования частотных характеристик двухполюсника.

3.4.4. Включить персональный компьютер и запустить программу *Micro-Cap*.

3.4.5. Открыть меню **File** и в выбрать в нем команду **New**.

3.4.6. В открывшемся диалоговом окне **New** поставить точку в строке **Schematic** (создание новой схемы) и щелкнуть кнопку **OK**.

3.4.7. Создать в рабочем окне модель двухполюсника (рис. 3.2), реализованного в п. 3.4.2.

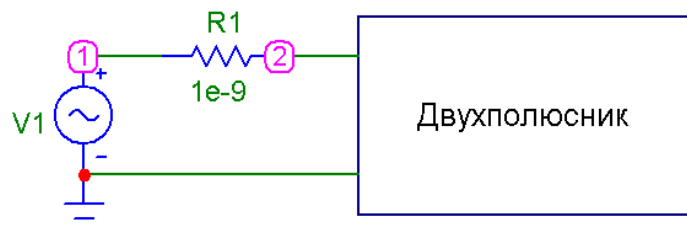


Рис. 3.2 — Схема включения двухполюсника

Примечание.

С целью упрощения нумерации узлов модели ее создание целесообразно начать с источника напряжения, в качестве которого следует использовать ис-

точник синусоидального напряжения *Sine Source*. В качестве второго элемента схемы целесообразно выбрать сопротивление, которое много меньше сопротивления любого элемента двухполюсника, например, $R = 10^{-9}$ Ом, и включить его последовательно с источником напряжения (см. рис. 3.1). Тогда выводам сопротивления $R1$ будут соответствовать первый и второй узлы.

3.4.8. Скопировать содержимое главного поля рабочего окна модели в электронный протокол лабораторной работы (см. п. 1.6.3.).

3.4.9. Открыть меню *Analysis* и выбрать в нем команду *AC*, соответствующую режиму анализа в частотной области.

В открывшемся диалоговом окне *AC Analysis Limits* выбрать пределы изменения частоты *Frequency Range* f_{max} и f_{min} , найденные в п. 3.4.3.

Для наблюдения частотных зависимостей модуля, аргумента, вещественной и мнимой частей сопротивления двухполюсника необходимо в строки столбца *Y Expression* ввести следующие выражения:

— в первую строку — модуль сопротивления $V(2)/I(R1)$, где $V(2)$ — напряжение второго узла, которое является входным сопротивлением двухполюсника; $I(R1)$ — ток в сопротивлении $R1$, который является входным током двухполюсника.

— во вторую строку — аргумент сопротивления двухполюсника $ph(V(2)/I(R1))$;

— в третью строку — вещественную часть $Re(V(2)/I(R1))$, а в четвертую строку — мнимую часть $Im(V(2)/I(R1))$ сопротивления двухполюсника

После ввода исследуемых величин щелкнуть кнопку *Run*.

Примечание. Если выбранные пределы изменения частоты не позволяют выявить особенности исследуемых зависимостей, то их необходимо скорректировать и снова щелкнуть кнопку *Run*.

3.4.10. Скопировать содержимое главного поля окна *AC Analysis* в электронный протокол.

3.5. Синтез и исследование реактивного двухполюсника

3.5.1. Разложить в соответствии с **первой формой Кауэру** операторное сопротивление

$$Z(p) = \frac{8p^4 + 16p^2 + 1}{4p^3 + 2p}. \quad (3.8)$$

3.5.2. Используя результаты разложения (3.8), составить схему двухполюсника и определить значения параметров ее элементов.

3.5.3. Создать модель двухполюсника с помощью программы *Micro-Cap* и скопировать ее вид в электронный протокол, выполнив действия по п. п. 3.4.5.— 3.4.7.

3.5.4. Исследовать частотную зависимость модуля, аргумента, вещественной и мнимой частей сопротивления двухполюсника, выполнив действия по п. п. 3.4.8.— 3.4.11. По исследуемым характеристикам определить резонансные частоты двухполюсника.

3.6. Содержание отчета

Отчет по работе оформляется в соответствии с требованиями, приведенными во введении. Кроме общих сведений в отчете необходимо привести:

- заданные операторные функции, их разложения и полюсно-нулевые диаграммы;
- пояснения, касающиеся определения параметров элементов схем, синтезируемых двухполюсников, (сопротивлений, емкостей и индуктивностей);
- модели исследуемых двухполюсников;
- частотные характеристики синтезированных двухполюсников (модуль, аргумент, вещественная и мнимая составляющие сопротивления).

В выводах необходимо отметить особенности частотных характеристик синтезированных двухполюсников.

3.7. Вопросы для самоконтроля

3.7.1. Дайте определения операторного сопротивления и операторной проводимости двухполюсника.

3.7.2. Перечислите условия реализуемости операторной функции двухполюсника.

3.7.3. Поясните особенности полюсно-нулевой диаграммы операторной функции LC -двухполюсника.

3.7.4. Поясните особенности полюсно-нулевой диаграммы операторных функций пассивных RL - и RC -двухполюсников.

3.7.5. Поясните метод реализации пассивного двухполюсника по заданной операторной функции с помощью первой и второй форм Фостера.

3.7.6. Поясните метод реализации реактансного операторной функции с помощью первой и второй форм Кауэра.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ ФИЛЬТРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ *MICRO-CAP*

4.1. Цель лабораторной работы

Целью работы является синтез электрических фильтров по заданным параметрам и исследование их характеристик с помощью программы *Micro-Cap*.

4.2. Основные теоретические сведения

Электрическим фильтром называется линейный четырехполюсник с частотными характеристиками, обеспечивающими требуемую обработку сигнала.

По взаимному расположению полос пропускания и задерживания различают следующие виды фильтров: фильтр нижних частот (ФНЧ), фильтр верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающий фильтр (ПФ), заграждающий фильтр (ЗФ).

Синтеза фильтра по заданной передаточной функции включает следующие этапы: аппроксимация, реализация и оптимизация.

Если заданная передаточная функция не реализуема, то **на этапе аппроксимации** выбирают реализуемую функцию, которая аппроксимирует заданную с требуемой точностью. Если заданная функция цепи является реализуемой, то переходят к реализации цепи, минуя этап аппроксимации.

На этапе реализации преобразуют заданную или аппроксимирующую функцию к виду, позволяющему определить схему и параметры элементов фильтра. При этом различают каскадную (последовательную) и параллельную реализации.

Каскадная реализация передаточной функции основана на ее разложении в виде произведения функций более низкого порядка, чем заданная функция. При этом фильтр реализуется в виде последовательного соединения элементарных четырехполюсников (каскадов), каждый из которых реализует один из сомножителей разложения. Чтобы исключить взаимное влияние каскадов друг на друга, необходимо либо обеспечить их согласование, либо развязку. Каскадно-согласованная реализация осуществляется с использованием пассивных мостовых четырехполюсников, имеющих одинаковые характеристические сопротивления. Каскадно-развязанная реализация осуществляется с помощью активных RC-каскадов на операционных усилителях, которые имеют большое входное и малое выходное сопротивления.

Параллельная реализация передаточной функции основана на ее разложении в виде суммы функций более низкого порядка, чем заданная функция. При этом фильтр реализуется в виде параллельного соединения каскадов, каждый из которых реализует одно из слагаемых разложения, и сумматора, который суммирует выходные сигналы каскадов.

На этапе оптимизации выполняется целенаправленное изменение параметров элементов синтезированного фильтра так, чтобы цепь удовлетворяла заданному критерию оптимальности.

Программа *Micro-Cap* содержит подпрограмму *Design*, позволяющую

осуществлять синтез моделей активных и пассивных фильтров по заданным типу фильтра и требованиям к его амплитудно-частотной характеристике.

4.3. Описание системы команд подпрограммы *Design*



Рис. 4.1 —
Меню *Design*

В верхней строке рабочего окна программы *Micro-Cap* находится кнопка *Design*, которая открывает меню из двух команд (рис. 4.1): *Active Filters* — синтез активных фильтров; *Passive Filters* — синтез пассивных фильтров.

При выборе команды *Active Filters* открывает диалоговое окно *Active Filter Designer*, имеющее три закладки:

- *Design* — проектирование фильтра;
- *Implementation* — реализация фильтра;
- *Options* — опции (возможности) представления параметров и характеристик фильтра.

Закладка *Design* (рис. 4.2) содержит четыре панели: *Type*, *Response*, *Specification* и *Poles and Zeros*.

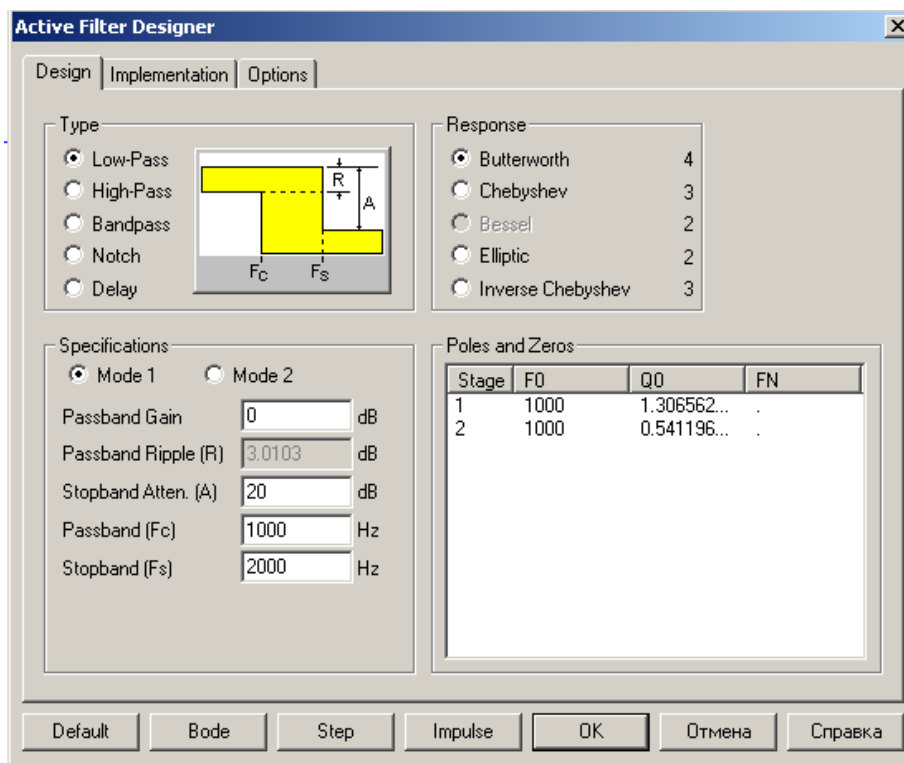


Рис. 4.2 — Закладка *Design* при синтезе активного фильтра

На панели *Type* выбирают тип фильтра:

- *Low-Pass* — фильтр нижних частот;
- *High-Pass* — фильтр верхних частот;
- *Bandpass* — полосно-пропускающий фильтр;
- *Notch* — заграждающий фильтр;
- *Delay* — фазовый фильтр (схема задержки).

Справа от названия фильтра индицируются вид его АЧХ с обозначениями параметров, которые поясняются на панели *Specification*.

На панели **Response** выбирают вид аппроксимации АЧХ и порядок фильтра:

- **Butterworth** — по Баттерворту;
- **Chebyshev** — по Чебышеву;
- **Bessel** — по Бесселю;
- **Elliptic** — эллиптическая;
- **Invers Chebyshev** — инверсная по Чебышеву.

На панели **Specification** задают требуемые параметры АЧХ фильтра в одном из двух возможных режимов: **Mode 1** и **Mode 2**.

В режиме **Mode 1** задают параметры:

- **Passband Gain** — коэффициент усиления в полосе пропускания;
- **Passband Ripple (R)** — уровень пульсаций АЧХ в полосе пропускания;
- **Stopband Attenuation (A)** — затухание в полосе задерживания;
- **Passband (F_c)** — граничная частота полосы пропускания, на которой затухание достигает значения **R**;
- **Stopband (F_s)** — граничная частота полосы задерживания, на которой затухание достигает значения **A**.

В режиме **Mode 2** задают параметры:

- **Gain** — коэффициент усиления в полосе пропускания;
- **Passband (F_c)** — граничная частота полосы пропускания, на которой затухание достигает значения **R**;
- **Ripple (R)** — уровень пульсаций АЧХ в полосе пропускания;
- **Order** — порядок **n** фильтра.

В задачах синтеза фильтров каждая пара комплексно сопряженных полюсов $p_i = \sigma_i + j\omega_i$, $p_{i+1} = \sigma_i - j\omega_i$ передаточной функции характеризуется частотой $F_{0i} = \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2} / 2\pi$ и добротностью $Q_{0i} = \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2} / 2\sigma_i$, значения которых задают на панели **Poles and Zeros** и формально совпадают с резонансной частотой и добротностью колебательного контура, передаточная функция которого имеет такие же полюса. Для полосового фильтра второго порядка параметры F_{0i} и Q_{0i} позволяют оценить центральную частоту полосы пропускания и добротность фильтра.

В нижней части окна расположены кнопки следующих команд:

- **Default** — установка параметров по умолчанию;
- **Bode** — показать частотные характеристики фильтра;
- **Step** — показать переходную характеристику фильтра;
- **Impulse** — показать импульсную характеристику фильтра;
- **OK** — показать схему синтезированного фильтра;
- **Отмена** — вернуть предыдущие установки окна;
- **Справка** — вызвать помощь.

В закладке **Implementation** (рис. 4.3), щелкнув курсором по названию схемы каскада, выбирается тип схемы: **Sallen-Key**, **MFB**, **Tow-Thomas**, **Flicher-Tow**, **KHN**, **Acker-Sossberg**.

Наличие отметка в поле ввода **Same Circuit for Each Stage** определяет использование одного и того же вида схемы для всех каскадов фильтра. Отсутствие отметки позволяет индивидуально выбирать вид схемы каждого каскада.

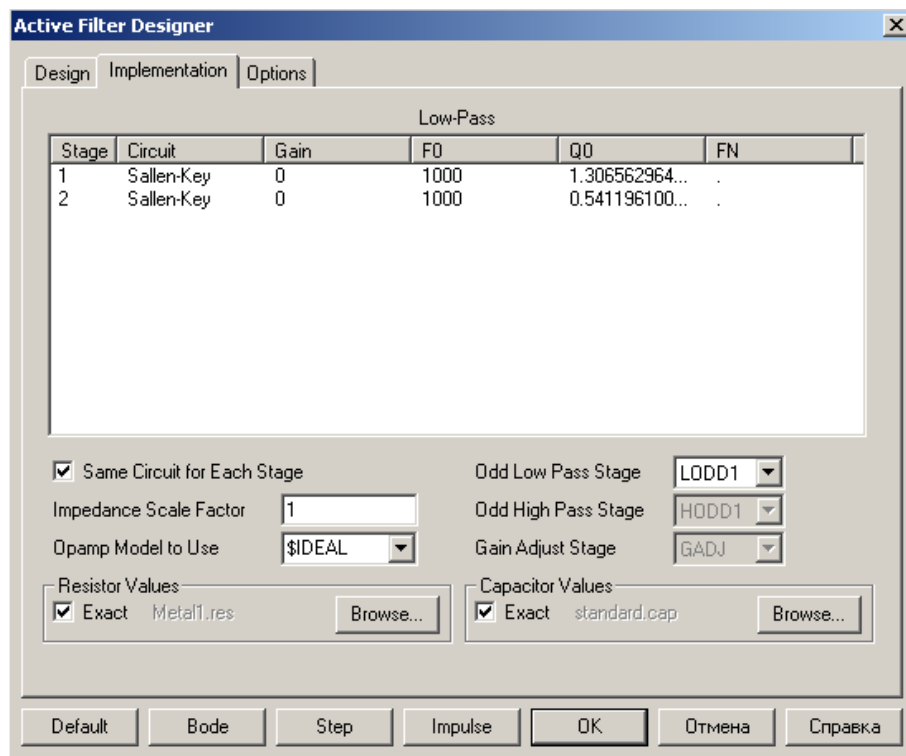


Рис. 4.3 — Закладка **Implementation** при синтезе активного фильтра

Масштабный коэффициент **Impedance Scale Factor** позволяет изменять значения всех пассивных элементов схемы без изменения формы характеристик фильтра.

Указатель , расположенный рядом с полем **Opamp Model to Use**, позволяет выбрать тип операционного усилителя, используемого в каскадах активного фильтра.

Указатель , расположенный рядом с полем **Odd Low Pass Stage**, позволяет выбрать тип выходного каскада фильтра в виде:

- **LODD1** — простая RC-цепь;
- **LODD2** — неинвертирующий усилитель с единичным коэффициентом усиления, нагруженный RC-цепью;
- **LODD3** — инвертирующий усилитель с единичным коэффициентом усиления, нагруженный RC-цепью.

На панелях **Resistor Values**, **Capacitor Values** ставится отметка в поле **Exact**, если в модели используются элементы со значениями параметров, рассчитанными программой, либо данная отметка удаляется в случае использования стандартных элементов с параметрами, близкими к расчетным. Типы стандартных элементов выбираются из соответствующей библиотеки **LIBRARY**, которая открывается после щелчка по кнопке **Browse**.

Закладка **Options** (рис. 4.4) состоит из трех панелей:

- панель **Component Value Format**, на которой выбирается формат пред-

ставления численных значений параметров элементов фильтра;

— панель ***Polynomial Format***, на которой выбирается формат представления численных значений коэффициентов передаточной функции фильтра;

— панели ***Plot***, на которой выбирается перечень исследуемых частотных характеристик (поля: ***Gain*** — АЧХ, ***Phase*** — ФЧХ, ***Group Delay*** — групповое время задержки (ГВЗ), раздельный или совмещенный вид их отображения (поле ***Separate Plots***), число расчетных точек графика (поле ввода ***Number of Data Points***).

На панели ***Save To*** выбирается вариант реализации фильтра либо в виде новой схемы ***New Circuit***, либо в виде текущей схемы ***Current Circuit***.

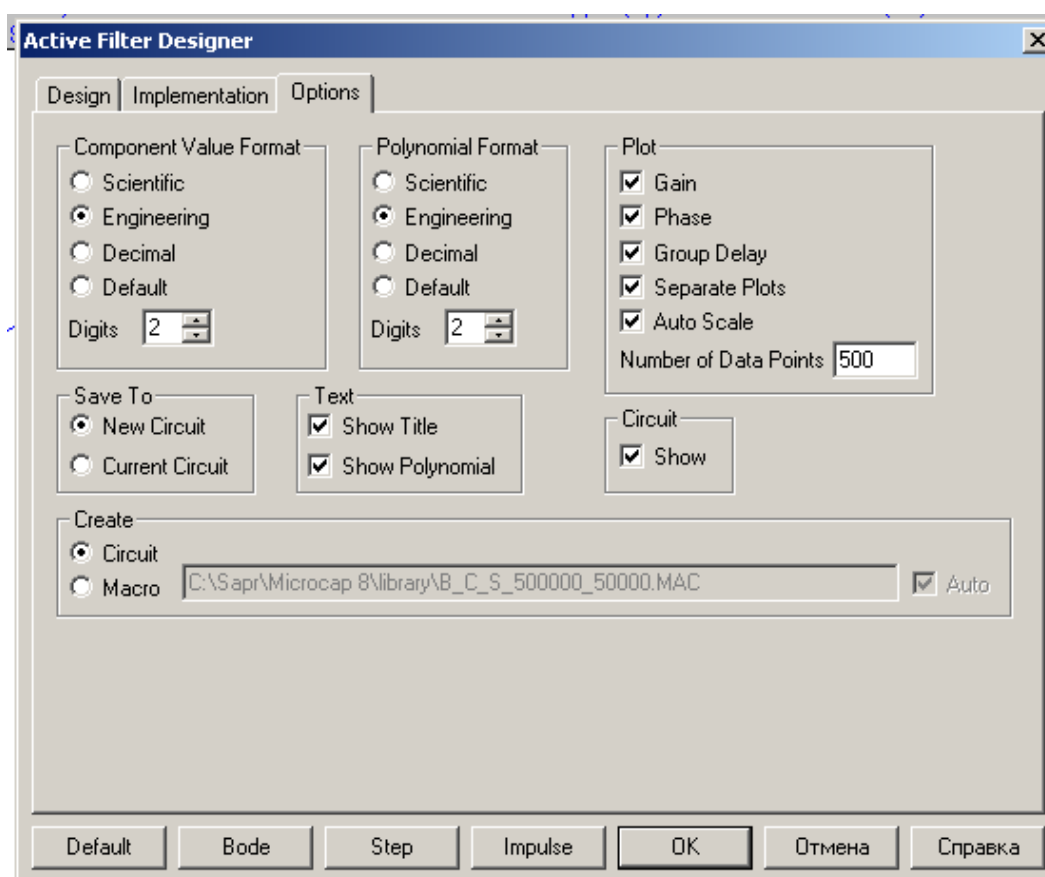


Рис. 4.4 — Закладка ***Options*** при синтезе активного фильтра

На панели ***Text*** выбирается необходимость показа текстового описания (***Show Title***) и передаточной функции фильтра (***Show Polynomial***).

На панели ***Create*** выбирается вариант реализации фильтра либо в виде электрической схемы ***Circuit***, либо в виде макромоделли ***Macro***.

Если на панели ***Circuit*** в рамке ***Show*** поставлена отметка, то это позволяет видеть схему синтезируемого фильтра.

При синтезе пассивного фильтра открывается окно ***Passive Filter Designer***, которое имеет закладки ***Design*** и ***Options***, аналогичные окну ***Active Filter Designer***.

На закладке ***Implementation*** (рис. 4.5) в поле ***Circuit*** выбирается или стандартная схема пассивного фильтра (***Standard***) или ее эквивалентный аналог

(*Dual*). В поле ввода *Source/Load Resistor* указываются значения сопротивлений источника входного напряжения и нагрузки фильтра. Остальные поля закладки *Implementation* пассивного фильтра аналогичны таким же полям закладки *Implementation* активного фильтра (см. рис. 4.4).

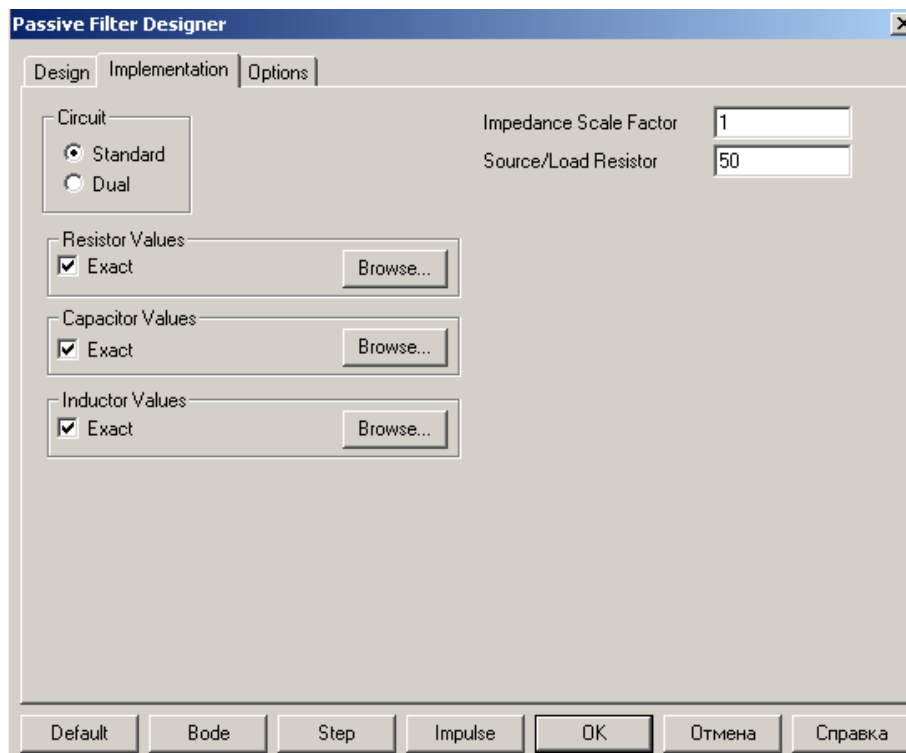


Рис. 4.6 — Закладка *Implementation* при синтезе пассивного фильтра

4.4. Задание на лабораторную работу

4.4.1. Синтезировать активный полосно-пропускающий фильтр.

4.4.2. Синтезировать пассивный фильтр нижних частот.

4.5. Синтез и исследование активного полосно-пропускающего фильтра

4.5.1. Изучить описание подпрограммы *Design* (см. п.п. 4.1...4.3).

4.5.2. Включить персональный компьютер и запустить программу *Micro-Cap*.

4.5.3. В строке меню щелкнуть кнопку *Design* и в открывшемся меню выбрать команду *Active Filters*.

4.5.4. В окне *Active Filter Designer* ввести в закладку *Design* следующие данные:

— на панели *Type* указать тип фильтра — *Bandpass*;

— на панели *Response* указать вид аппроксимации АЧХ — *Chebyshev* (по Чебышеву);

— на панели *Specification* выбрать режим ввода данных *Mode 1* и ввести следующие параметров фильтра:

— *Passband Gain* — $G = 10$;

- *Stopband Atten.* — $A = 10$ дБ;
- *Center Freq.* — $F_c = 500$ кГц;
- *Passband* — $PB = 20$ кГц;
- *Stopband* — $SB = 50$ кГц.

4.5.5. Открыть закладку *Implementation* и выбрать тип каскадов фильтра — *Sallen-Key*.

4.5.6. Открыть закладку *Options* и выбрать следующие опции.

На панелях *Component Value Format* и *Polynomial Format* выбрать инженерный формат (*Engineering*) представления численных значений с двумя цифрами после запятой (*Digits*), как показано на рис. 4.4.

На панели *Plot* выбрать следующие команды:

- *Gain* — отобразить АЧХ;
- *Phase* — отобразить ФЧХ;
- *Group Delay* — отобразить групповое время задержки (ГВЗ);
- *Separate Plots* — построить отдельно графики;
- *Auto Scale* — выполнить автоматическое масштабирование графиков.

На панели *Create* выбрать команду *Circuit* — реализовать фильтр в виде электрической схемы.

4.5.7. В нижней строке окна нажать клавишу **OK** и в открывшемся рабочем окне модели откорректировать вид модели так, чтобы были видны наименования и параметры элементов, а также текстовые комментарии.

4.5.8. Скопировать содержимое главного поля рабочего окна модели в электронный протокол лабораторной работы (см. п. 1.6.3.).

4.5.9. Исследовать частотные характеристики фильтра.

4.5.9.1. Открыть меню *Analysis* и выбрать в нем команду *AC*, соответствующую режиму анализа в частотной области.

Примечание.

Если вместо окна *AC Analysis* открывается диалоговое окно *Save as* (Сохранить как), то в нем необходимо щелкать кнопку **Отмена** до тех пор, пока не откроется диалоговое окно *AC Analysis Limits*.

4.5.9.2. В диалоговом окне *AC Analysis Limits* щелкнуть кнопку **Run**, а затем скопировать содержимое главного поля окна *AC Analysis* в электронный протокол лабораторной работы (см. п. 1.6.3.).

4.5.10. Исследовать переходную характеристику фильтра.

4.5.10.1. В строке меню щелкнуть кнопку *Analysis* и в открывшемся меню выбрать в нем команду *Transient*, соответствующую режиму анализа во временной области.

Примечание.

Если вместо окна *Transient Analysis* открывается диалоговое окно **Сохранить как**, то в нем необходимо щелкать кнопку **Отмена** до тех пор, пока не откроется диалоговое окно *Transient Analysis Limits*.

4.5.10.2. В диалоговом окне *Transient Analysis Limits* задать временной диапазон (*Time Range*) — не менее 200 мкс и шаг дискретизации (*Maximum*

Time Step) — не более 0,1 мкс, щелкнуть кнопку **Run** и скопировать содержимое главного поля окна **Transient Analysis** в электронный протокол лабораторной работы (см. п. 1.6.3.).

4.5.10.3. В строке меню щелкнуть кнопку **Transient** и в открывшемся меню выбрать команду **Exit Analysis**, после чего открывается рабочее окно модели.

4.5.11. Исследовать импульсную характеристику фильтра.

4.5.11.1. В рабочем окне модели дважды щелкнуть на переключателе, расположенном на входе фильтра. При этом вход фильтра отключается от источника ступенчатого сигнала **Step** и подключается к источнику импульсного сигнала **Impulse**.

4.5.11.2. Повторить действия, указанные в п. п. 4.5.10.1. — 4.5.10.3.

4.5.12. В строке меню рабочего окна модели щелкнуть кнопку **Design** и в открывшемся меню выбрать команду **Active Filters**.

4.5.13. В окне **Active Filter Designer** открыть закладку **Implementation** и на панели **Resistor Values** и **Capacitor Values** отменить использование значений сопротивлений и емкостей, рассчитанных программой, удалив отметки в полях **Exact**.

4.5.14. Щелкнув кнопку **Browse** на панели **Resistor Values**, открыть диалоговое окно **Open Resistor**, в котором находится библиотека **LIBRARY** сопротивлений, и выбрать стандартные сопротивления с номиналами, наиболее близкими к расчетным. Для достижения этого необходимо, изменяя библиотечные типы сопротивлений, следить за изменением значений сопротивлений модели.

4.5.15. Щелкнув кнопку **Browse** на панели **Capacitor Values** и выполняя действия, аналогичные п. 4.5.14 выбрать стандартные емкости из библиотеки емкостей, открыв соответствующее диалоговое окно **Open Capacitor**.

4.15.14. Повторить действия по п. 4.5.9.

4.6. Синтез и исследование пассивного фильтра нижних частот

4.6.1. В меню **Design** выбрать команду **Passive Filters**.

4.6.2. В окне **Passive Filter Designer** ввести в закладку **Design** следующие данные:

- на панели **Type** указать тип фильтра — **Low-Pass** (ФНЧ);
- на панели **Response** указать вид аппроксимации АЧХ — **Batterworth** (по Баттерворту);
- на панели **Specification** выбрать режим ввод данных **Mode 1** и ввести следующие параметров фильтра:

- **Passband Gain** — $G = -3$ дБ;
- **Stopband Attenuation** — $A = 20$ дБ;
- **Passband** — $F_c = 20$ кГц;
- **Stopband** — $F_s = 40$ кГц;

4.6.3. Открыть закладку **Implementation** и выбрать сопротивление источника сигнала и нагрузки (**Source/Load Resistor**) — $R_s = 100$ Ом.

4.6.4. Повторить действия по п. п. 4.5.6 — 4.5.11.

4.6.5. В строке меню рабочего окна модели щелкнуть кнопку **Design** и в

открывшемся меню выбрать команду *Passive Filters*.

4.6.6. В окне *Passive Filter Designer* открыть закладку *Implementation* и на панели *Resistor Values*, *Capacitor Values* и *Inductor Values* удалить отметки во всех полях *Exact*, отменив, таким образом, использование значения сопротивлений, емкостей и индуктивностей, рассчитанных программой. Выполняя действия, аналогичные п. 4.5.13, выбрать стандартные элементы с номиналами, наиболее близкими к расчетным.

4.6.7. Повторить действия по п. 4.5.9.

4.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- постановку задач исследования;
- модели исследованных фильтров, их передаточные функции и частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ и ГВЗ);
- результаты сравнения характеристик фильтров, полученных при точных и приближенных значениях параметров элементов;
- выводы.

4.8. Вопросы для самоконтроля

4.8.1. Дайте определение передаточной функции, АЧХ и ФЧХ четырехполюсника.

4.8.2. Перечислите условия, которым должна удовлетворять реализуемая передаточная функция.

4.8.3. Дайте определения электрического фильтра и его основных параметров?

4.8.3. Нарисуйте АЧХ основных видов фильтров: нижних частот, верхних частот, полосового и заграждающего.

4.8.4. Назовите основные метода реализации фильтров по заданной передаточной функции.

4.8.5. Поясните, почему при каскадном соединении мостовых четырехполюсников с постоянным характеристическим сопротивлением можно обеспечить согласованный режим работы каскадов.

4.8.6. Поясните принцип каскадно-развязанной реализации заданной передаточной функции.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ ФИЛЬТРОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ *FILTER SOLUTIONS*

5.1. Цель лабораторной работы

Целью работы является синтез аналоговых электрических фильтров по заданным параметрам и исследование их характеристик с помощью программы *Filter Solutions*.

5.2. Основные сведения о программе *Filter Solutions*

Программа *Filter Solutions* позволяет по заданным параметрам синтезировать аналоговые пассивные и активные фильтры, а также цифровые фильтры. Кроме того, программа позволяет исследовать частотные и временные характеристики синтезированных фильтров. По числу типов синтезируемых фильтров программа *Filter Solutions* значительно превосходит другие программы схемотехнического моделирования. Однако она не позволяет изменять структуру синтезированного фильтра и выполнять поэлементное создание моделей электрических цепей.

5.3. Система команд программы *Filter Solutions*

На рис. 5.1 изображено окно управления программой *Filter Solutions*, которое открывается после запуска программы.

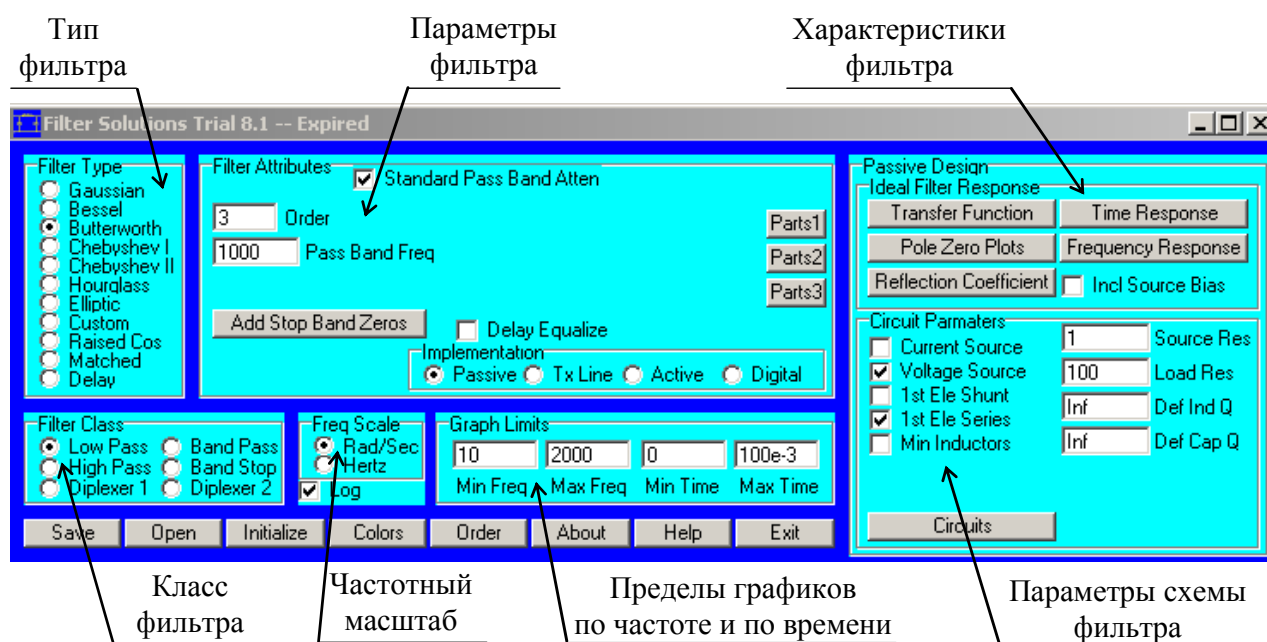


Рис. 5.1 — Окно управления программой *Filter Solutions* при синтезе пассивного ФНЧ Баттерворта 3-го порядка с граничной частотой 1000 Гц

Окно управления программой (рис. 5.1) состоит из панелей: *Filter Type*, *Filter Class*, *Filter Attributes*, *Freq Scale* и *Graph Limits*, разделенных цветными полосами, и набора кнопок.

На панели *Filter Type* задается тип фильтра, путем установки отметки в поле, название которого определяет вид функции, аппроксимирующей идеаль-

ную передаточную функцию фильтра:

- **Gaussian** — функция Гаусса;
- **Bessel** — функция Бесселя;
- **Batterworth** — функция Баттерворта;
- **Chebyshev I** — функция Чебышева первого вида;
- **Chebyshev II** — функция Чебышева второго вида;
- **Hourglass** — эллиптическая функция, у которой нули коэффициента отражения инверсны нулям коэффициента передачи;
- **Elliptic** — эллиптическая функция;
- **Custom** — заказной фильтр;
- **Raised Cos** — функция приподнятого косинуса;
- **Matched** — согласованный фильтр;
- **Delay** — фазовый фильтр, имеющий равномерную АЧХ и линейную ФЧХ в заданной полосе пропускания фильтра.

На панели **Filter Class** выбирается класс фильтра, путем установки отметки в поле, название которого определяет диапазон частот, пропускаемый или задерживаемый фильтром:

- **Low Pass** — фильтр нижних частот;
- **Band Pass** — полосно-пропускающий фильтр;
- **High Pass** — фильтр верхних частот;
- **Band Stop** — полосно-заграждающий фильтр;
- **Diplexer I** — диплексер первого вида;
- **Diplexer II** — диплексер второго вида.

Примечание.

Диплексером называются пассивная цепь, предназначенная как для разделения, так и для объединения (суммирования) сигналов, занимающих разные диапазоны частот.

На панели **Filter Attributes** задаются следующие параметры фильтра:

- в поле **Standard Pass Band Atten** — стандартное затухание 3 дБ в полосе пропускания, если в данном поле стоит отметка (если отметку убрать, то появляется диалоговое окно **Pass Band Atten**, в которой задается требуемое значение ослабления в полосе пропускания);
- в поле **Order** — порядок фильтра, который определяет число полюсов передаточной функции фильтра;
- в поле **Pass Band Freq** — полоса пропускания (индицируется только при синтезе фильтров нижних и верхних частот);
- в поле **Delay Equalise** — выравнивание групповой задержки в полосе пропускания (индицируется только при синтезе фильтров нижних частот и полосовых фильтров);
- в поле **Implementation** производится выбор вида реализации фильтра: **Passive** — пассивный аналоговый фильтр, **TxLine** — фильтр на передающих линиях, **Active** — активный аналоговый фильтр, **Digital** — цифровой фильтр;
- кнопки **Part 1**, **Part 2**, **Part 3** позволяют использовать наборы пассив-

ных элементов, которые могут быть использованы в аналоговых фильтрах для замены значений сопротивлений, емкостей и индуктивностей фильтра, рассчитанных программой, ближайшими стандартными значениями;

— кнопка **Add Stop Band Zeros** обеспечивает добавление нулей функции передачи в полосе затухания фильтра (кнопка индицируется только при синтезе фильтров Баттерворта и Чебышева).

Примечание.

Изменение типа или класса фильтра вызывает изменение вида панели **Filter Attributes**. На рис. 5.2 показан вид панели **Filter Attributes** при синтезе полосно-пропускающих фильтров Чебышева первого и второго рода. Полоса пропускания фильтра такого фильтра может быть задана двумя способами: либо задавая центральную частоту и ширину полосы пропускания, как показано на рис. 5.2, а, либо задавая граничные частоты полосы пропускания, как показано на рис. 5.2, б.

а)

б)

Рис. 5.2 — Вид панели **Filter Attributes** при синтезе полосно-пропускающего фильтра Чебышева: а) — первого рода и б) — второго рода

Появление новых полей на панели **Filter Attributes** обусловлено особенностями характеристик различных фильтров:

— в поле ввода **Pass Band Ripple** задается относительная неравномерность АЧХ в полосе пропускания;

— в поле ввода **Center Freq** задается центральная частота полосы пропускания;

— в поле ввода **Corner Freqs** задаются граничные частоты полосы пропускания: соответственно нижняя — **Lower Corner Freq** и верхняя — **Upper Corner Freq**;

— в поле ввода ***Stop Band Ratio*** задаются параметры фильтра, характеризующие АЧХ в полосе задержания: ***Stop Band Ratio*** — отношение полосы задержания к полосе пропускания; ***Stop Band Freq*** — полоса задержания в герцах; ***Stop Band Atten*** — затухание на границе полосы задержания в децибелах.

На панели ***Freq Scale*** задается представление частоты либо в радианах за секунду (***Rad/sec***), либо в герцах (***Hertz***), а также масштаб по оси частот при отображении частотных характеристик: линейный, если нет отметки в рамке ***Log***, или логарифмический, если такая отметка есть.

На панели ***Graph Limits*** выбираются пределы по оси частот ***Min Freq*** и ***Max Freq*** (минимальное и максимальное значения частоты, используемые при наблюдении частотных характеристик фильтра) и по оси времени ***Min Time*** и ***Max Time*** (минимальное и максимальное значения времени, используемые при наблюдении временных характеристик фильтра).

В нижней части окна управления программой расположены кнопки следующих команд:

- ***Save*** — сохранить созданную модель фильтра;
- ***Open*** — открыть ранее созданную модель фильтра;
- ***Initialise*** — открыть окно установки начальных условий программы;
- ***Colors*** — открыть окно цветовой палитры изображений;
- ***License*** — открыть окно лицензирования программы;
- ***About*** — открыть окно с указанием информации о программе;
- ***Help*** — открыть окно помощи с описанием программы
- ***Exit*** — завершить работу программы.

Панель, расположенная в правой части окна управления, изменяет свое название и конфигурацию в зависимости от вида синтезируемого фильтра.

При синтезе пассивных фильтров данная панель имеет название ***Passive Design*** и состоит из двух полей: ***Ideal Filter Response*** и ***Circuit parameters***.

В поле ***Ideal Filter Response*** расположены кнопки следующих команд:

- ***Transfer Function*** — открыть окно ***Continuous Transfer Function*** с изображением передаточной функции фильтра;
- ***Time Response*** — открыть окно ***Continuous Time Response*** с изображением временных характеристик фильтра;
- ***Pole Zero Plots*** — открыть окно ***Continuous Pole Zero Plane*** с изображением полюсно-нулевой диаграммы;
- ***Frequency Response*** — открыть окно ***Continuous Frequency Response*** с изображением частотных характеристик фильтра;
- ***Reflection Coefficient*** — открыть окно ***Reflection Coefficient*** с изображением частотных зависимостей модуля и фазы коэффициента отражения на входа фильтра.

Если в рамке ***Incl Source Bias*** поставить отметку, то к входному сигналу фильтра будет добавлена постоянная составляющая.

В поле ***Circuit Parameters*** задаются следующие параметры схемы фильтра:

- вид источника входного сигнала: ***Curent Source*** — источник тока, ***Voltage Source*** — источник напряжения;

— вид включения первого элемента фильтра относительно источника входного сигнала: *1st Ele Shunt* — параллельное включение, *1st Ele Series* — последовательное включение;

— при выборе команды *Min Inductors* программа синтезирует фильтр с минимально возможным числом индуктивностей;

— сопротивление источника — *Source Res*;

— сопротивление нагрузки — *Load Res*;

— добротность индуктивности — *Def Ind Q*;

— добротность емкости — *Def Cap Q*.

Кнопки *Circuit*, расположенная в нижней части панели *Passive Design*, соответствует команде — открыть окно с синтезированной схемой фильтра. В качестве примера на рис. 5.3 показано окно *Passive Filter 1* с моделью пассивного полосно-пропускающего фильтра Баттерворта третьего порядка.

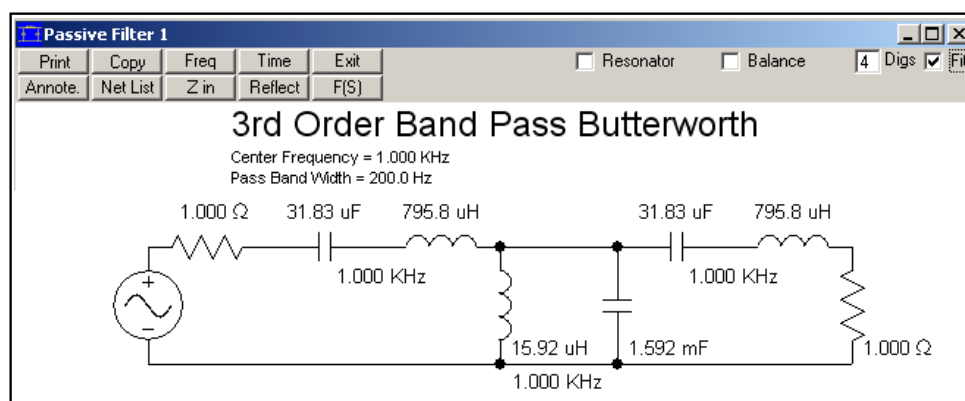


Рис. 5.3 — Окно модели пассивного полосно-пропускающего фильтра

В верхней части окна находится строка с кнопками соответствующими следующим командам:

— *Print* — печатать содержимое окна;

— *Copy* — копировать содержимое окна;

— *Freq* — показать частотные характеристики;

— *Time* — показать временные характеристики;

— *Exit* — закрыть окно;

— *Annote* — добавить аннотацию к схеме;

— *Net List* — показать описание соединений элементов схемы;

— *Z in* — показать частотные характеристики входного сопротивления фильтра;

— *Reflect* — показать частотные зависимости модуля и фазы коэффициента отражения на входе фильтра;

— *F(s)* — показать передаточную функцию фильтра.

На рис. 5.4 показано окно *Continuous Frequency Response* с изображением АЧХ полосно-пропускающего фильтра, модель которого изображена на рис. 5.2.

Для наблюдения ФЧХ и ГВЗ фильтра необходимо в окне *Continuous Fre-*

quency Response поставить отметки в полях *Phase* и *Grp Delay*. Кнопки, расположенные в левой части верхней части окна аналогичны по своему назначению таким же кнопкам окна модели (см. рис. 5.3).

На рис. 5.5 показано окно *Continuous Time Response* с изображением импульсной характеристики полосно-пропускающего фильтра.

Для наблюдения переходной характеристики фильтра и его реакции на линейно нарастающее воздействие необходимо в окне *Continuous Time Response* поставить отметки в рамках *Step* и *Ramp*.

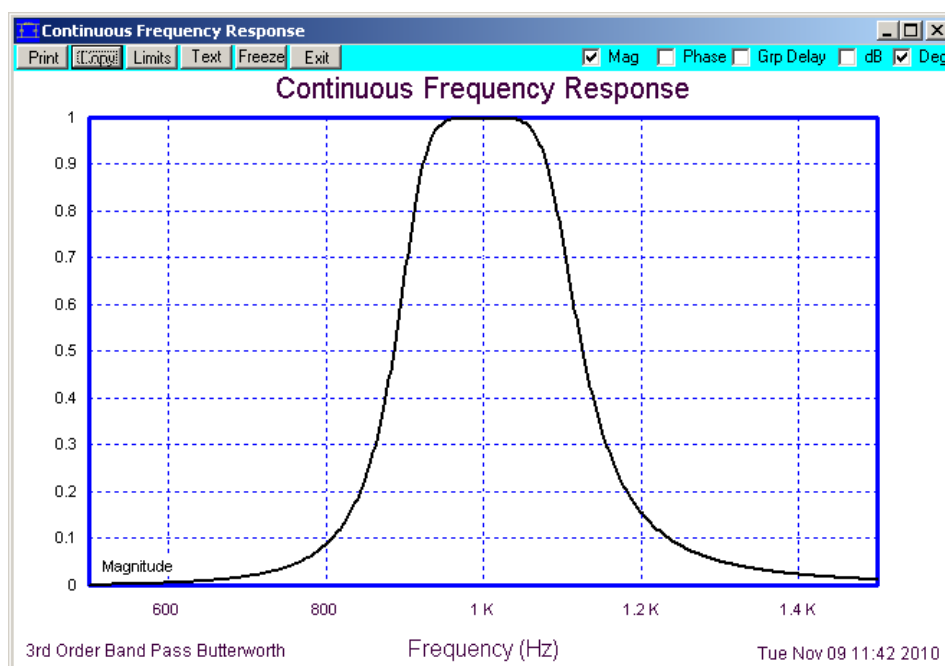


Рис. 5.4 — Окно *Continuous Frequency Response* с изображением АЧХ

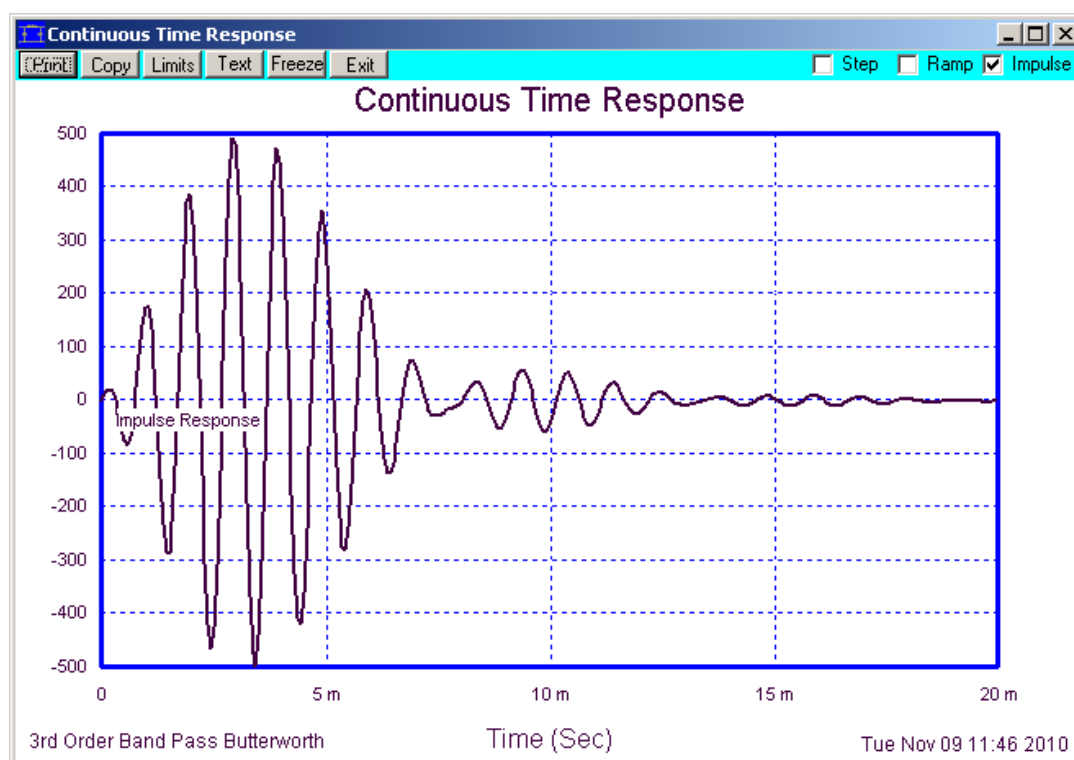


Рис. 5.5 — Окно *Time Response* с изображением импульсной характеристики

Окна *Transfer Function*, *Pole Zero Plots*, *Reflection Coefficient* имеют структуру, аналогичную рис. 5.3, 5.4.

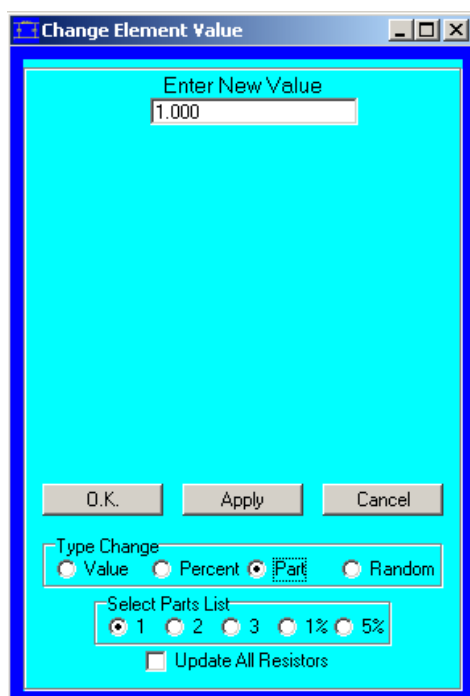


Рис. 5.6 — Окно для изменения сопротивления

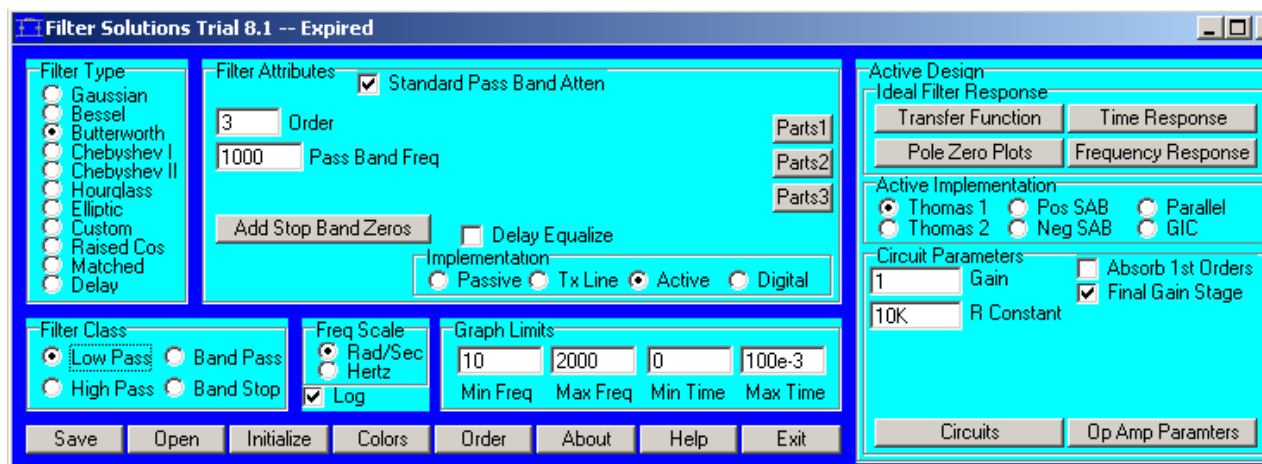
Для замены параметра элемента схемы на ближайшее стандартное необходимо в окне модели, навести курсор на изменяемый элемент и щелкнуть левой клавишей мыши. При этом открывается окно *Change Element Value* (рис. 5.4).

Для изменения сопротивления необходимо в поле *Type Change* (рис. 5.6) поставить отметку в кружке *Part*. В открывшейся после этого дополнительном поле *Select Parts List* выбрать *1*, поставить отметку в рамке *Update All Resistors* и щелкнуть кнопку *OK*, что позволяет заменить все сопротивления схемы на ближайшие стандартные значения.

Окна для изменения емкости и индуктивности имеют вид аналогичный окну, показанному на рис. 5.4. Дополнительной опцией этих окон является возможность ввода значения добротности, что необходимо сде-

лать перед изменением значений емкости или индуктивности.

На рис. 5.7 изображено окно управления программой *Filter Solutions* в режиме синтеза активных фильтров. В этом режиме все панели окна управления кроме панели *Active Design* имеют вид такой же, как в режиме синтеза пассивного фильтра (см. рис. 5.1).

Рис. 5.7 — Окно управления программой *Filter Solutions* при синтезе активных фильтров

Панель *Active Design* состоит из полей: *Ideal Filter Response*, *Active Imple-*

mentation и **Circuit Parameters/Op Amp Parameters**. Изменение названия последнего поля выполняется с помощью кнопки **Op Amp Parameters**, которая находится в нижней части панели.

В поле **Ideal Filter Response** расположены кнопки, имеющее такое же название, как в режиме синтеза пассивных фильтров.

В поле **Active Implementation** задают вид каскадов активного фильтра: **Thomas 1**, **Thomas 2**, **Pos Sab**, **Neg Sab**, **Parallel**, **GIC**.

В поле **Circuit Parameters** задают параметры активного фильтра:

- **Gain** — коэффициент усиления;
- **R Constant** — значение начального сопротивления, используемого в фильтре;
- **Absorb 1 st Orders** — поглотить изолированный полюс первого порядка;
- **Final Gain Stage** — добавить усилительный каскад на выходе фильтра.

При нажатии кнопки **Op Amp Parameters** открывается поле с таким же названием. Если в этом поле в рамке **Ideal Op Amp** стоит отметка, то операционный усилитель, используемый в каскадах активного фильтра является идеальным (рис. 5.8, а).

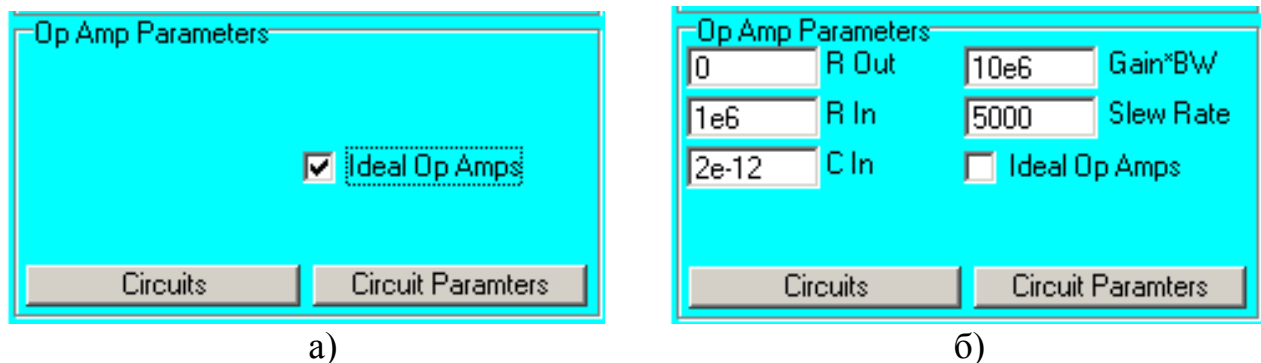


Рис. 5.8 — Вид панели **Op Amp Parameters**: а — с идеальным операционным усилителем, б — реальным операционным усилителем

Если указанную отметку убрать, то в поле **Op Amp Parameters** задаются параметры реального операционного усилителя (рис. 5.8, б):

- **R Out** — выходное сопротивление;
- **R InConstant** — входное сопротивление;
- **C In** — входная емкость;
- **Gain*BW** — произведение усиления на полосу пропускания;
- **Slew Rate** — скорость нарастания выходного напряжения в вольтах за секунду.

5.4. Задание на лабораторную работу

5.4.1. Синтезировать пассивный фильтр нижних частот Баттерворта, имеющий следующие параметры:

- граничная частота полосы пропускания — $F_{гр} = 100$ кГц;

- затухание в полосе пропускания — $A = -4$ дБ;
- порядок фильтра $n = 3$;
- внутреннее сопротивление источника входного напряжения $R_i = 10$ Ом;
- сопротивление нагрузки фильтра — $R_H = 100$ Ом;
- первый элемент фильтра должен быть включен параллельно источнику.

5.4.2. Синтезировать активный полосно-пропускающего фильтра Чебышева первого вида, имеющий следующие характеристики:

- тип каскадов фильтра — **Pos Sab**;
- порядок фильтра — $n = 2$;
- коэффициент усиления в полосе пропускания — $K = 10$;
- затухание на границе полосы пропускания — $A = -3$ дБ;
- центральная частота полосы пропускания — $f_0 = 100$ кГц;
- полоса пропускания — $\Pi_{0,7} = 10$ кГц.

5.5. Синтез и исследование пассивного фильтра нижних частот Баттерворта

5.5.1. Включить персональный компьютер, на рабочем столе найти пиктограмму  и, щелкнув ее, запустить программу **Filter Solutions**.

5.5.2. В окне управления программой (см. рис. 5.1) выбрать тип фильтра, его класс и ввести параметры, указанные в п. 5.4.1.

5.5.3. В окне **Circuit Parameters** нажать кнопку **Circuit**, просмотреть модель схемы фильтра, синтезированной программой, и скопировать ее в электронный протокол лабораторной работы.

5.5.4. Используя кнопки панели **Ideal Filter Response**, просмотреть, а затем скопировать в электронный протокол: выражение передаточной функции, полюсно-нулевую диаграмму передаточной функции, АЧХ, ФЧХ, импульсную и переходную характеристики фильтра.

5.5.5. Определить по АЧХ полосу пропускания фильтра на уровне 0,7.

5.5.6. Определить по переходной характеристике время установления переходного процесса в фильтре.

5.5.7. Заменить точные значения параметров элементов фильтра близкими стандартными значениями из ряда **Part 1** (см. п. 5.3, стр. 48, 49). При замене индуктивностей в рамку **Enter Inductor Q** ввести значение добротности 50. При замене емкостей в рамку **Enter Capacity Q** ввести значение добротности 200. Скопировать модель фильтра в электронный протокол лабораторной работы.

5.5.8. Используя кнопки **Frequency Response** и **Time Response** окна **Passive Filter** (см. рис. 5.2), просмотреть АЧХ, ФЧХ, импульсную и переходную характеристики фильтра, а затем скопировать их в электронный протокол лабораторной работы.

Примечание.

Следует иметь в виду, что кнопки панели *Ideal Filter Response*, (см. рис. 5.1) позволяют наблюдать характеристики фильтров только с идеальными элементами. После замены идеальных элементов фильтра на реальные его характеристики изменяются.

5.6. Синтез и исследование активного полосно-пропускающего фильтра Чебышева первого вида

5.6.1. Ввести в панель управления программой исходные данные для синтезируемого фильтра в соответствии с п.5.4.2.

5.6.2. Повторить действия по п. п. 5.5.3....5.5.4.

5.6.3. Определить по АЧХ фильтра полосы задержания $\Pi_{0,1}$ на уровне 0,1 и $\Pi_{0,7}$ на уровне 0,7 и рассчитать коэффициент прямоугольности АЧХ по формуле

$$K_{\text{пр}} = \frac{\Pi_{0,7}}{\Pi_{0,1}}.$$

5.6.4. По переходной характеристике определить время установления переходного процесса в фильтре.

5.6.5. Повторить действия по п. п. 5.5.7....5.5.8, 5.6.4.

5.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- постановку задач исследования;
- исследованные модели фильтров, их передаточные функции, частотные и временные характеристики фильтров;
- результаты сравнения частотных и временных характеристик фильтров с идеальными и стандартными значениями параметров элементов схемы;
- выводы.

5.8. Вопросы для самоконтроля

5.8.1. Дайте определение передаточной функции и комплексного коэффициента передачи фильтра.

5.8.2. Поясните, где на комплексной плоскости переменной $p = \sigma + j\omega$ должны располагаться полюса передаточная функция реализуемого фильтра.

5.8.3. Дайте определение частотным и временным характеристикам фильтра.

5.8.5. Дайте определение фильтров нижних частот, верхних частот, полосно-пропускающего и задерживающего и нарисуйте их идеализированные АЧХ.

5.8.6. Назовите достоинства и недостатки фильтров Баттерворта и Чебышева.

5.8.7. Назовите возможную область применения фильтров нижних частот, верхних частот, полосно-пропускающих и задерживающих.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 0907 — “Радиотехника” / В. Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 15 с.
2. Разевиг В. Д. Программа схемотехнического моделирования MicroCap 6 / В. Д. Разевиг. — М.: Горячая линия — Телеком, 2001. — 344 с.
3. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования MicroCap 8 / М. А. Амелина, С.А. Амелин. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 464 с.
4. Толстов Ю.Г. Теория линейных электрических цепей / Ю. Г. Толстов. — М.: Высш. шк., 1978. — 279 с.
5. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей / А. Ф. Белецкий. — М.: Радио и связь, 1986. — 544 с

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Образец титульного листа

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

ОТЧЕТ
по лабораторной работе

(название лабораторной работы)
по дисциплине “Синтез линейных радиотехнических цепей”

Выполнил студент гр. _____

(Ф.И.О.)

Отметка о защите _____

Преподаватель _____
(Ф.И.О.)

Севастополь
20__

Заказ № _____ от “ _____ ” _____ 2011 г. Тираж 75 экз.
Изд-во СевНТУ