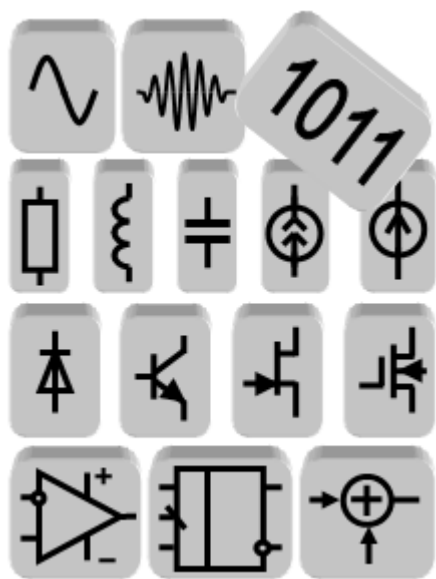


# Описание программы uSpice



Москва  
2023

### **Аннотация**

Приведено описание учебной программы uSpice, предназначенной для цифрового, аналогового и радиочастотного схемотехнического моделирования.

Программа uSpice знакомит студентов с современными компьютерными методами проектирования радиоэлектронной аппаратуры. При этом развиваются умения и навыки исследовательской работы, интенсифицируется индивидуальная работа над учебным материалом, пользователи знакомятся с разнообразной современной элементной базой и со способами ее применения.

Работа программы проверена в операционных системах Windows 7/8/8.1/10/11. Программа имеет небольшой объем, равный примерно 10 мегабайт (в архиве), устанавливается простым копированием в заданную папку, имеет русский интерфейс и руководство пользователя с файлом помощи на русском языке. Обозначения радиоэлементов соответствуют ЕСКД.

Нумерация формул, рисунков и таблиц внутри каждой главы описания начинается заново. При ссылке на формулу, рисунок или таблицу из другой главы указываются соответствующий номер главы.

# Оглавление

<b>1. Быстрое начало работы с программой uSpice .....</b>	<b>5</b>
1.1. Главное окно программы .....	5
1.2. Быстрое создание схемы .....	6
1.3. Выбор вида анализа и установка параметров расчета .....	9
1.4. Этап расчета и вывода результатов.....	9
<b>2. Создание схемы устройства.....</b>	<b>12</b>
2.1. Выбор и размещение элементов в окне схемы .....	12
2.2. Корпус (заземление) .....	15
2.3. Соединение выводов радиоэлементов .....	16
2.4. Использование меток.....	16
<b>3. Анализ электронных цепей .....</b>	<b>17</b>
3.1. Расчет переходного процесса .....	18
3.2. Расчет частотных характеристик.....	22
3.3. Расчет рабочих точек .....	24
3.4. Многовариантный расчет на постоянном токе .....	26
3.5. Расчет коэффициента гармонических искажений .....	28
3.6. ДПФ .....	32
3.7. БПФ.....	36
3.8. Расчет аналитического сигнала .....	40
3.9. Расчет комплексного модулированного сигнала .....	42
3.10. Расчет цифровых фильтров в аналоговой области.....	48
3.11. Расчет цифровых фильтров в области, управляемой событиями .....	51
3.12. Измерения на графиках результатов расчетов.....	53
<b>4. Работа со сложными схемами .....</b>	<b>55</b>
4.1. Общий источник питания.....	55
4.2. Сетка .....	56
4.3. Добавление текста и графических элементов .....	57
4.4. Использование шин .....	58
4.5. Символ "Нет соединения" .....	58
4.6. Масштаб изображения.....	59
4.7. Экспорт в PСВ-программы .....	59

4.8. Печать схемы .....	60
4.9. Изображение схемы на нескольких листах .....	60
4.10. Использование подсхем.....	62
4.11. Библиотеки элементов .....	64
<b>5. Панели инструментов.....</b>	<b>67</b>
5.1. Панель схемы.....	67
5.2. Панель рисования.....	68
5.3. Панель работы с блоками .....	68
5.4. Панель шины .....	68
<b>6. Меню программы.....</b>	<b>69</b>
6.1. Файл.....	69
6.2. Правка.....	71
6.3. Вид .....	73
6.4. Анализ .....	73
6.5. Библиотека .....	73
6.6. Экспорт.....	74
6.7. Параметры.....	74
<b>Литература .....</b>	<b>78</b>

# 1. Быстрое начало работы с программой uSpice

## 1.1. Главное окно программы

Программа uSpice предназначена для схемотехнического моделирования электрических цепей, включая радиочастотные цепи. С ее помощью можно рассчитывать процессы в линейных и нелинейных аналоговых и цифровых цепях, анализировать цифровые фильтры, осуществлять дискретное преобразование сигналов. Главное окно программы показано на рис. 1.

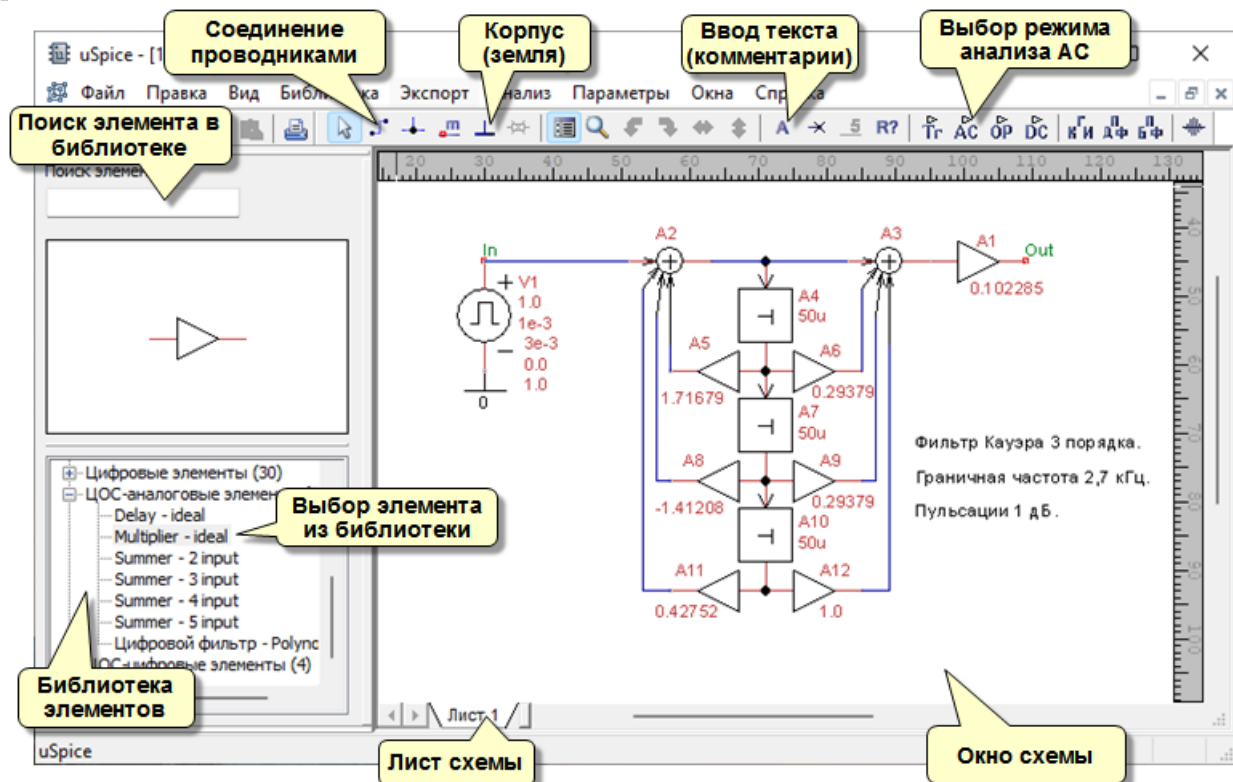


Рис. 1. Главное окно программы uSpice

*Меню команд* находится в верхней части главного окна программы. Первоначально работа с программой, как правило, начинается с выбора пункта меню "Файл" и с загрузки из папки примеров (папка .\Examples) одного из файлов, с описанием схемы типового радиоэлектронного устройства.

*Панель инструментов* (линейка значков) располагается выше окна схемы. Панель инструментов, как правило, дублирует наиболее часто используемые команды меню.

*Окно схемы* занимает основную область окна программы. В этом окне, используя радиоэлементы и соединительные провода, создают и редактируют электрические схемы. На рис. 1 показана схема цифрового фильтра Кауэра 3-го порядка.

Диалоговая панель выбора элементов по умолчанию располагается слева от окна схемы. С помощью этой панели выбирается требуемая библиотека и затем из библиотеки выбирается нужный радиоэлемент. Изображение выбранного радиоэлемента появляется в отдельном окне этой диалоговой панели. На рисунке выше в отдельном окне приведено изображение выбранного в библиотеке умножителя цифрового фильтра.

Работа с программой uSpice включает три основных этапа:

- создание схемы;
- выбор вида анализа и установка параметров расчета;
- расчет процессов, протекающих в исследуемом устройстве, и вывод результатов расчета.

Рассмотрим основные этапы создания и анализа схемы. Пусть требуется исследовать процессы в простой схеме, содержащей последовательно соединенные три радиоэлемента: источник напряжения, резистор и конденсатор.

## 1.2. Быстрое создание схемы

Выберем библиотеку "Источники", затем отметим элемент этой библиотеки "DC Voltage-ideal" и, наконец, перемещая мышью, поместим источник напряжения в окно схемы (рис. 2).

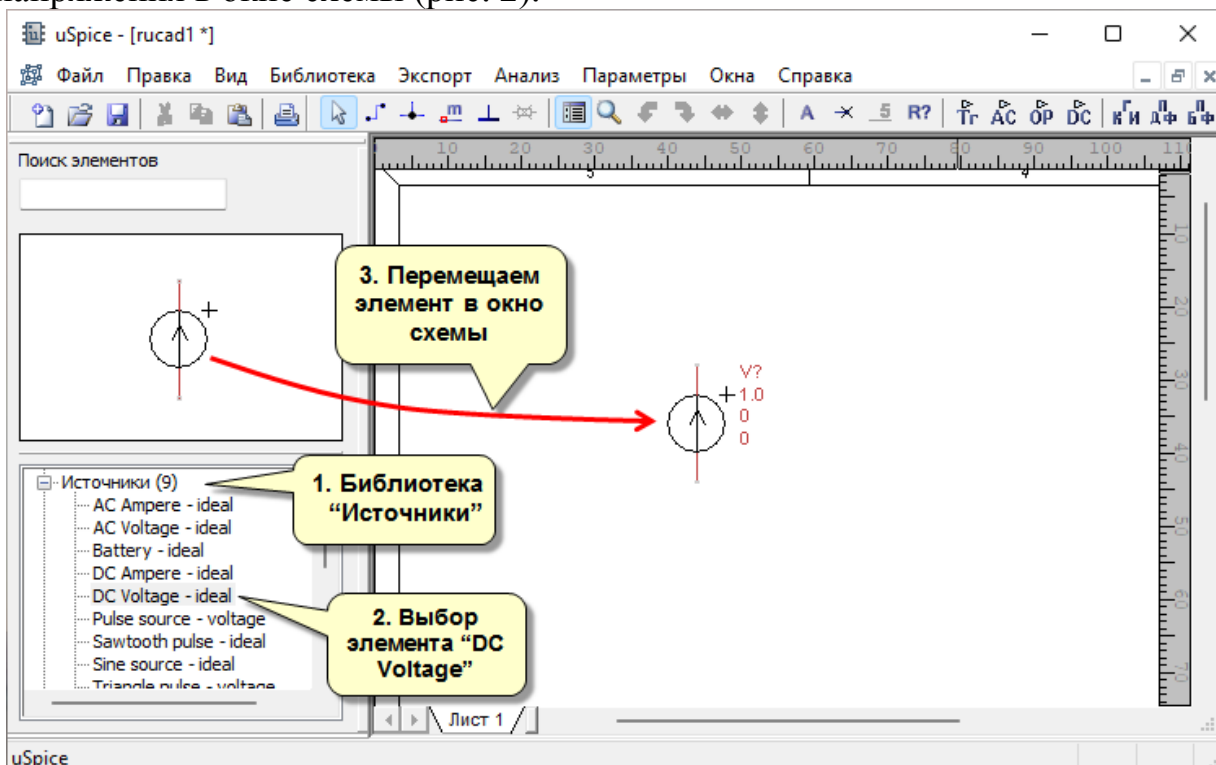


Рис. 2. Выбор и размещение источника постоянного напряжения

При необходимости положение элемента в окне схемы можно изменить, выделяя его левой клавишей мыши и перемещая с помощью мыши на новое

место. Аналогично, используя библиотеку "RLC", размещаем в окне схемы конденсатор и резистор.

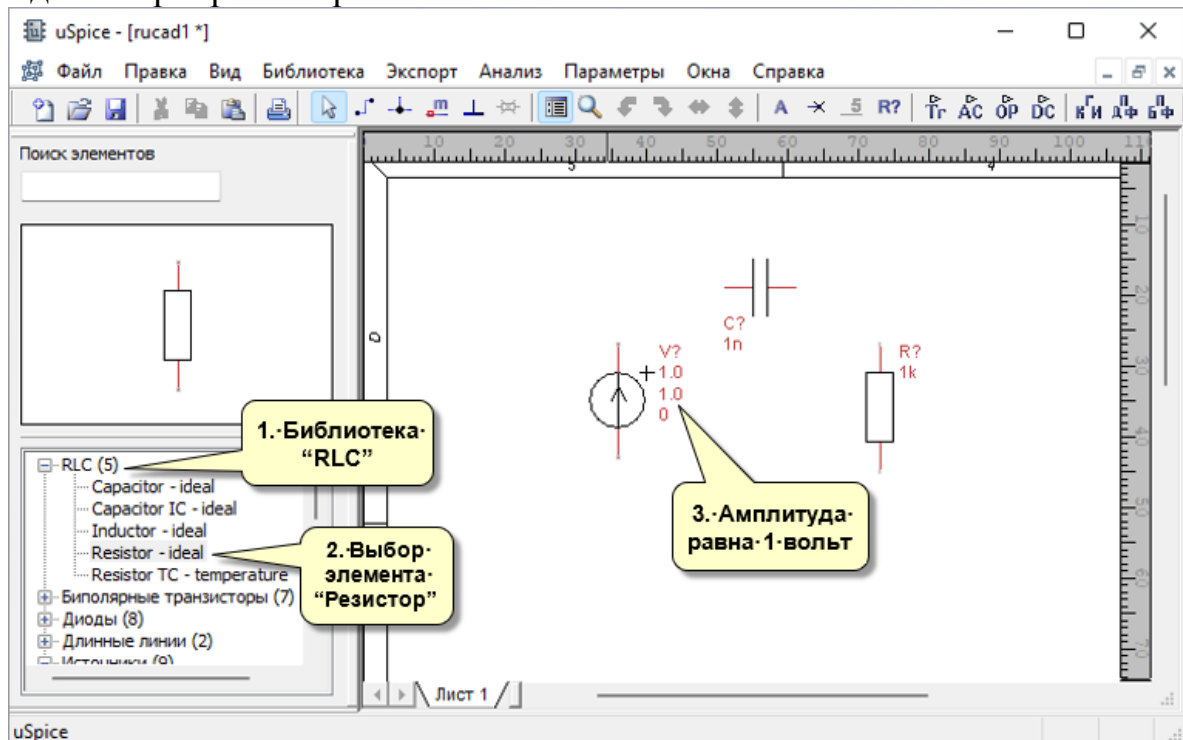


Рис. 3. Выбор и размещение резистора и конденсатора и установка амплитуды напряжения источника

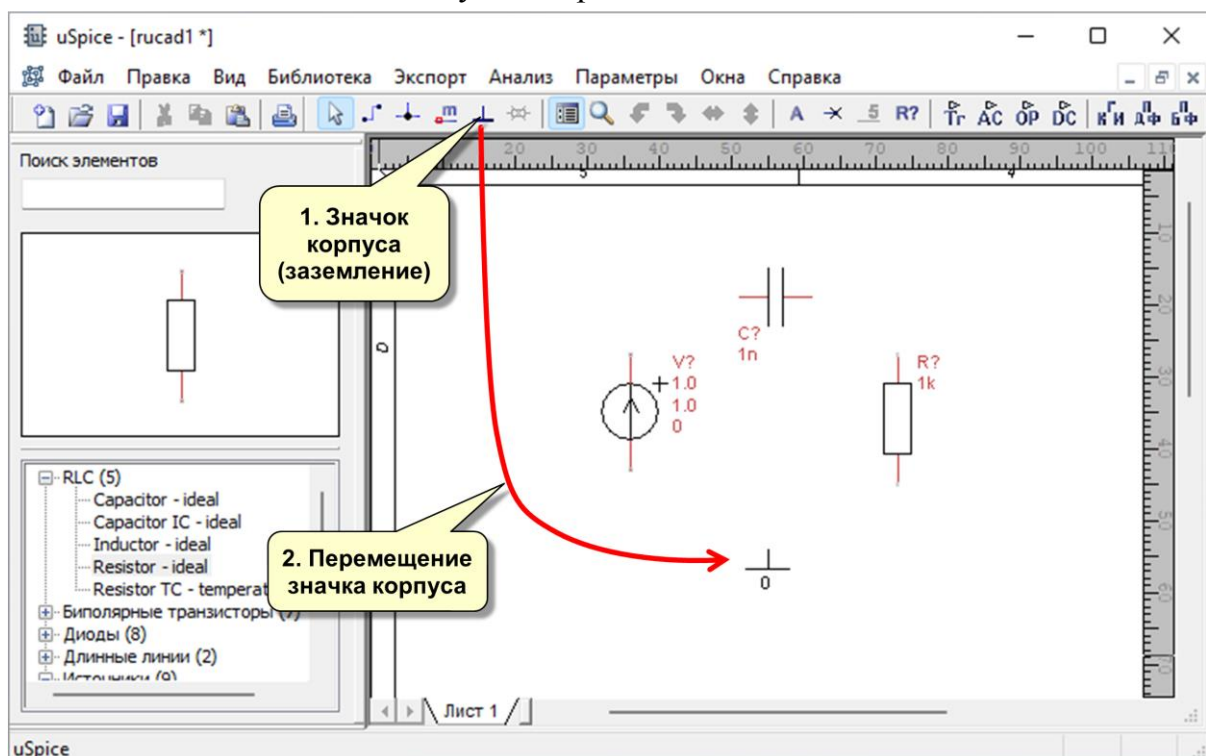


Рис. 4. Размещение значка корпуса

Выделяя элемент левой клавишей мыши и используя автоматически появляющуюся диалоговую панель, можно изменить параметры элемента.

Например, у источника напряжения установим параметр "AC Magnitude" равным 1 вольт (рис. 3).

При машинном моделировании используются узловые напряжения (узловые потенциалы), отсчитываемые относительно корпуса (земли). Поэтому в схему должен быть помещен еще один элемент – корпус (заземление). Значок корпуса вынесен на панель значков программы. С помощью мыши расположим корпус в нижней части схемы (рис. 4).

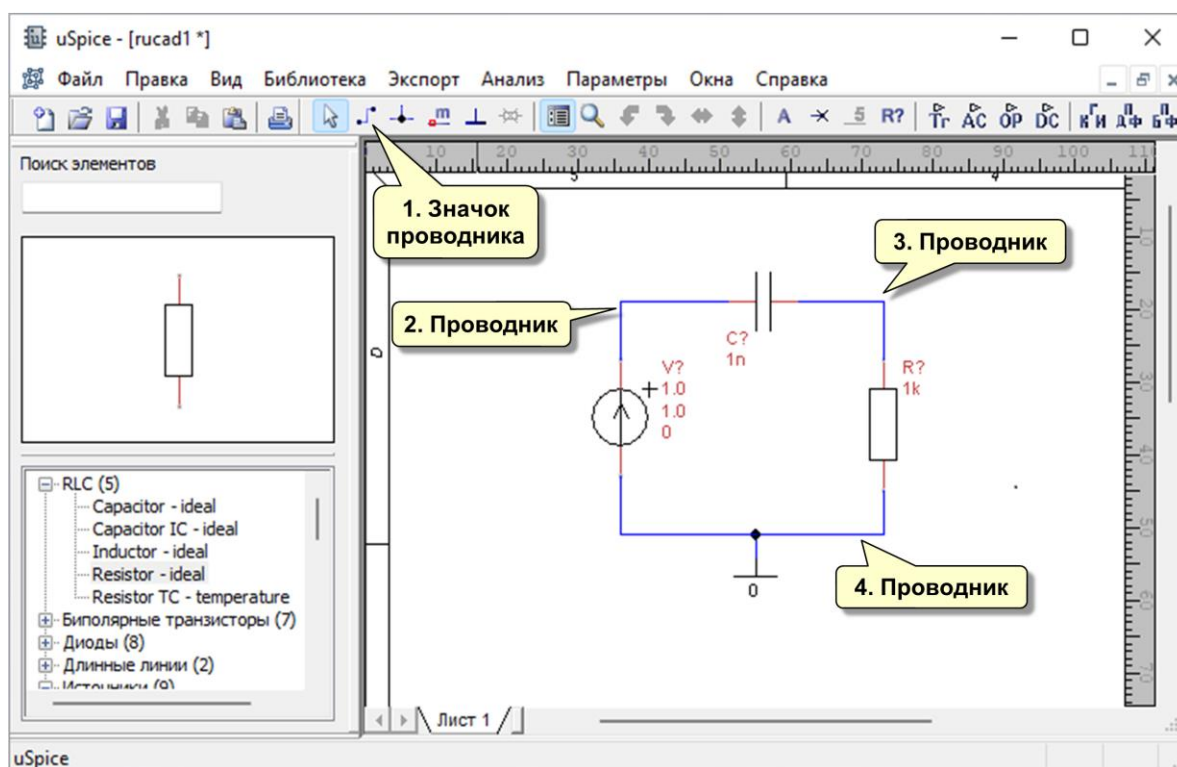



Рис. 5. Соединение проводниками

Осуществим соединение элементов проводниками. Для этого нажимаем на значок проводника на панели инструментов (рис. 5). Затем с помощью мыши, начиная с вывода одного элемента и до касания курсором вывода другого элемента, размещаем проводники схемы. При рисовании проводников для фиксации удачного положения проводника рекомендуется временно отпустить левую клавишу мыши и затем, снова нажав левую клавишу мыши, продолжить рисование проводника. Допускается соединение элементов касанием концов выводов элементов друг с другом.

После подготовки схемы требуется отметить узлы, на которых будут рассчитываться интересующие нас узловые напряжения. Пусть такими узлами будут верхний вывод источника (напряжение на этом выводе, равное напряжению источника, нам понадобится для сравнения) и верхний вывод резистора.

Эти узлы отмечаем, используя значок меток  на панели инструментов программы. С помощью мыши расположим две метки **m1** и **m2** на входе и



выходе схемы. Заметим, что после ввода метки **m1** снова вручную вводить вторую метку **m2** не нужно. Если в конце текста метки записать цифру (целое число), то после установки первой метки цифра (число) метки автоматически изменяется на большую цифру (большее число). Обновленную метку устанавливаем на новое место.

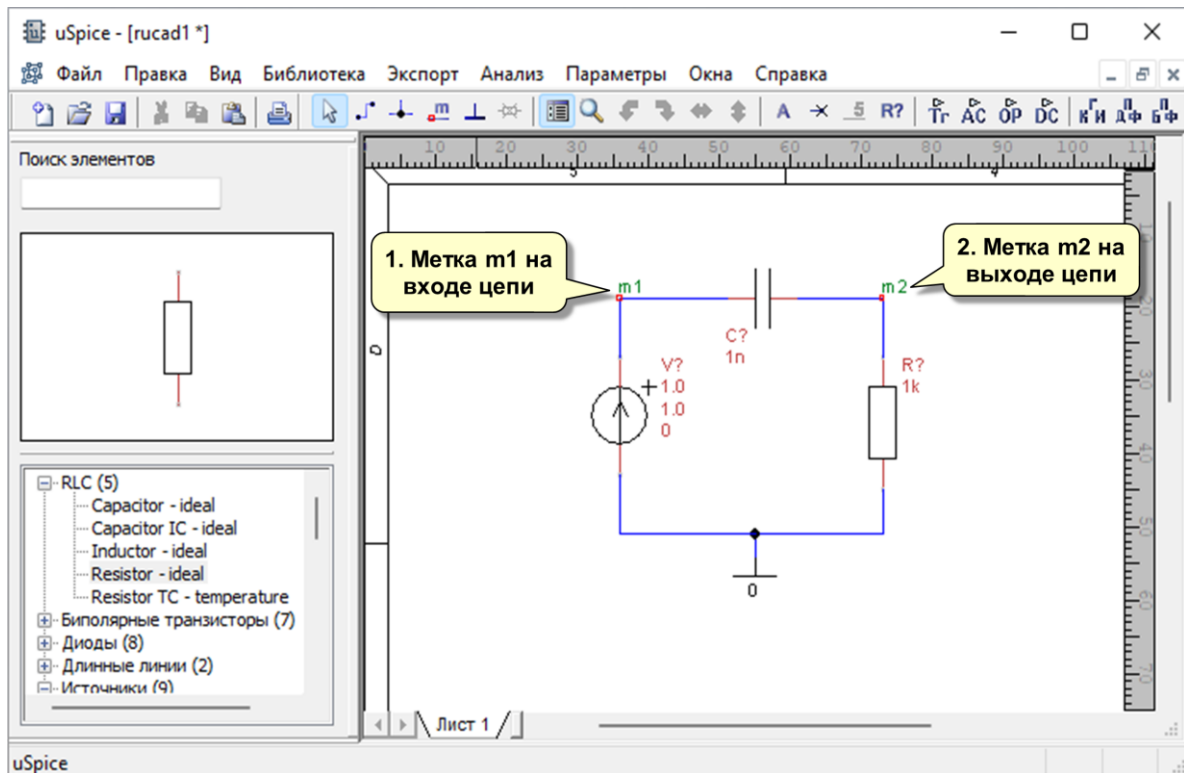


Рис. 6. Установка меток

В завершение можно пронумеровать элементы схемы, нажимая значок **R?** на панели инструментов. Однако этот шаг можно пропустить, т. к. перед расчетом схемы такая нумерация проводится автоматически. Если требуется нестандартная нумерация, то её можно реализовать, обращаясь к меню "Правка" и выбирая затем пункт "Переобозначить элементы схемы...".

### 1.3. Выбор вида анализа и установка параметров расчета

Для проведения анализа переходных процессов в схеме нажимаем на значок с буквами **Tr** панели инструментов. В появившемся диалоговом окне (рис. 7) оставим все параметры расчета по умолчанию, за исключением начальных условий. Выберем расчет с нулевыми начальными условиями.

### 1.4. Этап расчета и вывода результатов

Нажимая на кнопку "Расчет" диалоговой панели запускаем подпрограмму анализа uXSpice, которая проводит расчет переходных процессов, протекающих в исследуемом устройстве. Результаты работы этой подпро-

граммы появляются в текстовом окне (рис. 8) и в окне с графиками переходных процессов (рис. 9).

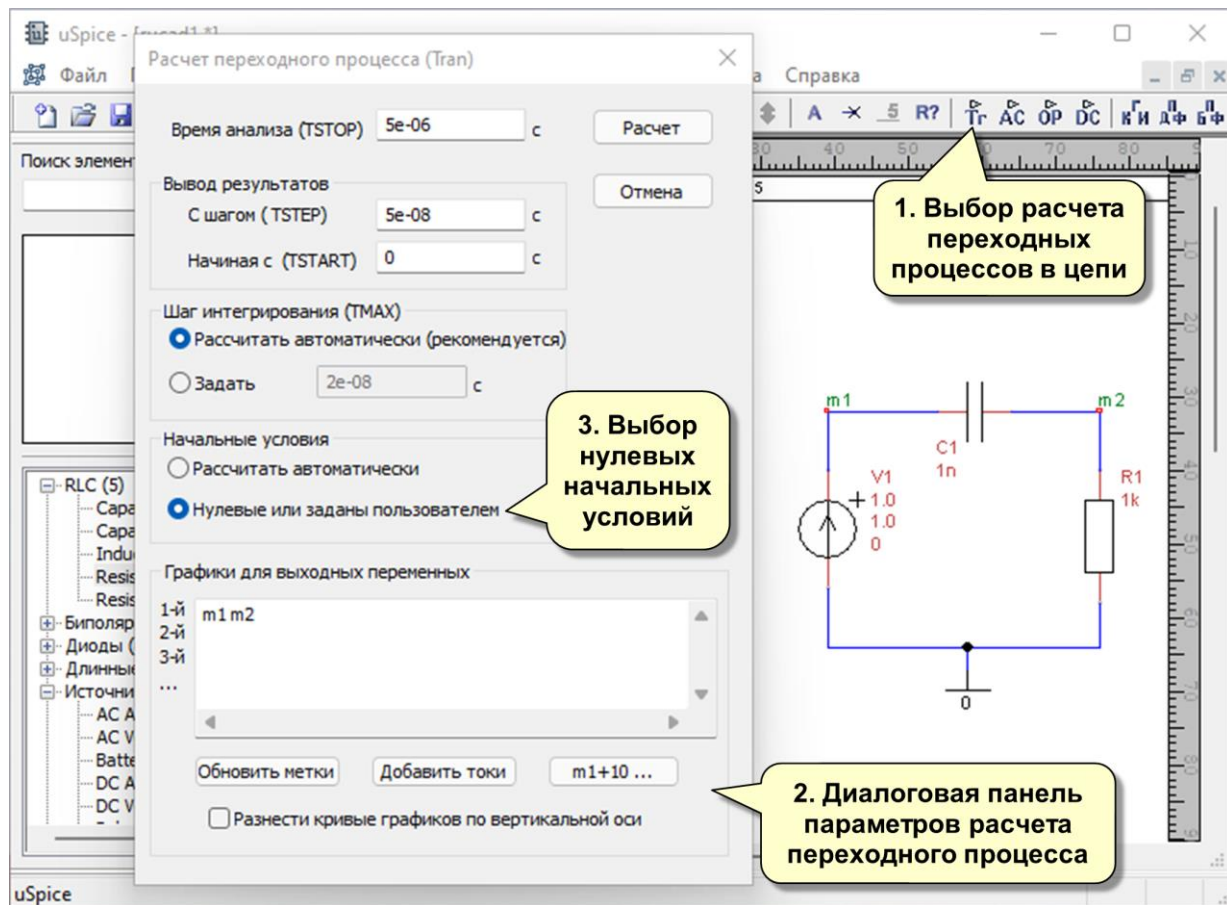


Рис. 7. Подготовка к расчету переходного процесса

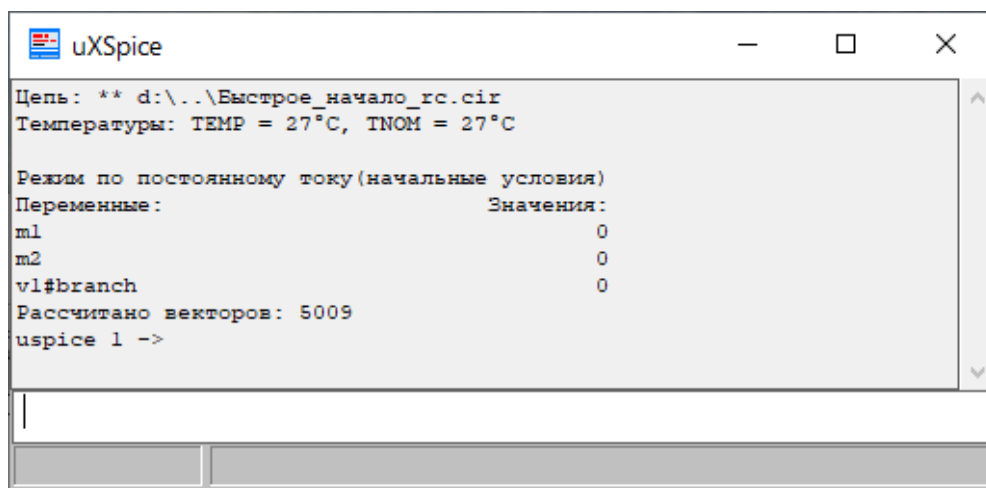


Рис. 8. Текстовое окно подпрограммы uXSpice

Из анализа кривых рис. 9 следует, что при появлении на входе RC-цепочки напряжения, равного 1 вольт, на выходе цепи появляется короткий импульс с длительностью, равной примерно 0,7 мкс (длительность импульса определяем по уровню 0,5 от амплитуды импульса).

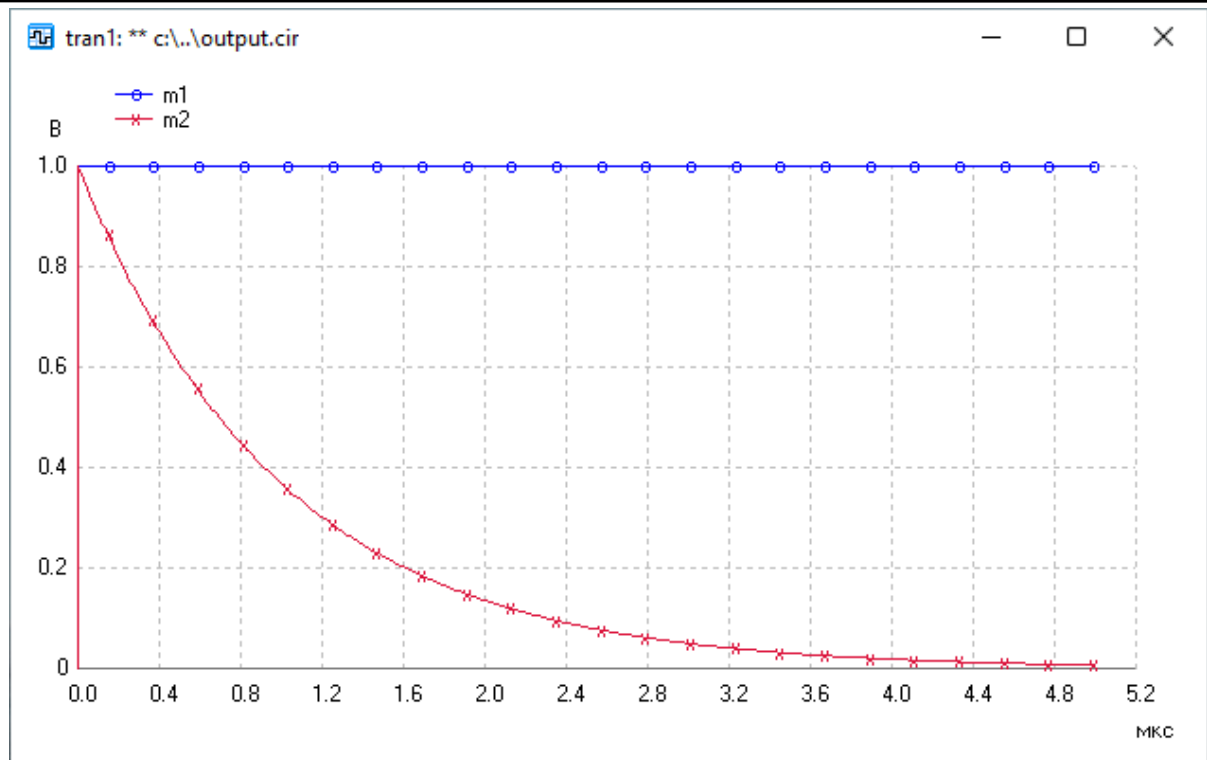


Рис. 9. Переходной процесс в исследуемой цепи

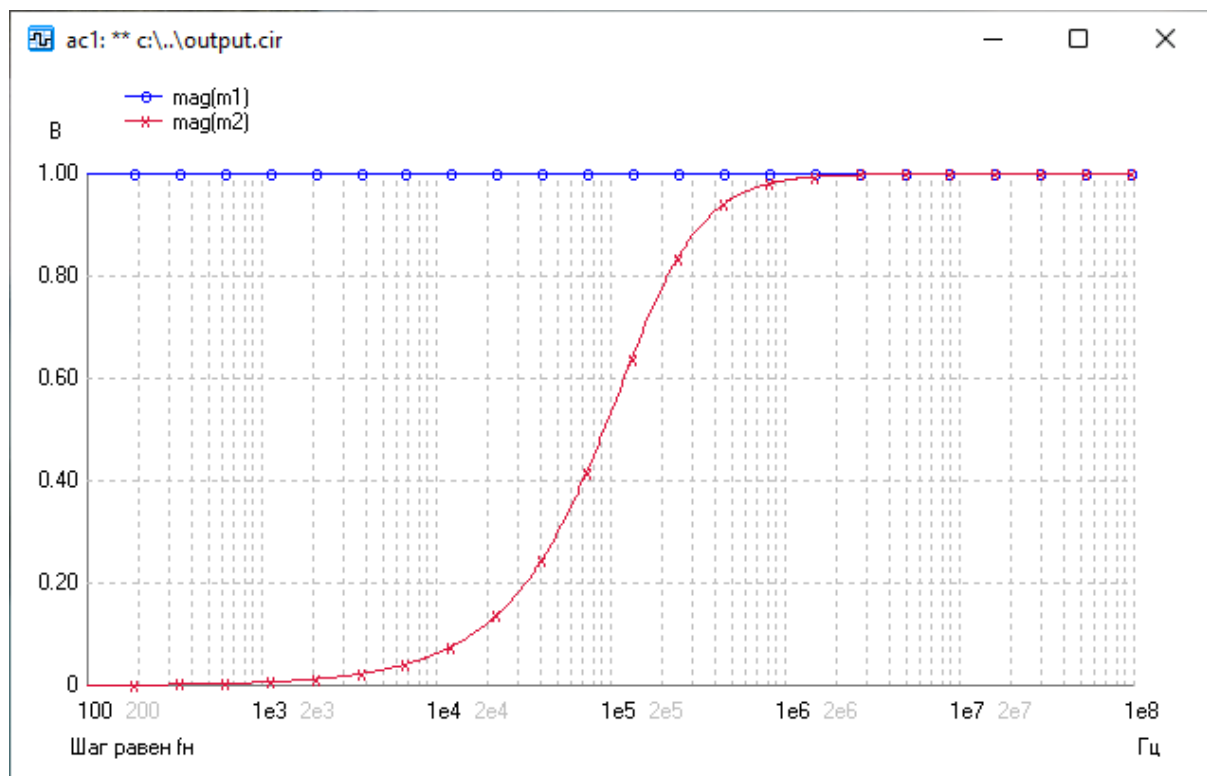


Рис. 10. АЧХ исследуемой цепи

Последние два этапа, выбор вида анализа и расчет, можно повторить, выбирая, например, расчет частотных характеристик цепи. Для этого нажимаем на значок **АС** и, используя параметры по умолчанию, получим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) цепи (рис. 10).

Из анализа полученной АЧХ следует, что исследуемая цепь является фильтром высоких частот с граничной частотой, равной примерно 160 кГц. Теперь можно объяснить полученные выше результаты расчета переходных процессов. Высокочастотные фильтры пропускают только высокочастотные быстро изменяющиеся составляющие входного сигнала и поэтому на выходе фильтра формируется короткий импульс.

## 2. Создание схемы устройства

Схемы включают радиоэлементы, проводники и узлы. Для создания схемы необходимо разместить элементы на рабочем пространстве окна схемы и соединить выводы элементов проводниками. Пример части схемы с резистором, конденсатором, проводниками и корпусом показан на рис. 1.

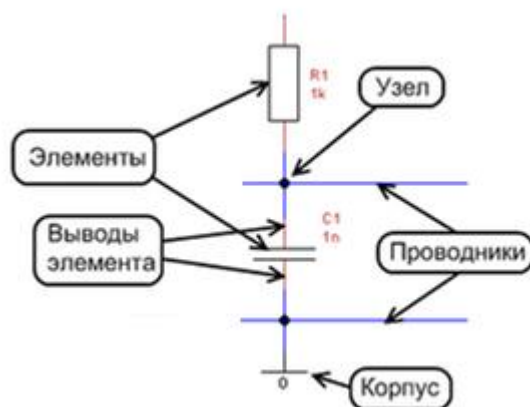


Рис. 1. Часть схемы с радиоэлементами, проводниками и узлами

При соединении нескольких элементов образуются узлы схемы. Один из узлов, соединенный с корпусом устройства, называют нулевым узлом. Значок корпуса (заземления) показан в нижней части рис. 1.

### 2.1. Выбор и размещение элементов в окне схемы

Выбор и размещение радиоэлементов (резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов, диодов, транзисторов и т.д.) производится в следующем порядке:

- выбор библиотеки элементов,
- выбор радиоэлемента из библиотеки,
- перемещение радиоэлемента в окно схемы и установка параметров радиоэлемента.

#### 2.1.1. Выбор библиотеки

В настоящее время на отечественных и зарубежных предприятиях изготавливаются миллионы различных радиоэлементов. Для удобного использо-

вания такого большого числа радиоэлементов их группируют в библиотеки по типам. По умолчанию список библиотек расположен в диалоговом окне выбора элементов (рис. 2) в левой части главного окна программы. Назначение библиотеки обычно ясно из ее названия.

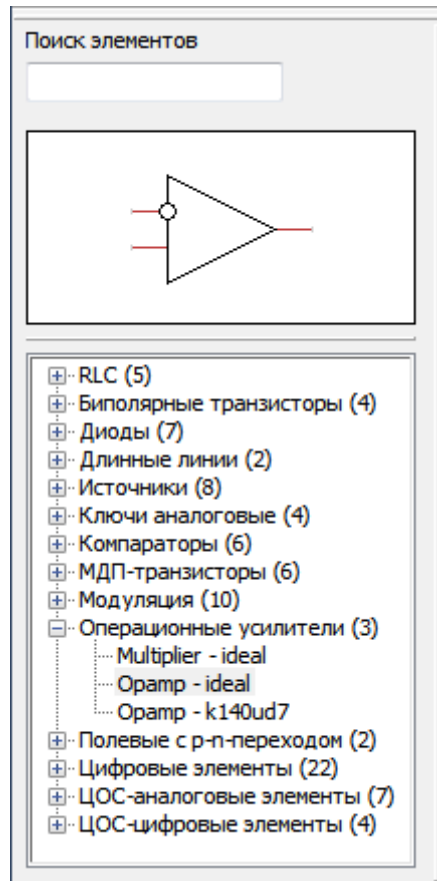



Рис. 2. Диалоговое окно выбора библиотеки и элементов

Например, на рис. 2 выбрана библиотека операционных усилителей и отмечен элемент — идеальный операционный усилитель. Размеры окон, содержащих перечень библиотек и изображение выбранного элемента, можно изменить, перемещая разделительную линию диалоговой панели.

### 2.1.2. Выбор элемента

Список элементов, содержащихся в библиотеке, появляется после нажатия на значок . Например, на рис. 2 в окне элементов показано изображение выбранного элемента — операционного усилителя.

Для проверки правильности выбора нужного элемента используется условное графическое изображение элемента, появляющееся в окне элементов.

Для ускорения выбора элемента в библиотеках можно также использовать окно поиска, в которое вводится имя элемента. Как правило, достаточно ввести несколько первых букв, содержащихся в имени элемента. Поиск осу-

ществуется во всех библиотеках и найденные элементы автоматически появляются в раскрывающихся списках библиотек.

### 2.1.3. Размещение элемента в окне схемы

Выбрав элемент, переместите мышью элемент в окно схемы (рис. 3). Для установки элемента в нужную часть схемы нажмите левую кнопку мыши. Если вместо этого нажать правую кнопку мыши, то установка выбранного элемента отменяется.

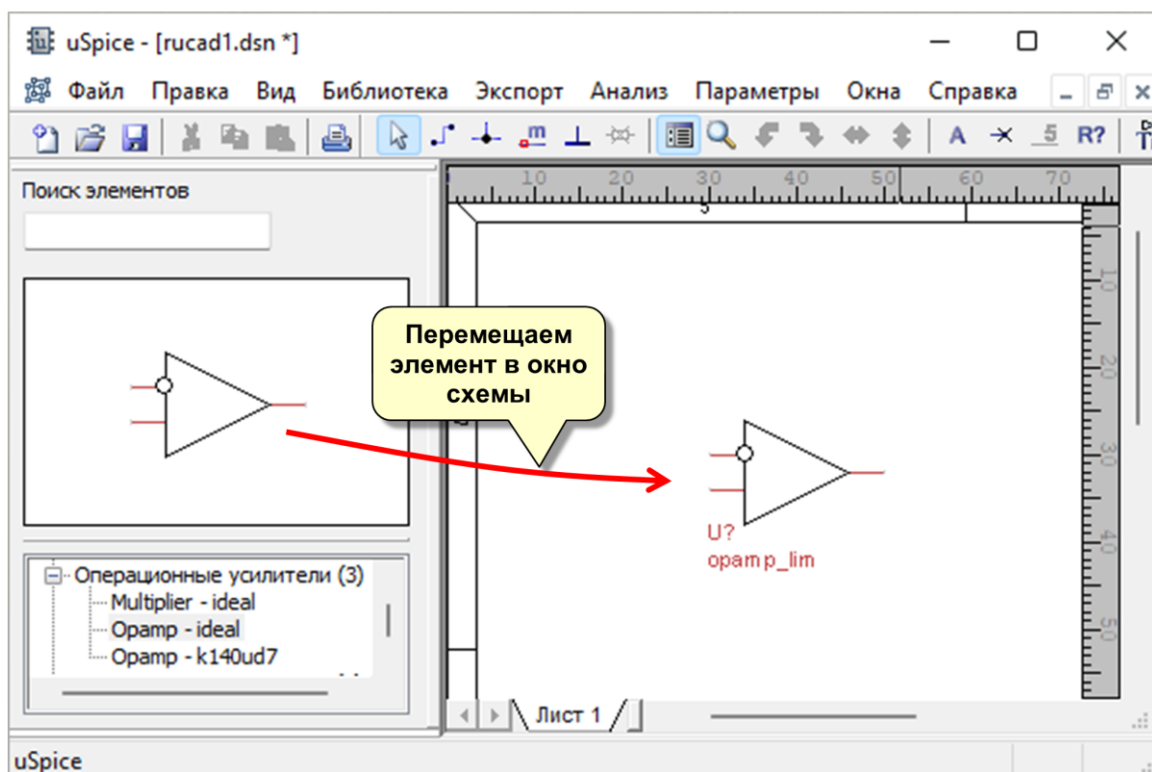


Рис. 3. Размещение элемента в окне схемы

При установке элементов будьте внимательны. Если при размещении элемента случайно дважды нажать на одном месте левую кнопку мыши, то в схему вставятся два элемента, обозначения которых, накладываясь друг на друга, будут создавать впечатление одного элемента. При расчете такой схемы будет возникать ошибки. В этом случае рекомендуется, нажимая левую кнопку мыши и выделяя элемент, передвинуть элемент на новое место, обнаруживая скрытый под ним двойник. Обнаруженный элемент-двойник нужно удалить.


При выделении элемента в окне схемы автоматически появляется диалоговая панель свойств элемента. В этой панели введите параметры элемента и выберите правильное положение элемента. Для этого используйте радиокнопки "Вверх", "Вниз", "Налево", "Направо" диалоговой панели. Для установки элемента в нужное положение удобно также использовать соответствующие значки на панели инструментов.

Примечания.

1. Нельзя оставлять в окне схемы элементы, не подключенные к другим элементам. Неиспользуемые элементы должны быть удалены иначе при расчете цепи будут возникать ошибки.
2. Перемещение элемента на новое место производится новым "захватыванием" и перемещением при нажатой левой клавиши мыши.
3. Для улучшения "читаемости" схемы можно с помощью мыши перемещать текстовые поля, содержащие описание параметров элемента.

## 2.2. Корпус (заземление)

В состав схемы обязательно включается корпус (заземление). Без этого элемента правильный расчет схемы не гарантируется, так как основной метод расчета, используемый в программе, — это метод узловых напряжений, а узловое напряжение — это напряжение между заданным узлом и корпусом. Поэтому, если в схему не включить узел-корпус, то программа автоматически вводит виртуальный узел-корпус в схему, номер которого может не совпадать с требуемым номером узла-корпуса.

Изображение корпуса (заземления) вынесено на панель значков. Для использования корпуса выберите значок  на панели инструментов и перетащите его в нужное место на схеме (рис. 4). В окне параметров этого элемента должна стоять цифра 0, соответствующая узлу с номером 0 и нулевому потенциалу.

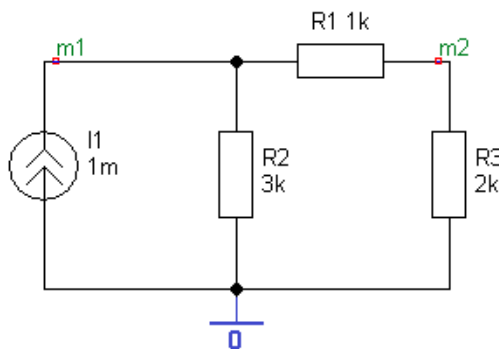


Рис. 4. Размещение значка корпуса в схеме цепи

Например, при установке корпуса корректно рассчитанные постоянные напряжения в узлах  $m1$  и  $m2$  на рис. 4 равны  $1,5$  В и  $1$  В, соответственно. Если значок корпуса в схему не поместить, то в узлах  $m1$  и  $m2$  получим неверные значения минус  $0,5$  В и минус  $1$  В, соответственно.


При анализе сложных схем с помощью значка корпуса можно ввести одинаковый номер узла в разных частях схемы. Например, указывая в окнах параметров элемента число 14, получим узлы с номерами 14. Однако более удобно такую операцию производить с использованием одинаковых меток.



Отметим, что нулевой узел можно ввести в схему, добавляя в схему метку с именем-цифрой "0". Однако использование символа корпуса более наглядно и соответствует правилам рисования схем.

### 2.3. Соединение выводов радиоэлементов

Все элементы и символ корпуса в окне схем должны быть размещены без пересечений и наложений. Соединение выводов всех элементов друг с другом осуществляется проводниками. Допускается непосредственное соединение выводов элементов друг с другом (касанием концов выводов).


Для входа в режим соединения проводниками нажимаем значок проводника  на панели инструментов. С помощью курсора мыши отмечаем вывод первого элемента и, не отпуская левую клавишу мыши, перемещаем курсор мыши в выбранном направлении. Появившийся проводник подключаем к выводу второго элемента и отпускаем левую клавишу мыши. Иногда, например, когда контакты элементов расположены близко друг к другу и т. п., для завершения соединения требуется повторное нажатие левой кнопки мыши.

Отметим, что при пересечении проводников автоматическая установка узла не происходит, если продолжить рисование проводника в выбранном направлении. По умолчанию при наложении на проводник выводов элементов в схеме автоматически устанавливается узел. Автоматическую установку узлов можно отключить, устанавливая соответствующий параметр в опциях программы.

Соединительные проводники можно, захватывая мышью, переместить на новое место. Если использовать операцию выделения с помощью курсора группы проводников, то перемещение можно производить без разрывов с соседними проводниками.

Выход из режима рисования проводников осуществляется с помощью клавиши Esc, а также при нажатии правой кнопки мыши или при выборе других режимов работы программы. После нажатия клавиши Esc или правой кнопки мыши возвращаемся в исходный режим выбора элементов.

### 2.4. Использование меток

Важную роль в схеме играют метки, установить которые можно, используя значок  с красной точкой и буквой **m** на панели инструментов. В основном метки используются для указания узлов, напряжения в которых будут выведены на печать после проведения расчета схемы (рис. 5). Названия меток указываются в окнах видов анализа для печати графиков. В этом случае имя метки служит именем переменной, описывающей узловое напряжение.



Метки также можно использовать для указания узлов с одинаковыми потенциалами, без соединения этих узлов с помощью проводников. Наконец, метки требуется указывать для связывания частей схемы, размещенной на нескольких листах.

На рис. 5 показаны метки **in** и **out** фильтра высоких частот. Метки размещают на проводниках (точнее, на проводниках размещают маленький красный прямоугольник метки). Текст метки можно расположить горизонтально или вертикально. Имя метки должно начинаться с латинской буквы в соответствии с правилами Spice-описания схем.

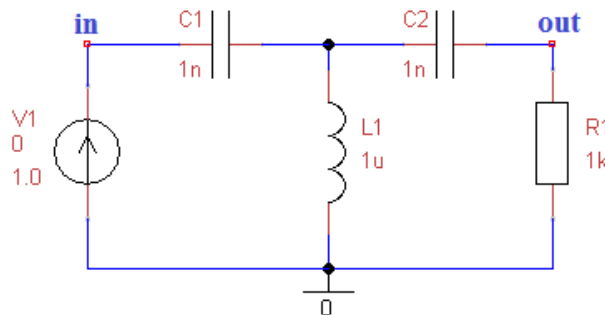






Рис. 5. Установка меток in и out в схеме ФВЧ




Если в конце текста метки имеется цифра (целое число), то после установки первой метки цифра (число) метки автоматически изменяется на большую цифру (большее число), что удобно при расстановке большого числа меток в сложной схеме.

### 3. Анализ электронных цепей


Программа uSpice позволяет проводить четыре основных вида моделирования:

- анализ переходных процессов (режим Transient (Tran, Tr), значок ,
- расчет схем методом комплексных амплитуд (режим AC, значок ,
- расчет рабочих точек на постоянном токе (режим OP, значок ,
- многовариантный расчет на постоянном токе (режим DC, значок 

Кроме этого, с помощью программы uSpice можно рассчитать коэффициент гармонических искажений (КГИ), провести цифровую обработку сигналов с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и быстрого преобразования Фурье (БПФ), а также найти огибающую и фазу аналитического сигнала:

- расчет КГИ (значок ,
- ДПФ (значок ,
- БПФ (значок 

17

– расчет аналитического сигнала (АС) (значок ).

После нажатия одного из указанных восьми значков появляется соответствующая диалоговая панель с параметрами расчета. После заполнения панели данными автоматически формируется .cir файл задания, содержащий описание цепи и директивы для проведения расчета. Этот .cir файл записывается в тот же каталог, куда записывается .dsn файл с графическим описанием схемы цепи.

Затем подготовленный .cir файл передается подпрограмме uXSpice, которая проводит расчет цепи и представляет выходные данные в виде таблиц и графиков.

### 3.1. Расчет переходного процесса


Расчет переходного процесса в электрической цепи предполагает получение выходного напряжения или тока как функций времени в заданном временном диапазоне. Так как радиоэлектронные цепи в программе uSpice в общем случае описываются дифференциальными уравнениями, то расчет переходного процесса проводится с использованием численного интегрирования. Переходные процессы рассчитываются от нулевого момента времени до заданного момента времени TSTOP. Перед началом расчета переходных процессов по умолчанию производится расчет рабочих точек (статического режима). Предварительный расчет рабочих точек может быть отменен, – вместо него можно задать нулевые начальные условия или начальные условия, определенные пользователем.

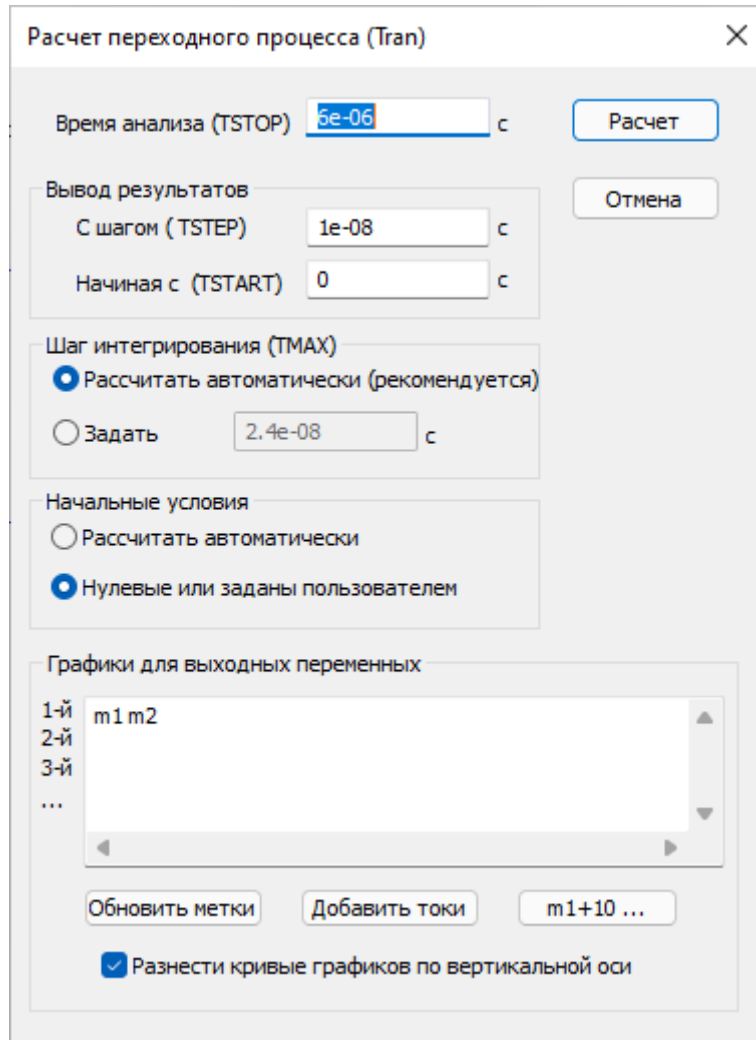
Отметим, что шаг при расчете переходных процессов может существенно меняться, так как он каждый раз выбирается системой автоматически. Для вывода результатов с фиксированным шагом TSTEP используется интерполяция данных. SPICE-инструкция для задания расчета во временной области имеет вид

```
.TRAN TSTEP TSTOP [TSTART [TMAX]] [UIC]
```

Здесь TSTEP — шаг вывода результатов расчета, TSTOP — конечное время расчета переходных процессов, TSTART — начальное время вывода переходных процессов на печать (если TSTART не задано, то его значение считается нулевым). На интервале времени (0, TSTART) схема рассчитывается, но результаты расчета на печать не выводятся. Результаты выводятся на печать на интервале (TSTART, TSTOP). С помощью необязательного параметра TMAX можно ограничить максимальную величину автоматически устанавливаемого шага интегрирования. Опция UIC указывает, что перед расчетом переходных процессов не будет проводиться расчет статического режима, а будут использоваться или нулевые начальные условия, или, если

указаны, начальные значения напряжений на конденсаторах, токов в катушках индуктивностях и т. п.

Все описанные параметры инструкции .TRAN вводятся с помощью диалоговой панели, изображенной на рис. 1. Это окно возникает при нажатии на значок  с буквами **Tr** панели инструментов.



Диалоговая панель "Расчет переходного процесса (Tran)" содержит следующие элементы:

- Время анализа (TSTOP):  с
- Вывод результатов:
  - С шагом (TSTEP):  с
  - Начиная с (TSTART):  с
- Шаг интегрирования (TMAX):
  - ☒ Рассчитать автоматически (рекомендуется)
  - ☐ Задать:  с
- Начальные условия:
  - ☐ Рассчитать автоматически
  - ☒ Нулевые или заданы пользователем
- Графики для выходных переменных:
  - 1-й:
  - 2-й:
  - 3-й:
  - ...:
- Кнопки: "Обновить метки", "Добавить токи", "m1+10 ..."
- Чекбокс: ☒ Разнести кривые графиков по вертикальной оси

Рис. 1. Диалоговая панель с параметрами переходного процесса

В нижней части диалоговой панели имеется окно текстового редактора для записи выходных переменных. В нем указываются метки узлов, напряжения в которых должны быть выведены в виде графиков. Кнопка "Обновить метки" позволяет обновить список этих меток, если пользователь удаляет или добавляет метки в процессе работы со схемой устройства. Кнопка "Добавить токи" позволяет внести в окно выходных переменных токи через источники напряжения, которые имеются в схеме или специально добавлены в схему для исследования токов в заданных ветвях. В последнем случае величину напряжения источника устанавливаем равной нулю.

Кнопка "m1+10 ..." позволяет разнести напряжения переменных m0, m1, m2 и т. д. по вертикальной оси, добавляя к переменным дополнительно по 10

вольт. Такой сдвиг графиков по вертикальной оси удобно использовать при анализе цифровых схем. Аналогичную задачу выполняет выбор пункта «Разнести кривые графиков по вертикальной оси». Величина сдвига графиков по вертикальной оси в последнем случае зависит от значений исследуемых переменных.

Список меток в окне выходных переменных можно редактировать. В окне можно записывать формулы, с включением меток. В формулах можно использовать большинство стандартных математических функций.

После завершения работы с диалоговым окном и нажатия кнопки "Расчет" параметры расчета записывается в .cir файл, который передается в подпрограмму uXSpice. Окно с результатами работы этой подпрограммы показано на рис. 2.

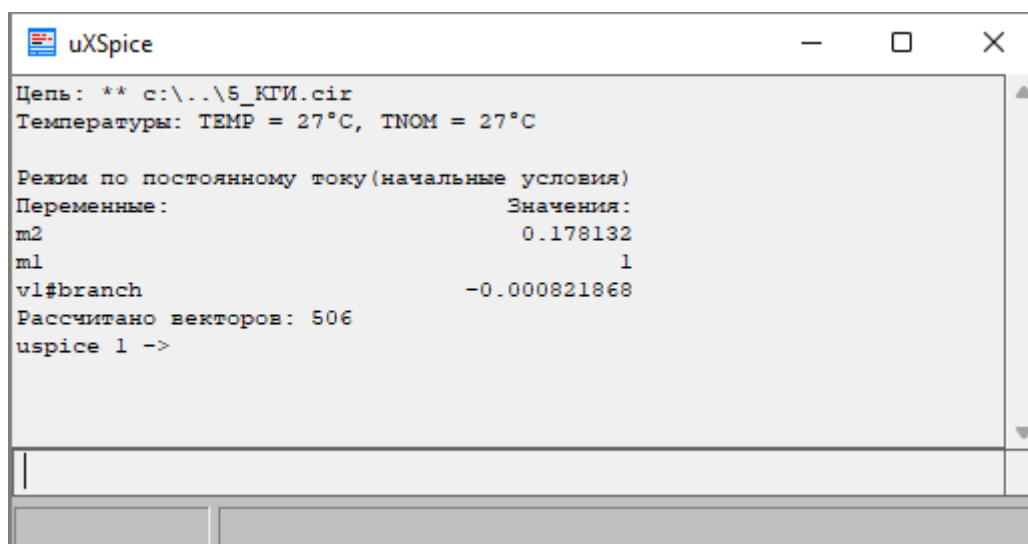


Рис. 2. Окно подпрограммы uXSpice

Отметим, что если опция TMAX не задана, то в программе uXSpice автоматически используется минимальное из двух постоянных TMAX1 и TMAX2, где  $TMAX1 = (TSTOP - TSTART)/250$  и  $TMAX2 = TSTEP/5$ . В последнем соотношении учитывается, что потребуется, по крайней мере, пять точек с данными, чтобы достоверно отобразить выходные результаты.

Минимальный шаг интегрирования  $delmin$  в программе uXSpice автоматически выбирается наибольшим из двух значений:  $TMAX * 1e-12$  и  $1e-21$ . Если схема цепи задана некорректно и при расчете шаг интегрирования будет меньше  $delmin$ , то вычисления прекращаются и пользователь получает сообщение об ошибке.

Рассмотрим, например, RC-автогенератор на операционном усилителе (рис. 3). График выходного напряжения в узле m1 показан на рис. 4. Из анализа кривых рис. 4 следует, что примерно через 3,0 мс после подачи питания

на выходе автогенератора устанавливаются колебания с амплитудой, равной примерно 0,8 В. Период колебаний примерно равен 1,3 мс.

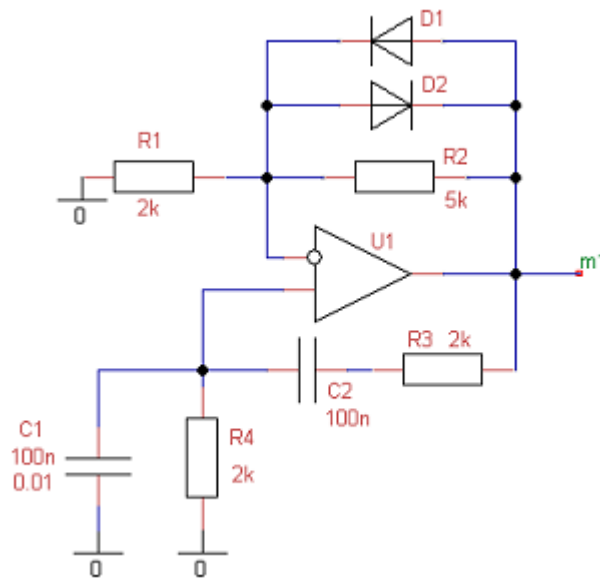


Рис. 3. Схема *RC*-автогенератора на ОУ

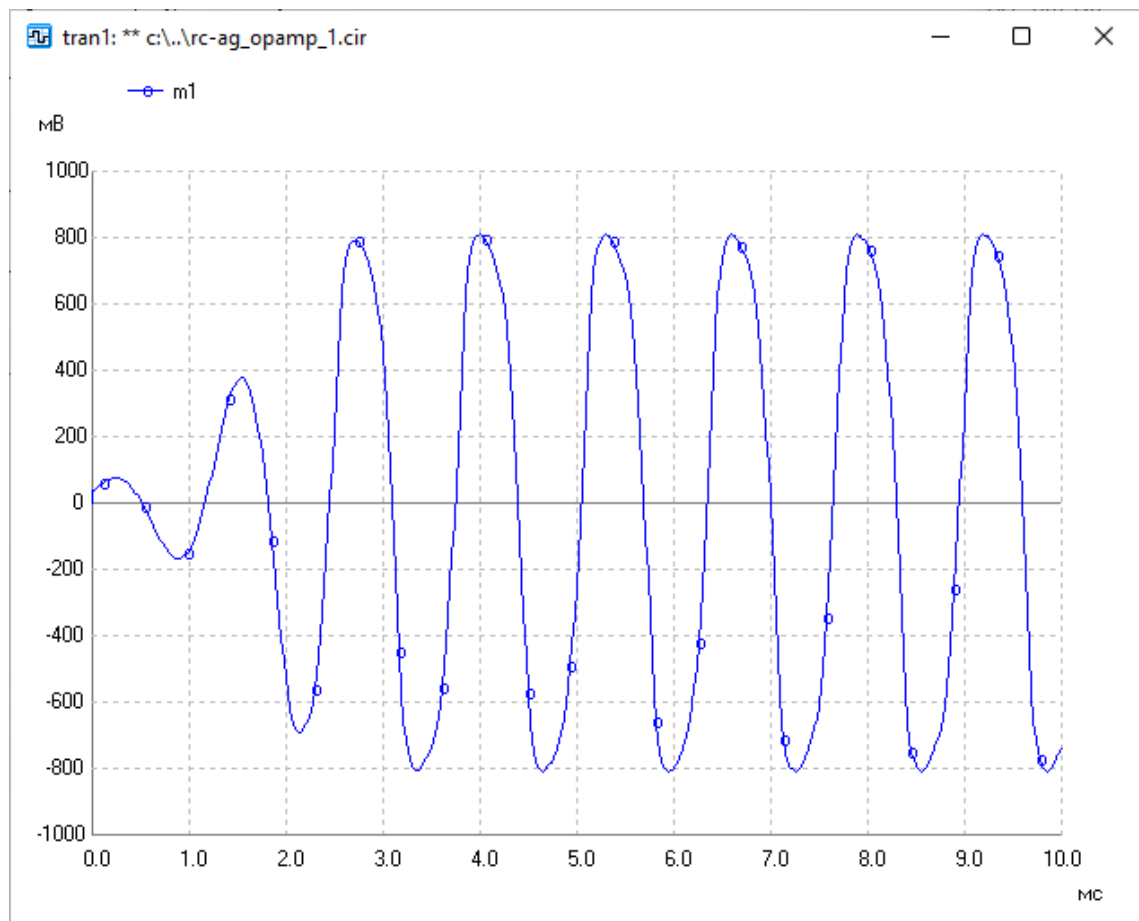


Рис. 4. Сигнал на выходе *RC*-автогенератора

## 3.2. Расчет частотных характеристик

Частотные характеристики описывают амплитуды и начальные фазы напряжений, или токов, или отношений амплитуд друг к другу, или разность начальных фаз, как функций от частоты. Перед началом расчета частотных характеристик всегда производит расчет статического режима схемы. Это требуется для определения рабочих точек нелинейных элементов и расчета их линейных эквивалентных параметров. Линейная модель схемы анализируется в заданном частотном диапазоне.

Имеются три SPICE-инструкции для расчета в частотной области:

```
.AC DEC ND FSTART FSTOP
```


```
.AC OCT NO FSTART FSTOP
```

```
.AC LIN NP FSTART FSTOP
```

Здесь параметр DEC устанавливает логарифмический масштаб изменения частоты по декадам, ND указывает количество точек в декаде, OCT устанавливает логарифмический масштаб изменения частоты по октавам, NO указывает количество точек в октаве, а LIN устанавливает линейный масштаб изменения частоты, NP указывает количество точек в заданном частотном диапазоне, FSTART указывает начальную частоту, а FSTOP указывает конечную частоту анализа.

Пример.

```
.AC LIN 100 1 10K
```

Для задания параметров расчета частотных характеристик нажимаем на значок  с буквами AC на панели инструментов. В появившемся диалоговом окне (рис. 5) вводим начальную и конечную частоты, а также число рассчитываемых точек. Дополнительно указываем тип шкалы по вертикали и по горизонтали.

В нижней части диалоговой панели в окне текстового редактора контролируем правильность списка выходных переменных. Кнопка "Обновить метки" позволяет обновить список меток. Кнопка "Добавить токи" позволяет внести в окно выходных переменных токи через источники напряжения, которые имеются в схеме или специально добавлены в схему для исследования токов в заданных ветвях. Список меток в окне выходных переменных можно редактировать. Отметим, что для каждой метки рассчитываются две зависимости: амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики.

Для меток можно дополнительно указать представление на комплексной плоскости или в виде диаграммы Вольперта-Смита. Для последней из списка метки предусмотрена возможность представления в режиме непрерывной фазы.

После завершения работы с диалоговым окном и нажатия кнопки "Расчет" параметры расчета записываются в .sig файл, который передается в подпрограмму uXSpice. Результаты работы этой программы выводятся в виде таблиц и графиков.

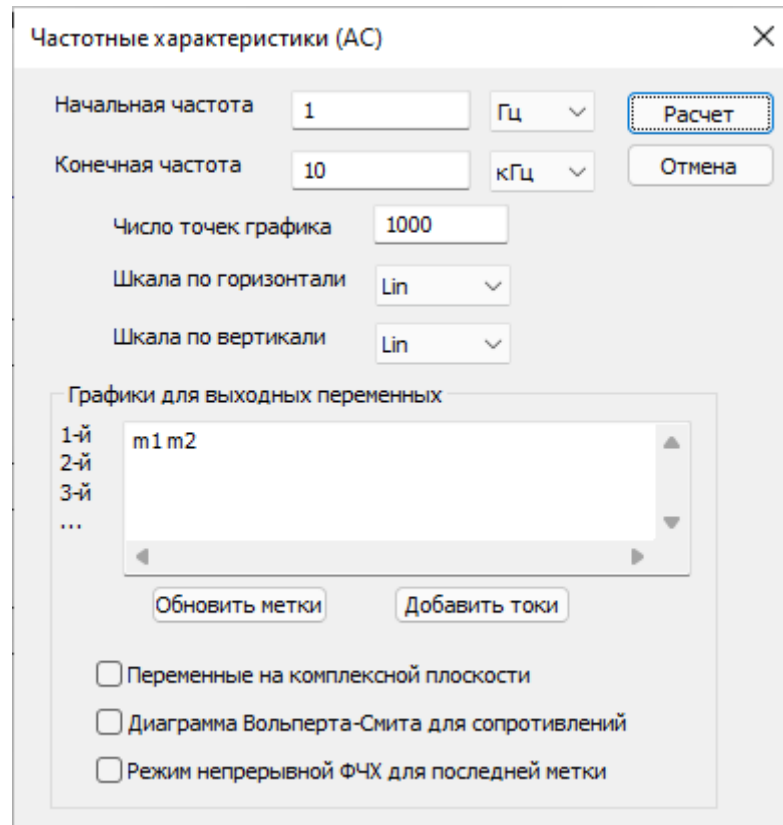


Рис. 5. Диалоговая панель для задания параметров расчета методом комплексных амплитуд (панель режима АС)

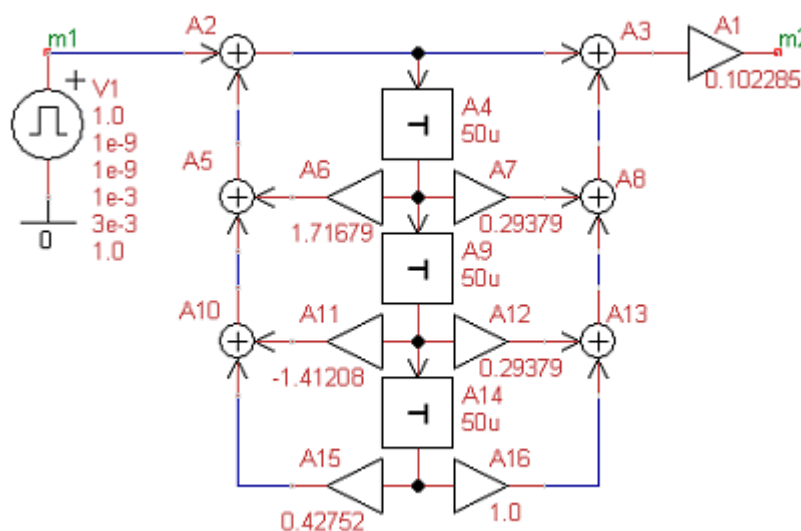


Рис. 6. Схема цифрового фильтра 3-го порядка

В качестве примера рассмотрим цифровой фильтр 3-го порядка. Схема фильтра приведена на рис. 6. Параметры расчета частотных характеристик

соответствуют параметрам, установленным на диалоговой панели, показанной выше на рис. 5. АЧХ фильтра приведена на рис. 7.

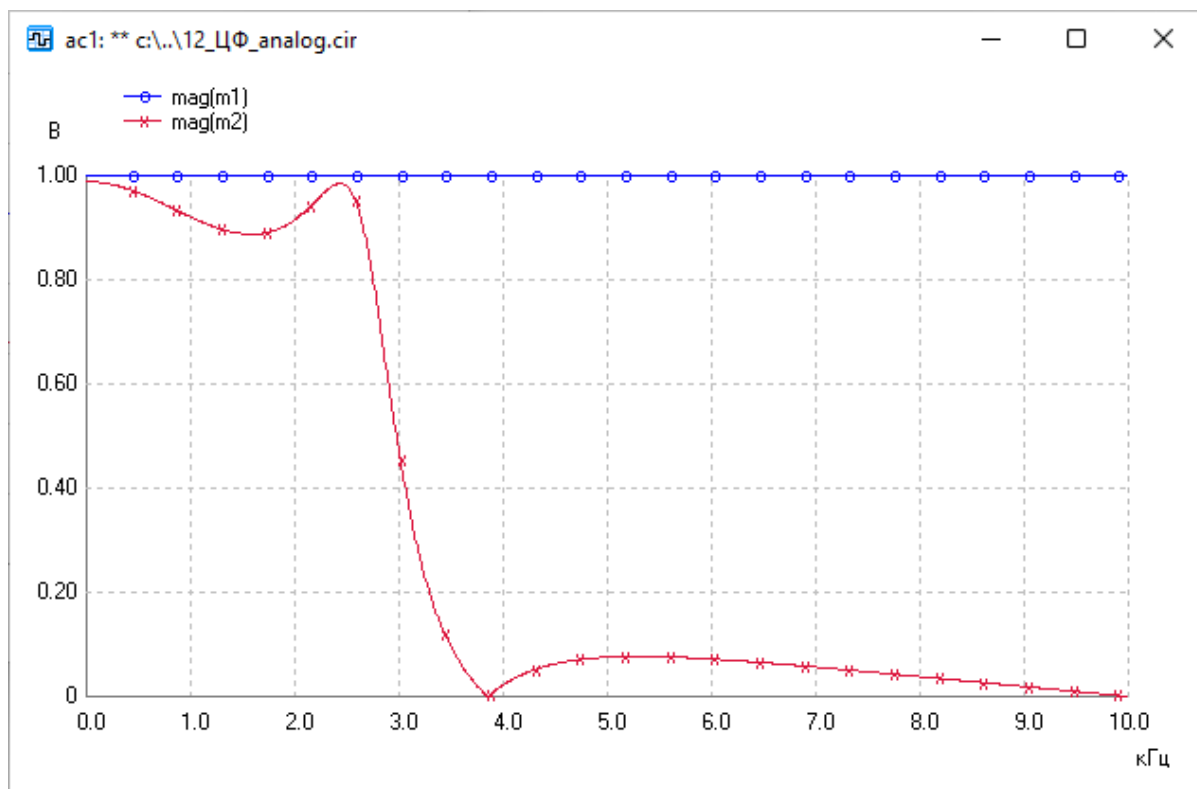



Рис. 7. АЧХ цифрового фильтра

Из анализа полученных кривых следует, что фильтр относится к эллиптическому типу, является фильтром низких частот с граничной частотой, равной примерно 2,7 кГц.

### 3.3. Расчет рабочих точек

Анализ рабочих точек (статических режимом работы электрической схемы, режим ОР) проводится, когда все переходные процессы, протекающие в схеме при подаче питания, закончились. При расчете все катушки индуктивности замыкаются, а конденсаторы в электрической схеме размыкаются. Диалоговое окно режима ОР со списком переменных показано на рис. 8.

Для расчета рабочих точек нажимаем на значок  с буквами **ОР** на панели инструментов. SPICE-инструкция на расчет записывается в виде простой команды .ОР без дополнительных параметров. При необходимости добавляем токи через источники напряжения и редактируем список переменных. В окне на рис. 8 перед током  $i(v1)$  поставлен знак минус, т. к. ожидается, что исходный ток  $i(v1)$  будет отрицательным. В этом случае величина  $(-i(v1))$  будет положительной.



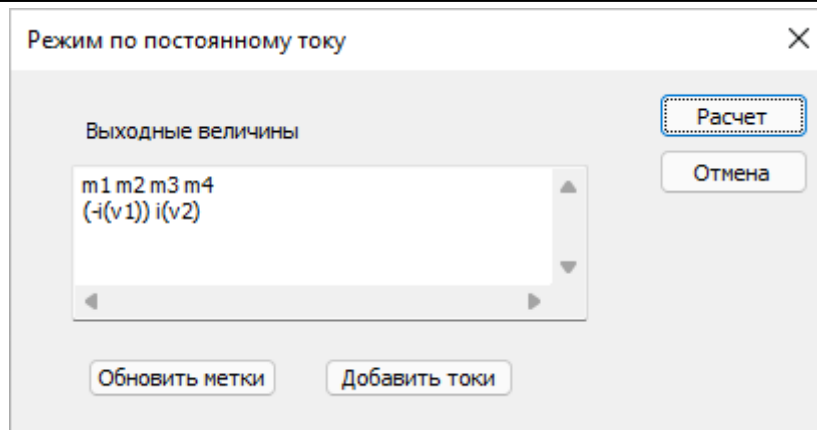


Рис. 8. Диалоговая панель режима ОР

Пример. Усилительный каскад на полевом транзисторе с встроенным  $n$ -каналом (рис. 9).

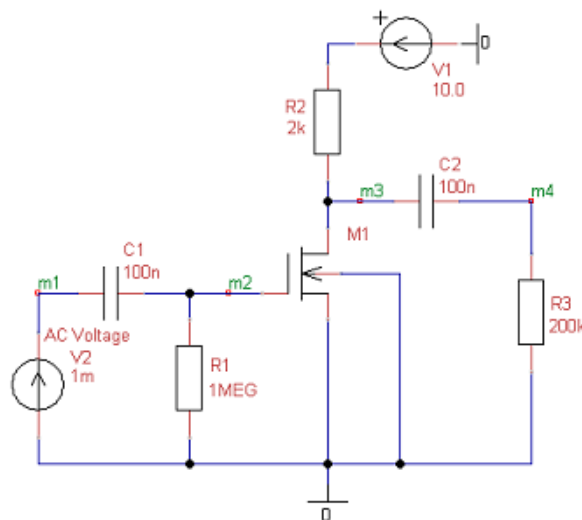


Рис. 9. Схема усилителя на полевом транзисторе

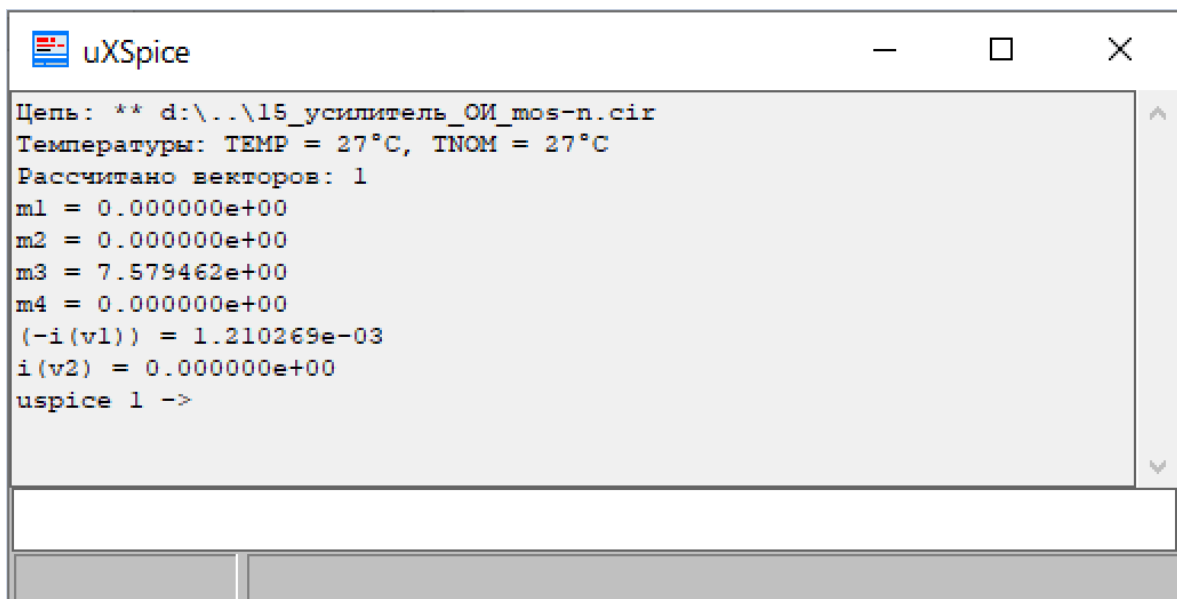


Рис. 10. Результаты расчета рабочих точек

Результаты расчетов статического режима приведены в окне подпрограммы uXSpice на рис. 10. Как видим, постоянное напряжение  $m3$  на стоке транзистора установилось равным примерно 7,6 вольт. Ток стока полевого транзистора равен примерно 1,2 мА. Следовательно, максимально допустимое значение тока стока для транзистора не превышено. Ток затвора транзистора для данной модели равен нулю. Поэтому падение напряжения  $m2$  на резисторе  $R1$  равно нулю и напряжение на затворе транзистора также равно нулю.

Постоянный ток через выходной разделительный конденсатор  $C2$  не протекает, поэтому постоянное напряжение  $m4$  на выходе каскада также равно нулю. Ток  $i(v1)$  через источник постоянного напряжения  $V1$  с учетом поставленного перед расчетом знака минус на рис. 8 протекает от стока к истоку, в соответствии с направлением стрелки сторонних сил на источнике  $V1$ . Если в исходных данных знак минус перед  $i(v1)$  на рис. 8 не ставить, то величина тока была бы отрицательной.

### 3.4. Многовариантный расчет на постоянном токе


В отличие от расчета рабочих точек по команде .OP при многовариантном расчете проводится расчет статических режимом при пошаговом изменении напряжений или токов одного или двух источников постоянного напряжения или постоянного тока.

Инструкция для расчета статического режима с вариацией напряжений или токов источников записывается следующим образом.

```
.DC SRC1 START1 STOP1 INCR1 [SRC2 START2 STOP2 INCR2]
```

Здесь  $SRC1$  — имя первого источника напряжения или тока в рассчитываемой схеме,  $START1$ ,  $STOP1$  и  $INCR1$  — параметры, определяющие начальное, конечное и шаг изменения значений источника. Если используется второй источник  $SRC2$ , то его параметры описываются аналогично. Отметим, что изменение значений первого источника во всем диапазоне происходит для каждого значения второго источника. Указанная инструкция автоматически записывается в .sig файл для проведения расчета схемы.

Рассмотрим, например, расчет выходных вольт-амперных характеристик полевого транзистора при вариации напряжений двух источников  $V1$  и  $V2$  (рис. 11).

После нажатия значка  с буквами DC в появившемся диалоговом окне на рис. 12 источники описываем следующим образом. Напряжение первого источника  $V1$  плавно изменяется (свипирует) от 0 В до 15 В с малым шагом 0.1 В, напряжение источника в цепи затвора  $V2$  изменяется от 0 В до 4 В с относительно большим шагом 0,5 В. Число различных значений напряжения  $V2$

будет равно числу кривых на рисунке, показывающем выходные ВАХ полевого транзистора.

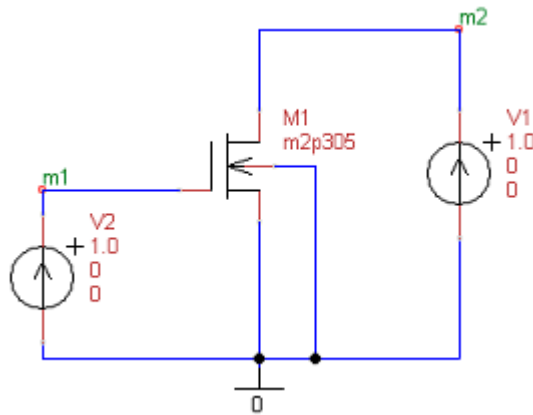


Рис. 11. Схема с полевым транзистором для режима DC

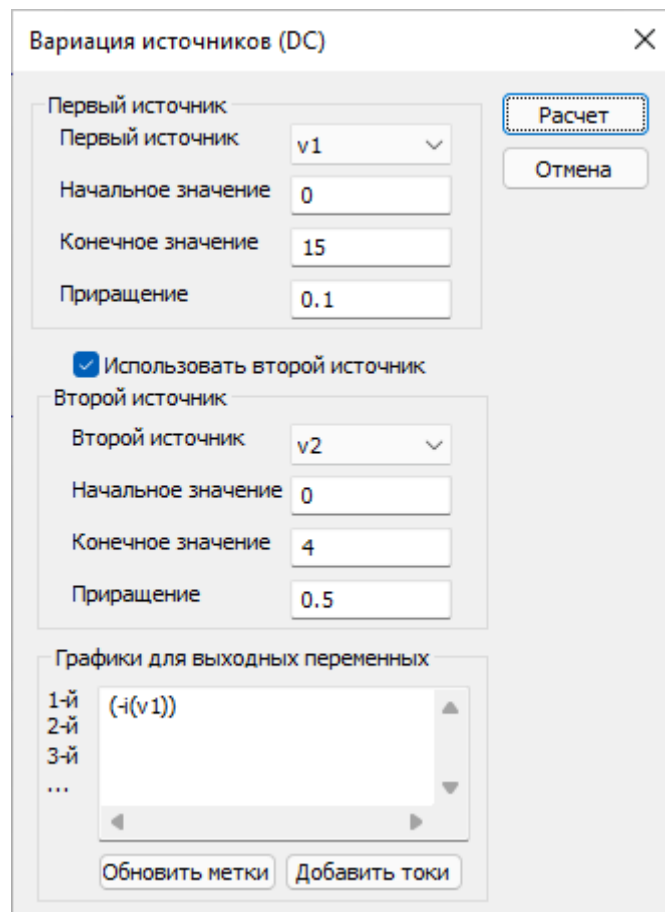


Рис. 12. Диалоговая панель режима DC

Рассчитанные вольт-амперные характеристики МДП-транзистора показаны на рис. 13. По вертикальной оси на рисунке откладывается ток стока полевого транзистора.

Этот ток фактически протекает через источник V1 против стрелки положительного направления напряжения на этом источнике. Поэтому ток стока

указан в диалоговой панели задания на расчет со знаком минус. В этом случае рассчитанный ток стока будет положительным и выходные ВАХ на рис. 13 появляются не в 4-ом, а в 1-ом квадранте системы координат. По горизонтальной оси на рис. 13 откладывается свипирующее напряжение на стоке транзистора, равное напряжению источника  $V_1$ .

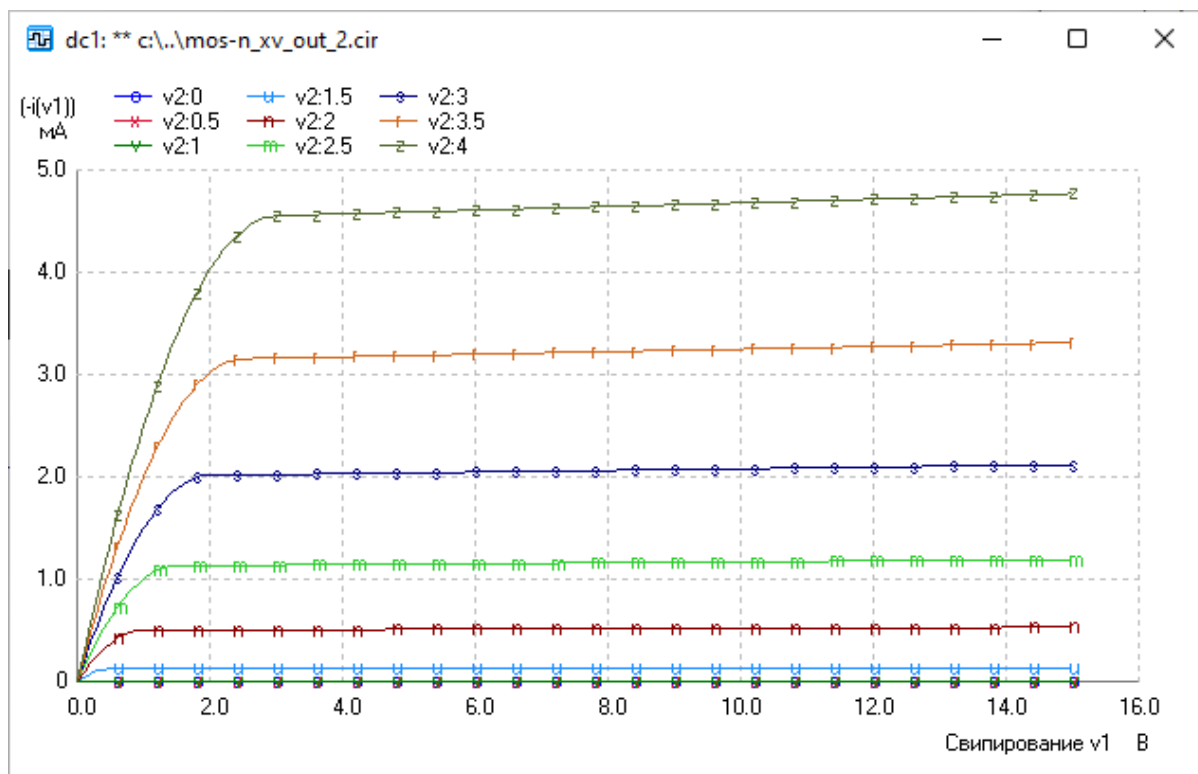


Рис. 13. Выходные ВАХ полевого транзистора

Кривые на рис. 13 получены при 9 различных напряжениях на затворе: напряжение  $V_2$  последовательно принимает значения 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 и 4 В. Обозначения кривых, соответствующих указанным напряжениям на затворе даны в верхней части рис. 13. Как видим, чем больше напряжение на затворе, тем больше ток стока.

Максимальная величина тока стока, равная примерно 4,8 мА, достигается при напряжении на затворе, равном 4 В, и при напряжении на стоке, равном 15 вольт. Крутизна транзистора при напряжении на стоке 8 В и при напряжении на затворе 4 В примерно равна 3 мА/В.

### 3.5. Расчет коэффициента гармонических искажений

Коэффициент гармонических искажений (КГИ) характеризует степень отличия формы анализируемого сигнала от формы идеального гармонического сигнала. Для оценки коэффициента гармонических искажений необходимо предварительно провести спектральный анализ исследуемого сигнала,

т.е. рассчитать амплитуду основной (первой) гармоники  $A_1$  с частотой  $f_1$  и амплитуды последующих второй, третьей и т. д. гармоник:  $A_2, A_3, \dots, A_n$  с частотами  $f_2, f_3, \dots, f_n$ , соответственно.

Коэффициент гармонических искажений (в процентах) рассчитывается по формуле

$$\text{КГИ} = 100 \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}.$$

Для получения приемлемой точности обычно число рассчитываемых гармоник  $n \geq 9$ . Чем меньше амплитуды высших гармоник  $A_2, A_3, \dots, A_n$  относительно амплитуды основной гармоники  $A_1$  в спектре сигнала, тем ближе форма исследуемого сигнала к форме гармонического сигнала и меньше КГИ.

Спектральный анализ производится с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) после завершения расчета переходного процесса (в текстовом файле задания должна присутствовать директива .TRAN). Спектр рассчитывается только для части переходного процесса длительностью  $T_1 = 1/f_1$  в конце интервала анализа. Предполагается, что в конце интервала анализа получаем практически стационарные колебания. По умолчанию в программе uSpice время  $T_1 = 0,2 \cdot \text{TSTOP}$ , где TSTOP — интервал анализа для режима TRAN

SPICE-директива на проведение расчета КГИ имеет вид

.FOURIER  $f_1$  m1 m2 ...

Здесь  $f_1$  — частота первой гармоники, равная основной частоте исследуемого сигнала, m1, m2, ... — метки выходных переменных, для которых требуется рассчитать КГИ.

Диалоговая панель, используемая для ввода параметров при исследовании КГИ, показана на рис. 14. С помощью этой панели вводятся:

- частота первой гармоники  $f_1$ ,
- число гармоник, амплитуды и фазы которых будут напечатаны в виде таблицы, (по умолчанию 10),
- степень полинома (от 1 до 8), с помощью которого проводится интерполяция данных (по умолчанию 1),
- объем выборки для ДПФ (по умолчанию 1000),
- метки выходных переменных (m1 и m2 на рис. 14).

При изменении частоты первой гармоники  $f_1$  автоматически пересчитываются параметры TSTOP, TSTEP и TMAX. Причем последний параметр, максимальный шаг интегрирования TMAX, пересчитывается только при выборе радиокнопки “Рассчитать автоматически (рекомендуется)”. Кроме того, параметр TMAX автоматически пересчитывается при изменении объема вы-

борки  $N$ , т. к. для достижения максимальной точности параметр TMAX рассчитывается по формуле  $TMAX = T1/(5*N)$ .

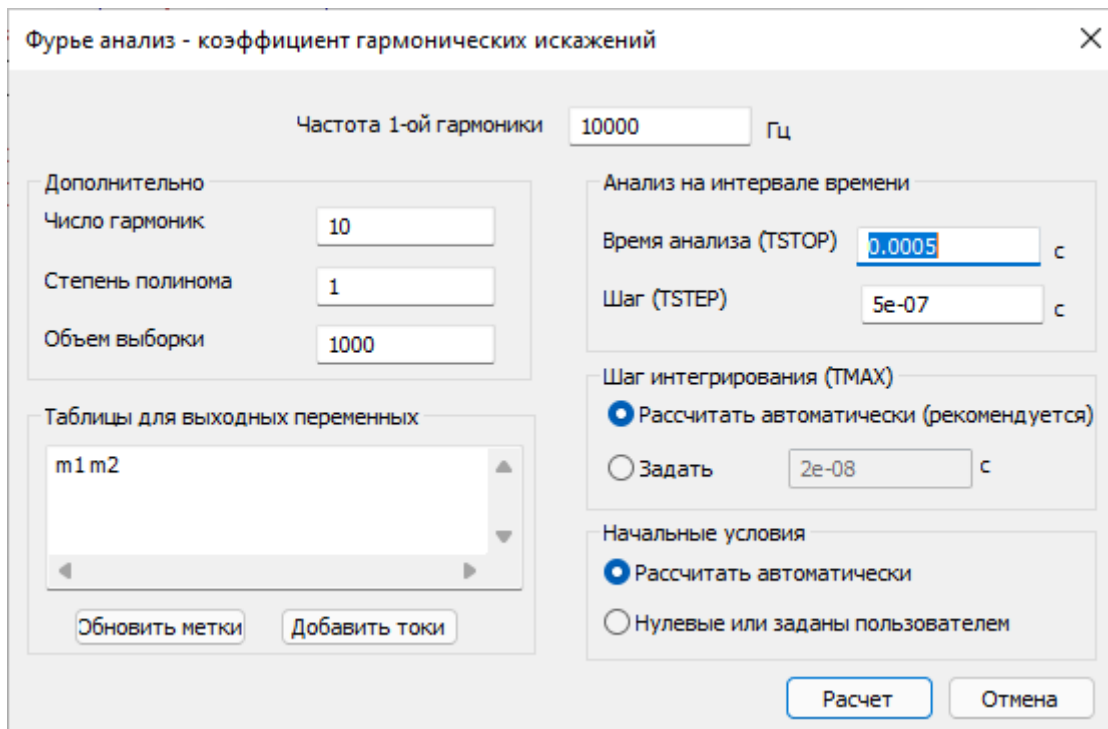


Рис. 14. Диалоговая панель режима КГИ

Отметим, что описанный случай отличается от режима расчета переходного процесса (режим Tran), у которого при выборе автоматического определения шага интегрирования параметр TMAX рассчитывается внутри программы uXSpice.

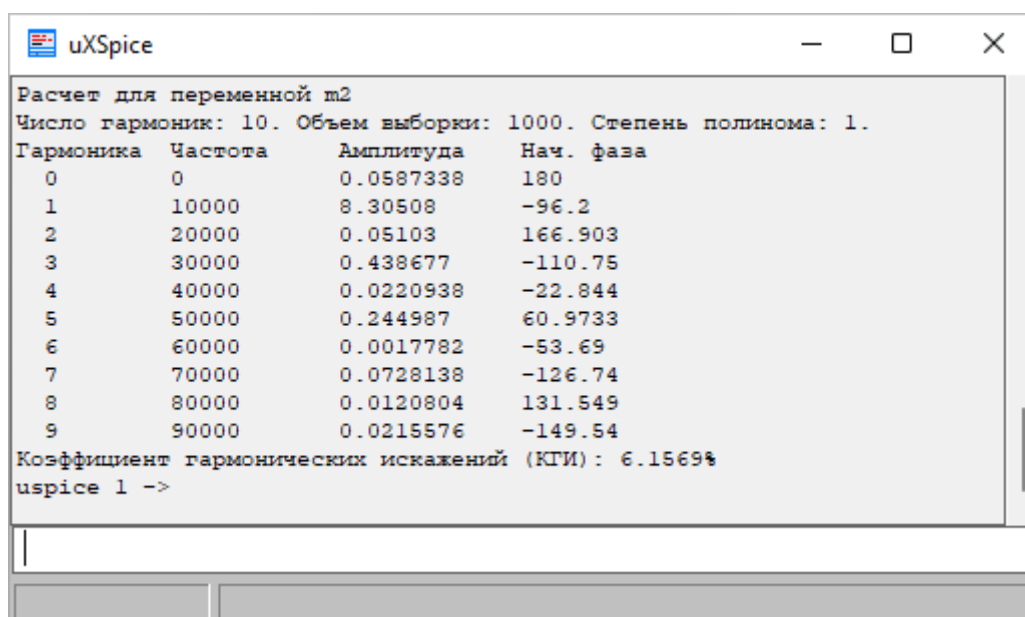


Рис. 15. Результаты расчета КГИ

Так как шаг интегрирования в программе моделирования может быть различным, то после расчета переходного процесса для того, чтобы обеспечить равномерное взятие отсчетов исследуемого сигнала, проводится интерполяция рассчитанных данных. По умолчанию интерполяция проводится полиномом первого порядка. В правой части диалогового окна можно ввести данные для предварительного расчета переходного процесса. По умолчанию время анализа в пять раз превышает период основных колебаний.

Отметим, что, в большинстве случаев, для проведения расчета КГИ достаточно ввести частоту первой гармоники и проверить правильность списка выходных переменных. Остальные параметры, как правило, можно оставить по умолчанию. Результаты расчета КГИ и спектрального анализа выводятся в окне подпрограммы uXSpice (рис. 15).

Рассчитаем КГИ для сигнала на выходе неинвертирующего усилителя, собранного на операционном усилителе U1 типа k140ud7 (рис. 16).

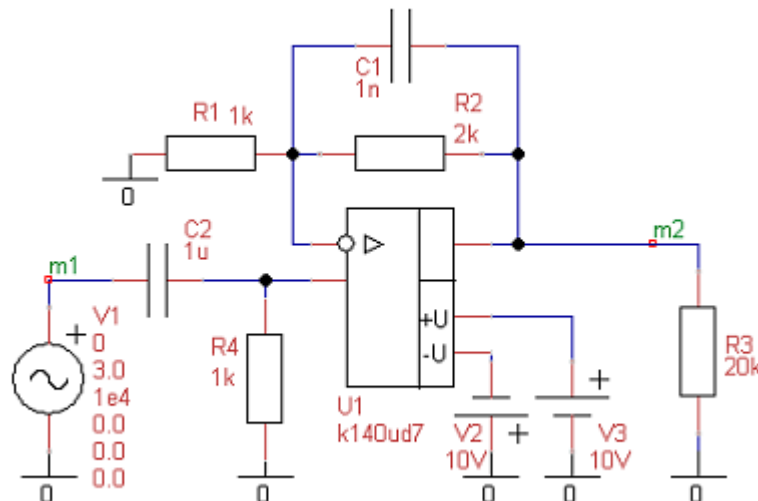


Рис. 16. Схема нелинейного усилителя на ОУ

При подаче на вход усилителя большого по уровню сигнала с амплитудой, равной 3 В, форма выходного напряжения искажается. Это видно на рис. 17. Причина возникновения искажений — выходное напряжение ОУ ограничивается напряжениями источников питания.

Результаты расчета КГИ показаны выше на рис. 15 в окне подпрограммы uXSpice. Как видим, коэффициент гармонических искажений исследуемого сигнала (m2) равен приблизительно 6,2%. В таблице на рис. 15 приведены амплитуды и начальные фазы нескольких спектральных составляющих. Например, максимальную амплитуду, равную примерно 8,3 В имеет первая гармоника. Из высших гармоник наибольшую амплитуду, равную примерно 0,44 В, имеет третья гармоника.

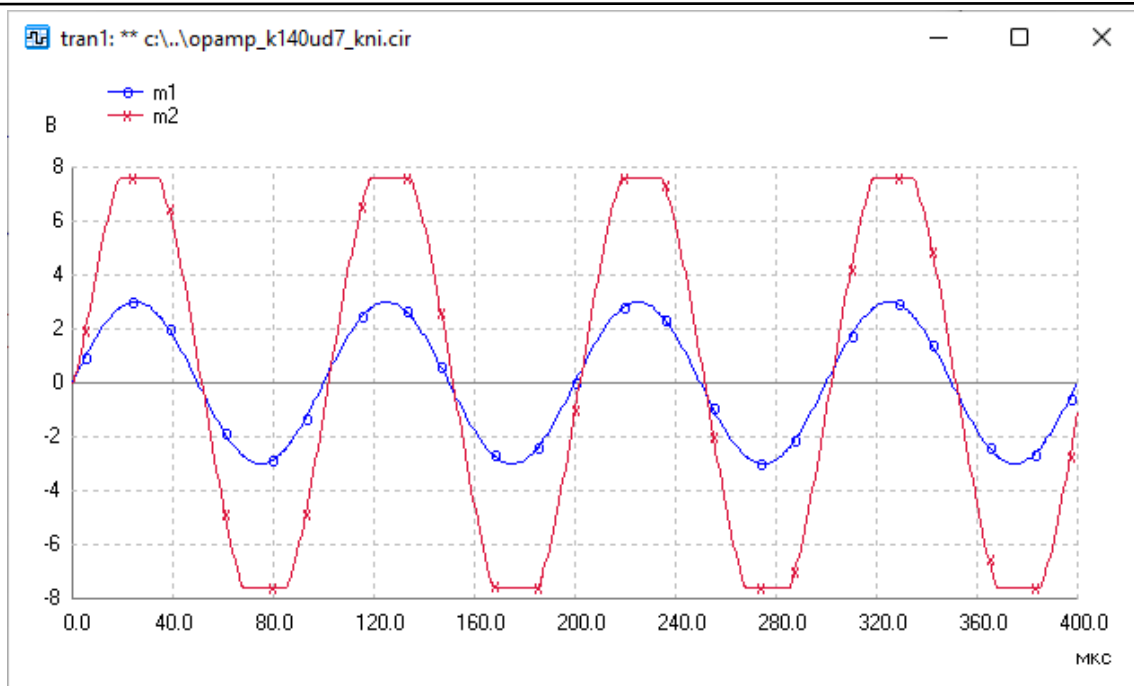


Рис. 17. Входной (m1) и выходной (m2) сигналы усилителя на ОУ

### 3.6. ДПФ

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) позволяет представить дискретный сигнал на конечном интервале времени  $T$  в виде суммы дискретных гармонических сигналов:

$$s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{C}_n \exp(j \frac{2\pi}{N} nk).$$

Здесь  $s(k)$  — отсчеты исследуемого сигнала,  $k$  — номер отсчета,  $\dot{C}_n$  — комплексная амплитуда  $n$ -й гармоники,  $N$  — объем выборки.

На рис. 18 показана основная диалоговая панель, с помощью которой вводятся параметры ДПФ. Первый из этих параметров — объем выборки  $N$ . По умолчанию  $N = 1000$ . Чем больше объем выборки, тем при прочих равных условиях подробнее и полнее спектр сигнала. Важное преимущество, обусловленное использованием ДПФ, — возможность задания  $N$ , равным не степени 2, как при применении БПФ, а кратным 10. При этом упрощается выбор частоты дискретизации, частотного диапазона спектрального анализа, интервала анализа и т. п.

Следующие два основных параметра — разрешение по частоте  $F$  (частота первой гармоники) и исследуемый частотный диапазон  $D$ , связаны между собой соотношением  $D = F(N/2)$ . Изменять можно только один из этих параметров, другой параметр будет рассчитан автоматически.

Второе преимущество использования ДПФ — возможность расчета не всех  $N/2$  комплексных гармоник, как при применении БПФ, а только части, из



заданного диапазона. Такой диапазон можно указать, задавая частоты  $F_{min}$  и  $F_{max}$  в диалоговой панели. При указании малого диапазона можно даже получить выигрыш по времени расчета в сравнении с БПФ.

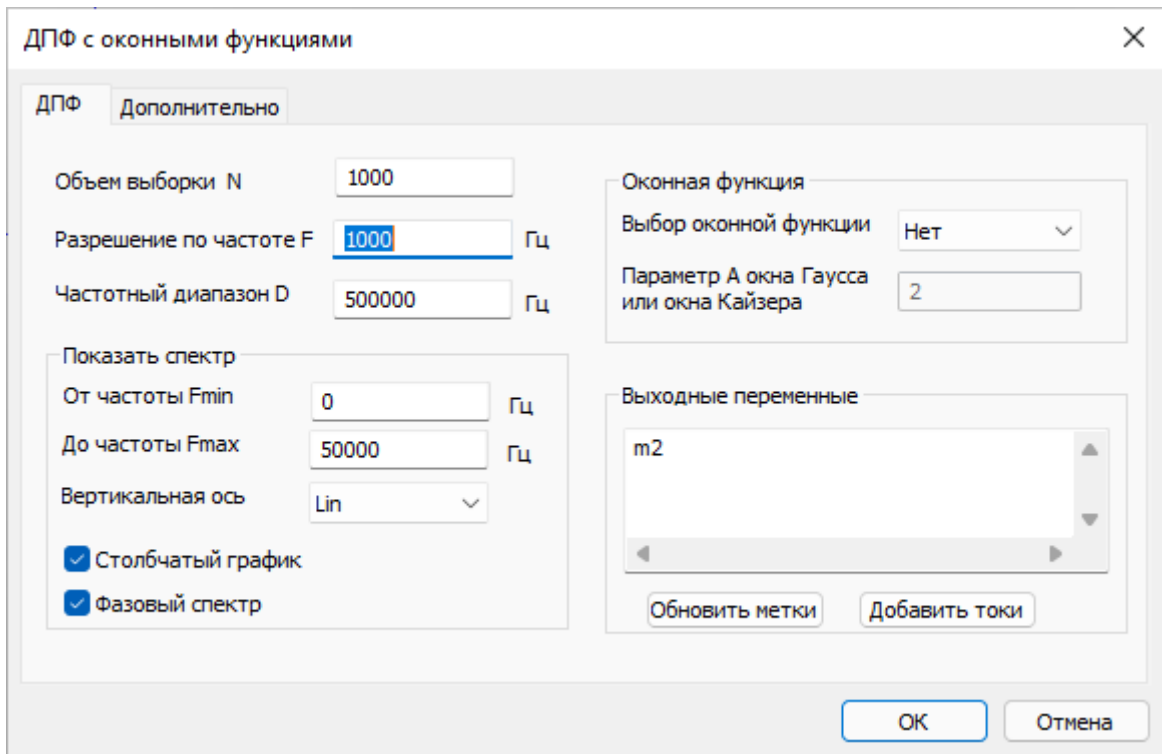


Рис. 18. Основная диалоговая панель ДПФ

При цифровой обработке сигналов для уменьшения влияния разрывов на концах интервала  $T$  широко используются оконные функции. В диалоговом окне можно указать шесть разновидностей, наиболее часто используемых на практике оконных функций: hanning, hamming, bartlet, blackman, gaussian и kaiser. Причем для двух последних окон указывается вспомогательный параметр  $A$ . Для окна Гаусса параметр  $A$  изменяется, как правило, в диапазоне от 1 до 10 (по умолчанию 3). Для окна Кайзера параметр  $A$  выбирается, как правило, от 0 до 100 (по умолчанию 3).

При использовании оконных функций учитывается коэффициент ослабления  $\beta$ , равный отношению постоянной составляющей  $A_w$  заданной оконной функции  $w(t)$  к постоянной составляющей  $A_0$  прямоугольного окна,

$$\beta = \frac{A_w}{A_0} = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt.$$

В случае дискретного спектрального анализа используем  $N$  отсчетов оконной функции  $w(k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , взятых через промежуток времени  $\Delta$ , равный периоду дискретизации  $T_d$ . Тогда  $T = N \cdot \Delta$  и интеграл в записанном выше выражении для  $\beta$  заменяется на сумму

$$\beta = \frac{1}{N\Delta} \sum_{k=0}^{N-1} w(k)\Delta = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w(k)$$

Амплитуды спектральных составляющих при использовании указанных выше оконных функций уменьшаются. Для того чтобы компенсировать это уменьшение после ДПФ каждый спектральный отсчет умножается на  $1/\beta$ .

С помощью основного диалогового окна можно также изменить вид графиков (установить столбчатый вид), вывести график фазового спектра, изменить список выходных переменных.

Рис. 19. Дополнительная диалоговая панель ДПФ

Спектральный анализ производится после завершения расчета переходного процесса (в текстовом файле задания должна присутствовать соответствующая директива .TRAN). Разрешение по частоте и временной интервал анализа связаны соотношением  $F = 1/T$ . Следовательно, вводя в основной диалоговой панели частоту  $F$ , задаем интервал анализа спектра  $T = 1/F$ . Полное время расчета  $T_{STOP}$  определяется по формуле  $T_{STOP} = T + T_Z$ , где  $T_Z$  — задержка (рис. 19). В последнем случае спектр рассчитывается для части переходного процесса длительностью  $T$  в конце интервала анализа, начиная со времени  $T_Z$ . Время задержки  $T_Z$  указывается на второй диалоговой панели (закладка "Дополнительно").

Вторая диалоговая панель показана на рис. 19. Здесь можно указать время задержки  $T_Z$  (по умолчанию задержка  $T_Z$  равна нулю). На второй диалоговой

панели можно также изменить начальные условия и максимальное значение шага интегрирования при расчете переходного процесса.

Особенность использования ДПФ в программах моделирования — это необходимость проведения интерполяции данных, так как расчет переходного процесса проводится с переменным шагом, величина которого выбирается автоматически и может существенно изменяться для обеспечения минимизации времени вычислений и допустимых погрешностей. Для ДПФ требуется равномерная дискретизация с шагом, равным периоду дискретизации  $T_d$  (рис. 19). По умолчанию интерполяция проводится полиномом 1-ой степени. Информация о периоде дискретизации, а также о временах  $T_{STOP}$  и  $T$  выводится в правой верхней части диалогового окна.

Отметим, что при указании степени интерполирующего полинома  $P > 1$  и числа точек  $M > 0$  будет проведена интерполяция точек графиков с добавлением между каждой парой точек исходного графика  $M$  значений интерполирующего полинома. Будьте внимательны, при  $M > 0$  не рекомендуется использование столбчатого графика, так как к спектру добавляются дополнительные интерполяционные компоненты, отсутствующие в анализируемом сигнале. Степень интерполирующего полинома выбираем из диапазона 1...8, а число точек  $M$  — от 0 до 10.

Результаты расчетов представляются на графиках как физический односторонний спектр (только по положительным частотам). Амплитуды спектральных составляющих на графике определяются соотношениями:  $A_n = C_n$ , если  $n = 0$ ,  $n = N/2$  и  $A_n = 2C_n$ , если  $0 < n < N/2$ .

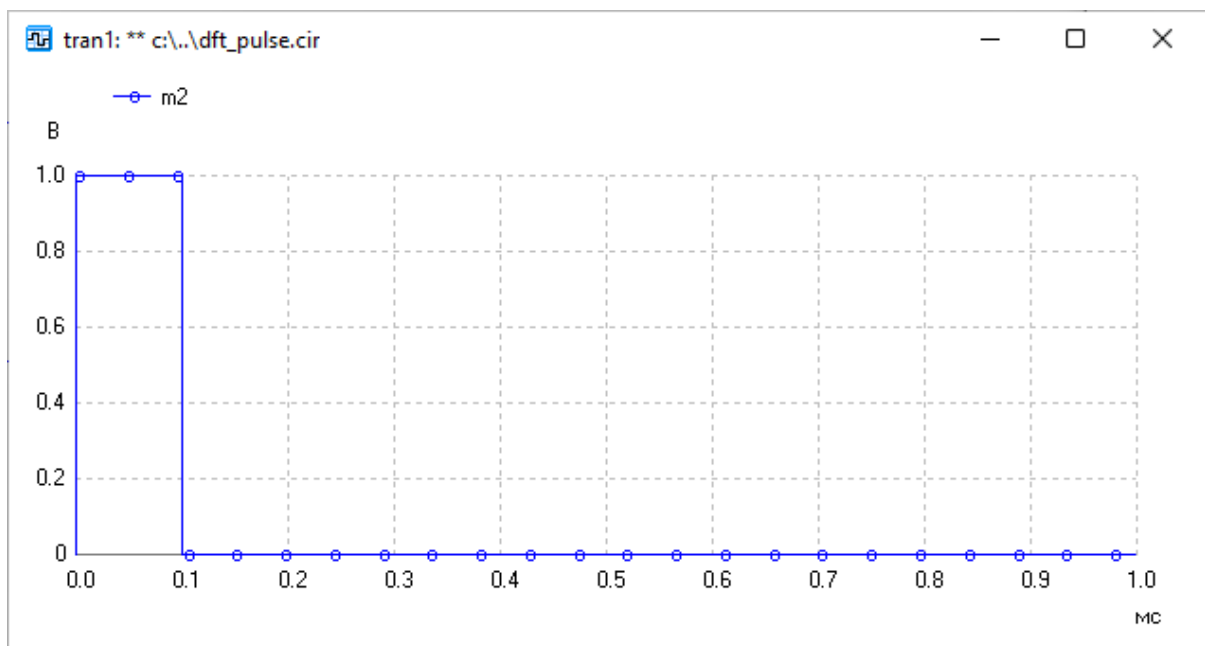


Рис. 20. Прямоугольный импульс

Пример. На интервале времени  $T = 1$  мс задан прямоугольный импульс с амплитудой 1 В и длительностью 100 мкс (рис. 20). Длительности переднего и заднего фронтов импульса малы и равны 1нс. Амплитудный спектр этого импульса приведен на рис. 21. Расчет проведен при использовании прямоугольной оконной функции (рис. 18).

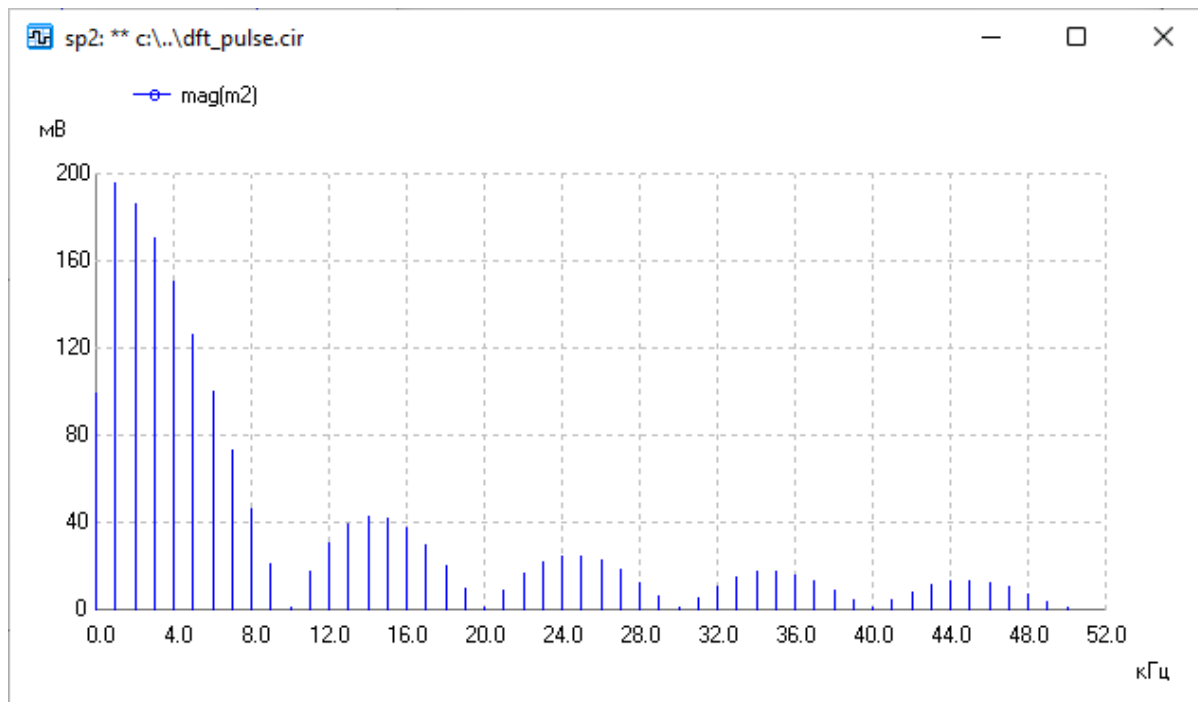


Рис. 21. Амплитудный спектр прямоугольного импульса

При расчете спектра использовались параметры, представленные в диалоговых окнах выше на рис. 18 и рис. 19. Отметим, что расчет проводился не для всех  $N/2$  комплексных гармоник, а только для первых 50-и гармоник. Как видим, амплитуда первой гармоники примерно в два раза превышает постоянную составляющую в спектре сигнала. Ширина одностороннего главного лепестка физического амплитудного спектра равна 10 кГц.

### 3.7. БПФ

С помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) для дискретного сигнала, заданного на конечном интервале времени  $T$ , определяется спектр в соответствии со следующей формулой

$$\dot{C}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \exp(-j \frac{2\pi}{N} nk).$$

Здесь  $\dot{C}_n$  — комплексная амплитуда  $n$ -й гармоники,  $N$  — объем выборки,  $s(k)$  — отсчеты исследуемого сигнала,  $k$  — номер отсчета сигнала. Для расчета спектра используются быстрые алгоритмы, учитывающие периодичность

комплексной экспоненты в приведенной выше формуле. В отличие от ДПФ объем выборки  $N$  при использовании БПФ должен быть равен степени двойки.

Рис. 22. Основная диалоговая панель параметров БПФ

На рис. 22 показана основная диалоговая панель, с помощью которой вводятся параметры БПФ. Первый из этих параметров – объем выборки  $N$ . По умолчанию  $N = 1024$ . Чем больше объем выборки, тем при прочих равных условиях подробнее и полнее спектр сигнала. Следующие два основных параметра – разрешение по частоте  $F$  и исследуемый частотный диапазон  $D$  связаны между собой соотношением  $D = F(N/2)$ . Вводить можно только один из этих параметров, другой параметр будет рассчитан автоматически.

В виде графика можно представить только часть спектра из заданного диапазона  $D$ . Такой диапазон можно указать, задавая частоты  $F_{\min}$  и  $F_{\max}$  в диалоговой панели.

При цифровой обработке сигналов для уменьшения влияния разрывов на концах интервала  $T$  используются оконные функции. В диалоговом окне можно указать шесть часто используемых на практике оконных функций: hanning, hamming, bartlet, blackman, gaussian, kaiser. Для двух последних окон указывается вспомогательный параметр  $A$ . Для окна Гаусса параметр  $A$  выбирается из диапазона от 1 до 10 (по умолчанию 3). Для окна Кайзера параметр  $A$  выбирается из диапазона от 0 до 100 (по умолчанию 3). Если для окна Кайзера выбрать  $A = 0$ , то получим прямоугольное окно.

При использовании оконных функций учитываем коэффициент ослабления  $\beta$ , равный

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w(k).$$

Здесь  $w(k)$  — отсчеты оконной функции,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ . Амплитуды спектральных составляющих после умножения входных отсчетов на указанные выше оконные функции уменьшаются. Для того чтобы компенсировать влияние этого уменьшения на спектр после БПФ каждый спектральный отсчет делится на  $\beta$ .

С помощью основного диалогового окна можно также изменить вид графиков (установить столбчатый вид), вывести график фазового спектра, изменить список выходных переменных.

Спектральный анализ производится после завершения расчета переходного процесса (в текстовом файле задания должна присутствовать директива .TRAN). Разрешение по частоте и временной интервал анализа связаны при использовании БПФ соотношением  $F = 1/T$ . Следовательно, вводя в основной диалоговой панели частоту  $F$ , задаем интервал анализа спектра  $T = 1/F$  и полное время расчета  $TSTOP = T + Tz$ , где  $Tz$  — задержка. Спектр рассчитывается для части переходного процесса длительностью  $T$  в конце интервала анализа начиная с времени  $Tz$ . Время задержки  $Tz$  указывается на второй диалоговой панели (закладка "Дополнительно"), показанной на рис. 23.

БПФ с оконными функциями

БПФ    Дополнительно

Задержка  $Tz$   с

Начальные условия

☒ Рассчитать автоматически

☐ Нулевые или заданы пользователем

Шаг интегрирования (TMAX)

☒ Рассчитать автоматически

☐ Задать  с

Информация

Время анализа TSTOP  с

Спектр на интервале T  с

Период дискретизации  $T_d$   с

Интерполяция

Степень полинома P

Число точек M

OK    Отмена

Рис. 23. Дополнительная диалоговая панель параметров БПФ

По умолчанию задержка  $Tz$  равна нулю. На второй диалоговой панели можно также задать начальные условия и максимальное значение шага интегрирования при расчете переходного процесса. При использовании в про-

граммах моделирования БПФ возникает необходимость проведения интерполяции входных данных, так как расчет переходного процесса проводится с переменным шагом, а для БПФ требуется равномерная дискретизация с шагом, равным периоду дискретизации  $T_d$ . Информация о периоде дискретизации, а также о временах TSTOP и T выводится в правой верхней части диалогового окна на рис. 23. По умолчанию интерполяция проводится полиномом 1 степени.

Степень интерполирующего полинома при создании графиков рекомендуется выбирать из диапазона 1...8. Отметим, что при указании числа точек  $M > 0$  будет дополнительно проведена интерполяция точек графиков. Будьте внимательны, при  $M > 0$  не рекомендуется использование столбчатого графика, так как к спектру добавляются дополнительные интерполяционные компоненты, отсутствующие во входном сигнале.

Результаты расчетов представляются на графиках как физический односторонний спектр (только по положительным частотам). Амплитуды спектральных составляющих на графике определяются соотношениями:  $A_n = C_n$  если  $n = 0$ ,  $n = N/2$  и  $A_n = 2C_n$  если  $0 < n < N/2$ .

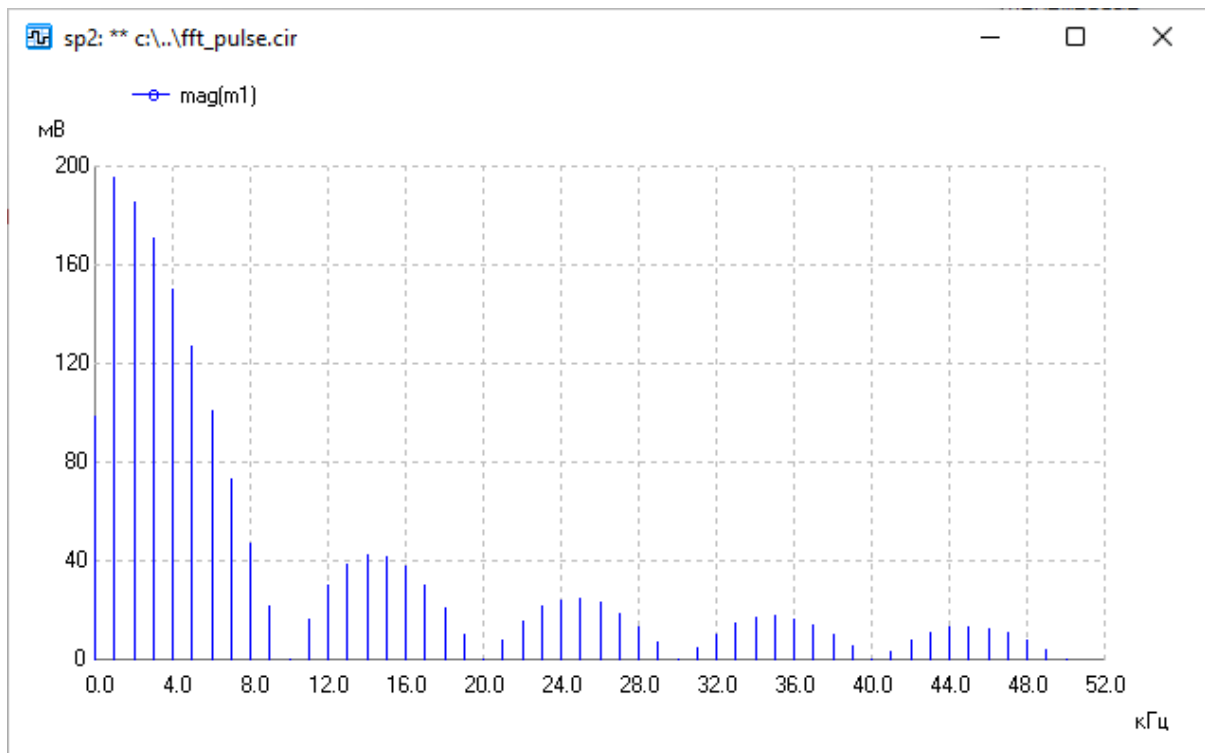


Рис. 24. Амплитудный спектр прямоугольного импульса, полученный с использованием БПФ при объеме выборки  $N = 1024$


Например, амплитудный спектр прямоугольного импульса с амплитудой 1 В и длительностью 100 мкс, заданный на интервале времени  $T = 1$  мс, приведен на рис. 24. Длительности переднего и заднего фронтов импульса одинаковы и равны 1 нс.

При расчете спектра использовались параметры, представленные в диалоговых окнах на рис. 22 и рис. 23. Отметим, что на рисунке приведены только первые 50 гармоник. Как видим, амплитуда первой гармоники примерно в два раза превышает постоянную составляющую в спектре сигнала. Ширина главного лепестка в одностороннем амплитудном спектре равна 10 кГц.

### 3.8. Расчет аналитического сигнала

Аналитический сигнал (АС) используется для однозначного определения амплитуды и фазы модулированного сигнала. Амплитуда и фаза модулированного сигнала определяется с использованием БПФ.

Рис. 25. Основная диалоговая панель для задания параметров расчета аналитического сигнала

Для расчета огибающей и фазы нажимаем значок  на панели инструментов. На рис. 25 показана основная диалоговая панель, с помощью которой вводятся параметры АС и БПФ. Первый из этих параметров — время расчета переходного процесса TSTOP. Далее с помощью диалоговой панели задаем объем выборки  $N$ . По умолчанию  $N = 1024$ . На рис. 25 выбрано  $N = 4096$ . Чем больше объем выборки, тем при прочих равных условиях точнее выполняется преобразование Гильберта.

С помощью диалоговой панели можно задать параметры несущей, а именно: частоту несущей, постоянную начальную фазу, время  $t_{z1}$  начала радиоимпульса и время  $t_{z2}$  окончания радиоимпульса. Обратите внимание, что, задавая частоту несущей и постоянную начальную фазу равными нулю, при расчете переменной начальной фазы получим зависимость полной фазы ко-



лебания от времени. Как правило, график этой зависимости аналогичен графику быстро возрастающей функции. Вычисление полной фазы в программе uSpice проводится с использованием специального алгоритма расчета непрерывной фазы. Это позволило получить корректные зависимости переменной начальной фазы от времени при больших индексах фазовой модуляции (ФМ).

В правой нижней части диалоговой панели можно указать вывод графика переменной начальной фазы. В левой нижней части диалоговой панели имеется окно текстового редактора для ввода выходных переменных. В нем указываются метки узлов, напряжения в которых должны быть выведены в виде графиков. Кнопка "Обновить метки" позволяет обновить список меток. Кнопка "Добавить токи" позволяет внести в окно выходных переменных токи через источники напряжения. Список меток в окне выходных переменных можно редактировать.

Для каждой выходной переменной рассчитывается зависимость комплексной амплитуды от времени. На графиках выводятся огибающая и, если указано на диалоговой панели, переменная начальная фаза этой комплексной амплитуды.

Рис. 26. Дополнительная диалоговая панель для задания параметров расчета аналитического сигнала

Вторая дополнительная диалоговая панель показана на рис. 26. На этой панели можно ввести задержку  $T_z$ , то есть время, после которого начинается расчет огибающей и переменной начальной фазы. По умолчанию  $T_z$  равно

нулю. При  $T_z > 0$  отрезок времени, на котором рассчитывается переходной процесс увеличивается до  $TSTOP = T + T_z$ .

Вводя в основной диалоговой панели время  $TSTOP$ , объем выборки  $N$  и указывая на второй панели  $T_z$ , задаем разрешение по частоте  $F = 1/T$  и период дискретизации  $T_d$ . Разрешение по частоте  $F$ , время  $T$  и период дискретизации  $T_d$  приводятся в правой верхней части второго диалогового окна. БПФ осуществляется для части переходного процесса длительностью  $T$  в конце интервала анализа, начиная со времени  $T_z$ .

На второй диалоговой панели можно также изменить начальные условия и максимальное значение шага интегрирования при расчете переходного процесса.

При использовании в программах моделирования БПФ возникает необходимость проведения интерполяции данных, так как расчет переходного процесса проводится с изменяющимся шагом, а для проведения БПФ требуется равномерная дискретизация с шагом, равным периоду дискретизации. По умолчанию интерполяция проводится полиномом 1-й степени.

Отметим, что при указании степени интерполирующего полинома  $P > 1$  и числа точек  $M > 0$  будет проведена соответствующая интерполяция точек графиков с добавлением между каждой парой точек исходного графика  $M$  значений интерполирующего полинома. Степень интерполирующего полинома выбираем из диапазона 1...8, а число точек  $M$  – от 0 до 10.

При проведении расчетов АС с использованием БПФ имеется возможность оценки погрешности, вносимой преобразованием Гильберта. Среднюю квадратическую погрешность при условии нормального распределения ошибок находим по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (u(k) - u'(k))^2}.$$

Здесь  $u(k)$  — отсчеты исходного сигнала,  $u'(k)$  — отсчеты вещественной составляющей АС, полученной после применения ОБПФ. Эта погрешность выводится в окне подпрограммы uXSpice для каждого анализируемого сигнала.

### 3.9. Расчет комплексного модулированного сигнала

При схемотехническом моделировании радиочастотных устройств параметры несущего колебания и модулирующих сигналов, характеристики модуляторов и демодуляторов, как правило, заданы. В этом случае удобно использовать комплексный модулированный сигнал (КМС).

Для расчетов с использованием КМС используется библиотека элементов «Модуляция». В библиотеку включено шесть элементов, показанных ниже на рис. 27.

Генераторы V1 и V2 — это генераторы амплитудно- и фазомодулированных сигналов. Они аналогичны генераторам из стандартной Spice-библиотеки и имеются в большинстве программ схемотехнического моделирования.

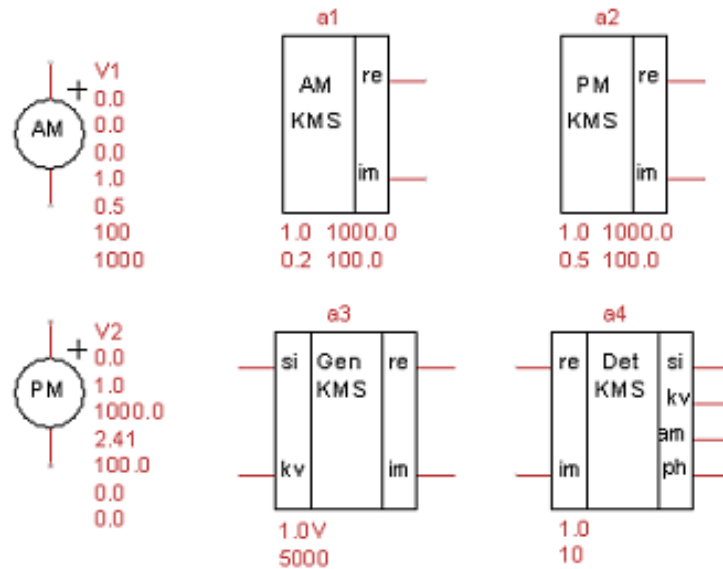


Рис. 27. Элементы библиотеки «Модуляция»

Элементы a1 и a2 являются генераторами вещественных и мнимых составляющих сигналов с амплитудной и фазовой модуляциями соответственно. Наиболее сложные элементы a3 и a4 предназначены для генерирования и детектирования КМС со смешанными амплитудно-фазовыми видами модуляции. На входы элемента a3 необходимо подавать модулирующие синфазный и квадратурный сигналы. На выходах элемента a4 получаем синфазную (СМ) и квадратурную (КМ) модуляционные составляющие комплексной огибающей, а также огибающую и переменную начальную фазу КМС.

Рассмотрим пример моделирования фильтра с использованием элементов библиотеки «Модуляция». На рис. 28 приведена схема устройства, содержащего полосовой фильтр Баттерворта 1-го порядка (здесь и далее порядок фильтра определяем по отношению к огибающей).

Элемент a1 является источником амплитудно-модулированного напряжения, создающего вещественную и мнимую составляющую комплексного модулированного сигнала. Два напряжения от источника КМС поступают на фильтры с идентичными параметрами. Добротность контуров фильтров равна 10, резонансная частота — 5 кГц. Напряжения с выходов фильтров поступают на элемент a2 — детектор составляющих КМС.

Частота несущей входного модулированного сигнала, равная 5250 Гц. Она на 250 Гц превышает резонансную частоту контура (нормированная расстройка контура равна +0,5). Коэффициент АМ задан равным 0,1, а частота модуляции — 250 Гц.

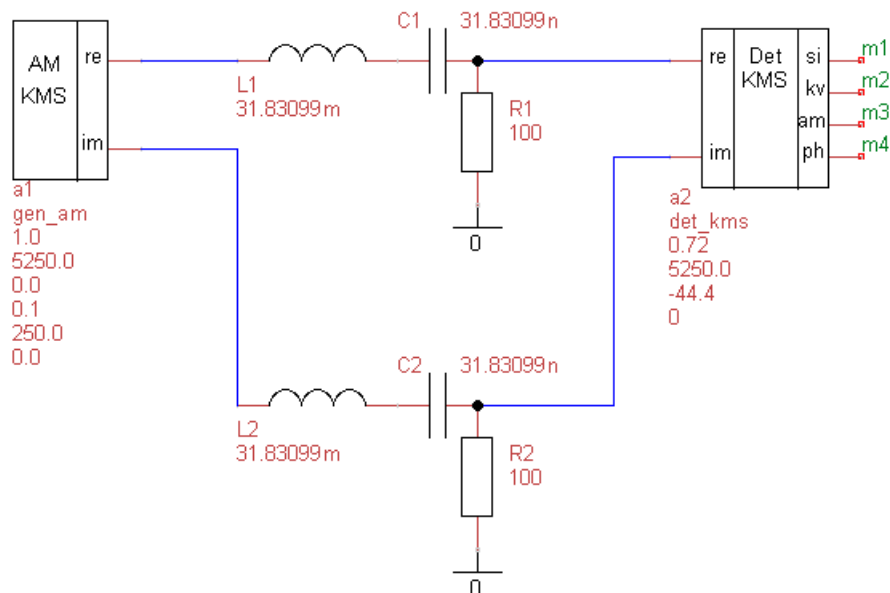


Рис. 28. Схема устройства полосовой фильтрации АМ-сигнала

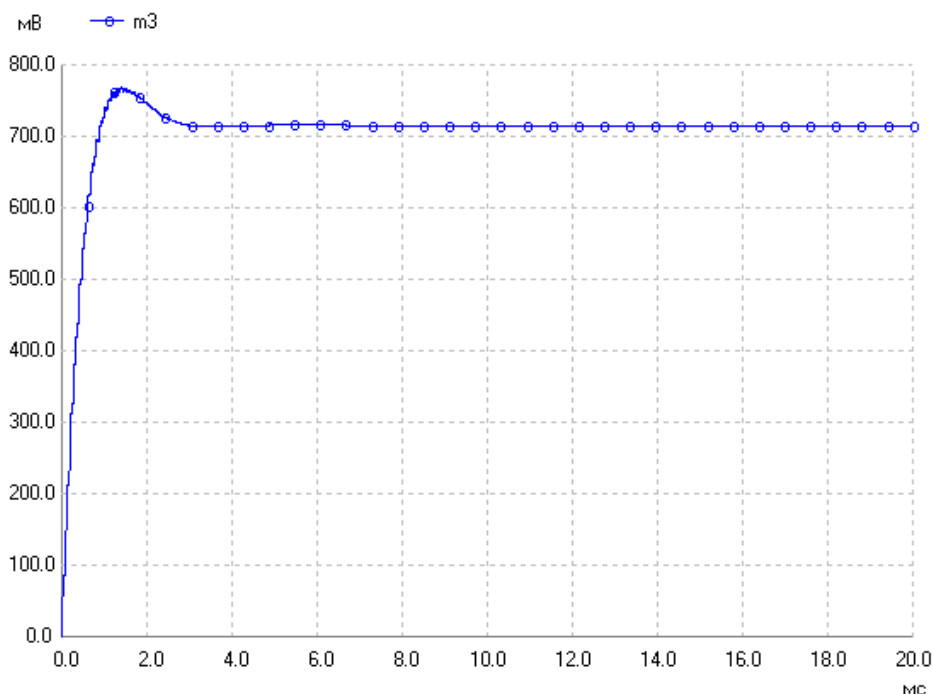


Рис. 29. Расчет установившейся амплитуды

На первом этапе рекомендуется провести предварительное моделирование при установке коэффициента АМ входного сигнала, равным нулю, и при установке амплитуды и начальной фазы детектора КМС, равными 1 В и 0

градусов соответственно. Цель предварительного моделирования — определить установившиеся начальную фазу и амплитуду выходного сигнала.

На рис. 29 и рис. 30 приведены рассчитанные зависимости от времени огибающей и начальной фазы (сигналы в узлах m3 и m4). Из анализа рис. 29 и рис. 30 следует, что при расстройке фильтра амплитуда сигнала на выходе фильтра уменьшается от 1 В до 0,72 В и устанавливается начальная фаза несущей, равная  $-44,4$  градуса.

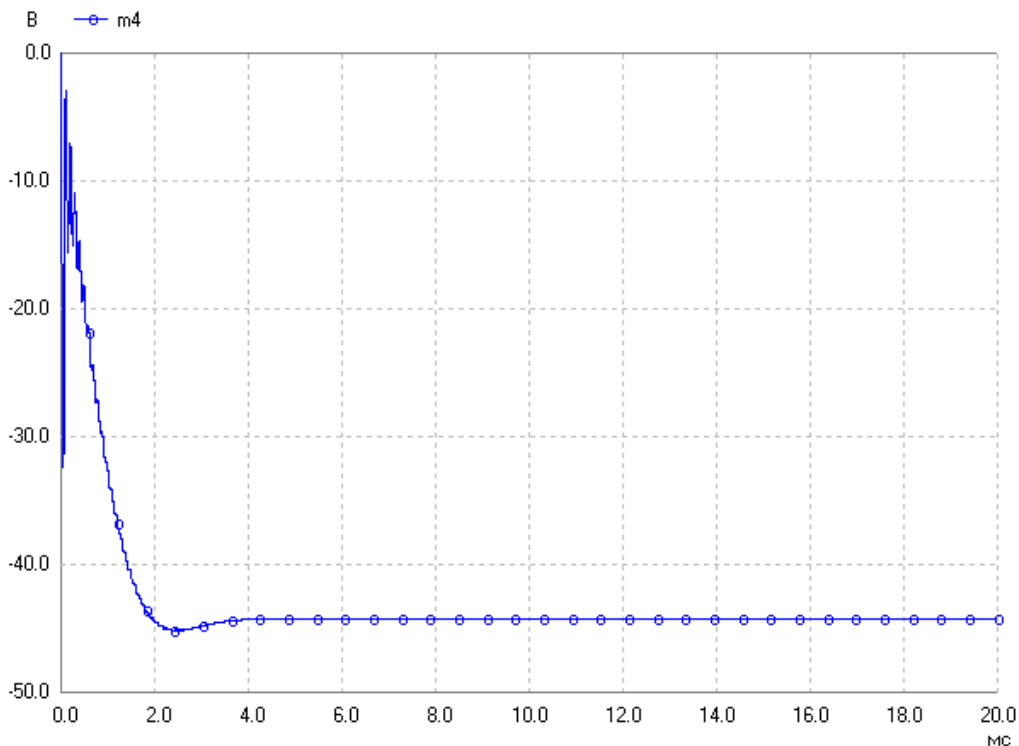


Рис. 30. Расчет установившейся постоянной начальной фазы

Для проведения дальнейшего анализа устанавливаем параметры внутреннего опорного сигнала детектора КМС — амплитуду устанавливаем равной 0,72 В, а начальную фазу — минус 44,4 градуса.

Результаты моделирования прохождения амплитудно-модулированного сигнала при расстройке фильтра представлены на рис. 31 и рис. 32.

На рис. 31 показаны огибающие сигналов на входе (помечено буквой д) и на выходе (метка m3), а также синфазная составляющая (метка m1) комплексной огибающей выходного сигнала. Как видим, амплитуды пульсаций синфазной составляющей и огибающей на выходе практически одинаковы, так как моделирование проводим с малым коэффициентом АМ, равным 0,1.

Из сравнения кривых следует, что при прохождении синфазно-модулированного сигнала через фильтр 1-го порядка и при введении указанной выше расстройки фильтра, амплитуда установившихся пульсаций синфазной составляющей на выходе практически равна пульсациям огибающей входного сигнала (кривая, помеченная буквами д на рис. 31).

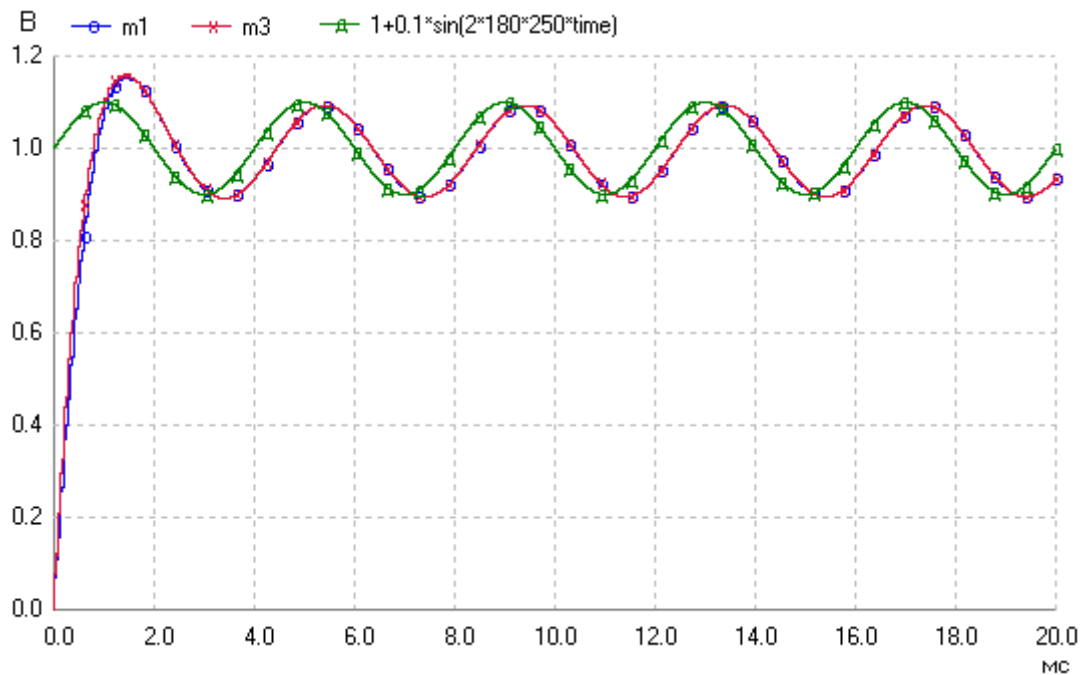


Рис. 31. Огибающие сигналов на входе (помечено буквами д), на выходе (m3) и синфазная составляющая (m1) комплексной огибающей

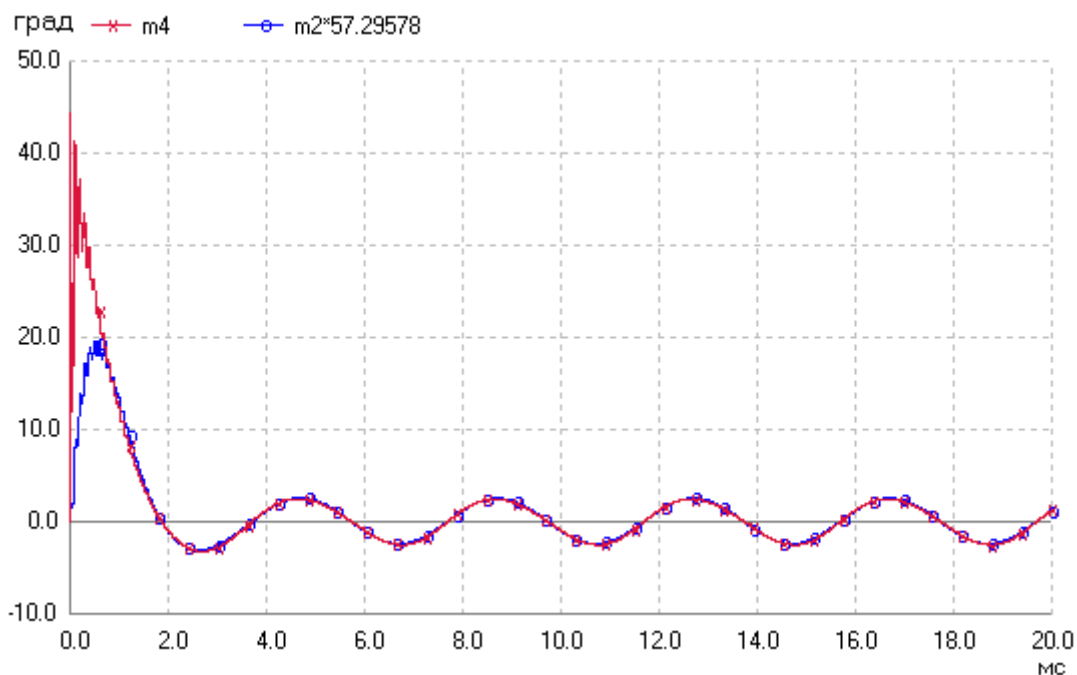


Рис. 32. Паразитные ФМ (m4) и КМ (m2) выходного сигнала

Этот эффект объясняется следующими свойствами цепи. Если расстройку фильтра сделать равной нулю, то АМ на выходе цепи будет меньше, чем АМ на входе, т. к. боковые составляющие в спектре АМ-сигнала будут уменьшаться при прохождении через полосовой фильтр. Однако при наличии расстройки пропорционально уменьшается амплитуда несущей, как было видно на рис. 28. Эти два фактора обуславливают эффект неизменности ко-

эфициента АМ при прохождении сигнала через расстроенный фильтр при нормированной расстройке, равной 0,5.

На рис. 32 приведены кривые, соответствующие паразитным ФМ (метка m4) и КМ (метка m2) для выходного сигнала. Эта паразитная модуляция обусловлена амплитудно-фазовой конверсией, возникающей при расстройке фильтра. Причем для удобства сравнения значения КМ умножены на 57,29578, чтобы представить значения КМ в градусах.

Как видим, при малом коэффициенте АМ входного сигнала амплитуды колебаний ФМ и КМ практически равны друг другу. Индекс установившейся паразитной ФМ равен примерно 2,5 градусам. Коэффициент преобразования СМ-КМ обусловленный расстройкой фильтра и несимметричностью его АЧХ составляет примерно  $-7,3$  дБ.

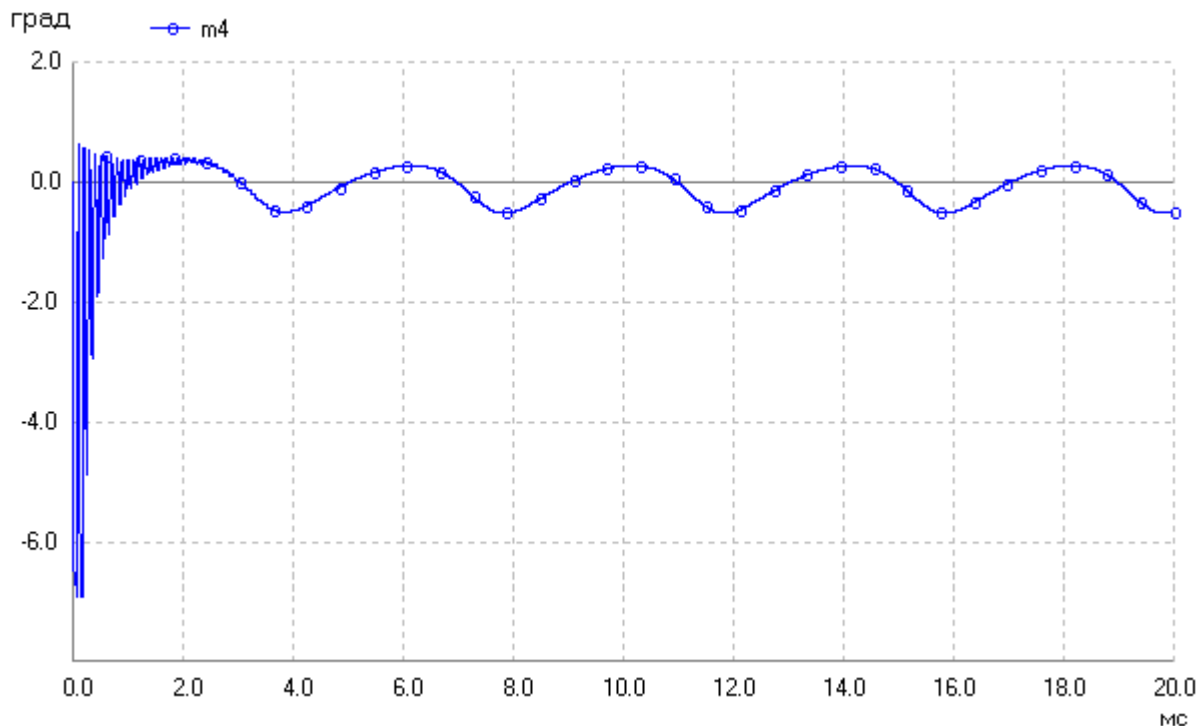


Рис. 33. Фазовая модуляция сигнала на выходе полосового фильтра, обусловленная несимметричностью частотных характеристик и преобразованием АМ-ФМ

Отметим, что преобразование АМ-ФМ в исследуемой цепи будет иметь место даже при расстройке, равной нулю. В этом случае амплитудно-фазовая конверсия обуславливается несимметричностью АЧХ и ФЧХ цепи.

На рис. 33 приведен график зависимости незначительной по величине фазовой модуляции выходного сигнала от времени при расстройке, равной нулю. Для наглядности коэффициент АМ в этом случае увеличен до 0,5. Расчет проведен на частоте несущей, равной 5 кГц.

Для проведения корректного детектирования моделирование в последнем случае проводилось при установке следующих параметров детектора КМС: амплитуда внутреннего опорного сигнала равна 1 В, частота — 5 кГц и начальная фаза — 0 градусов. Из анализа рис. 33 следует, что величина паразитного преобразования АМ-ФМ равна примерно  $-38$  дБ.

### 3.10. Расчет цифровых фильтров в аналоговой области

При расчете цифровых фильтров (ЦФ) в аналоговой области предполагается, что напряжения в аналоговых узлах схемы равны уровням сигналов на шине данных ЦФ. Дискретизация сигналов в аналоговых узлах схемы ЦФ проведена с шагом, равным шагу интегрирования в программе uSpice. Эффектами квантования в аналоговых узлах ЦФ для простоты пренебрегаем.

Для моделирования цифровых фильтров в аналоговой области создана библиотека "ЦОС-аналоговые элементы", включающая семь элементов: Delay, Multiplier, Summer-2 input, Summer-3 input, Summer-4 input, Summer-5 input и Цифровой фильтр-Polynomial. Условные обозначения элементов этой библиотеки показаны на рис. 34.

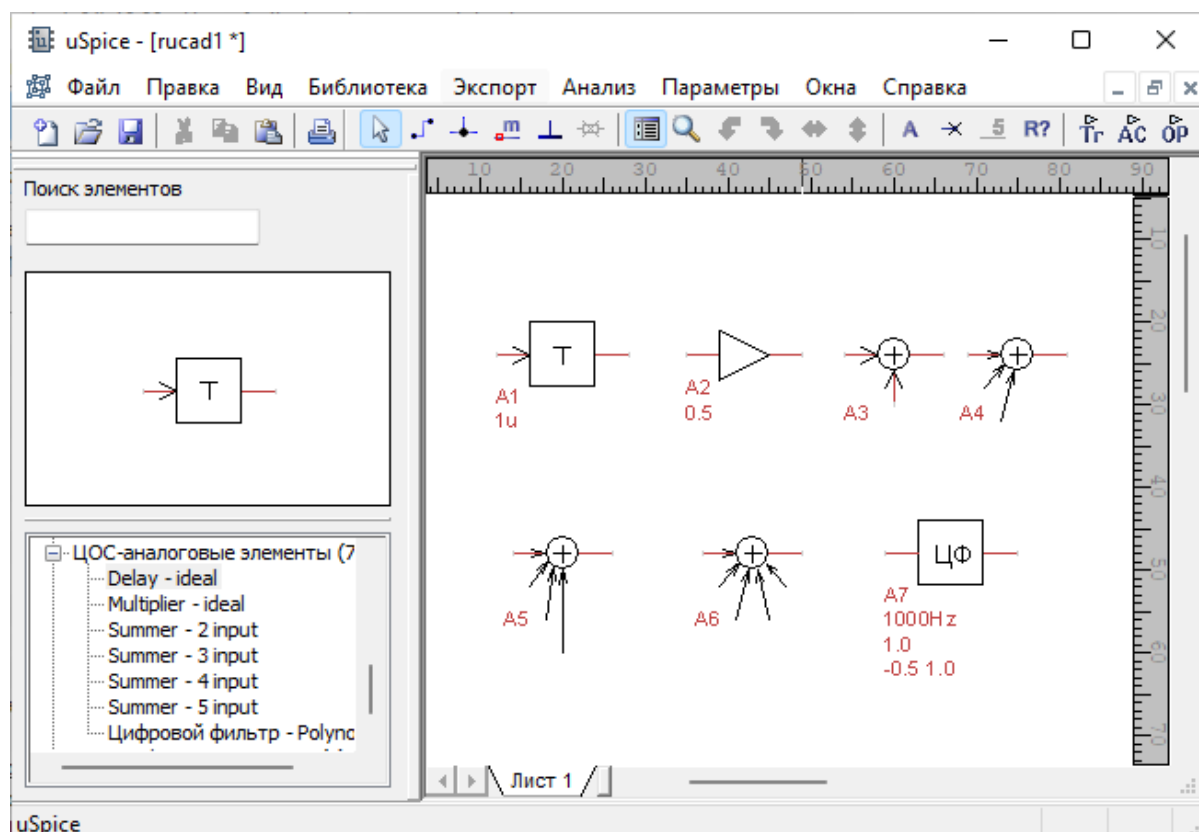


Рис. 34. Библиотека элементов цифровых фильтров в аналоговой области

С помощью библиотеки "ЦОС-аналоговые элементы" можно анализировать сложные цифровые фильтры. На рис. 35 приведена схема цифрового ФНЧ третьего порядка с характеристикой эллиптического типа (фильтр Кау-



эра), построенного с использованием отмеченных выше аналоговых элементов.

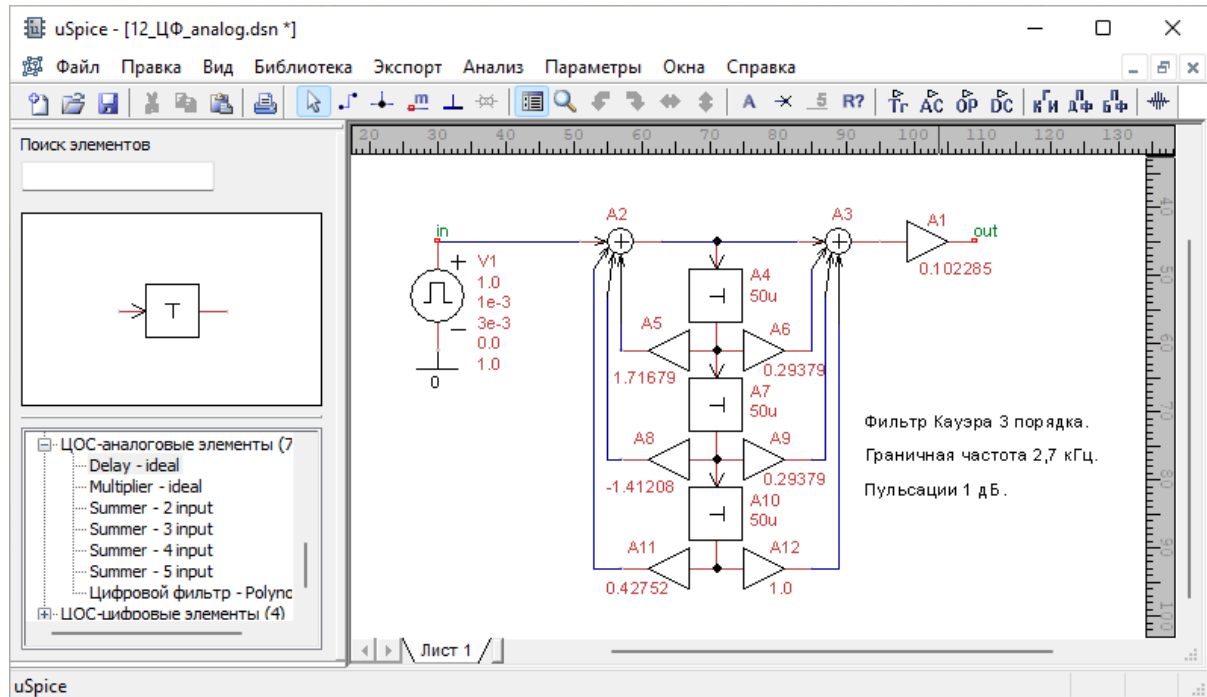


Рис. 35. Схема цифрового ФНЧ третьего порядка, построенного с использованием аналоговых элементов

Амплитудно-частотная характеристика этого фильтра имеет пульсации, как в полосе пропускания, так и в полосе задерживания (рис. 36).

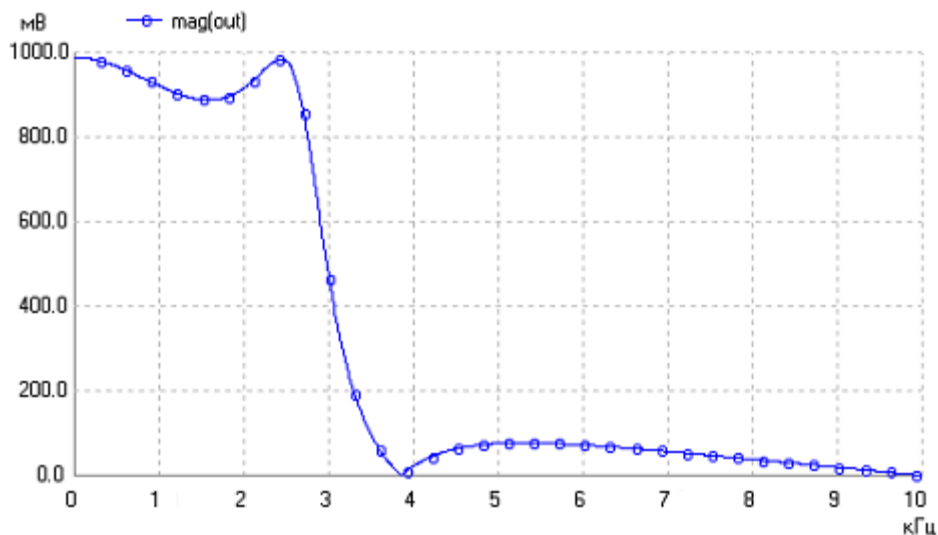


Рис. 36. Амплитудно-частотная характеристика фильтра Кауэра третьего порядка с аналоговыми элементами

Полоса пропускания ФНЧ равна примерно 2,7 кГц, пульсации в полосе пропускания составляют не более 1 дБ, затухание на частоте задерживания 3,5 кГц не менее 20 дБ. Расчеты проведены при частоте дискретизации  $f_d$ , равной 20 кГц.

С помощью элемента "Цифровой фильтр-Polynomial" (элемент A7 библиотеки "ЦОС-аналоговые элементы" на рис. 34) моделируются полиномиальные цифровые фильтры. Коэффициент передачи этих ЦФ в  $z$ -области задается в виде

$$K(z) = \text{gain} \frac{k_m z^{-m} + \dots + k_2 z^{-2} + k_1 z^{-1} + k_0}{d_n z^{-n} + d_{n-1} z^{-(n-1)} + \dots + d_2 z^{-2} + d_1 z^{-1} + d_0}.$$

Здесь  $\text{gain}$  – постоянная,  $k_i$  – коэффициенты полинома в числителе,  $i = 0, 1, \dots, m$ ,  $d_p$  – коэффициенты полинома в знаменателе,  $p = 0, 1, \dots, n$ . Коэффициент  $d_0$  в формуле не должен быть равен нулю. Комплексная переменная  $z$  и нормированная частота входного сигнала  $\omega$  связаны соотношением  $z = \exp(j\omega)$ , где  $\omega = 2\pi f / f_d$ ,  $f_d$  — частота дискретизации в герцах.

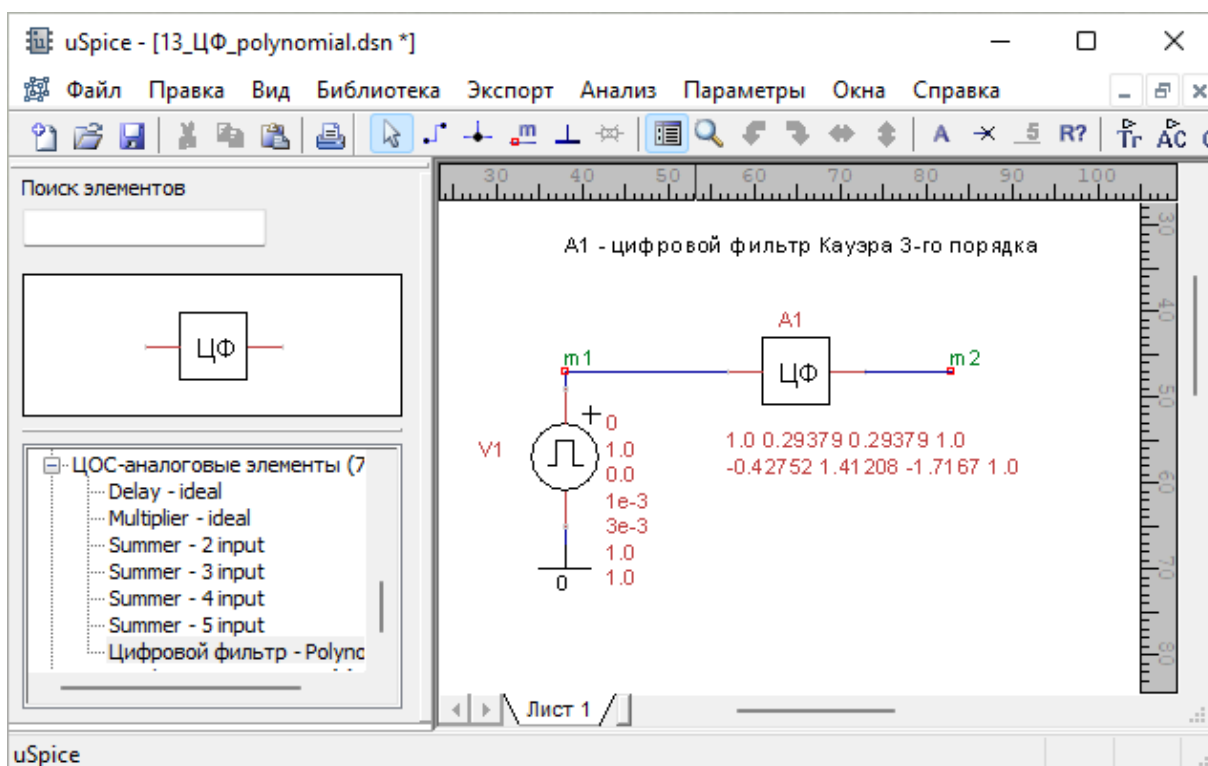


Рис. 37. Схема ЦФ в виде линейного блока 3-го порядка

На рис. 37 приведена схема ЦФ 3-го порядка с элементом "Цифровой фильтр-Polynomial" (элемент A1 на схеме). Для моделирования низкочастотного эллиптического фильтра Кауэра 3-го порядка коэффициент передачи будет равен

$$K(z) = 0.10285 \frac{z^{-3} + 0.29379z^{-2} + 0.29379z^{-1} + 1}{-0.42752z^{-3} + 1.41208z^{-2} - 1.71679z^{-1} + 1}.$$

Обратите внимание, что коэффициенты полиномов, записанные в формуле, указаны в виде параметров цифрового фильтра на рис. 37. Амплитудно-частотная характеристика этого цифрового фильтра будет аналогична АЧХ

цифрового фильтра, приведенной на рис. 36. Реакция ЦФ на воздействие прямоугольного импульса показана на рис. 38.

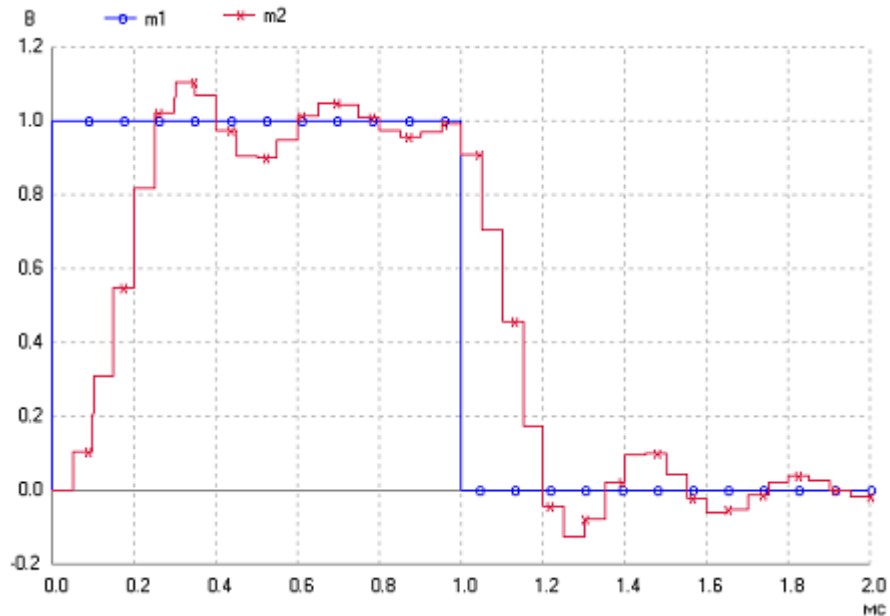


Рис. 38. Переходной процесс в фильтре Кауэра третьего порядка

Как видим, фильтр вносит задержку, равную примерно 150 мкс (по уровню 0,5 В). Установление выходного сигнала на вершине и после окончания импульса происходит в виде затухающего колебательного процесса. Максимальная амплитуда этих колебаний не превышает 10% от амплитуды входного импульса.

### 3.11. Расчет цифровых фильтров в области, управляемой событиями

Для моделирования устройств цифровой обработки сигналов в подпрограмме uXSpice, как и в других XSpice-программах, кроме аналоговых и цифровых узлов предусмотрены специальный узел Real, а также интерфейсы digital-real и real-analog, блоки real\_delay и real\_gain.

Интерфейс analog-real, отсутствующий в программе XSpice, был создан для uXSpice в области, управляемой событиями, как кодовая модель пользователя. Новый элемент analog-real включен в состав .dll файла, который автоматически подключается после старта подпрограммы uXSpice.

С использованием элемента analog-real для моделирования ЦФ в области, управляемой событиями, создана библиотека "ЦОС-цифровые элементы". Библиотека включает четыре элемента: Converter Analog-Real, Converter Real-Analog, Real-delay и Real-multiplier (рис. 39).

Отметим, что создавать элемент "Сумматор" для построения ЦФ в данном случае нет необходимости, так его роль играют узлы Real схемы.

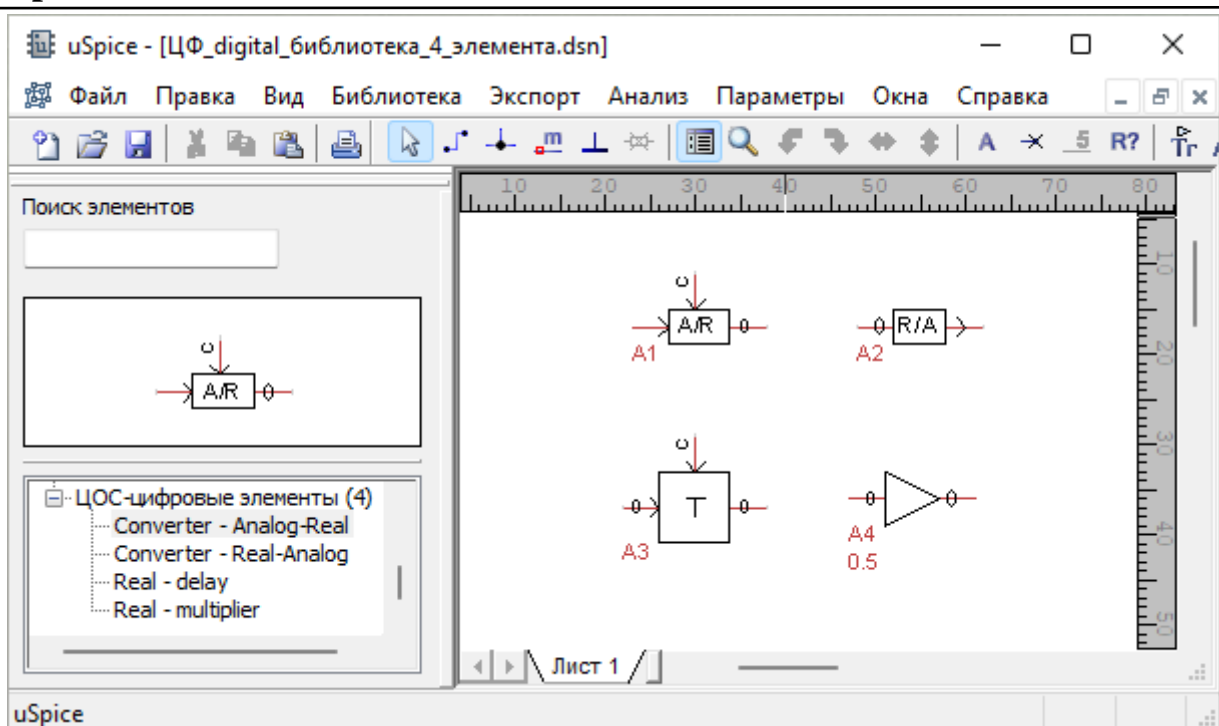


Рис. 39. Библиотека элементов ЦФ в области, управляемой событиями

Элемент A3 в схеме обеспечивает корректную работу узлов схемы, как сумматоров сигналов.

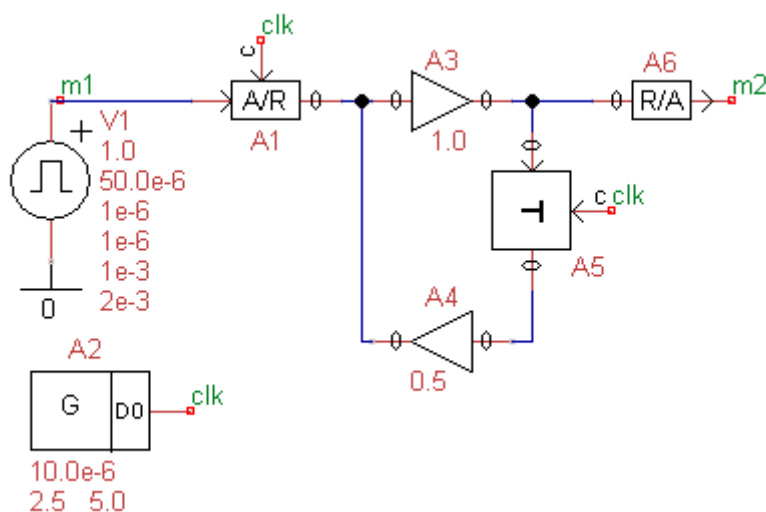


Рис. 40. Схема цифрового фильтра 1-го порядка

Простой пример цифрового фильтра с элементами из этой библиотеки показан на рис. 40. Интерфейс analog-real (элемент A1) показан на рисунке в виде прямоугольника с вписанными символами A/R. Для работы этого элемента, а также для работы элемента задержки (памяти) требуется подача синхросигнала от вспомогательного генератора A2.

Переходная характеристика цифрового фильтра, рассчитанная с помощью uSpice, показана на рис. 41 красным цветом. Синим цветом на этом рисунке показан единичный скачок напряжения на входе фильтра.

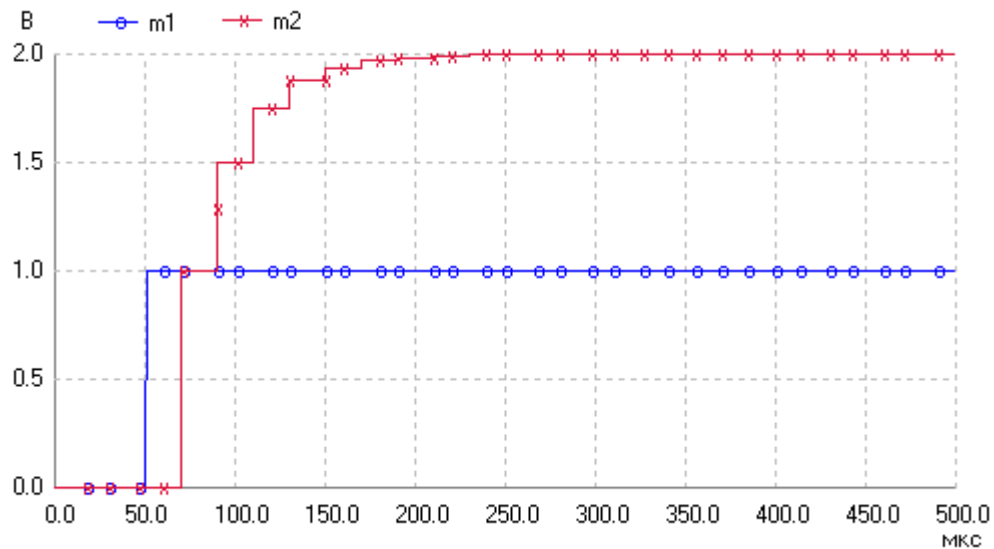


Рис. 41. Переходная характеристика цифрового фильтра первого порядка

Задержка начала выходного сигнала на рис. 41, равная примерно 20 мкс, объясняется задержками в элементах фильтра относительно сигнала синхронизации. По сравнению с ЦФ, построенными с использованием аналоговых элементов, цифровые фильтры, созданные в области, управляемой событиями, могут лучше описывать реальные процессы, происходящие при цифровой обработке сигналов.

Недостаток анализа в области событий – отсутствие анализа частотных характеристик цифровых фильтров в режиме АС в широком диапазоне частот. Частотные характеристики цифровых фильтров в этом случае удобно получать при использовании библиотеки аналоговых элементов ЦФ.

## 3.12. Измерения на графиках результатов расчетов

### 3.12.1. Измерения расстояний на рисунке с графиками

Для измерения расстояний необходимо, нажимая левую клавишу мыши, указать первую точку на графике и не отпуская левую клавишу протянуть ломанную линию до второй точки (рис. 42). Для удобства измерений начальная и конечная точки помещены в кружки.

Расстояния по осям отобразятся в текстовом окне подпрограммы uXSpice (рис. 43). Как видим, задержка  $dx$  между задним фронтом сигнала  $m0$  и передним фронтом сигнала  $m1$  равна 2,64 нс. Сдвиг по вертикальной оси равен примерно  $dy = 9,6$  вольт. Обратите внимание, что величина сдвига включает 10 В смещения между графиками. В текстовом окне на рис. 43 приведено также отношения  $dy/dx$ .

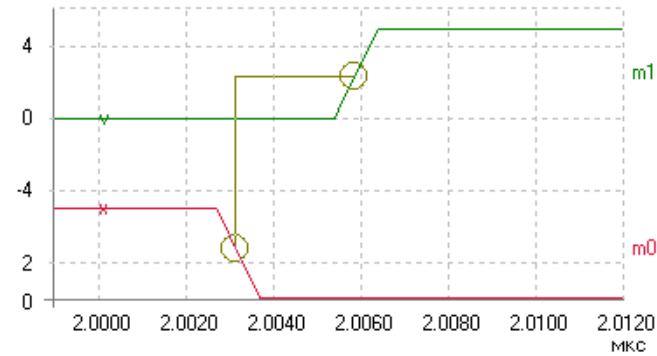


Рис. 42. Измерения расстояний на рисунке с графиками

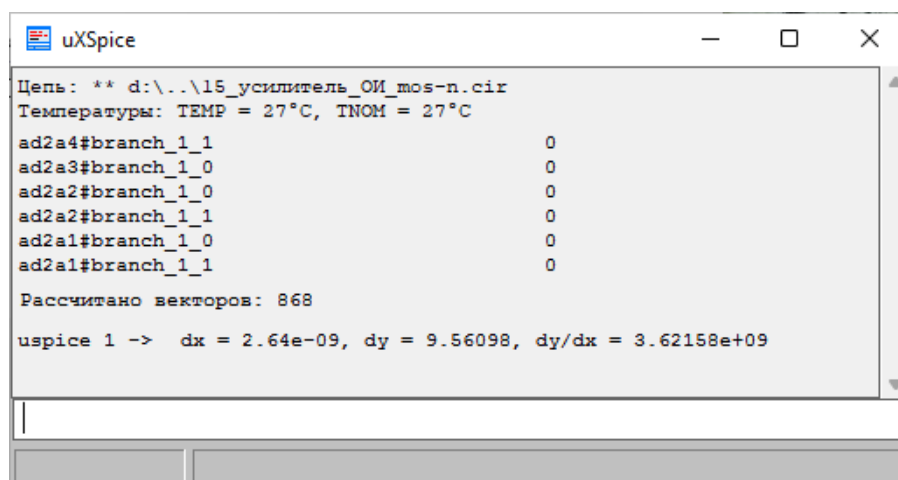


Рис. 43. Печать расстояний в окне uXSpice

### 3.12.2. Лупа значений по оси X

Лупа значений по оси X позволяет задать с помощью правой клавиши мыши уменьшенный интервал значений по оси X (рис. 44).

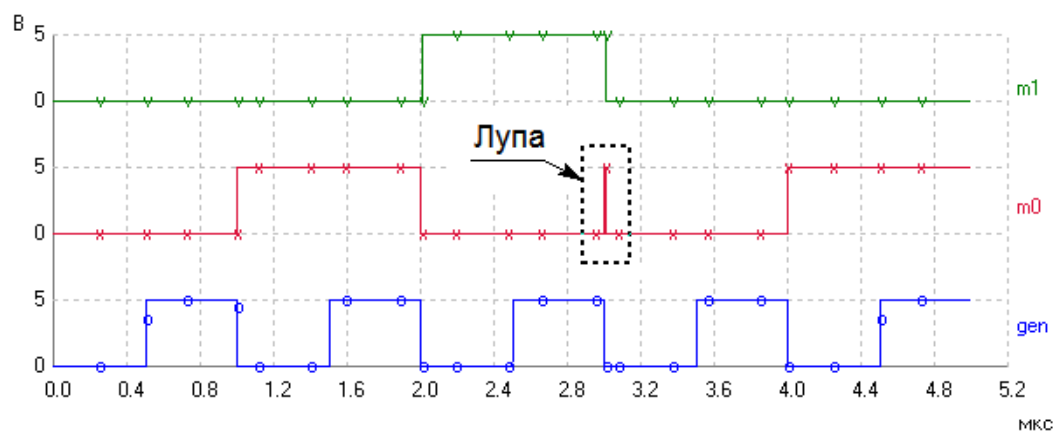


Рис. 44. Временная лупа в uSpice

Если ось X — ось времени, то получим временную лупу. Временная лупа позволяет установить новый уменьшенный диапазон значений по оси времени — новый временной интервал.

Для получения нового интервала по оси X необходимо, нажимая правую клавишу мыши, вытянуть прямоугольник с требуемым интервалом значений по оси X, а затем отпустить правую клавишу мыши. Появится новый рисунок с графиками, масштаб по оси X у которого будет изменен в соответствии с размерами по горизонтальной оси прямоугольника на рис. 44. Аналогичную операцию можно провести еще раз для достижения требуемого интервала по оси X. Например, для графиков, изображенных на рис. 44 получены новые значения на временной оси, показанные на рис. 45.

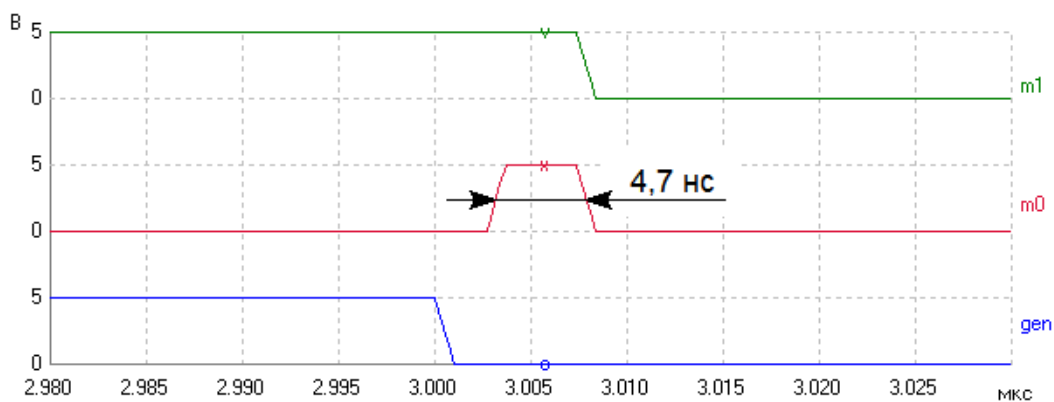



Рис. 45. Оценка длительности импульса

Как видим, длительность короткого импульса в сигнале m0 равна примерно 4,7 нс. Обратите внимание, что для одного рисунка нельзя много раз подряд использовать лупу. Из-за ограниченного числа рассчитанных точек могут появиться некорректные результаты.

## 4. Работа со сложными схемами

Кроме рассмотренных выше основных действий по созданию и анализу схемы, в программе имеются дополнительные операции и элементы, облегчающие работу пользователя со сложной схемой.

### 4.1. Общий источник питания

Нажимая значок  с изображением корпуса (заземления) на панели инструментов, можно ввести в схему метку (название узла) общего источника питания. Отметим, что в этом случае в окне параметров этого элемента рекомендуется выбрать изображение символа общего источника питания отличным от значка заземления. Например, выберите изображение общего ис-

точника питания в виде треугольника, круга или отрезка косинусоиды (волны).

В окне параметров укажите имя общего источника питания. Ниже, на рис. 1 показан символ общего источника питания с именем VCC, изображенный в виде треугольника. Напряжение этого источника равно 2 В.

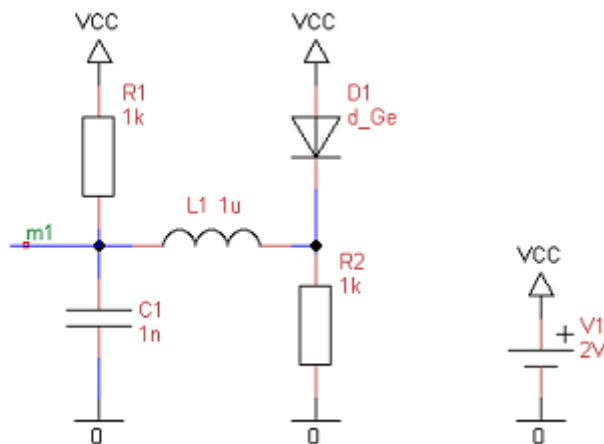


Рис. 1. Общий источник питания VCC

Отметим, что аналогичную задачу можно решить с использованием одинаковых меток, однако использование общего источника питания более наглядно.

## 4.2. Сетка

При рисовании схемы можно включить в опциях программы отображение сетки и привязку элементов к сетке, используя меню "Параметры\Установки редактирования...\Сетка".

На рис. 2 показана сетка при создании библиотечного элемента транзистора. При этом установлена привязка выводов элемента к сетке.

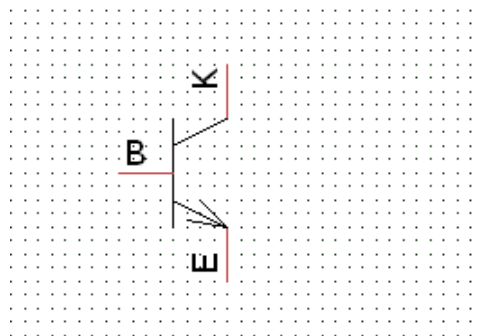


Рис. 2. Сетка при создании изображения транзистора

Быстро удалить или показать сетку, а также установить привязку элементов к сетке можно также при выборе пунктов "Параметры\Показать сетку" и "Параметры\Привязать к сетке" соответственно. Как правило, отображение



сетки и привязка к ней элементов требуется при создании или редактировании библиотечного элемента.

Отметим, что сетка не изображается при уменьшении размера схемы до значения менее 80% от номинального. Видимый шаг сетки может автоматически изменяться в зависимости от масштаба.

### 4.3. Добавление текста и графических элементов

На схему можно наносить надписи и простейшие графические элементы: линии, многоугольники, эллипсы, окружности и дуги.

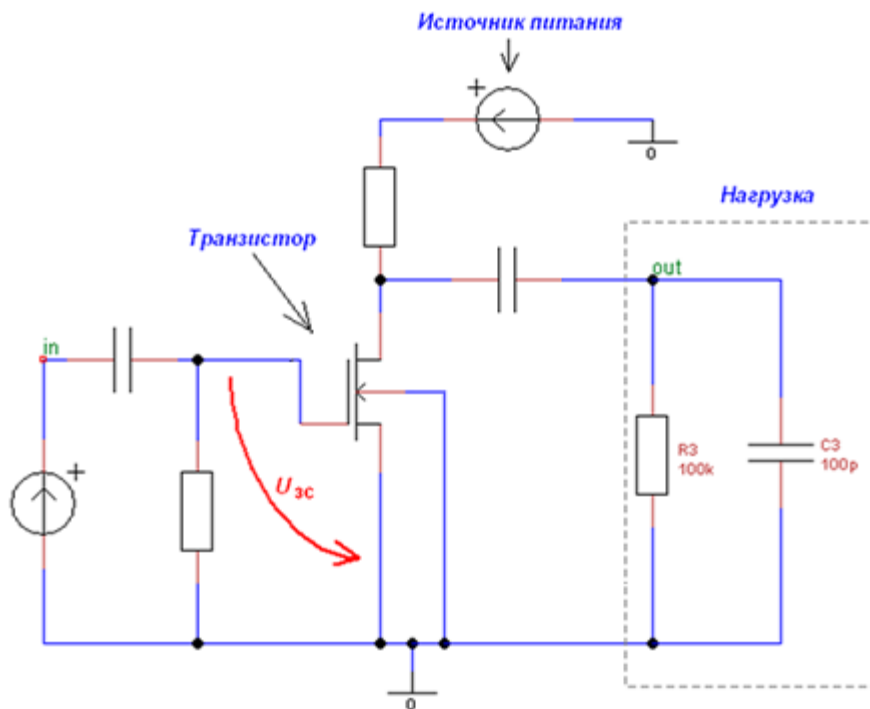


Рис. 3. Схема с нанесенными надписями и простейшими графическими элементами

Добавить надписи можно, используя значок с буквой А на панели инструментов главного окна программы. Если при вводе текста перед буквой ввести символ "``" (гравис), то буква будет выведена с чертой сверху. Это часто требуется при описании логических сигналов.

Для добавления простейших графических элементов необходимо включить отображение панели графических примитивов (меню "Вид\Панели инструментов\Рисование"). Работа с графическими элементами проводится по обычным для графических программ правилам.

Для модификации нарисованных графических элементов используйте контекстное меню, вызываемое нажатием правой кнопки мыши. Пример схемы с нанесенными в учебных целях надписями и графическими элементами показан на рис. 3.

## 4.4. Использование шин

В сложных схемах с большим количеством проводников можно использовать шины. Для работы с шинами необходимо включить изображение панели шины в меню "Вид\Панели инструментов\Шины". Пример использования шины с именем Data показан на рисунке ниже.

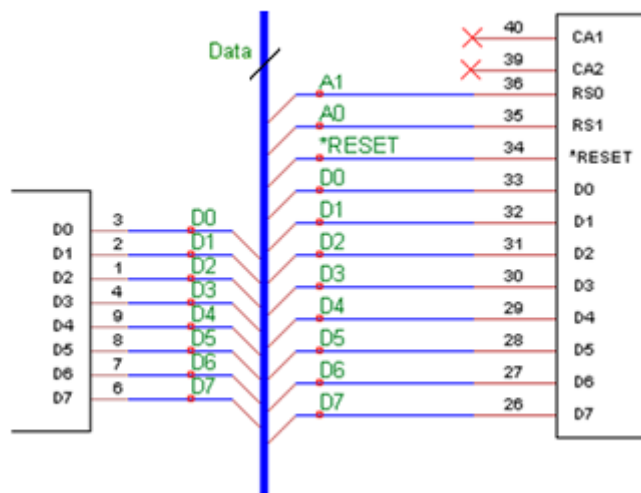


Рис. 4. Включение в схему шины с именем Data

Для идентификации проводников шины на рисунке используются метки, показанные на рис. 4 зеленым цветом.

## 4.5. Символ "Нет соединения"

Обычно все контакты элемента должны быть соединены с другими элементами схемы. Однако некоторые элементы разрешается использовать с неподключенными выводами.

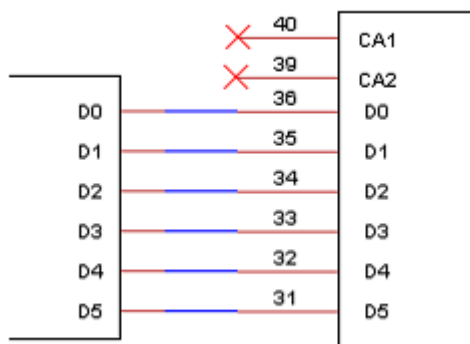



Рис. 5. Использование символа "Нет соединения"

На рис. 5 символом отсутствия соединений помечены выводы 39 и 40 правого по схеме цифрового элемента.

К элементам, у которых имеются выводы, которые можно не подключать, относятся, операционные усилители, триггеры, комбинационные устройства и

т. п. В этом случае используется символ  — "Нет соединения", расположенный на линейке значков. При проверке схемы неподключенные выводы в этом случае не будут отмечаться как ошибочные.

## 4.6. Масштаб изображения

Масштаб изображения можно изменить, используя значок с изображением лупы и нажимая в окне схемы левую или правую кнопку мыши. Быстро изменить масштаб можно, нажимая клавиши Page Up, Page Down.

Установить номинальный масштаб можно, используя меню "Вид\Масштаб 100%". Изменить масштаб можно также используя меню "Вид\Увеличить масштаб" или меню "Вид\Уменьшить масштаб".

Отметим, что для того, чтобы при большом увеличении масштаба интересующий пользователя элемент схемы оставался примерно в центре экрана, необходимо предварительно его выделить мышкой.

## 4.7. Экспорт в РСВ-программы

Используя меню "Экспорт", можно подготовить данные для программ разводки печатных плат (РСВ-программ).

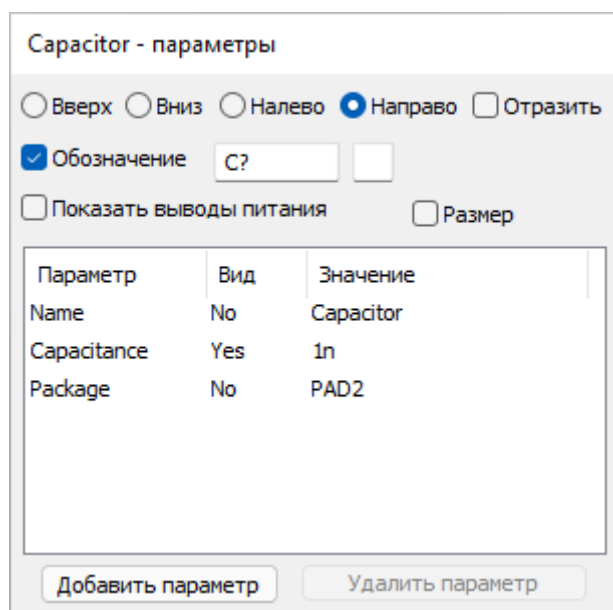


Рис. 6. Окно свойств конденсатора C3 с типом корпуса PAD2

Для этого необходимо: создать схему с безошибочно соединенными элементами, корректно добавить атрибут "Package", описывающий тип корпуса радиоэлемента и выбрать требуемый формат выходного файла для программы разводки печатной платы. Например, окно свойств конденсатора C3 с типом корпуса PAD2 показано на рис. 6. В программе реализованы следующие форматы выходного файла: PADS-PCB, Eagle SCR и Protel.

## 4.8. Печать схемы

Печать схемы производится с использованием типового окна задания параметров печати, показанного на рис. 7.

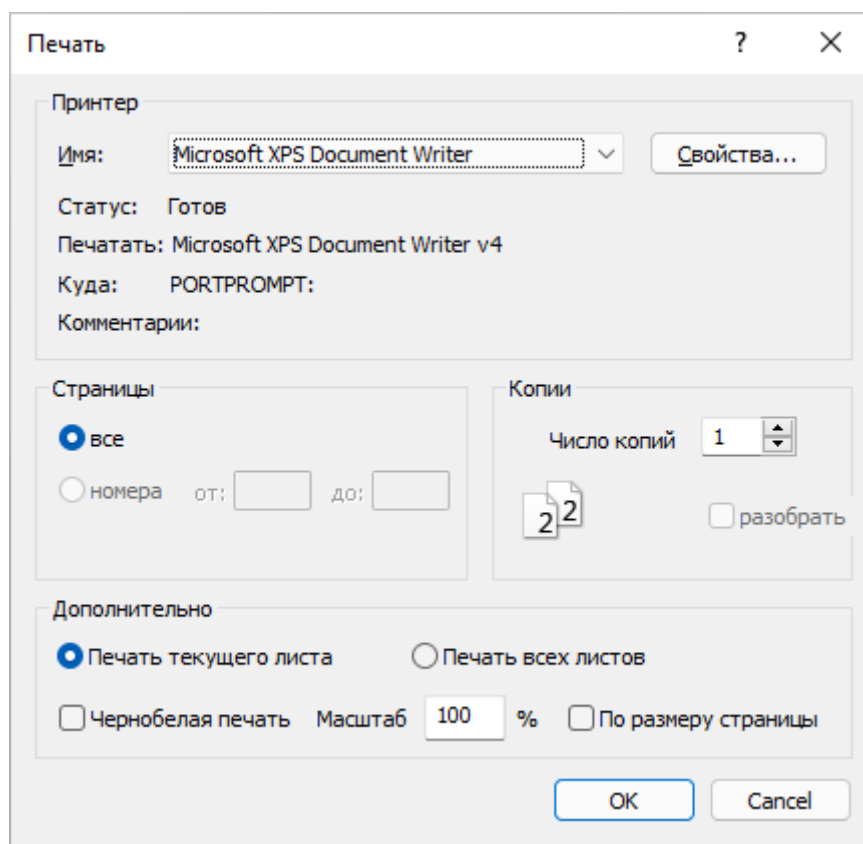


Рис. 7. Окно параметров печати схемы

## 4.9. Изображение схемы на нескольких листах

Для создания схемы, содержащей большое число радиоэлементов, можно использовать два пути:

1. Размещение большой схемы на нескольких листах;
2. Выделение из большой схемы подсхемы, представление этой подсхемы в виде символа (аналогично символу элемента из библиотеки) и вставка этой подсхемы в виде символа в основную схему.

В сложных проектах можно одновременно использовать подсхемы и множество различных листов схемы.

Для добавления нового листа в большую электрическую схему необходимо нажать правую кнопку мыши на закладке "Лист 1" первого листа схемы и выбрать пункт "Вставить лист". Будет создан новый лист для рисования продолжения большой схемы. Эту операцию можно повторить для создания дополнительных листов схемы.

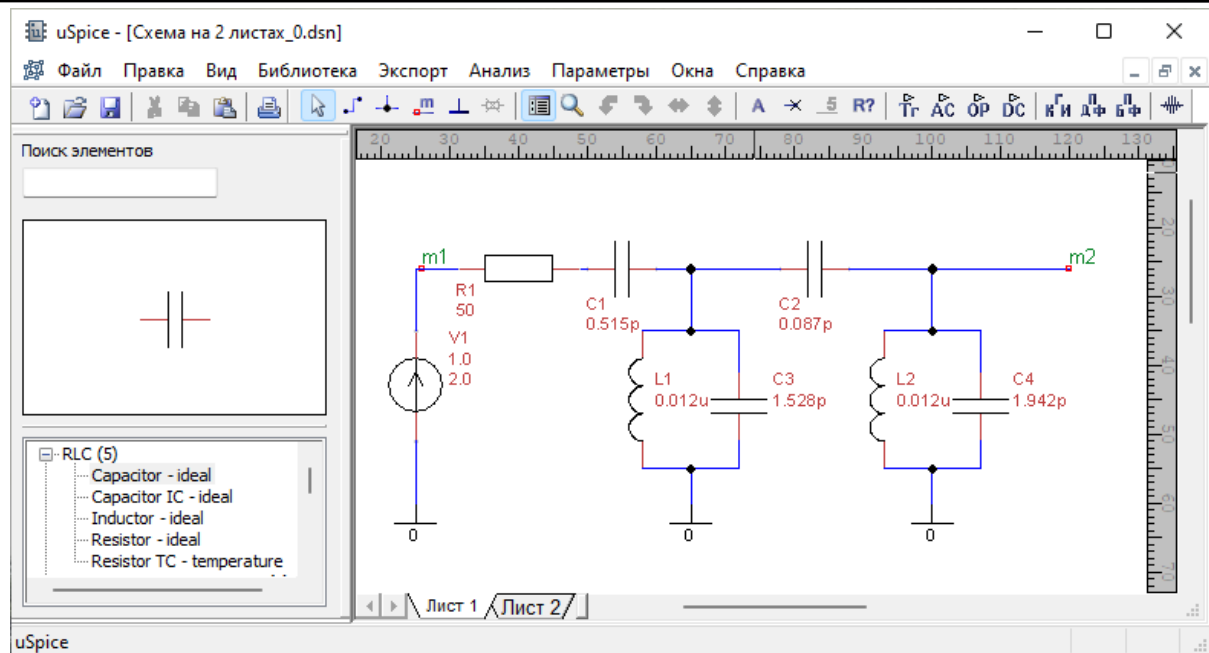


Рис. 8. Первый лист схемы

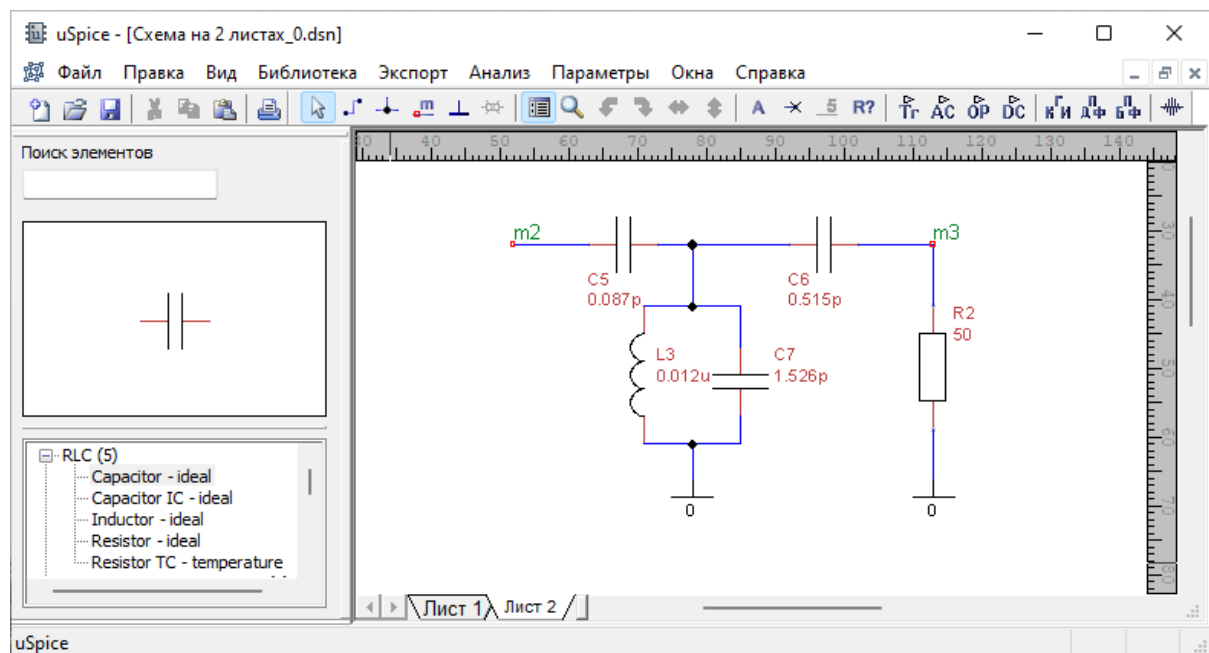


Рис. 9. Второй лист схемы

Отметим, что все листы одной большой схемы будут иметь одинаковый размер страницы, однако каждый отдельный лист может иметь свои собственные детали оформления. При необходимости можно удалять или переименовывать листы большой схемы, нажимая правую кнопку мыши на названии листа внизу экрана. Отметим, что при удалении листа, его невозможно восстановить с помощью команды "Правка\Отменить ввод". Все листы большой схемы записываются в один файл.

Для осуществления связи между отдельными частями схемы, расположенными на отдельных листах, используются метки, имеющие одинаковые названия на разных листах.

На рис. 8 и рис. 9 представлена схема многозвенного СВЧ-фильтра. На первом листе (рис. 8) изображено начало схемы. На втором листе (рис. 9) представлена вторая часть схемы фильтра. На двух листах схемы присутствует одинаковая метка m2. Эта общая метка перед проведением моделирования позволяет сгенерировать связанное описание всей схемы.

Амплитудно-частотная характеристика описанного выше полосового СВЧ-фильтра показана на рис. 10.

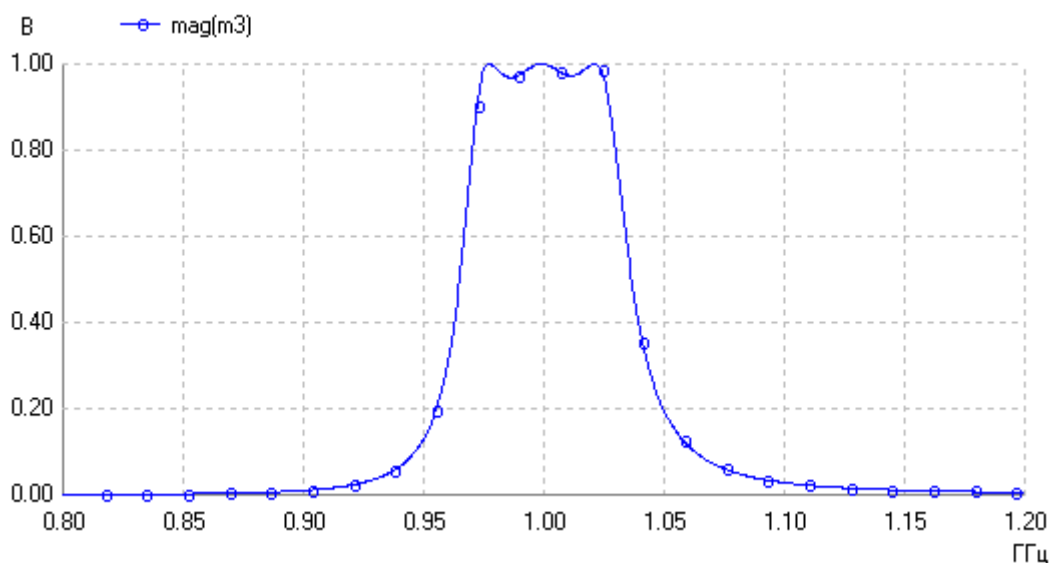


Рис. 10. АЧХ полосового СВЧ фильтра

Расчет АЧХ проведен при использовании выходной метки m3 (рис. 9). Центральная частота фильтра равна 1 ГГц. Полоса пропускания равна примерно 60 МГц.

#### 4.10. Использование подсхем

Изображение большой схемы можно улучшить, создавая элемент-подсхему (hierarchical symbol). Подсхему в виде совокупности радиоэлементов и их соединений изображаем как новую схему на отдельном листе. Каждый внешний вывод в подсхеме отмечаем меткой. Аналогичные метки должны иметь выводы символа-подсхемы.

Используя меню "Правка\Создать элемент-подсхему", к листу с подсхемой добавляется лист, на котором, используя графические примитивы, нужно нарисовать символ подсхемы. Обычно это прямоугольник, в который вписывается название подсхемы, а к боковым сторонам добавляется соответствующее число выводов с именами, соответствующими именам меток подсхемы.

Полученные изображения подсхемы и ее символа сохраняется в файл. Теперь элемент-подсхему можно вставить в основную большую схему, выбирая пункт меню "Правка\Вставить элемент-подсхему".

Внедренный символ элемента-подсхемы используется как обычный символ из библиотеки. Он может быть перемещен, повернут на соответствующий угол, отражен и т.п. Как и в случае использования нескольких листов схемы, при расчете схем с элементами-подсхемами генерируется единое Spice-описание задания. Наименования выводов подсхемы (метки) можно использовать для расчета соответствующих узловых напряжений.

На рис. 11 приведена схема активного фильтра на ОУ с использованием элемента-подсхемы Н1.

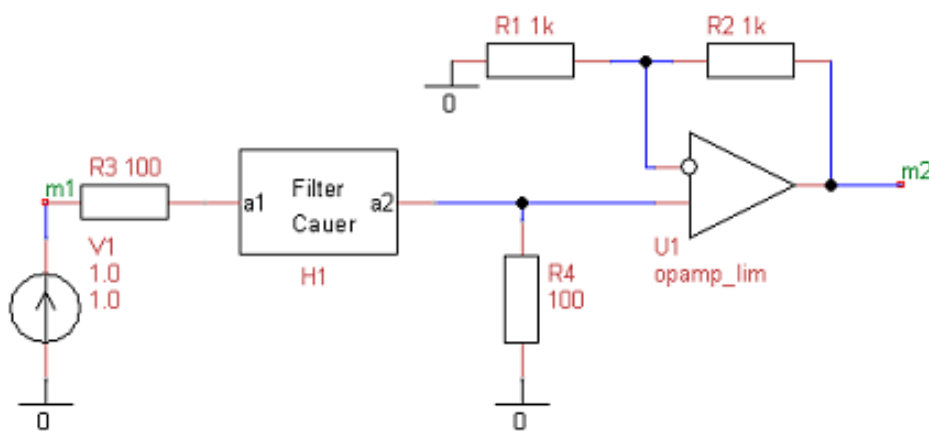


Рис. 11. Схема активного фильтра с использованием элемента-подсхемы Н1

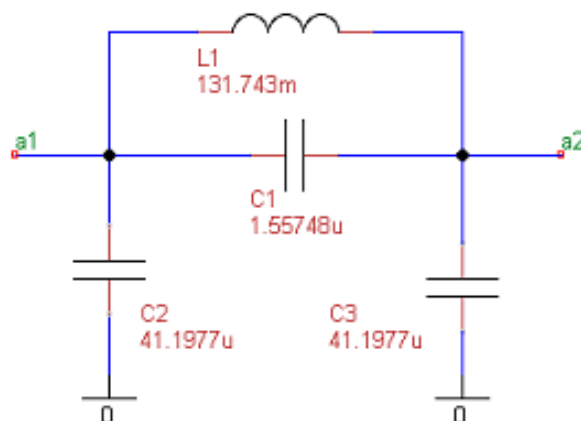


Рис. 12. Электрическая схема элемента-подсхемы Н1

Электрическая схема элемента-подсхемы, представляющего фильтр Кауэра, приведена на рис. 12. Метки выводов подсхемы a1 и a2, соответствуют

меткам на условном изображении элемента-подсхемы Н1. Амплитудно-частотная характеристика активного фильтра приведена на рис. 13.

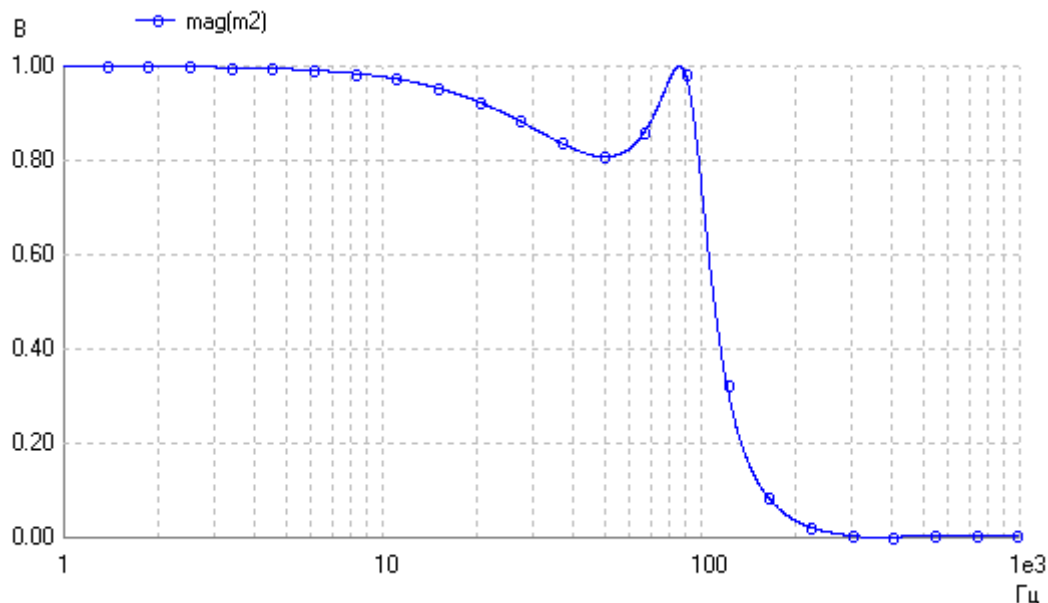


Рис. 13. АЧХ активного фильтра, использующего элемент-подсхему

Как видим, граничная частота активного фильтра по уровню 0,7 примерно равна 100 Гц. Пульсации АЧХ в полосе пропускания примерно равны 20%.

## 4.11. Библиотеки элементов

Для работы с библиотеками выбираем пункт меню "Библиотека\Библиотеки элементов". Возникающее при этом окно с используемыми библиотеками показано на рис. 14.

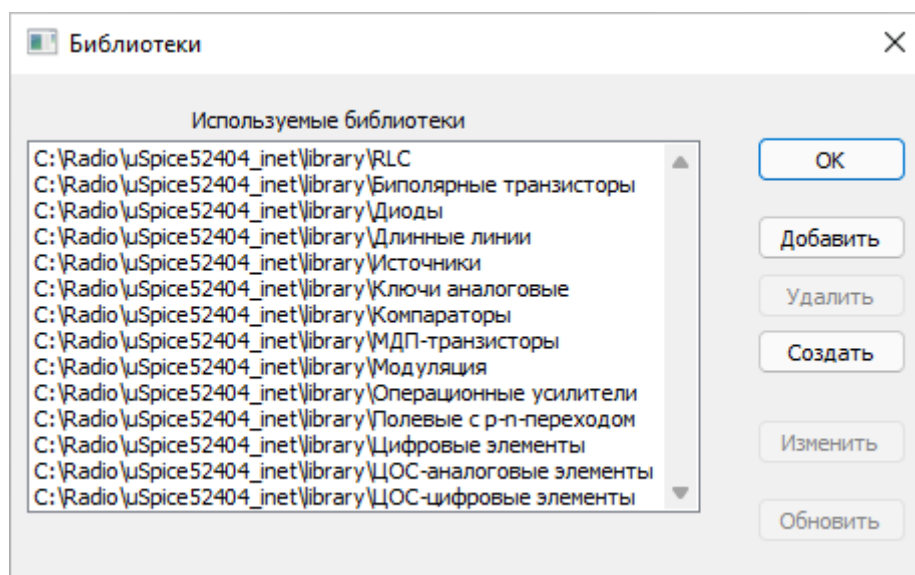


Рис. 14. Окно с используемыми библиотеками



В отдельную библиотеку собираются, как правило, однотипные элементы схемы. Пользователь, используя возможности программы, может легко создать новую библиотеку, или добавить в имеющуюся библиотеку свой собственный элемент, или изменить существующий элемент.

Библиотеки можно добавлять, удалять, создавать, редактировать. Окно программы с элементами библиотеки «RLC» (катушка индуктивности, резистор и два конденсатора) показано на рис. 15.

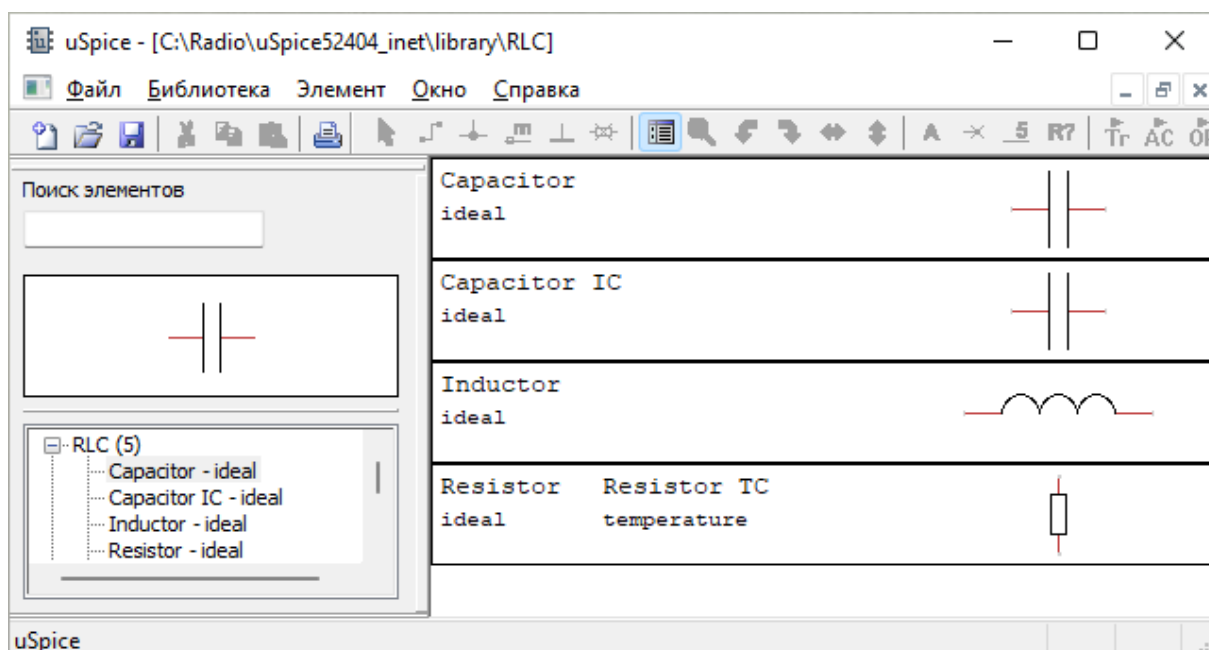


Рис. 15. Радиоэлементы библиотеки RLC

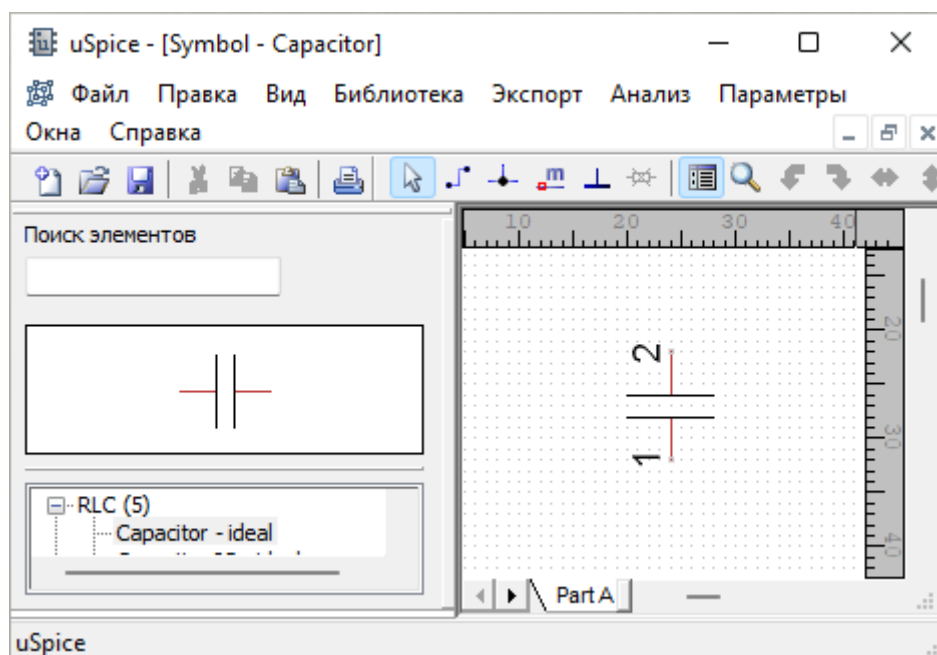


Рис. 16. Условное графическое изображение конденсатора

Мышью можно выбрать один из элементов библиотеки. Нажимая затем правую кнопку мыши, попадаем в контекстное меню, с помощью которого изменяем свойства и состав элементов библиотеки.

При выборе пунктов меню "Создать элемент" или "Изменить элемент" появляется окно графического редактора. На рис. 16 в окне графического редактора показано изображение конденсатора. Цифры 1 и 2 обозначают номера выводов элемента. Выводы проставляются с использованием значка с отрезком прямой линии и цифрой 5, приведенного на панели инструментов программы.

Свойства элементов изменяются с помощью диалогового окна, внешний вид которого для конденсатора с емкостью по умолчанию, равной 1 нанофарады, приведен на рис. 17.

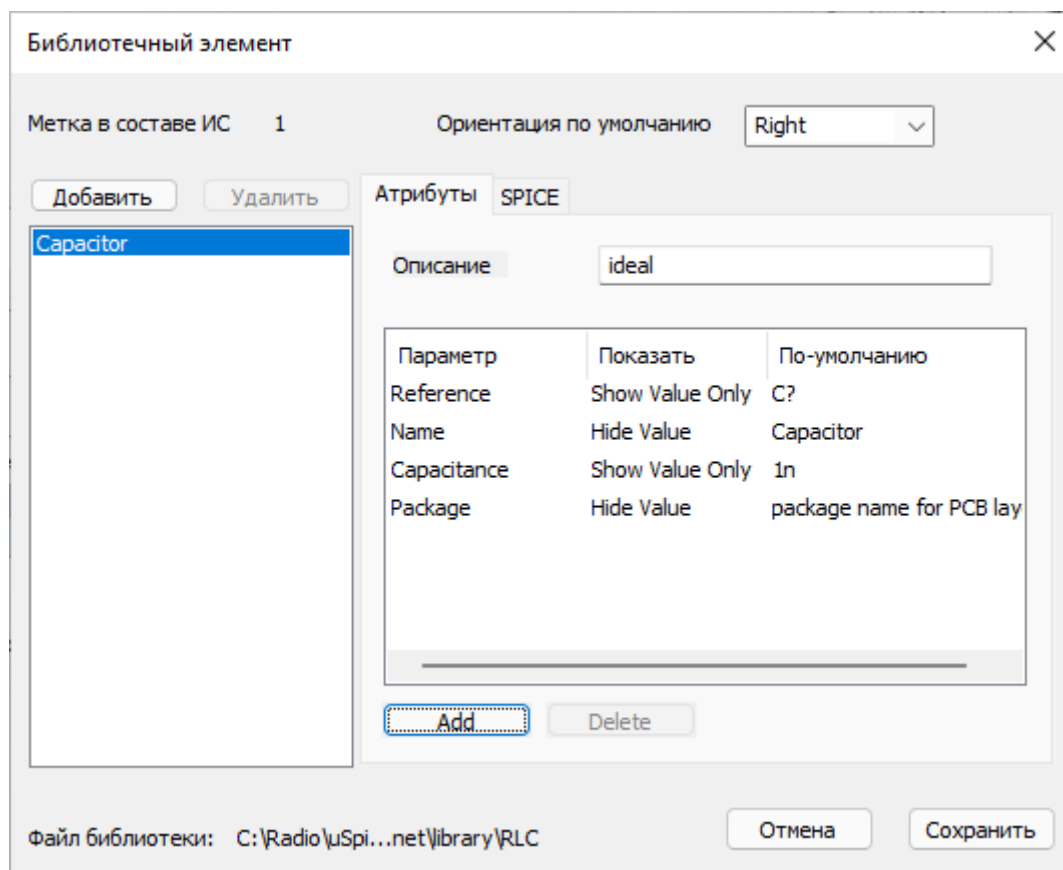


Рис. 17. Окно с атрибутами конденсатора

Подробное схемотехническое описание элемента можно провести, используя закладку SPICE этого окна.

В программе uSpice используется стандартное, построчное SPICE-описание электронной цепи, представленное в файлах с расширением .cir. В каждой строке такого описания приводится информация о типе элемента, об узлах, к которым он подключен, о параметрах элемента и т.п. Для

поддержки такого описания в программе uSpice используется библиотека элементов, содержащая специальное SPICE-описание параметров элементов.

Собственную библиотеку таких элементов может подготовить пользователь. Для использования или подготовки библиотеки требуется знание SPICE-языка. Описание этого языка можно найти в литературе, указанной в конце описания программы моделирования uSpice.

## 5. Панели инструментов

В разделе кратко описаны панели инструментов (панели значков) программы

### 5.1. Панель схемы

Панель схемы — основная панель инструментов программы. Ее внешний вид приведен на рис. 1.



Рис. 1. Значки основной панели инструментов программы

Панель содержит 24 значка. Начиная с первого значка, кратко опишем назначение значков этой панели:

- 1 – режим выделения элементов схемы – исходный режим работы мышью в программе,
- 2 – режим рисования проводников (для быстрого выхода из этого режима достаточно нажать правую кнопку мыши),
- 3 – режим установки в схему узлов (работает только при отключении автоматического режима установки узлов),
- 4 – работа с метками,
- 5 – установка в схему корпуса (или общего источника питания),
- 6 – удаление предварительно выделенного элемента,
- 7 – режим показа/скрытия диалоговой панели, содержащей библиотеки радиоэлементов,
- 8 – включение/выключение режима изменения масштаба,
- 9, 10, 11, 12 – вращения и зеркальные отражения условного графического отображения элемента,
- 13 – размещение в окне схемы текстовых комментариев,
- 14 – установка в схему символа "Нет соединения",
- 15 – установка на графическое изображение библиотечного элемента выводов,

- 16 – нумерация элементов схемы, которые предварительно не были пронумерованы вручную,
- 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 – выбор различных видов анализа.

## 5.2. Панель рисования

Панель рисования используется для создания графического изображения радиоэлемента, а также для нанесения на схему дополнительных графических символов (рис. 2).

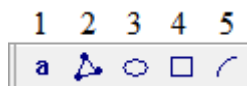


Рис. 2. Значки панели рисования

Панель содержит 5 значков. Кратко опишем назначение значков этой панели:

- 1 – ввода текста в окно схемы или в окно графического изображения радиоэлемента,
- 2 – режим рисования линий (режим завершения рисования выбирается при нажатии правой кнопки мыши),
- 3 – рисование круга или эллипса,
- 4 – рисование прямоугольника,
- 5 – рисование дуги.

## 5.3. Панель работы с блоками

Панель работы с блоками используется при проектировании сложных и больших схем (рис. 3).

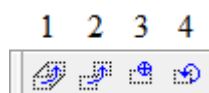


Рис. 3. Значки панели работы с блоками

Панель содержит 4 значка. Кратко опишем назначение значков этой панели:

- 1 – режим перемещения блока с элементами схемы с сохранением соединений,
- 2 – режим перемещения блока без сохранения соединений,
- 3 – режим копирования и перемещения блоков схемы,
- 4 – вращение или зеркальное отражение изображения блока.

## 5.4. Панель шины

Панель работы с шинами используется при создании схем цифровых устройств и сложных аналоговых схем (рис. 4).

Панель содержит 4 значка. Кратко опишем назначение значков этой панели:

- 1 — задание имени шины,
- 2, 3 — ввод отводов от шины,
- 4 — рисование шины в окне схемы.

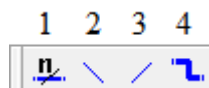


Рис. 4. Значки панели работы с шинами

Если при вводе имени шины перед буквами вводить символы "'" («гравис»), то буквы будут выведены с черточками сверху.

## 6. Меню программы

Кратко опишем только особенности меню программы. Для стандартных пунктов меню используется общепринятый порядок работы.

### 6.1. Файл

Далее описаны наиболее важные подпункты меню «Файл».

#### 6.1.1. Параметры чертежа

Используя диалоговую панель, показанную на рис. 1, можно ввести название схемы, данные автора, номер группы и т.д. Эти параметры схемы появляется в основной надписи учебного чертежа.

Рис. 1. Панель ввода параметров чертежа

Выбирая закладку "Обрамление" на диалоговой панели можно добавить рамку к листу со схемой с соответствующими цифровыми и буквенными символами, вписанными в рамку.

### 6.1.2. Импорт

Используйте этот пункт меню для добавления к создаваемой схеме другой, ранее созданной и сохраненной в виде файла, схемы. После загрузки новая схема высвечивается красным цветом и может с помощью мыши перемещаться в нужное положение.

Для фиксирования положения внедряемой схемы нажмите на левую кнопку мыши, а для отмены операции внедрения вместо левой нажмите на правую кнопку мыши. Если внедрение схемы завершилось неудачно, то выберите "Правка\Отменить ввод".

### 6.1.3. Экспорт в виде рисунка

Экспортировать в рисунок можно всю схему, включая основную надпись, или только часть схемы. В последнем случае требуется предварительно выделить в окне схемы нужную часть схемы. Диалоговое окно преобразования в рисунок показано на рис. 2.

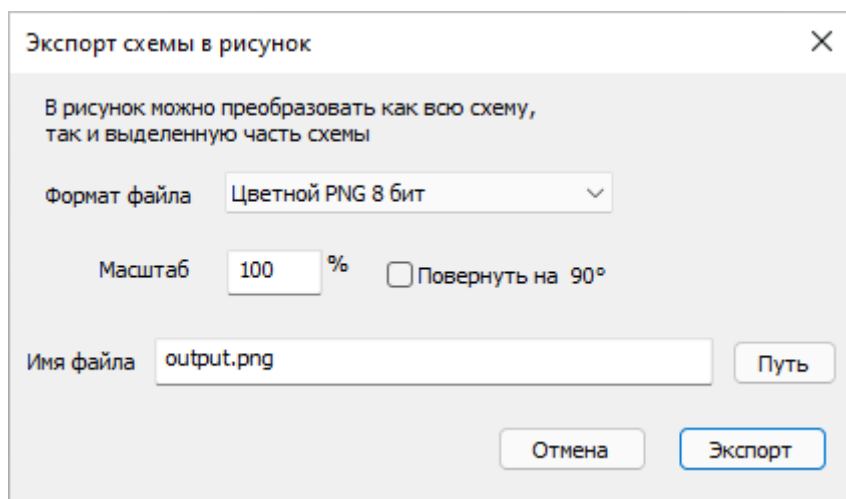


Рис. 2. Диалоговое окно преобразования в рисунок

Можно выбрать следующие форматы графического файла: цветной BMP, цветной PNG 8 бит, цветной PNG 24 бит, цветной JPEG, цветной GIF, цветной EMF, черно-белый BMP, черно-белый PNG 8 бит, черно-белый PNG 24 бит, черно-белый JPEG, черно-белый GIF.

Для удобства использования экспортируемого рисунка в диалоговой панели можно указать поворот рисунка на 90 градусов.

При экспорте можно изменить масштаб рисунка. Если преобразовывается вся схема, то масштабируется весь рисунок в целом. Если экспортируется часть схемы, то при масштабе, меньшем 100%, рисунок обрезается (преобразование в рисунок происходит только для верхней левой части рисунка), а при масштабе, большем 100%, справа и снизу добавляются поля. Последний вариант преобразования в рисунок удобно использовать для сохранения рисунка

с условными обозначениями элементов, которые, как правило, располагаются справа и внизу и при 100% масштабировании могут отсекаются.

### 6.1.4. Печать

Печать схемы производится с использованием стандартных методов операционной системы Windows. Окно печати показано выше на рис. 4.7.

### 6.1.5. Параметры страницы

Размер страницы, указываемый в этом пункте меню, одновременно определяет размер окна схемы. По умолчанию используется страница A4 в альбомном формате (рис. 3). Такой размер, как правило, достаточен для создания учебных чертежей.

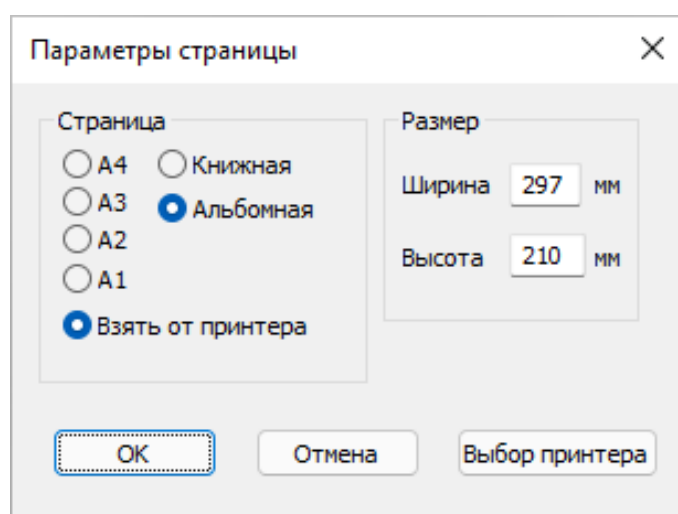


Рис. 3. Диалоговое окно установки параметров страницы

При использовании монитора с большой диагональю для рисования больших схем можно задать увеличенный размер страницы от формата A3 до формата A1.

Имеется возможность согласовать размер страницы в программе uSpice и размер страницы, заданной для принтера. Причем для разных принтеров могут быть заданы разные форматы страниц.

## 6.2. Правка

Далее описаны только наиболее значимые и оригинальные подпункты меню «Правка».

### 6.2.1. Проверить схему

Перед проведением расчетов рекомендуется провести проверку схемы на наличие грубых ошибок. В диалоговой панели, показанной на рис. 4, рекомендуется отметить все пункты. Как правило, большинство выявленных ошибок будет показано специальными символами на схеме устройства.

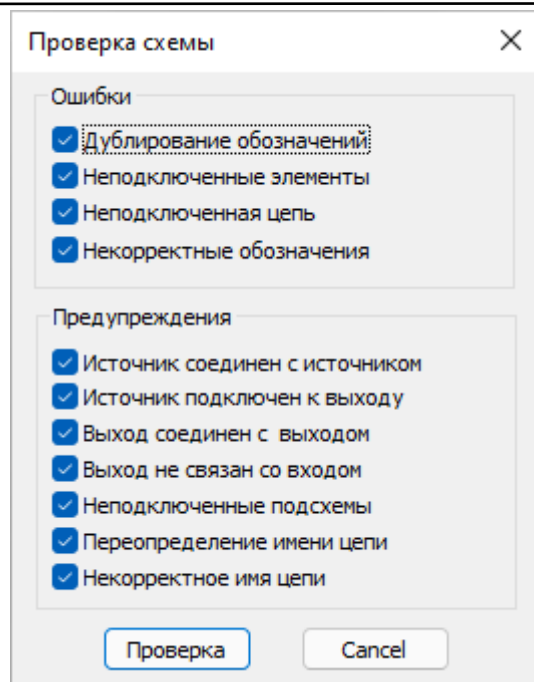


Рис. 4. Диалоговая панель проверки схемы

### 6.2.2. Обозначения элементов схемы

Нумерация элементов схемы проводится автоматически при запуске расчета схемы. При необходимости можно провести индивидуальную перенумерацию элементов схемы, используя меню "Правка\Переобозначить элементы схемы". Соответствующая диалоговая панель показана на рис. 5.

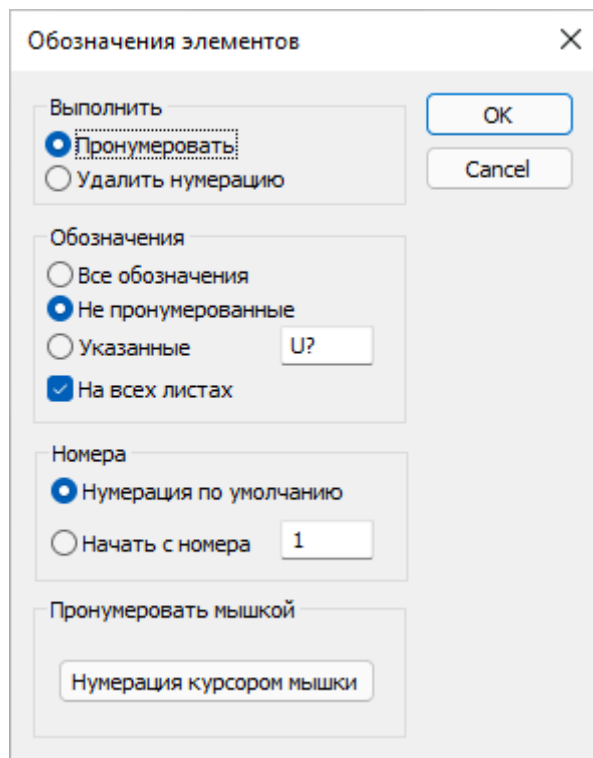


Рис. 5. Диалоговая панель обозначения элементов



Индивидуальную перенумерацию радиоэлементов можно провести с помощью курсора мышки (кнопка "Нумерация курсором мышки" на рис. 6). При этом, нажимая правую кнопку мыши, удаляем старое обозначение элемента, а нажимая левую кнопку мыши, устанавливаем новый номер элемента.

Перед расчетом автоматическую нумерацию элементов схемы можно провести, выбирая значок **R?** на панели инструментов.

### 6.3. Вид

Выбирая этот пункт меню, можно изменить масштаб изображения, а также сделать видимыми или невидимыми диалоговую панель элементов, панель схемы, панель значков графических примитивов, панели значков шины и блоков. Отметим, что масштаб схемы можно также изменить, нажимая клавиши Page Up, Page Down или используя значок с изображением лупы на панели инструментов.

### 6.4. Анализ

Программа uSpice позволяет проводить четыре основных вида анализа: исследование переходных процессов во временной области (режим Tran), расчет схем методом комплексных амплитуд (режим AC), расчет рабочей точки на постоянном токе (режим OP), многовариантный расчет на постоянном токе (режим DC).

Кроме этого, с помощью программы uSpice можно рассчитать коэффициент гармонических искажений (КГИ), провести дискретное преобразование Фурье (ДПФ) или быстрое преобразование Фурье (БПФ), а также найти огибающую и фазу аналитического сигнала.

### 6.5. Библиотека

#### 6.5.1. Элементы в составе ИС

Этот пункт меню становится активным только при редактировании изображения элемента. Он используется, когда требуется учесть наличие нескольких элементов в составе одного корпуса интегральной схемы (ИС). При создании изображения такой ИС требуется ввести число элементов, содержащееся в корпусе ИС. При выборе этого пункта необходимо проверить отметку у пунктов меню "Одинаковые элементы в составе ИС" и "Элементы в составе ИС различны". Если изображения элементов одинаковы, то эти элементы отличаются только разными номерами выводов.

Изображение каждого элемента в составе ИС должно быть представлено на отдельном листе. При использовании таких элементов в схеме к их обозначению необходимо добавлять буквы А, В и т.д. Как правило, у первого

элемента в ИС рекомендуется нарисовать выводы питания, которые можно сделать видимыми при выборе соответствующей опции в диалоговом окне свойств элемента.

### 6.6. Экспорт

Далее описаны основные подпункты меню «Экспорт».

#### 6.6.1. Создать файл для PCB-программ

Программа uSpice позволяет создать файл с данными для некоторых популярных программ разводки печатных плат. Для этого необходимо создать схему с безошибочно соединенными элементами, корректно добавить атрибут "Package", описывающий тип корпуса радиоэлемента, и выбрать требуемый формат выходного файла для программы разводки печатной платы. В программе реализованы следующие форматы выходного файла: PADS-PCB, Eagle SCR и Protel.

#### 6.6.2. Создать перечень элементов

Перечень элементов создается в виде текстового файла и содержит отсортированный список всех радиоэлементов схемы.

#### 6.6.3. Создать файл описания схемы

Файл описания схемы с расширением .sig содержит стандартное, построчное SPICE-описание электронной цепи. В каждой строке такого описания приводится информация о типе элемента, об узлах, к которым он подключен, о параметрах элемента и т.п. Для поддержки такого описания в программе uSpice используется библиотека элементов, содержащая SPICE-описание параметров элементов.

### 6.7. Параметры

Далее описаны основные подпункты меню «Параметры».

#### 6.7.1. Параметры анализа

При выборе этого пункта вызывается диалоговая панель опций с несколькими вкладками (рис. 6). Для выполнения учебных заданий эти опции изменять не рекомендуется. Как правило, все учебные задания успешно выполняются с опциями по умолчанию. Параметры анализа можно изменять при проведении студентами научно-исследовательской работы.

SPICE-инструкция для изменения параметров расчета в программе uSpice имеет вид:

```
.OPTIONS OPT1=OPTVAL1 OPT2=OPTVAL2 ...
```

Здесь OPT1, OPT2, ... — опции, изменяющие параметры расчета, OPTVAL1, OPTVAL2, ... — значения параметров.

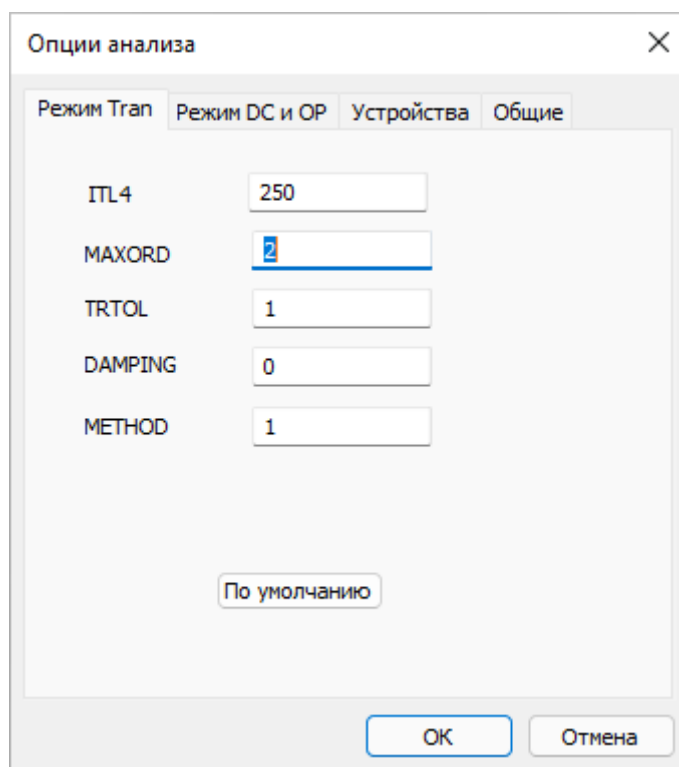


Рис. 6. Диалоговая панель опций анализа схемы

Подробное описание опций приведено в литературе, указанной в конце данной работы.

### 6.7.2. Показать сетку

При выборе этого пункта показывается сетка, если ее не было в окне схемы, или удаляется сетка, если она была в окне схемы.

### 6.7.3. Привязать к сетке

При выборе этого пункта все размещаемые на листе схемы элементы выравниваются по сетке.

### 6.7.4. Установки редактирования

С помощью, показанной на рис. 7 диалоговой панели, можно установить параметры сетки, размеры в миллиметрах или дюймах, правила соединения и автонумерации элементов, режим автоматического сохранения.

Отметим, что при работе с программой рекомендуется установить опцию "Привязать к сетке" и выбрать мелкий масштаб сетки (минимальный шаг сетки равен примерно 1 мм).

При работе с условными графическими обозначениями элементов рекомендуется установить параметр «Показывать сетку».

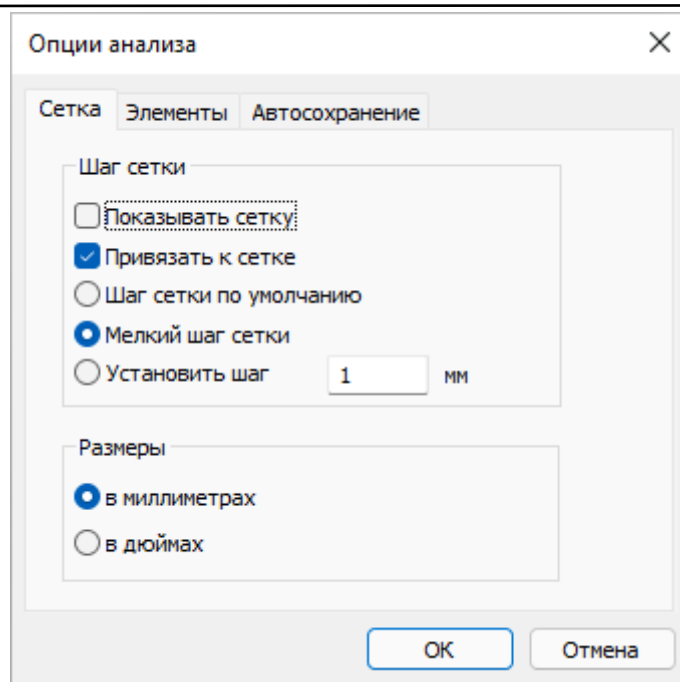


Рис. 7. Диалоговая панель установок редактирования

### 6.7.5. Цвета

С помощью изображенной на рис. 8 панели можно переустановить цвета основных элементов интерфейса программы.

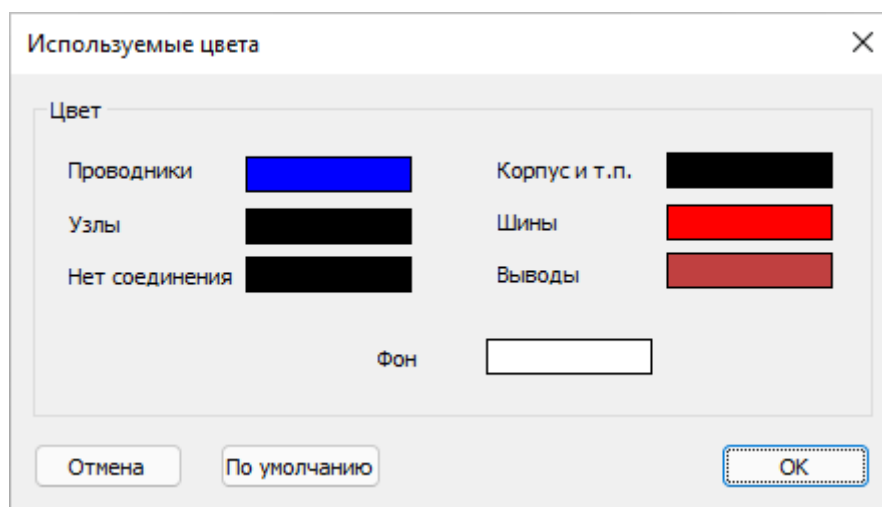


Рис. 8. Панель выбора цветов для основных элементов интерфейса программы

### 6.7.6. Координаты курсора

При выборе этого пункта над окном схемы появляется дополнительная панель с координатами курсора (рис. 9).

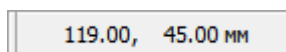


Рис. 9. Панель координат курсора в окне схемы

На панели отображаются текущие горизонтальные и вертикальные координаты курсора соответственно.

### **6.7.7. Горизонтальная визирная линия**

При выборе этого пункта в окне схемы появляется тонкая горизонтальная линия. Нажав левую клавишу мыши, эту линию можно зафиксировать в окне схемы. При повторном нажатии левой кнопки мыши, когда курсор расположен на линии, ее можно перемещать.

Визирные линии удобно использовать при расположении однотипных элементов на большом листе схемы. Нажимая правую кнопку мыши или нажимая клавишу Esc, выходим из режима работы с визирной линией. Устанавливая курсор на визирной линии и нажимая правую кнопку мыши, получим контекстное меню, используя которое можно удалить визирную линию.

### **6.7.8. Вертикальная визирная линия**

При выборе этого пункта в окне схемы появляется вертикальная визирная линия. Нажав левую клавишу мыши, эту линию можно зафиксировать в окне схемы. При повторном нажатии левой кнопки мыши, когда курсор расположен на линии, ее можно перемещать. Устанавливая курсор на визирной линии и нажимая правую кнопку мыши, вызываем контекстное меню, с помощью которого визирную линию можно удалить.

Нажимая правую кнопку мыши или нажимая клавишу Esc, выходим из режима работы с визирной линией.

Визирные линии удобно использовать при расположении однотипных элементов на большом листе схемы.

### **6.7.9. Нумерация**

Используя этот пункт меню, можно изменять порядок нумерации элементов и узлов, а именно, — выбрать нумерацию с увеличивающимся или, наоборот, с уменьшающимся значением индекса.

## Литература

1. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версия 9, 10. – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.: ил.
2. Антипенский Р. В., Фадин А. Г. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств. – М.: Техносфера, 2007. – 128 с.: ил.
3. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Том 1-2. – М.: Солон-Пресс, 2006.
4. Кеон Дж. OrCAD Pspice/ Анализ электрических цепей (+DVD). – М.: ДМК Пресс, 2008. – 640 с.: ил
5. Кучумов А. А., Кучумов А. И. Электроника и схемотехника. – М.: Гелиос АРВ, 2017. – 368 с.: ил.
6. Марченко А. Л. Основы электроники. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 296 с.: ил.
7. Панфилов Д. И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. – М.: Додека-XXI, 2002.
8. Разевиг В. Д. Система проектирования цифровых устройств OrCad. – М.: Солон-Р, 2000.
9. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001.
10. Хайнеман Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSPICE: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 336 с.: ил.
11. Хернтер Марк Е. Электронное моделирование в Multisim + DVD: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 488 с.: ил.
12. Харрис Д. М., Харрис С. Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера. – М.: ДМК-Пресс, 2017

---

NSK

## **Описание программы uSpice**