

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Часть 2**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» и  
«Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

## **Агеев Евгений Юрьевич**

Компьютерное моделирование и проектирование. Лабораторный практикум. Часть 2: Методические указания к лабораторным работам для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» и направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность 210105 – Электронные приборы и устройства) / Е.Ю. Агеев; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. – 77 с.

В методических указаниях приведено описание семи лабораторных работ, охватывающих материал по изучению компьютерного моделирования и проектирования.

Предлагаемый лабораторный практикум позволяет выполнять моделирование работы электронных схем с помощью программы Qucs, как на компьютерах с операционной системой Linux, так и Windows.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Компьютерное моделирование и проектирование оптических систем» и по направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность 210105 – Электронные приборы и устройства) по дисциплине «Компьютерное моделирование и проектирование электронных приборов и устройств»

© Агеев Евгений Юрьевич, 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ПРОЕКТИРОВАНИЕ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Часть 1**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» и  
«Электроника и микроэлектроника»

Разработчик

\_\_\_\_\_ Е.Ю. Агеев  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

## Содержание

Введение. Описание программы QUCS.....	5
1 Основы работы с программой .....	5
2 Моделирование на постоянном токе.....	12
3 Моделирование на переменном токе .....	26
4 Развертка процессов во времени .....	31
Лабораторная работа 1. Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора .....	36
1.1 Введение.....	36
1.2 Контрольные вопросы .....	36
1.3 Порядок выполнения работы .....	36
Лабораторная работа 2. Исследование характеристик и параметров полевого транзистора.....	42
2.1 Введение.....	42
2.2 Контрольные вопросы .....	42
2.3 Порядок выполнения работы.....	42
Лабораторная работа 3. Исследование усилительного каскада на биполярном (полевом) транзисторе на переменном токе (средние и нижние частоты).....	47
3.1 Введение.....	47
3.2 Контрольные вопросы .....	47
3.3 Порядок выполнения работы.....	48
Лабораторная работа 4. Исследование усилительного каскада на биполярном (полевом) транзисторе на переменном токе (верхние частоты).....	54
4.1 Введение.....	54
4.2 Контрольные вопросы .....	54
4.3 Порядок выполнения работы.....	55
Лабораторная работа 5. Исследование пассивных схем плавной регулировки усиления.....	60
5.1 Введение.....	60
5.2 Теоретическая часть.....	60
5.3 Контрольные вопросы .....	61
5.4 Порядок выполнения работы .....	61
Лабораторная работа №6. Исследование активных схем плавной регулировки усиления.....	64
6.1 Введение.....	64
6.2 Контрольные вопросы .....	64
6.3 Порядок выполнения работы .....	64
Лабораторная работа 7. Определение высокочастотных параметров биполярных транзисторов .....	72
7.1 Введение.....	72
7.2 Теоретическая часть.....	72
7.3 Контрольные вопросы .....	72
7.4 Порядок выполнения работы.....	73

## Введение. Описание программы QUCS

### 1 Основы работы с программой

При первом запуске Qucs создает папку ".qucs" в вашей домашней папке (если вы работаете в Windows-версии, то эта папка создается в директории "Document and Settings\Ваш\_Логин" системного диска). Каждый файл проекта сохраняется в этой папке или в одной из ее подпапок. После загрузки Qucs показывается главное окно, которое выглядит примерно как на рис. 1.

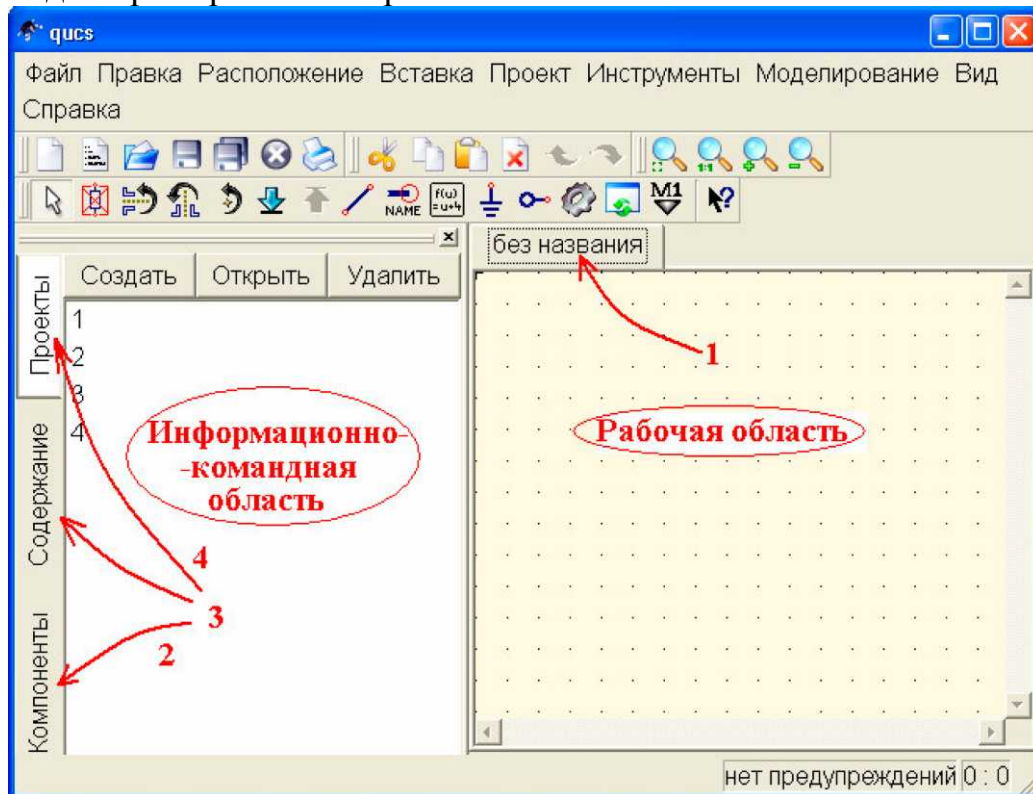


Рисунок 1 - Главное окно Qucs

С правой стороны расположена рабочая область, в которой содержатся схемы, документы показа данных и т. д. С помощью вкладок (1) над этой областью можно быстро переключиться на любой документ, открытый в данный момент. С левой стороны главного окна Qucs находится информационно-командная область, содержание которой зависит от состояния вкладок, расположенных с левой стороны: «Компоненты» (2), «Содержание» (3) и «Проекты» (4). В верхней части этой области находятся управляющие клавиши «Создать», «Открыть» и «Удалить», выполняющие соответствующие действия с проектами.

После запуска Qucs активируется вкладка «Проекты» (4). Если вы запустили программу в первый раз, эта область будет пуста, поскольку еще не создано ни одного проекта (На рис. 1 в этой области видны четыре проекта с именами: 1, 2, 3 и 4). Работа начинается с создания проекта и присвоения ему имени. Нажатие на вкладку «Создать» вызывает диалоговое окно рис. 2.

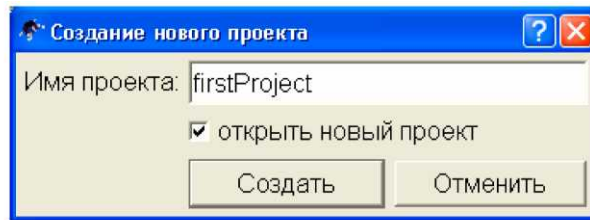


Рисунок 2 - Диалоговое окно создания проекта

Введите имя для вашего первого проекта, например, «firstProject» и нажмите кнопку «Создать». Qucs создает в вашей домашней папке папку проекта с соответствующим названием «firstProject\_prj». Каждый файл схемы, диаграммы или описания, принадлежащий этому новому проекту, будет сохранен в этой папке. Новый проект немедленно открывается (это можно прочитать в заголовке окна программы), автоматически генерируя первый документ-схему без названия. Вкладки информационно-командной области при этом переключаются в режим «Содержание», отображая в виде древообразной схемы различные аспекты содержимого проекта, рис. 3.

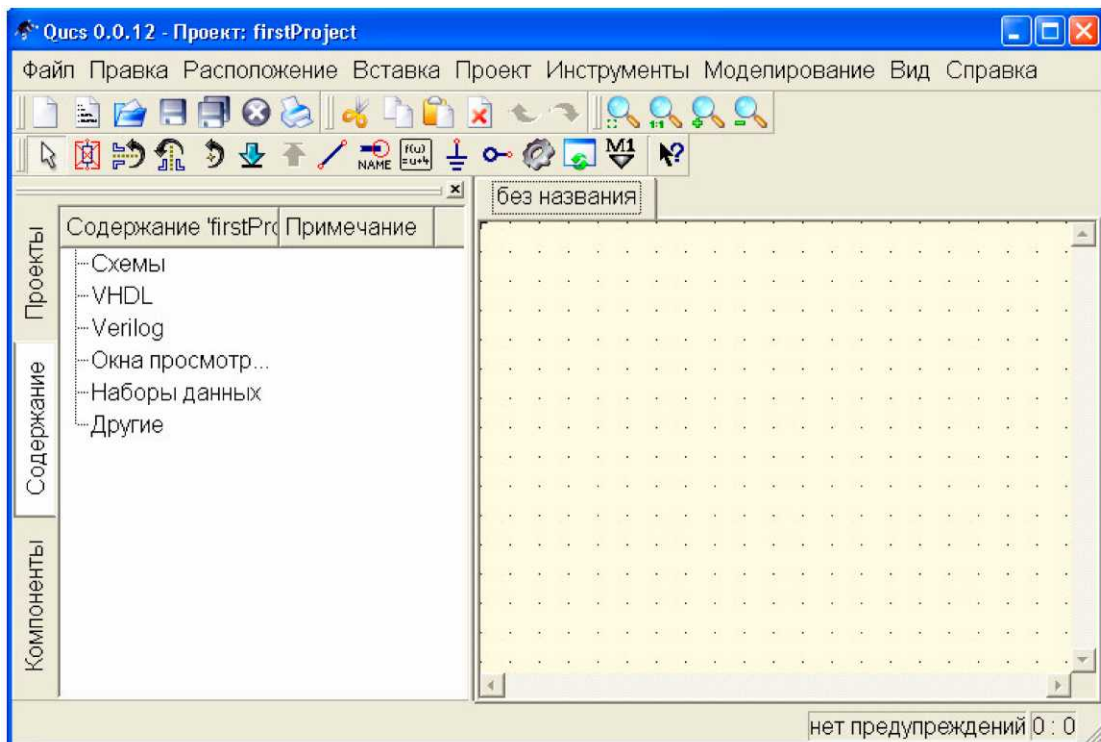


Рисунок 3 - Вид информационно-командной области в режиме «Содержание»

Здесь есть, например, такие «ветви» как VHDL и Verilog - языки программирования, широко используемые для описания электронных схем. Программа позволяет сохранить модель разработанной схемы в виде файла с описанием на одном из указанных языков или выполнить обратное преобразование, прочитав файл с таким описанием, отобразить его в виде схемы в окне программы. Языки VHDL и Verilog - стали стандартами описания электронных схем, поэтому в программу включена их

поддержка. Однако при создании исследуемой схемы и выполнении операций моделирования от пользователя не требуется знание указанных языков программирования. Вся работа основана на визуальном проектировании и автоматическом анализе схемы.

Начать работу по созданию схемы рекомендуется с операции сохранения документа, во время которой ему присваивается конкретное имя. Хотя создание схемы можно начинать и в документе без названия, при первой попытке выполнения моделирования, программа потребует ввести имя для обрабатываемого документа. Поэтому лучше это имя задать сразу. Для выполнения этой операции можно нажать пиктограмму дискеты на панели инструментов (или в меню «Файл» выбрать пункт «Сохранить» или «Сохранить как...», наконец, можно воспользоваться комбинацией клавиш Ctrl+S). В появившемся диалоговом окне (рис. 4) документу присваивается имя, например, «MyfirstSchem», а нажатие кнопки «Сохранить» приводит к созданию в папке проекта файла документа MyfirstSchem.sch.

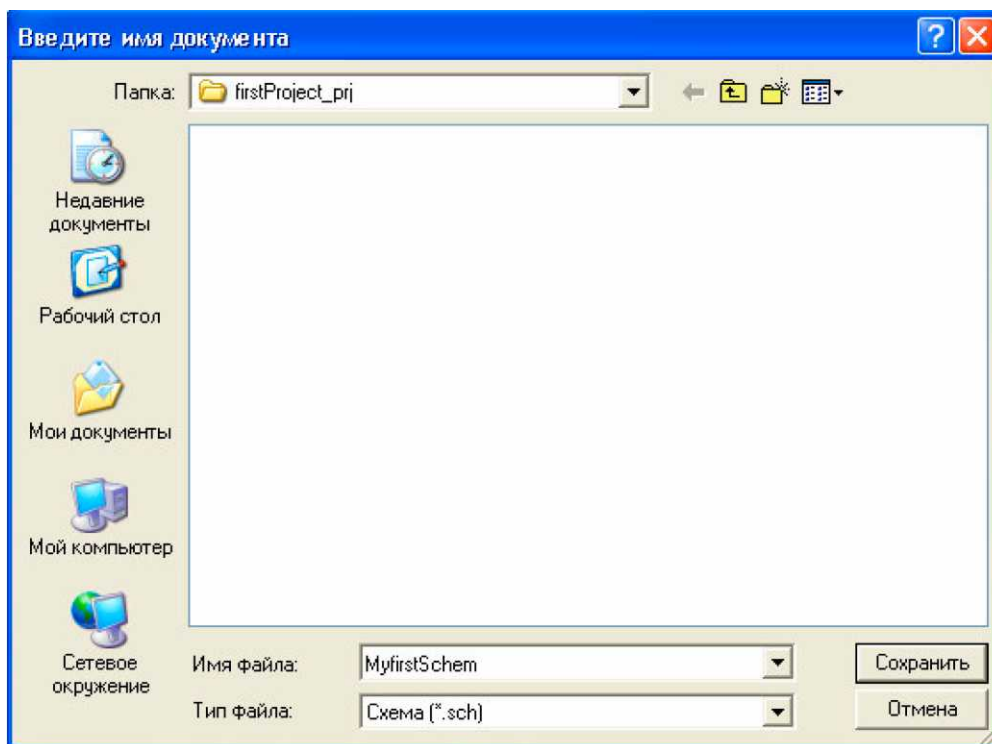


Рисунок 4 - Диалог сохранения документа

После этого имя документа-схемы появляется на вкладке рабочей области и в ветви «Схемы», рис. 5.

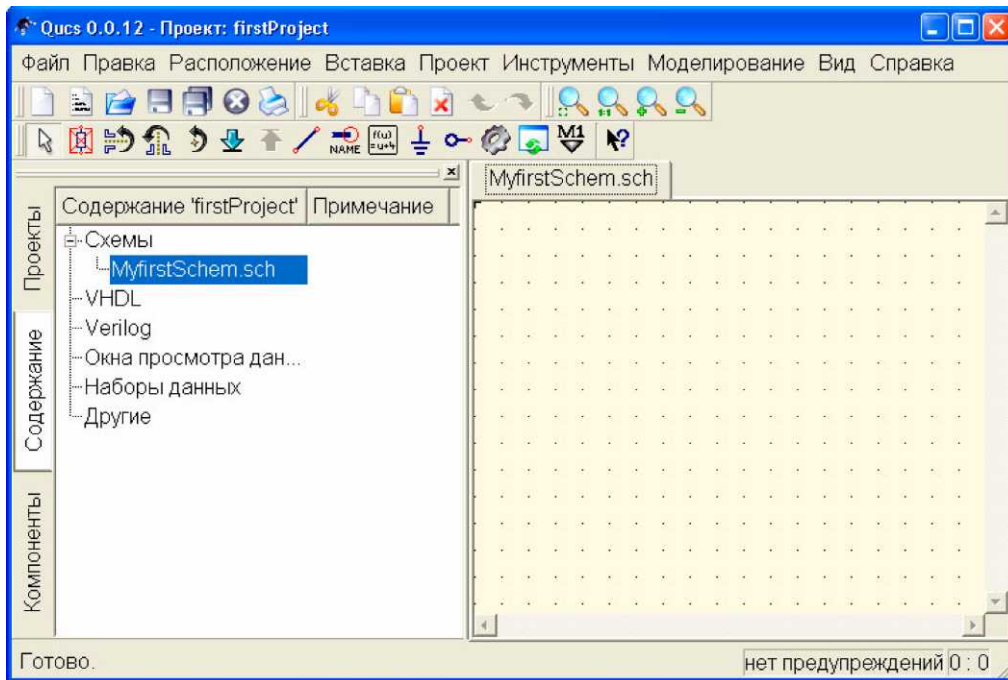


Рисунок 5 - Изменение содержимого ветви «Схемы» информационно-командного окна после сохранения документа

Все созданные в одном проекте документы, можно увидеть в окне программы в ветви «Схемы» на вкладке «Содержание» с левой стороны и в рабочей области, где активен один из документов, остальные показаны вкладками. Каждый проект может содержать как один документ, так и многие десятки.

Заметим, что документ «без названия» не отображается в ветви «Схемы», он как бы «не существует».

Для создания модели электронной схемы нужно перейти на вкладку «Компоненты». В верхней части информационно-командной области при этом появляется выпадающее меню, по-умолчанию отображающее первую строку: «Дискретные компоненты», рис. 6.

Ниже отображены сами компоненты соответствующего класса. Кроме «Дискретных компонентов», в число которых входят все пассивные элементы электрических цепей и некоторые специальные компоненты, например, «Реле», «Гиратор», и т.д., в меню компонентов девять пунктов:

- Источники
- Измерители
- Линии передачи данных
- Нелинейные компоненты
- Цифровые компоненты
- Файловые компоненты
- Виды моделирования
- Диаграммы
- Рисунки



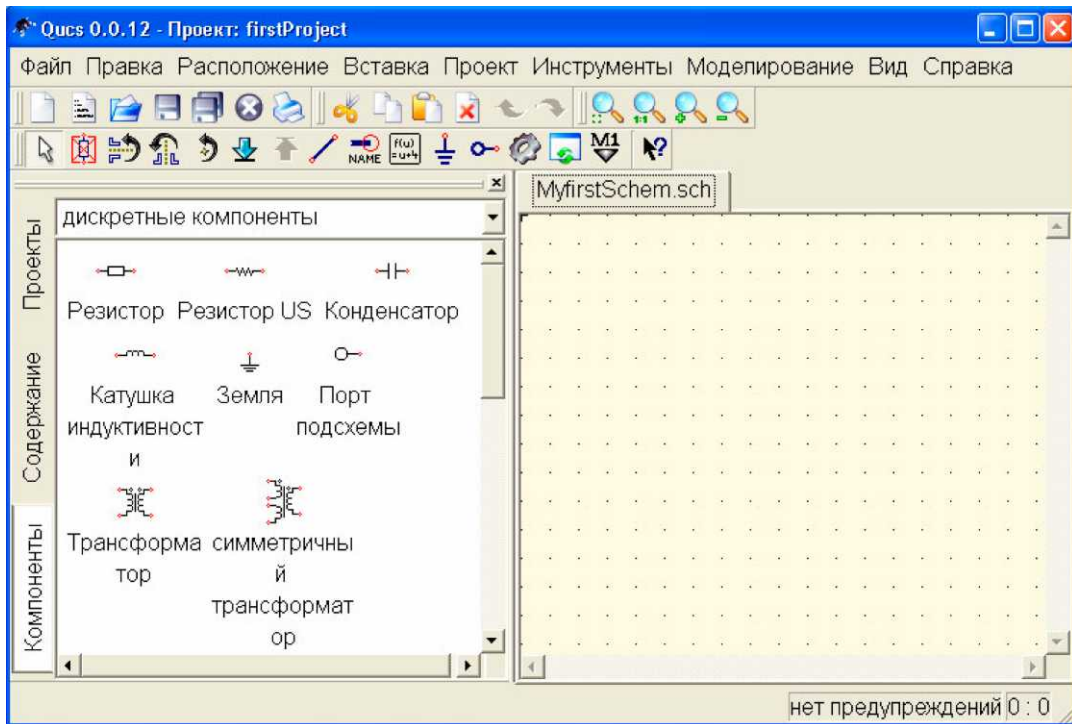


Рисунок 6 - Вид информационно-командной области при активизированной вкладке «Компоненты»

В лабораторном практикуме пункты меню: «Линии передачи данных», «Цифровые компоненты», «Файловые компоненты» и «Рисунки» использоваться не будут.

Активные элементы электрических цепей, такие как диоды и транзисторы, находятся в разделе «Нелинейные компоненты». В разделе «Источники» размещены источники постоянного и переменного тока и напряжения, а раздел «Диаграммы» позволяет выбрать способ отображения результатов моделирования.

Программа «Qucs» построена таким образом, что может выполнять различные виды моделирования электронных схем - на постоянном и переменном токе, с разверткой параметра, моделирование процессов во времени и т.д. Для выполнения того или другого вида моделирования необходимо явно указать этот вид моделирования на принципиальной схеме. Такое указание выполняется перетаскиванием кубика соответствующего вида моделирования из раздела «Виды моделирования» на рабочую область. Если этого не сделать и не указать вид моделирования, то при попытке выполнения моделирования будет сгенерирована ошибка. Одновременное же выполнение нескольких видов моделирования для одной и той же схемы не только допускается, но и используется чаще всего.

Рисование принципиальной схемы в рабочем окне заключается в перетаскивании соответствующих компонентов из левого фрейма в рабочую область и соединении их между собой. Для выделения компонента достаточно однократно щелкнуть на нем левой клавишей мышки. Держать левую клавишу нажатой во время перетаскивания не

обязательно. После этого при перенесении мышью указателя в рабочую область он сопровождается штриховым изображением выделенного компонента, а следующий щелчок левой клавишей мышки вставляет компонент в рабочую область. Если до вставки компонента выполнить нажатие правой клавиши мышки, то происходит поворот компонента на 90°. Отметим, что, вставив компонент в рабочую область, мы не отменяем выделение выбранного компонента. Однократно выбрав нужный компонент мы можем продолжать вставлять в рабочую область столько его копий, сколько необходимо для построения схемы. Снять выделение компонента можно клавишей «Esc» или выбором нового компонента в информационно-командной области.

Если же выполнить перетаскивание компонента с нажатой левой клавишей мышки, то при отпускании клавиши в рабочей области выделение компонента сразу отменяется, таким способом можно пользоваться для вставки в схему единственного компонента соответствующего типа.

Количество компонентов разных типов в программе Qucs очень велико, более сотни, это одно из важных преимуществ программы перед аналогичными по назначению продуктами других разработчиков. Благодаря этому, программа Qucs позволяет моделировать такие процессы, которые в других программах остаются, что называется «за кадром». Так, например, здесь наряду с обычным набором источников тока и напряжения, есть модели источников шумовых сигналов, в качестве компонентов схем могут использоваться линии связи различных видов и т.д.

Соединение компонент производится при переключении в режим рисования соединений. Такое переключение выполняется нажатием клавиш Ctrl+E или выбором на панели инструментов значка, символизирующего проводник, рис. 7.



Рисунок 7 - Пиктограмма проводника на панели инструментов

Отметим, что переключение в режим рисования соединительного проводника может происходить автоматически при задании опции «Начать проводку при нажатии кнопки на открытом узле» в меню «Файл -> Настройки программы».

Начало и конец проводника отмечаются нажатием левой клавиши мышки. Трассировка проводника осуществляется автоматически, линия, показывающая путь прохождения будущего проводника следует за курсором после первого нажатия и отображается пунктиром до тех пор, пока пользователь повторно не нажмет левую клавишу. Во время построения соединения линия имеет вид ломанной, состоящей из двух прямых участков, соединенных под прямым углом. Щелчок правой

клавишей мышки изменяет вид ломанной на зеркально противоположный. Иногда возникает потребность построить соединение элементов с помощью ломанной линии, имеющей более сложную структуру, чем два отрезка, соединенных под прямым углом. Для этого при проведении трассы проводника необходимо выполнить несколько «промежуточных остановок» при проведении проводника от одного компонента к другому, завершая рисование соединения нажатием левой клавиши мышки и, повторно выполнив нажатие, начиная новое соединение из той же точки. Никаких соединительных узлов на проводнике при таком изменении траектории его прохождения не образуется. Для проведения соединений «от» или «в» произвольную точку на уже существующем проводнике (точку без узла), необходимо переключиться в режим рисования проводника явно.

Для удаления отдельных компонентов или проводников их необходимо предварительно выделить щелчком левой клавиши мышки. Нажатие после этого клавиши «Del» приведет к удалению компонента или проводника. Более тонкое управление удалением участков проводников можно выполнить, переключив курсор в режим удаления. Сделать это можно щелкнув левой клавишей мышки пиктограмму красного креста на панели управления, рис. 8, или щелкнув на рабочем поле левой клавишей мышки при нажатой клавише «Del».



Рисунок 8 - Пиктограмма переключения курсора в режим удаления

В режиме удаления при наведении курсора на проводник и щелчке левой клавишей мышки удаляется только прямолинейный участок этого проводника, а не весь проводник.

При перенесении компонентов в рабочую область из информационно-командной области их свойства соответствуют идеальным компонентам. Свойства любого компонента можно изменить в диалоговом окне, которое открывается при двойном щелчке на компоненте.

Кроме того, в программе есть *библиотека компонентов*, содержащая десятки и сотни описаний свойств реальных, выпускаемых промышленностью (зарубежной) компонентов. Вызов библиотеки компонентов осуществляется нажатием горячих клавиш Ctrl+4 или выбором в меню «Инструменты» пункта «Библиотека компонентов». При этом появляется диалоговое окно рис. 9. Содержащиеся здесь компоненты разбиты по типам: «Мостовые выпрямители» (Bridges), «Диоды» (Diodes), «Биполярные транзисторы» (Transistors), «Операционные усилители» (OpAmps), «Полевые транзисторы с p-n переходом» (JFETs), «Полевые транзисторы с изолированным затвором» (MOSFET), «Светодиоды» (LEDs), «Стабилитроны» (Z-Diodes) и «Поверхности» (Substrates) для микрополосковых линий и линий задержки. Необходимый тип компонента можно выбрать в раскрывающемся меню в левом верхнем углу

диалогового окна. По-умолчанию это меню открыто на разделе мостовых выпрямителей, рис. 9. Компонент можно скопировать в буфер обмена с помощью расположенной на диалоговом окне соответствующей клавиши и вставить затем в рабочую область с помощью горячих клавиш Ctrl+V, нажатием на пиктограмму вставки, рис. 10, расположенную на панели управления или через пункт «Вставить» контекстного меню, возникающего при нажатии правой клавиши мышки. Компонент из библиотеки можно также просто перетащить на рабочее поле указателем мышки с нажатой левой клавишей.

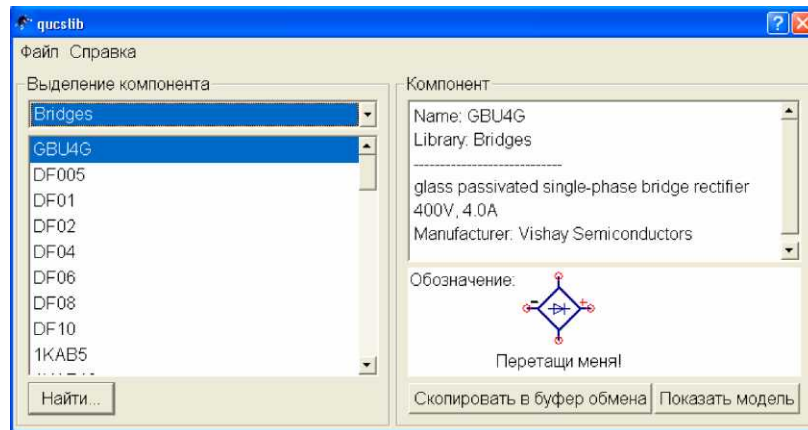


Рисунок 9 - Окно библиотеки компонентов



Рисунок 10 - Пиктограмма команды вставки из буфера обмена

В программе Qucs, как и в других подобных программах, выполняется математическое моделирование процессов, происходящих в электрических и электронных цепях. Результаты моделирования отображаются на отдельных «листах» проекта и сохраняются в файлах с расширением .drl (при желании диаграммы и графики могут быть скопированы и перенесены на рабочую область схемы в виде рисунка). Эти результаты могут быть представлены как в виде неких функций на графиках различного типа, так и в виде таблиц.

## 2 Моделирование на постоянном токе

### Простое моделирование

После того, как схема нарисована, можно выполнять моделирование ее работы. Программа Qucs имеет в своем арсенале восемь видов моделирования. Если учесть, что могут использоваться и комбинации этих видов, число вариантов моделирования возрастает до десятков и, по задумке авторов программы, должно удовлетворить самым изощренным запросам разработчика.

Рассмотрим выполнение самого простого моделирования: моделирования на постоянном токе. Этот вид моделирования присутствует практически в любой схеме, использующей источники питания. Для примера выберем простейшую схему - делителя напряжения, рис. 11.

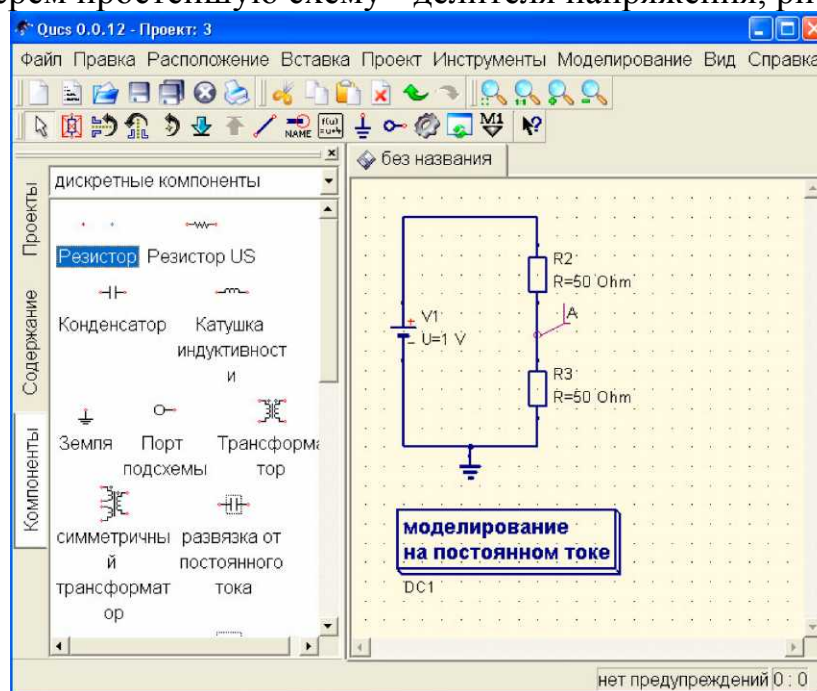


Рисунок 11 - Исследование делителя напряжения на постоянном токе

Перенесем в рабочую область два резистора из раздела «Дискретные компоненты», затем раскроем меню в верхней части левого фрейма и, выбрав пункт «Источники», добавим источник постоянного напряжения. Параметры компонентов по-умолчанию соответствуют представленным на рис. 11. Изменить их можно через диалоговое окно свойств компонента, которое открывается при двойном щелчке на компоненте левой клавишей мышки. Это же окно можно вызвать, выбрав пункт «Изменить свойства» в контекстном меню, появляющемся при нажатии на компоненте правой клавиши мышки. Наконец, можно отредактировать номинальное значение компонента, щелкнув левой клавишей мышки в поле отображения значения на схеме.

Для задания величины параметра компонента можно использовать три типа записи:

- стандартную;
- научную;
- инженерную.

При использовании стандартного типа записи номинальное значение параметра указывается числом, например, 1000. Научный тип - это запись вида  $1e3$  или  $1e+3$ , где символ «e» означает умножение на 10 в степени, обозначенной числом, следующим за этим символом. Обе записи  $1e3$  и  $1e+3$  соответствуют числу 1000, запись  $1e-3$  соответствует числу 0.001. Наконец, инженерная запись основана на использовании буквенных

коэффициентов. Программа распознает следующие коэффициенты абсолютных значений:

- **T** - «Тера», домножение номинала на  $10^{12}$ ;
- **G** - «Гига», домножение номинала на  $10^9$ ;
- **M** - «Мега», домножение номинала на  $10^6$ ;
- **k** - «кило», домножение номинала на  $10^3$ ;
- **m** - «милли», домножение номинала на  $10^{-3}$ ;
- **u** - «микро», домножение номинала на  $10^{-6}$ .

В связи с отсутствием в английском алфавите греческого символа «мю», используется английская буква «и», схожая по написанию;

- **n** - «нано», домножение номинала на  $10^{-9}$ ;
- **p** - «пико», домножение номинала на  $10^{-12}$ ;
- **f** - «фемто», домножение номинала на  $10^{-15}$ ;
- **a** - «атто», домножение номинала на  $10^{-18}$ .

Например, запись «1 к» соответствует числу 1000. Инженерные приставки чувствительны к регистру, т.е. «т»-малое и «М»-большое - имеют разное значение.

Программа позволяет указывать для компонентов и единицы измерений их номинальных значений. Разрешены следующие условные обозначения:

- **Ohm** - сопротивление в омах;
- **s** - время в секундах;
- **S** - проводимость в сименсах;
- **K** - температура в кельвинах;
- **H** - индуктивность в генри;
- **F** - емкость в фарадах;
- **Hz** - частота в герцах;
- **V** - напряжение в вольтах;
- **A** - ток в амперах;
- **W** - мощность в ваттах;
- **m** - длина в метрах.

При использовании условных обозначений также «работают» инженерные приставки. Т.е. можно указать для сопротивления величину номинала 1m без указания единиц измерения, а можно 1 mOhm, и то и другое определение дадут одинаковый результат. Обратите внимание на совпадение обозначения длины в метрах и приставки «милли». Длину нельзя задать в метрах, могут использоваться только производные единицы, например, - mm -миллиметр. На самом деле, при разработке микрополосковых линий в СВЧ устройствах их размеры далеки от метровых, поэтому длина всегда измеряется достаточно малыми величинами.

В программе нет жестких требований по обязательному применению только одного способа задания номинальных значений для всех элементов схемы. В принципе, использование для разных элементов одной и той же схемы разных способов задания параметров никак не отразится на



результате моделирования. Единообразие в этом случае - это скорее требование правильной организации труда разработчика. Оно поможет легче работать со схемой.

Все виды аналогового моделирования, в том числе и моделирование на постоянном токе, требуют наличия в схеме точки для отсчета потенциала - точки заземления или просто «Земли». Элемент «Земля» присутствует среди дискретных компонентов, он отображается и на панели инструментов в верхней части окна программы, кроме того, для активации этого элемента можно использовать комбинацию клавиш Ctrl+G. Как показано на рис.11, мы добавили на схему этот элемент и подключили его к отрицательному выводу источника питания.

Задача моделирования на постоянном токе сводится к тому, что мы хотим определить потенциалы в определенных точках схемы и токи в ее ветвях. Для указания программе точек, для которых выполняется расчет потенциала, используется элемент «Метка», изображенный на панели инструментов пиктограммой рис. 12. Для активизации этого элемента можно также использовать комбинацию клавиш Ctrl+L.



Рисунок 12 - Пиктограмма метки

После установки метки в конкретную точку схемы, открывается диалоговое окно, в котором задается имя для создаваемой метки. В примере на рис. 11 метка обозначена буквой А.

Заключительным действием перед запуском процесса моделирования является перенесение на рабочую область кубика с указанием вида моделирования. Вид моделирования выбирается из левого фрейма при переходе на закладке «Компоненты» в меню «Виды моделирования».

Процесс моделирования запускается нажатием левой клавишей мышки пиктограммы шестеренки на панели инструментов, рис.13, или нажатием функциональной клавиши F2.



Рисунок 13 - Пиктограмма запуска моделирования

В процессе моделирования отображается окно рис. 14, в которое выводится информация о исходных данных для расчета и этапах обработки схемы в виде горизонтальной бегущей полоски - прогресс-бара.

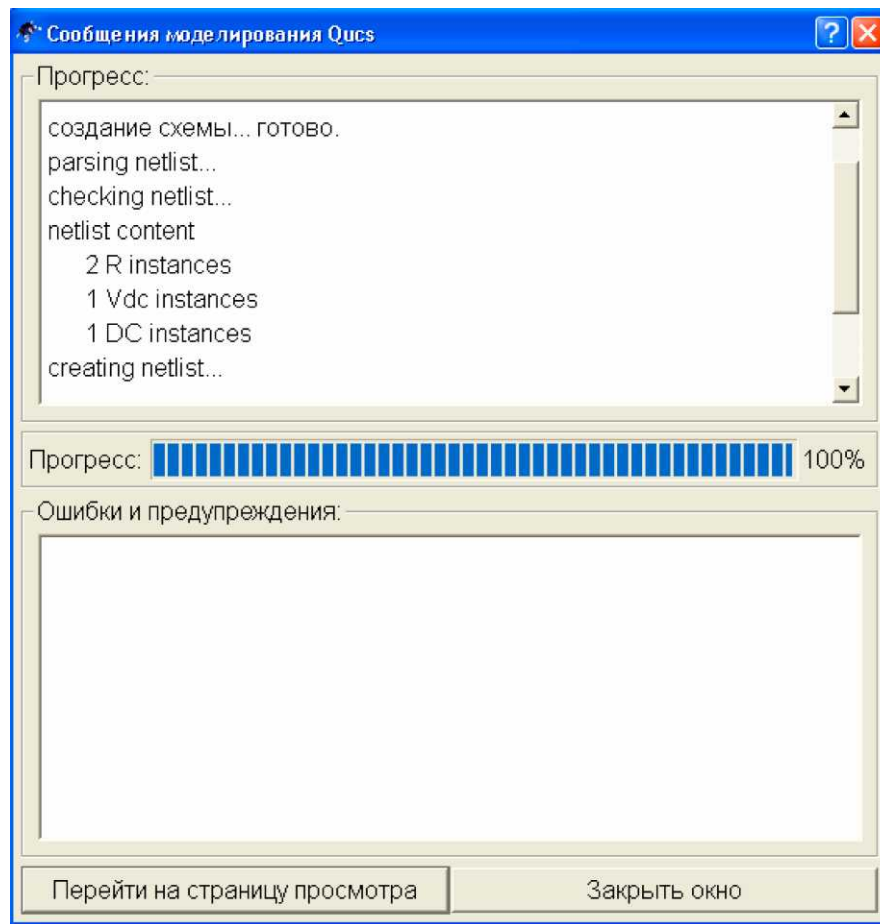


Рисунок 14 - Окно обработки данных

Настройки программы по-умолчанию таковы, что после завершения расчета автоматически открывается окно отображения диаграмм, а окно, показанное на рис. 14, пропадает. Для простых схем, подобных той, что мы выбрали для примера, время расчета невелико и мы видим только промелькнувшее на экране окно обработки. Изменить поведение программы можно, сняв галочку «Открыть просмотр данных после моделирования» в диалоговом окне «Файл -> Настройки документа».

В этом случае окно рис. 14 останется на экране и мы сможем просмотреть этапы моделирования, выполняемые программой. Конечно, специфическая информация, выводимая в это окно будет больше понятна программистам, но иногда она может быть полезна при анализе ошибок, допущенных в схеме. Впрочем, программа всегда записывает служебный лог-файл с информацией о результатах последнего моделирования. Вызвать встроенный редактор с отображением этого файла можно нажатием функциональной клавиши F5.

В окне отображения диаграмм после окончания моделирования ничего не отображается. Это может вызвать недоумение - проведено моделирование и где же результаты? Дело в том, что программа, получив в ходе моделирования некие расчетные величины, может представить их по-разному. Для того, чтобы увидеть эти результаты, нужно указать программе, как она должна их отобразить. В открывающемся по-



умолчанию после выполнения моделирования меню «**Диаграммы**» в левом фрейме находятся 11 типов диаграмм. Выберем табличное представление и перенесем диаграмму этого типа в рабочую область на окно просмотра данных. Окно просмотра данных и файл с именем MyfirstSchem.dpl создаются автоматически в процессе моделирования. Программа построена так, что результаты моделирования отделяются от исходной схемы и даже хранятся в отдельном файле. Но мы можем, если захотим, вставить диаграмму и на рабочую область в поле отображения схемы.

Как только мы сделаем щелчок левой клавишей мышки на рабочей области, открывается диалоговое окно свойств создаваемой диаграммы, рис.15.

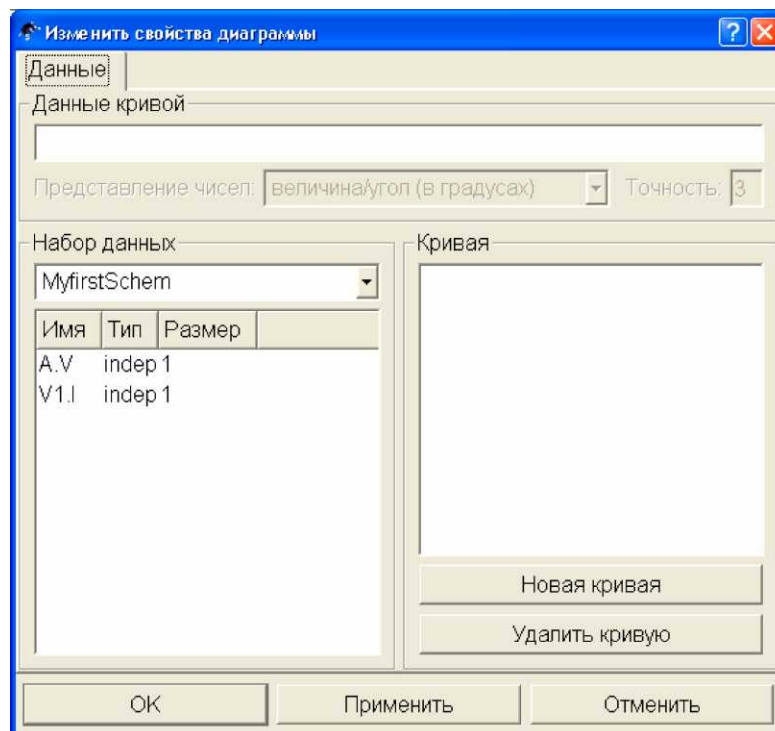


Рисунок 15 - Диалоговое окно свойств диаграммы

В этом окне необходимо выбрать переменную, значение которой было рассчитано программой и которую мы хотим отобразить на диаграмме. Все рассчитанные переменные отображаются в окне «**Набор данных**». Двойной щелчок на любой из переменных приводит к тому, что эта переменная появляется в окне «**Кривая**» и, после нажатия клавиши «**ОК**», будет отображена на диаграмме. Мы можем перенести в окно «**Кривая**» одну из рассчитанных переменных, несколько переменных или все, но отображены на диаграмме могут быть только те переменные, которые видны в окне «**Набор данных**».

Необходимо учесть, что в программе используются следующие условные обозначения:

• УзелЦепи. V	Постоянное напряжение в узле УзелЦепи
• ИмяКомпонента.1	Постоянный ток через компонент ИмяКомпонента
• УзелЦепи-v	Переменное напряжение в узле УзелЦепи
• ИмяКомпонента.1	Постоянный ток через компонент ИмяКомпонента
• УзелЦепи.Vt	Мгновенное значение напряжение в узле УзелЦепи
• ИмяКомпонента. It	Мгновенное значение тока через компонент ИмяКомпонента

Создавая схему электронной цепи мы формируем и тот набор переменных, который будет рассчитан программой. Так, например, в наборе данных, показанном на рис. 15 можно видеть потенциал метки «А». Появление этой переменной в наборе данных связано с размещением метки на схеме. Автоматически программа ничего не рассчитывает, кроме тока, протекающего через источник. Соответствующую переменную можно видеть в наборе данных на рис. 15. У расчета программой тока источника есть одна особенность, -считается, что ток внутри источника движется от вывода с более высоким потенциалом к выводу с более низким потенциалом. Во внешней по отношению к источнику цепи ток протекает тоже от «плюса» к «минусу», поэтому токи внутри и вне источника оказываются противоположно направленными (на самом деле внутри источника ток движется от «минуса» к «плюсу»). Эту особенность необходимо учитывать при использовании рассчитанного значения тока источника для определения тока во внешней цепи, домножив это значение на (-1).

Для расчета тока в отдельных ветвях схемы или падений напряжения на отдельных элементах, а не относительно нулевого потенциала, можно применить измерительные приборы: амперметр или вольтметр, подключив их к собранной схеме. В этом случае в наборе данных после расчета будут доступны переменные с показаниями приборов.

Другим, более универсальным способом добавления расчетных переменных, является математическая запись выражений в виде формулы, размещенной в рабочей области. Работа с формулами будет рассмотрена ниже. При выполнении же анализа на постоянном токе часто вполне достаточно знать потенциалы в той или иной точке схемы, а для этого - просто расставить метки в требуемых местах. Полученный в результате расчета результат для нашего примера в виде табличной диаграммы показан на рис. 16. Отрицательное значение тока источника связано с упомянутой выше особенностью программы.

number	A.V	V1.I
1	0.5	-0.01

Рисунок 16 - Табличная диаграмма результатов расчета делителя напряжения

### Моделирование на постоянном токе с развержкой параметра

Моделирование с развержкой параметра - один из самых часто используемых приемов моделирования. Построим простую цепь с биполярным транзистором, включенным по схеме с ОЭ, рис. 17. Выполним анализ зависимости коэффициента усиления по току биполярного транзистора от величины тока коллектора. Так как ток коллектора зависит от тока базы транзистора, то очевидно, что параметром, развертку которого необходимо выполнить, будет ток базы. С учетом этого строим принципиальную схему.

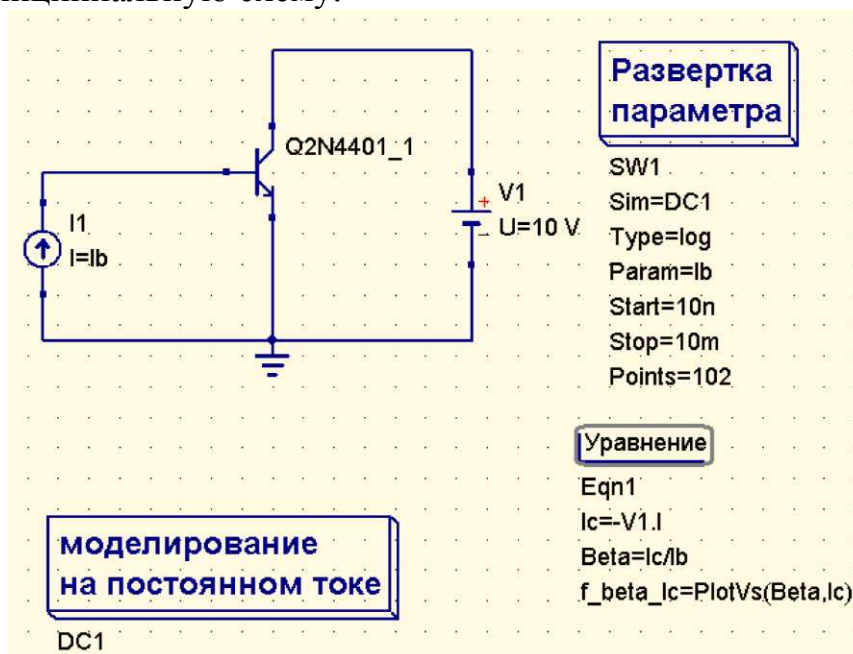


Рисунок 17 - Цепь с нелинейным элементом для выполнения моделирования с развержкой параметра

Для питания базы используем источник постоянного тока, величину этого тока установив в общем виде -  $I_b$  (вместо значения по-умолчанию 1мА). Используем модель реального транзистора Q2N4401\_1 из библиотеки компонентов, для того, чтобы зависимость была более

наглядной. Для питания коллекторной цепи транзистора установим источник постоянного напряжения 10 В. После соединения элементов схемы, перенесем на рабочую область кубики, символизирующие моделирование на постоянном токе и развертку параметра. Обратите внимание, что каждый кубик имеет имя. Каждый вид моделирования выполняется, вообще говоря, независимо от других. Чтобы согласовать работу двух используемых видов моделирования, в свойствах моделирования с разверткой параметра:

- 1) укажем имя моделирования на постоянном токе - DC1, рис. 18;
- 2) зададим параметр развертки -  $I_b$ ;
- 3) установим логарифмический тип развертки параметра (можно задать линейную развертку или использовать список значений);
- 4) определим начальное и конечное значение тока базы, исходя из разумного диапазона значений (ясно, что необходимо ориентироваться на справочные данные транзистора). Так, на рис. 18 выбраны, соответственно, 10 наноампер и 10 миллиампер;
- 5) завершается настройка свойств моделирования с разверткой параметра изменением (если необходимо) в нижнем поле формы общего количества расчетных точек. По-умолчанию в этой строке всего 20 точек. В случае сложной кривой зависимость, построенная по такому количеству точек может быть недостаточно гладкой. В примере на рис. 18 выбрано 102 точки, т.к. при этом получается ровно по 17 точек на декаду развертки.

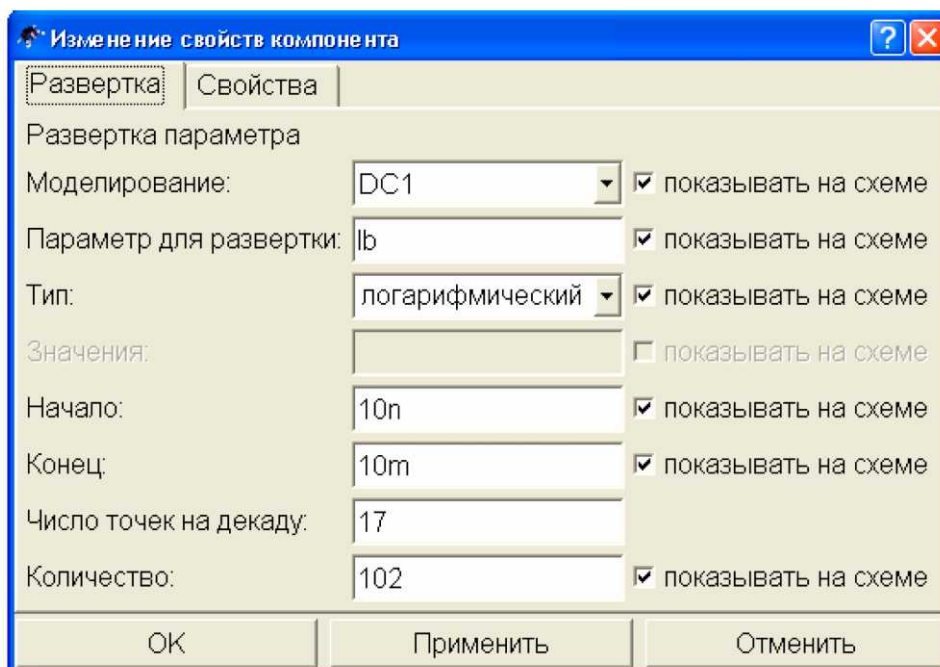


Рисунок 18 - Окно свойств моделирования с разверткой параметра

Настройка моделирования завершена, но выполнять его еще рано. Как уже говорилось, программа делает расчет только заданных величин. Нам необходимо построить зависимость коэффициента усиления транзистора по току от величины тока коллектора, но ни та, ни другая переменная не

будут рассчитаны, т.к. неизвестно, как их считать. Универсальным способом определения переменных является введение в схему уравнений или блока вычислений, определяющих эти переменные. Для того, чтобы вставить в схему блок вычислений достаточно щелкнуть левой клавишей мышки на пиктограмме уравнения, расположенной на панели управления, рис. 19.

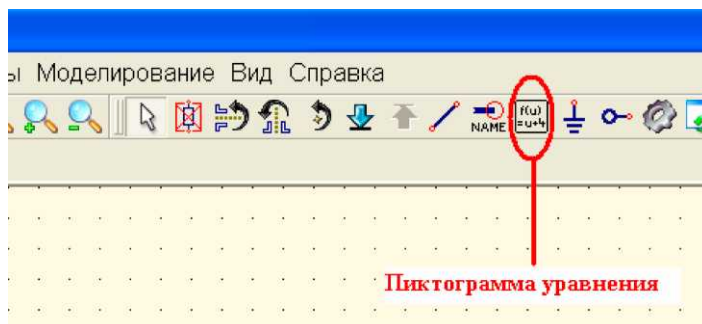


Рисунок 19 - Пиктограмма уравнения на панели управления

Это приводит к переключению программы в режим ввода уравнений в блоке вычислений, что сопровождается изменением формы курсора, - он отображается теперь пунктирным уголком. В режиме ввода уравнений щелчок левой клавишей мышки на свободном месте рабочей области вставляет в схему «пустое» уравнение вида  $y = 1$ , рис. 20.

Уравнение  
Eqn1 . . .  
y=1 . . .

Рисунок 20 - Вид уравнения по-умолчанию

Каждый блок вычислений может содержать несколько уравнений. Двойной щелчок левой клавишей мышки, либо выбор из контекстного меню, вызываемого правой клавишей мышки, строки «Изменить свойства», открывает окно свойств блока вычислений, рис. 21.

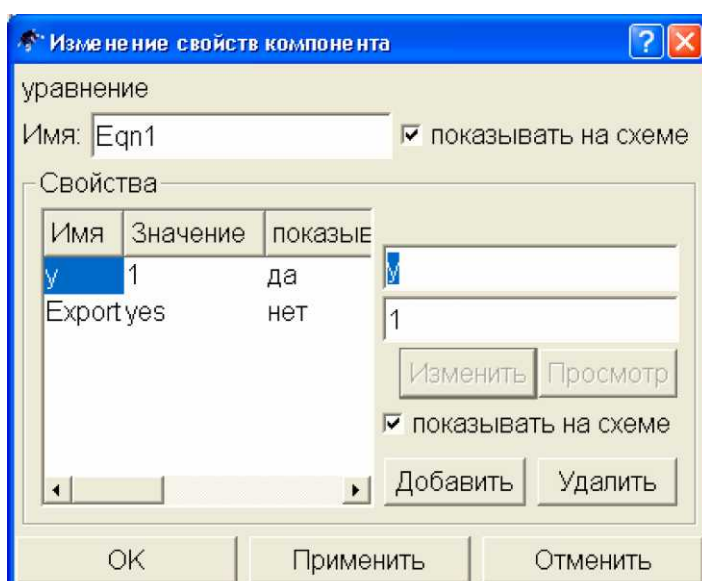


Рисунок 21 - Окно свойств блока вычислений

В этом окне в двух полях справа мы можем изменить имя функции (в верхнем поле, имя функции по-умолчанию  $y$ ) и записать формулу (в нижнем поле), по которой выполняется расчет. Нажатие клавиши «Применить» записывает сделанные изменения и они становятся видны слева в окне свойств блока вычислений. Снова изменив имя функции и задав новую формулу для ее расчета, с помощью клавиши «Добавить» мы можем увеличивать число уравнений в блоке вычислений. И, наоборот, выбрав в списке слева какую-то строку с уже введенным уравнением, с помощью клавиши «Удалить», можем удалить его. В примере, показанном на рис. 17 блок вычислений содержит три уравнения:

1. Ток коллектора задан равным току источника питания коллекторной цепи с обратным знаком:  $I_c = -V1.I$ ;

2. Коэффициент усиления транзистора по току определен как отношение тока коллектора к току базы:  $Beta = I_c/I_b$ ;

3. Функциональная зависимость коэффициента усиления по току от величины тока коллектора определена с помощью встроенной функции PlotVs ():

$$f\_beta\_Ic = \text{PlotVs}(Beta, I_c).$$

При записи выражений в поле формулы используются обычные символы математических операций:

- + сложение;
- - вычитание;
- / деление;
- \* умножение;
- % остаток от деления;
- ^ возведение в степень.

Программа Qucs содержит большое число встроенных функций, как элементарных математических (тригонометрические, логарифмические и т.п.), так и специальных (функции Бесселя, преобразования Фурье, преобразования параметров четырехполюсника и т. д.). С полным списком функций и краткой справкой по ним можно ознакомиться в справочной системе программы в разделе «Краткое описание математических функций».

После задания функциональных зависимостей для рассматриваемого примера было выполнено моделирование. Для отображения результатов которого выбран декартов график. Окно свойств диаграммы при построении графика показано на рис. 22.

В окне свойств в поле «Набор данных» можно видеть все функции, определенные в блоке вычислений. Т.к. необходимо построить только одну функциональную зависимость, выбираем именно ее. Обратите внимание, что для функциональных зависимостей в колонке «Тип» стоят символы «dep» - сокращение от «dependent», а в следующей колонке показано от какого аргумента зависит эта функция. Независимые переменные отмечены символами «indep» - independent, это просто наборы значений. Таких переменных в нашем примере всего две: ток базы  $I_b$  и

Versus.0001. Набор значений тока базы получен в результате выполнения моделирования с разверткой параметра - 102 точки, в которых ток базы изменяется по логарифмическому закону от 10 наноампер до 10 микроампер. Набор «Выборки из..» Versus.0001 создан автоматически функцией PlotVs() и содержит 102 значения тока коллектора, при заданных в наборе Ib токах базы.

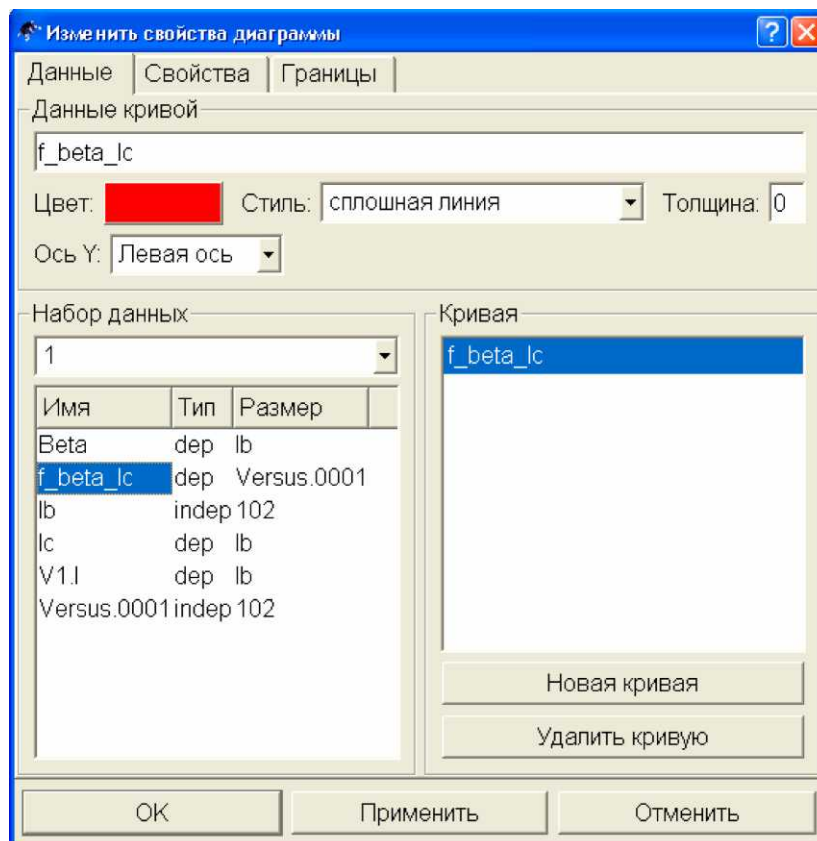


Рисунок 22 - Окно свойств диаграммы для рассматриваемого примера

Откроем закладку «Свойства» диаграммы, рис. 23. По-умолчанию ось абсцисс графика будет подписана именем Versus.0001, введем в поле «Метка оси X» другое значение - Ic (Можно использовать надписи и на русском языке). Кроме того, установим флажок «Логарифмическая разметка оси X», чтобы более подробно увидеть область наибольших изменений коэффициента усиления по току. Результирующая зависимость показана на рис. 24. Линии сетки отображаются на графике, если установлен флажок «Показывать сетку». На вкладке «Границы» можно, отменив автоматическое определение границ графика и шага по осям, назначить эти величины вручную.

Для просмотра значений функции в различных точках на ее графике применяются маркеры. Установить маркер на график можно переключившись в режим установки маркера комбинацией клавиш Ctrl+B или щелчком левой клавишей мышки по символу маркера на панели управления, рис. 25. Курсор превращается в треугольник. После этого,



щелчок левой клавишей мышки на любой точке кривой формирует на графике сноску с изображением значений функции и аргумента, рис. 26.

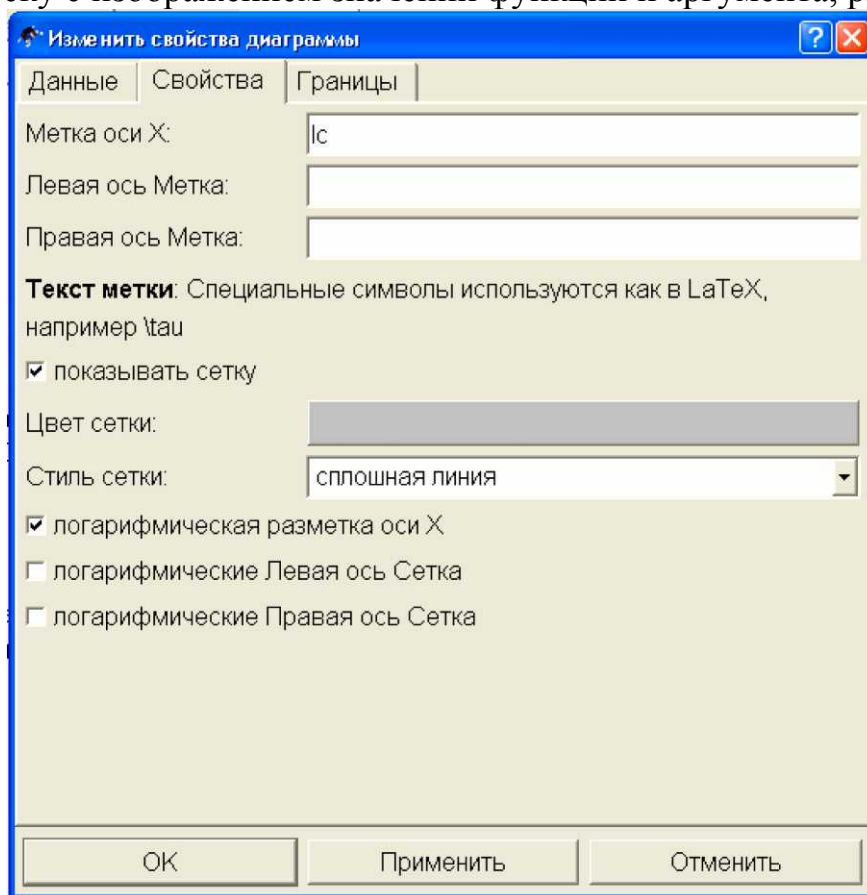


Рисунок 23 - Окно свойств графика функции

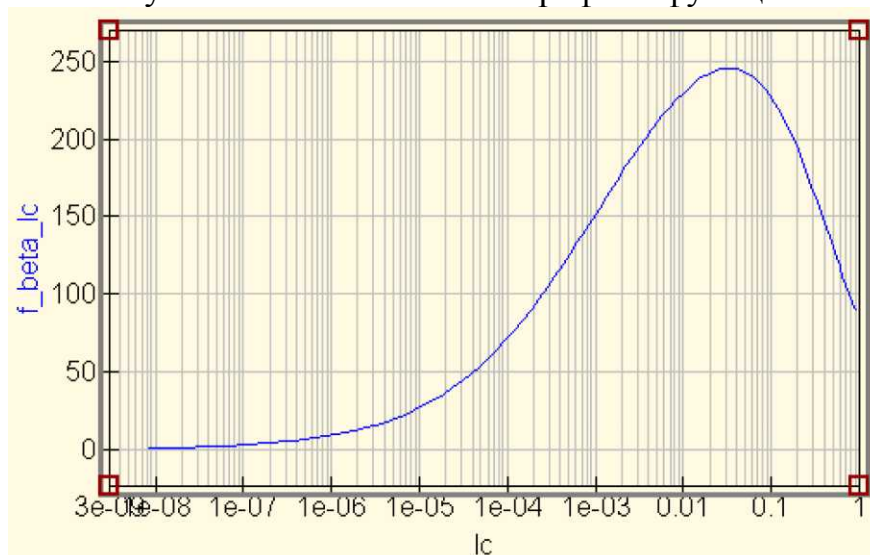


Рисунок 24 - График зависимости коэффициента усиления транзистора по току от величины тока коллектора



Рисунок 25 - Пиктограмма маркера на панели управления



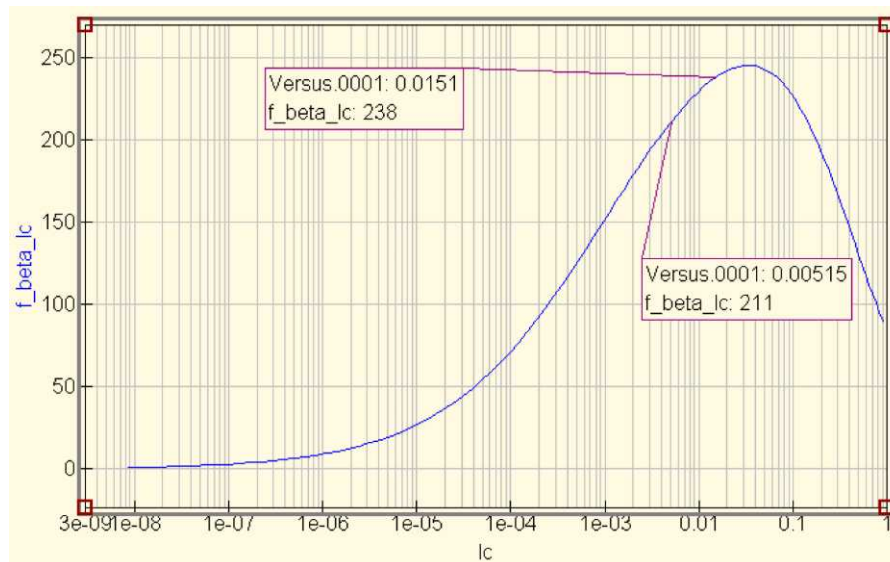


Рисунок 26 - Установка маркеров на график функции

Выделив щелчком левой клавиши мышки любой из маркеров, точку привязки к графику маркера можно перемещать вдоль кривой клавишами управления движением курсора - стрелками «вправо», «влево».

Используя моделирование с разверткой параметра с помощью программы Qucs достаточно легко построить и график функции, зависящей от двух (или более) переменных. Для примера рассмотрим, как можно построить семейство выходных характеристик биполярного транзистора. Внесем в схему, показанную на рис. 17 небольшие изменения. Напряжение источника питания коллекторной цепи зададим в общем виде, рис. 27.

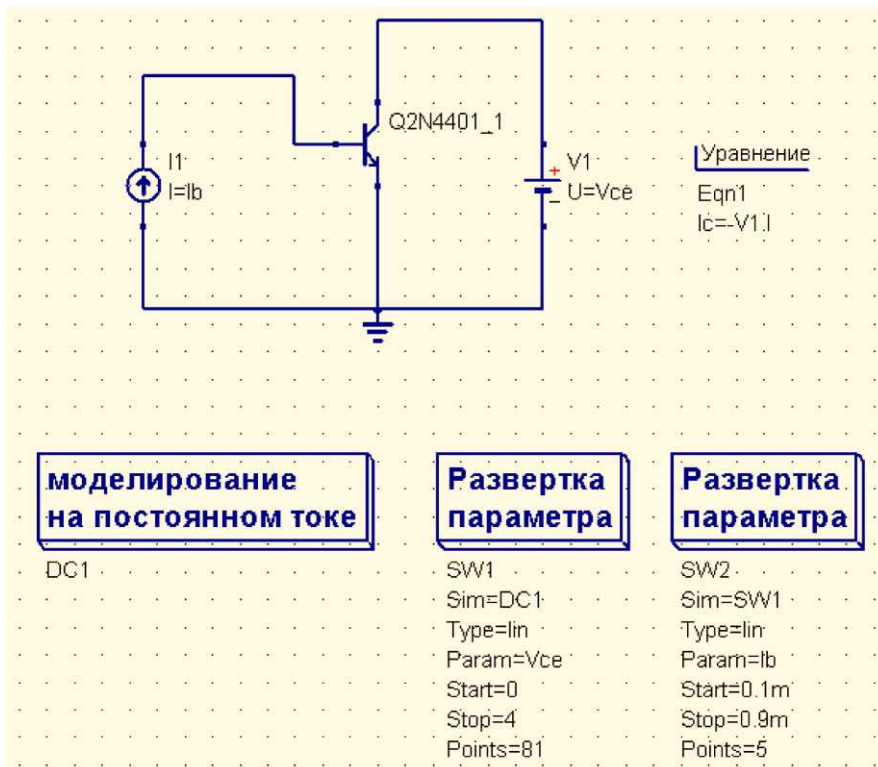


Рисунок 27 - Принципиальная схема для построения выходных ВАХ биполярного транзистора

На рабочей области добавим еще один блок моделирования с разверткой параметра. Первый блок моделирования будет изменять напряжение питания коллекторной цепи. Эти изменения происходят линейно, от 0 до 4 вольт. Задав общее количество точек - 81, мы обеспечим шаг изменения напряжения 0,05 В.

Второй блок моделирования с разверткой параметра будет изменять величину базового тока для первого блока. Поэтому в свойствах моделирования для второго блока мы должны указать имя первого блока. Вполне достаточно получить на графике пять выходных характеристик. Значения токов базы, при которых строится выходная характеристика, установим линейно изменяющимися от 100 до 900 мкА с шагом 200 мкА, это даст необходимые пять значений тока базы. В блоке вычислений нам понадобится только одно уравнение - определяющее ток коллектора, т.к. необходимо построить зависимость именно этого тока от напряжения питания коллекторной цепи и тока базы.

Результат моделирования показан на рис. 28.

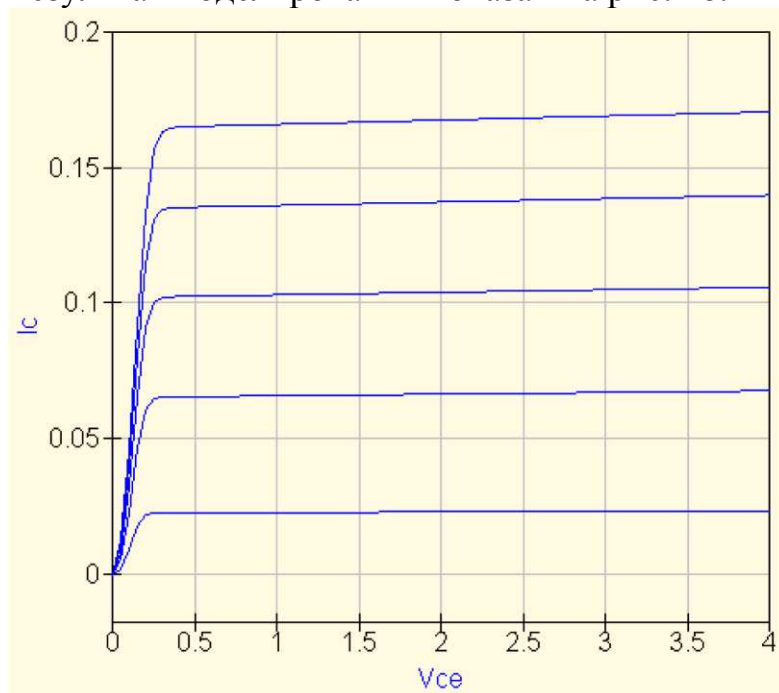


Рисунок 28 - Выходные ВАХ биполярного транзистора, полученные с помощью программы

### 3 Моделирование на переменном токе

Анализ работы электронных схем на переменном токе в программе Qucs позволяет выяснить, как ведет себя схема при изменении частоты. Другими словами, использование моделирования на переменном токе сразу предполагает изучение работы схемы не на определенной, заданной частоте, а в некоторой полосе частот, хотя, при необходимости, можно выполнить моделирование и для переменного тока одной определенной частоты.

## Простое моделирование

Рассмотрим, как выполняется моделирование работы на переменном токе простой RC-цепи, представляющей собой фильтр высоких частот (ФВЧ). Схема цепи представлена на рис. 29. Соединив между собой элементы цепи и источник переменного напряжения, добавим на схему две метки, одну - сразу после источника напряжения, другую - между сопротивлением и емкостью. Потенциал первой метки - это амплитудное значение переменного напряжения источника, потенциал второй метки - амплитудное значение переменного напряжения с выхода ФВЧ. Добавим также на рабочее поле кубик моделирования на переменном токе, указав в его свойствах диапазон частот от 0 до 1000 Гц, линейное изменение частоты и общее количество рассчитываемых точек.

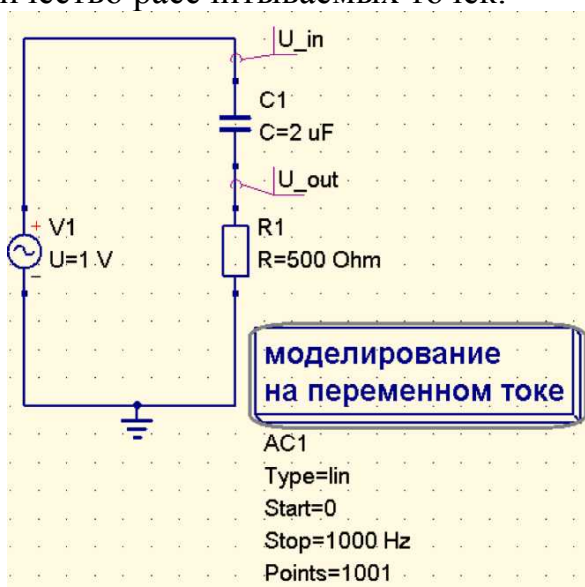


Рисунок 29 - Схема анализа работы ФВЧ на переменном токе

Результаты моделирования работы фильтра на переменном токе построим на декартовом графике, рис. 30. Мы можем одновременно вывести на график амплитуды переменного напряжения на входе и выходе ФВЧ.

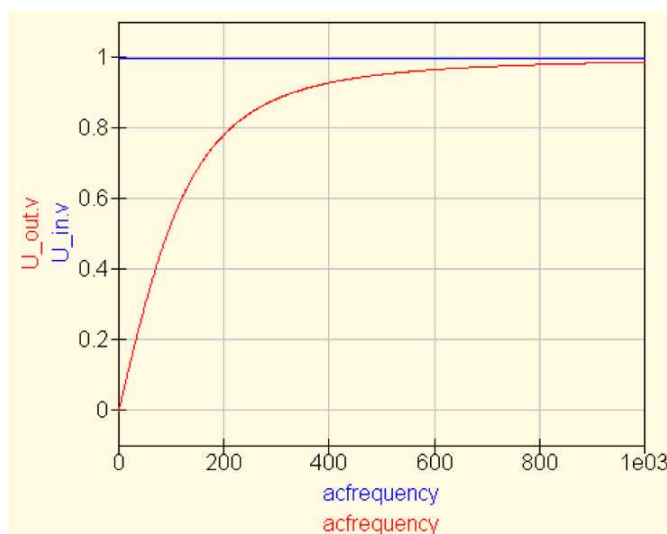


Рисунок 30 - АЧХ ФВЧ, построенная по результатам моделирования

Построение табличной диаграммы позволяет вывести не только амплитуду, но и величину фазового сдвига напряжения в определенной точке схемы, рассчитанную относительно фазы колебаний напряжения источника. На рис. 31 показана часть табличной диаграммы, полученной при анализе рассматриваемого ФВЧ.

acfrequency	U_out.v
553	0.961 / 16.1°
554	0.961 / 16°
555	0.961 / 16°
556	0.961 / 16°
557	0.962 / 15.9°
558	0.962 / 15.9°
559	0.962 / 15.9°
560	0.962 / 15.9°
561	0.962 / 15.8°
562	0.962 / 15.8°
563	0.962 / 15.8°

Рисунок 31 - Амплитуда и фаза выходного напряжения в схеме рис. 29

### Моделирование на переменном токе с разверткой параметра

Рассмотрим более сложный пример. Предположим, нам необходимо проанализировать усилительные характеристики биполярного транзистора в некотором частотном диапазоне и выбрать для него оптимальный режим работы по постоянному току. Схема включения транзистора показана на рис. 31.

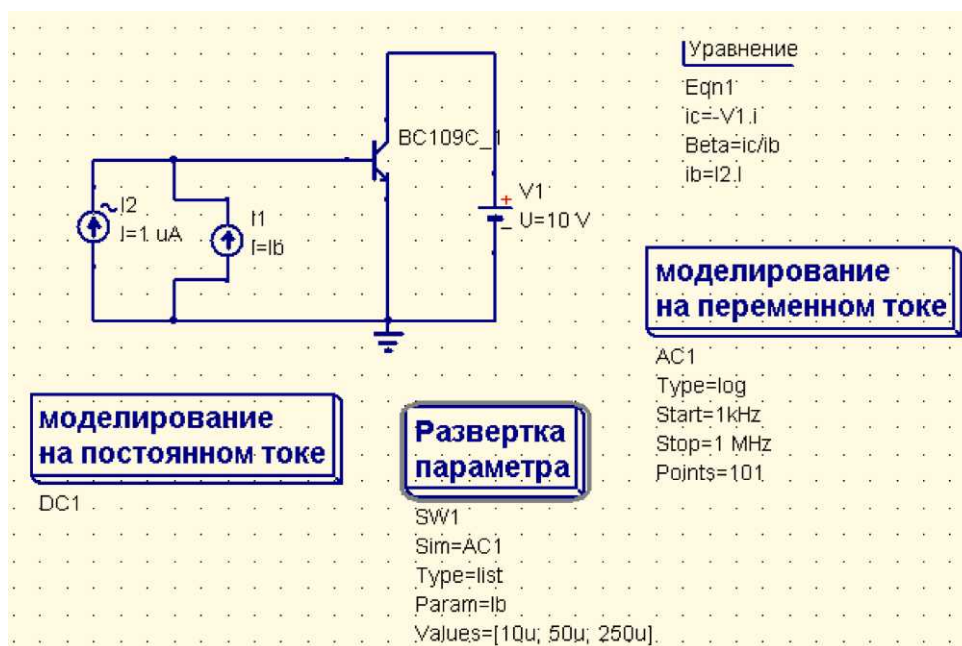


Рисунок 31 - Моделирование усиления транзистором сигнала переменного тока

По сравнению со схемами рис. 17, 27 здесь добавлен источник переменного тока  $I_2$  в цепи базы транзистора, создающий сигнал переменного тока необходимой частоты и амплитуды. Источник постоянного тока  $I_1$  создает необходимое смещение в цепи базы, ток этого источника задан в общем виде. Из библиотеки компонентов выбран другой транзистор - BC109C.

В блоке вычислений переменная составляющая тока коллектора определена через переменную составляющую тока (малый индекс), протекающего через источник напряжения в коллекторной цепи:

$$i_c = -V_{1.i} \quad (1)$$

Коэффициент усиления по переменному току определяется как отношение амплитуд переменных составляющих тока в цепи коллектора и базы:

$$\text{Beta} = i_c / i_b \quad (2)$$

Переменная составляющая тока в цепи базы транзистора задается равной амплитуде тока источника  $I_2$ :

$$i_b = I_{2.I} \quad (3)$$

Выполняется моделирование работы транзистора на переменном токе, поэтому на рабочую область помещен соответствующий кубик. Верхняя частота моделирования задана 10 МГц. В то же время, очевидно, что для нормальной работы транзистора должен быть задан (а при моделировании - рассчитан) определенный режим по постоянному току, поэтому перед каждым моделированием на переменном токе, необходимо выполнить моделирование на постоянном токе. Для этого на рабочую область перенесен кубик моделирования на постоянном токе. Наконец, в свойствах третьего блока моделирования, расположенного на рабочей области, - блока моделирования с разверткой параметра, в качестве моделируемого блока указано AC1 - имя блока моделирования на переменном токе, а в качестве изменяемого параметра задан Ib - постоянный ток смещения (в виде списка значений).

Необходимо отметить, что при одновременном моделировании на постоянном и переменном токе, вывод результатов на табличную диаграмму допускается только для одного вида моделирования. При попытке вывести рассчитанные напряжения и токи для двух режимов на одну диаграмму табличного вида в колонках для переменных напряжений и токов возникает ошибка. Это связано с разными форматами вывода результатов моделирования для постоянного и на переменного токов. Для переменного тока в табличной диаграмме отображается относительная фаза, а для постоянного тока этот параметр отсутствует.

Результаты моделирования показаны на графике, рис. 32 (в свойствах графика установлен режим логарифмической разметки оси абсцисс (ось X)). На графике хорошо видно, что коэффициент усиления транзистора по току мало меняется в полосе частот 1 кГц - 1 МГц. Увеличение тока смещения в цепи базы позволяет добиться несколько большего усиления

при ухудшении равномерности коэффициента усиления в полосе частот. Большой ток смещения приводит, кроме того, и к неэффективному рассеиванию энергии источника. Оптимальным поэтому можно считать режим с базовым током 50 мкА.

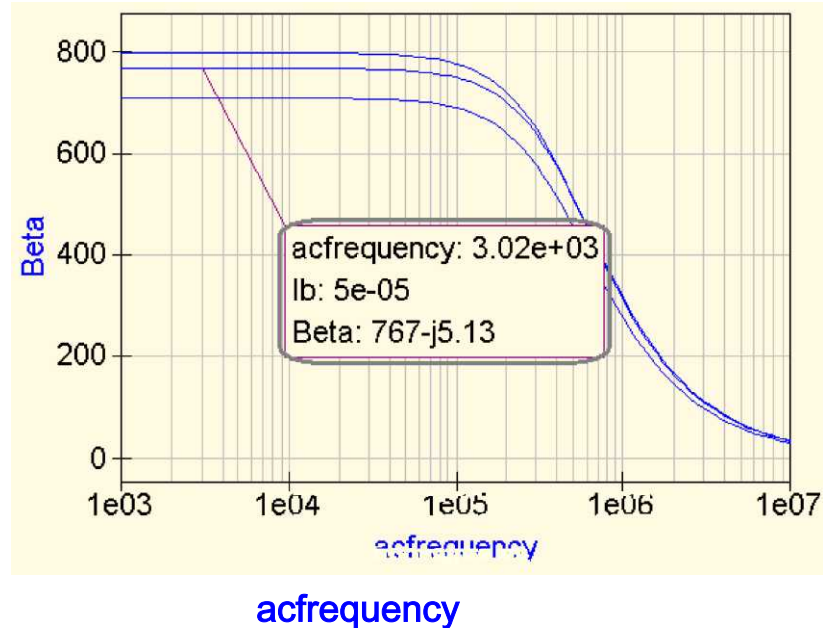


Рисунок 32 - Изменение коэффициента усиления транзистора с частотой при разных положениях рабочей точки

В следующем примере определим граничную частоту усиления транзистора, т.е. частоту, на которой усиление транзистора становится равным единице. Внесем небольшие изменения в схему на рис. 31. Во-первых, уберем блок моделирования с разверткой параметра, вместо этого зададим рабочую точку, установив  $I_1 = I_b = 50$  мкА. Расширим диапазон моделирования на переменном токе до 500 МГц. Добавим еще один блок вычислений и с помощью встроенной функции  $\text{dB}(x)$  запишем коэффициент усиления транзистора по переменному току в децибелах:

$$\text{Beta\_dB} = \text{dB}(i_c/1e-6) \quad (4)$$

Используя еще одну встроенную функцию программы Qucs –  $\text{xvalue}(f, y)$ , определим граничную частоту:

$$F_t = \text{xvalue}(\text{Beta\_db}, 0) \quad (5)$$

Функция  $\text{xvalue}(f, y)$  ищет значение аргумента функции, при котором ее значение наиболее близко к указанному –  $y$ . в данном случае будет определяться частота, на которой коэффициент усиления в децибелах равен нулю. Результат может быть выведен в табличном виде, рис.33.

numb er	Ft
1	3.45e+08

Рисунок 33 - Определение граничной частоты транзистора

Таким образом, для транзистора BC109C граничная частота составила 345 МГц.

*Частой ошибкой при определении значений функции в логарифмических единицах -децибелах является задание диапазона частот (в свойствах моделирования на переменном токе) от 0 Гц. Логарифмическая функция не может иметь аргументом 0, поэтому при попытке построения графика возникнет ошибка определения функции.*

#### 4 Развертка процессов во времени

Применяя моделирование на переменном токе мы легко можем построить амплитудно-частотные характеристики исследуемой цепи, однако часто необходимо знать, не только амплитуду, но и фазу электрических колебаний в разных точках схемы. Выполнить анализ работы электронной схемы во времени позволяет моделирование переходных процессов. Надо сказать, что название для этого вида моделирования выбрано неудачно. Вообще под переходными процессами принято понимать изменения, происходящие, например, при включении-выключении питания схемы, когда происходит достаточно кратковременный переход системы из одного установившегося состояния в другое. Тот вид моделирования, который в программе Qucs носит название «моделирование переходных процессов» выполняется и для установившихся процессов, когда необходимо проанализировать амплитуду и фазу тока и напряжения, периодически изменяющихся во времени.

Рассмотрим простую цепь, содержащую источник тока, резистор и конденсатор, рис. 34. Частоту источника напряжения установим 1 кГц. Определим фазовый сдвиг между действующим на конденсаторе напряжением и протекающим через него током. Установим на схеме две метки определения потенциала - до и после конденсатора. Величину емкости конденсатора зададим 1 нФ, на частоте источника сопротивление конденсатора превысит 100 кОм. Сопротивление резистора установим 50 Ом. Резистор в данном случае работает в качестве датчика тока через



емкость, преобразуя этот ток в сигнал напряжения, наблюдаемый в метке В. Так как падение напряжения на резисторе очень мало, можно считать, что потенциал метки А равен напряжению на конденсаторе.

Для наблюдения на одном графике сигналов напряжения сильно различающихся по амплитуде, необходимо изменить масштаб одного из них. Это сделано введением уравнения:

$$I_s = 1000 * V.Vt, \quad (6)$$

где  $V.Vt$  «переходное» напряжение в узле В (Изменения напряжения во времени в данной точке).

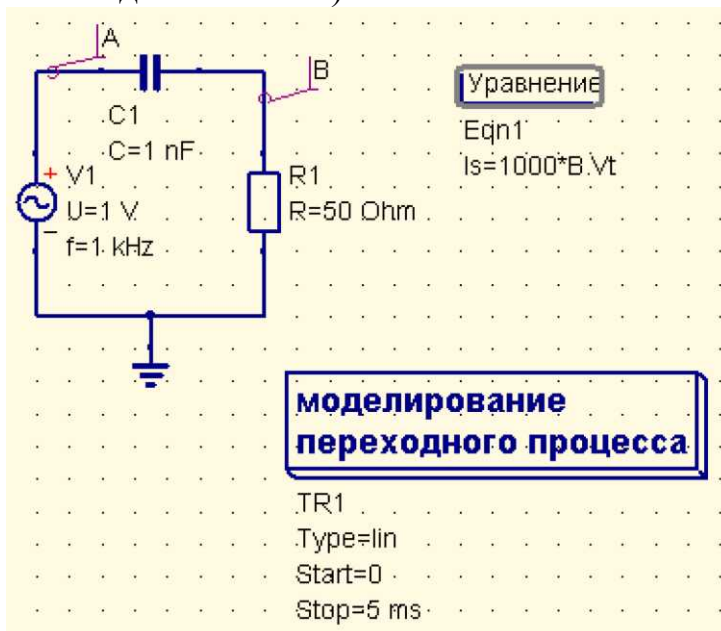


Рисунок 34 - Схема для определения фазового сдвига между переменным напряжением и током, протекающим через конденсатор

Для выполнения моделирования на рабочую область перенесен кубик соответствующего вида моделирования, в свойствах которого указана длительность моделируемого процесса - 5 миллисекунд. Результат моделирования приведен на графике рис. 35. Хорошо видно, что сдвиг фаз между напряжениями в узлах А и В составляет  $90^\circ$ , фаза напряжения в узле В соответствует фазе тока через конденсатор. Таким образом, график показывает, что ток в конденсаторе опережает по фазе напряжение на  $90^\circ$  или  $\pi/2$  радиан.

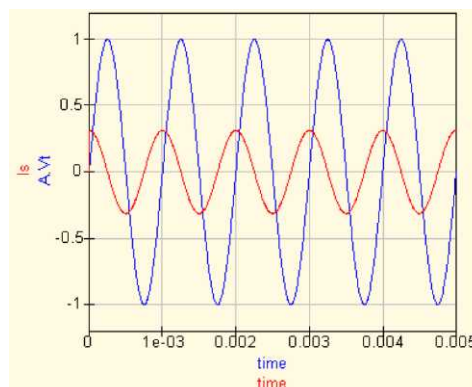


Рисунок 35 - Относительные изменения фазы тока и напряжения на



конденсаторе, полученные моделированием переходного процесса

В следующем примере анализируются относительные изменения напряжений в базовой и коллекторной цепях биполярного транзистора. На рис. 36 показана схема моделируемой цепи. Источник постоянного тока I1 задает смещение рабочей точки. Источник переменного тока частотой 1 кГц и амплитудой 1 мкА формирует входной сигнал. В цепи коллектора транзистора установлен нагрузочный резистор 50 Ом. Вольтметры Pr1 и Pr2 фиксируют напряжение в базовой и коллекторной цепях транзистора, соответственно.

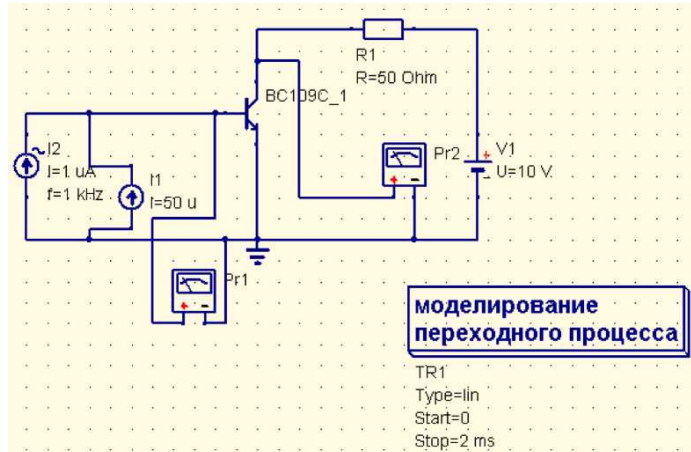


Рисунок 36 - Моделирование во времени процессов в биполярном транзисторе

На рабочую область перенесен кубик моделирования переходного процесса, в свойствах моделирования установлена его длительность: от 0 до 2 мс. Результаты анализа, измеренные вольтметрами напряжения, показаны на графиках, рис. 37. Хорошо видно, что напряжения противофазны, т.е. имеют сдвиг  $180^\circ$ . Использование маркеров позволяет выполнять измерения, рассчитывать амплитуду напряжений, значение напряжения в рабочей точке для входной и выходной цепи, сдвиг фаз, коэффициент усиления транзистора по напряжению и других параметров с высокой точностью.

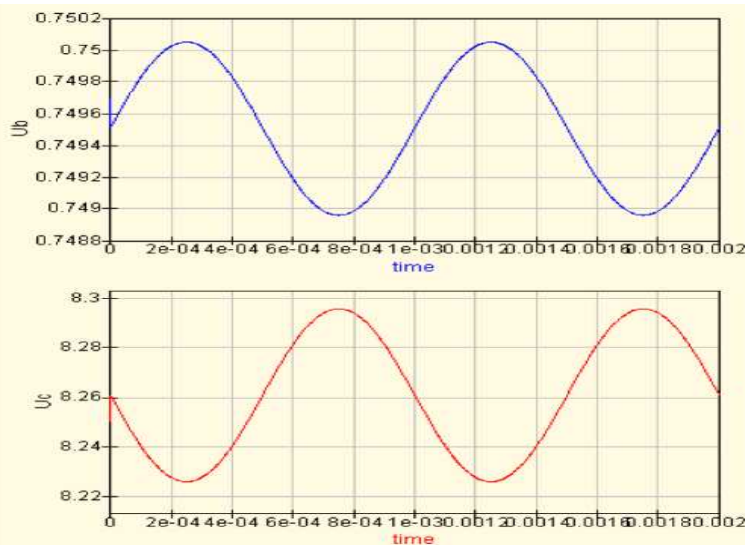


Рисунок 37 - Графики изменения во времени напряжения в цепи базы и коллектора

Кроме того, графики абсолютно прозрачны, а ось ординат может выводиться как справа, так и слева, по выбору, поэтому мы легко можем совместить оба графика для более наглядной их демонстрации, рис. 38.

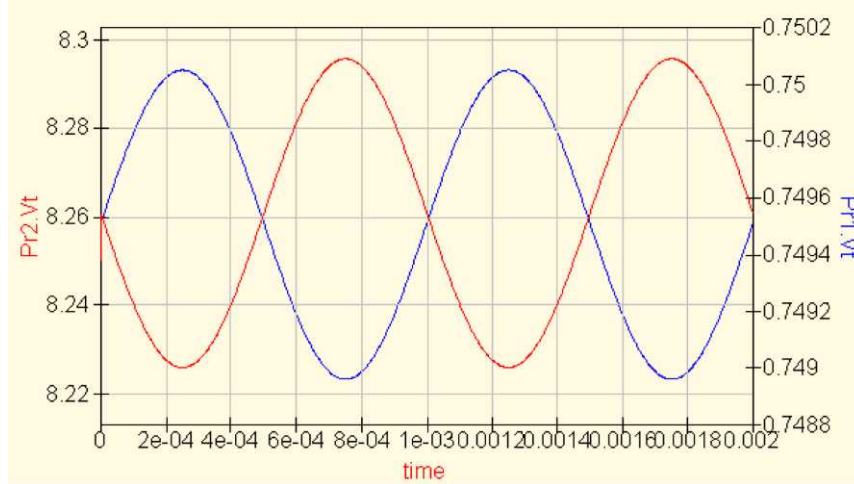


Рисунок 38 - Совмещение двух графиков с разными масштабами по осям ординат

## **Лабораторная работа 1. Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора**

### **1.1 Введение**

Цель работы:

- познакомиться с программой Qucs, научиться строить схемы в рабочей области программы, изменять параметры элементов, выбирать виды моделирования, записывать уравнения в блоке вычислений;
- снять статические характеристики биполярного транзистора и научиться обеспечивать положение рабочей точки транзистора при различных схемах питания.

### **1.2 Контрольные вопросы**

1. Что называется входной характеристикой биполярного транзистора?
2. Как зависит входная проводимость (входное сопротивление) биполярного транзистора от режима его работы, который характеризуется, например, постоянной составляющей тока коллектора?
3. В какой из схем (питание фиксированным током базы или коллекторной стабилизации) сопротивление в цепи базы будет больше, если напряжение источника питания и режим работы транзистора одинаковы?
4. Каково назначение делителя в цепи базы биполярного транзистора, и какие соображения принимаются во внимание при выборе его элементов?
5. Каким будет напряжение питания в схеме питания фиксированным током базы, если ток коллектора в точке покоя равен 5 мА, напряжение на коллекторе 4 В и сопротивление в цепи коллектора 1 кОм? Как изменится напряжение питания, если добавить в цепь эмиттера сопротивление, на котором будет падать напряжение 3 В?
6. Как изменится напряжение на коллекторе по отношению к эмиттеру, если при неизменном напряжении питания в схеме с питанием фиксированным током базы сопротивление в цепи коллектора увеличить вдвое?

### **1.3 Порядок выполнения работы**

1. Изучите описание программы Qucs.
2. Научитесь «собирать» схемы в графическом интерфейсе программы. Для этого соберите схему каскада на биполярном транзисторе при питании фиксированным током базы. При необходимости, подключите измерительные приборы. Режим работы приборов определяется выбранным видом моделирования и не требует специальной настройки, но результаты измерений видны только на диаграммах.

3. Ознакомьтесь с параметрами модели биполярного транзистора, с которым вам предстоит выполнять работу в соответствии с полученным вариантом задания:

Вариант	Транзистор
1.	2DC4617R
2.	2N2219A
3.	2N2222
4.	2N2905A
5.	2N2907
6.	2N2955
7.	2N3019
8.	2N3055
9.	2N3501
10.	2N3507
11.	2N3904
12.	2N3905
13.	2N3906
14.	2N4402
15.	2N4403
16.	2SA1213
17.	BC237BP
18.	BC549
19.	BF720
20.	MMBTN10

Посмотрите, чем отличаются параметры заданной модели от параметров идеального транзистора.

4. Снимите входную  $I_b = f(U_b)$  и проходную  $I_k = f(U_b)$  статические характеристики

заданного биполярного транзистора. Для этого целесообразно использовать отдельные источники питания для коллекторной и базовой цепей (в базовой цепи рекомендуется использовать источник постоянного тока - см. Рис. 1.1).

Характеристики снимите при фиксированном напряжении на коллекторе 5 В. Целесообразные значения тока коллектора 0,5 - 15 мА. С учетом этого выбираются значения тока источника в цепи базы. Используйте режим моделирования на постоянном токе с разверткой параметра. В качестве изменяемого параметра выступает ток источника в цепи базы. Для определения напряжения базы установите в схему вольтметр. Используйте блок вычислений и функцию PlotVsO для получения требуемых зависимостей.

Постройте диаграмму табличного вида 1.1:

Таблица 1.1. Статические характеристики транзистора  
Условия измерения:  $U_K = 5 \text{ В}$ .

$I_{\delta}$ , мкА										
$I_K$ , мА										
$U_{\delta}$ , В										

Постройте характеристики  $I_{\delta} = f(U_{\delta})$  и  $I_K = f(U_{\delta})$  в тетради для дальнейшего использования.

Входная характеристика транзистора  $I_{\delta} = f(U_{\delta})$

Проходная характеристика транзистора  $I_K = f(U_{\delta})$

5. Выберите на входной характеристике положение рабочей точки и обеспечьте этот же режим работы транзистора в трех схемах с разными способами базового смещения:

5.1 В схеме питания с фиксированным током базы, рис. 1.2.

Чтобы режим работы транзистора не изменился, когда в его коллекторной цепи появилась нагрузка, необходимо увеличить напряжение источника питания. На коллекторном резисторе должно происходить такое падение напряжения, чтобы потенциал коллектора не изменился по сравнению с режимом снятия статических характеристик. При этом ток коллектора должен быть равен току в рабочей точке:

$$U_{num} = U_{к0} + R_I, I_{к0}.$$

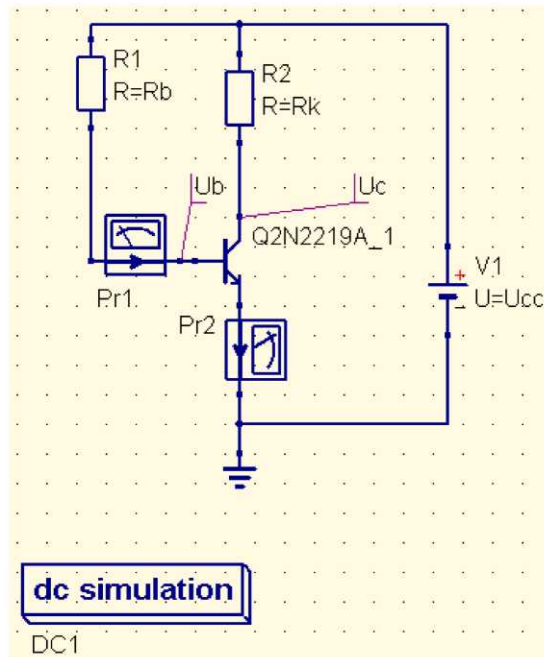


Рисунок 1.2 - Схема смещения фиксированным током базы

При расчете величины базового сопротивления, учтите, что на нем происходит полное падение напряжения источника питания, за исключением напряжения на базовом р-п переходе, равное напряжению в выбранной рабочей точке. Ток базы равен току в рабочей точке:

$$R_b = \frac{U_{num} - U_{б0}}{I_{б0}}$$

5.2. В схеме коллекторной стабилизации, рис. 1.3.

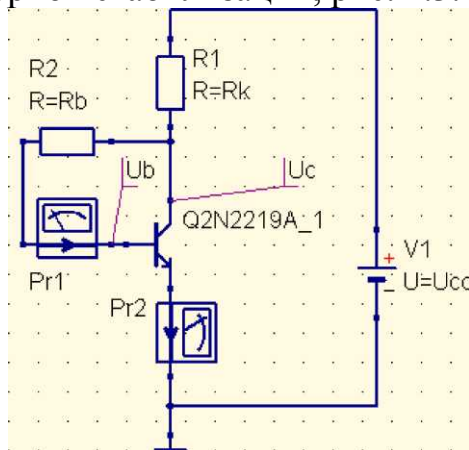


Рисунок 1.3 - Схема смещения транзистора с коллекторной стабилизацией

В этой схеме питание базового резистора осуществляется напряжением, равным напряжению коллектора, это необходимо учесть для расчета базового резистора:

$$R_{\delta} = \frac{(U_{\text{нм}} - I_{\text{к0}} R_{\text{к}})}{I_{\delta 0}} \quad (1.1)$$

5.3. В схеме эмиттерной стабилизации, рис. 1.4.

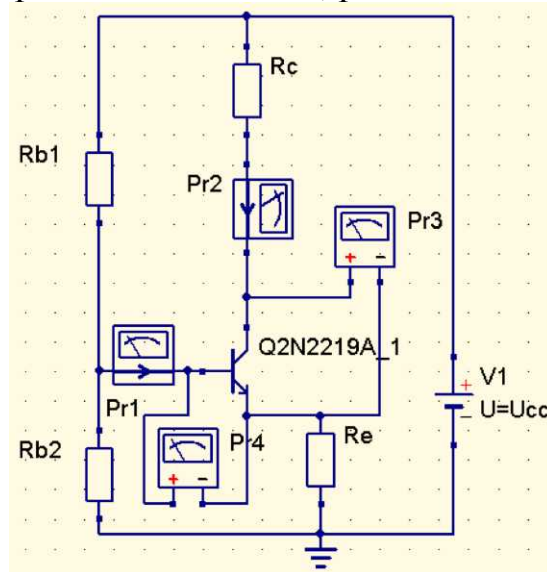


Рисунок 1.4 - Схема смещения с базовым делителем и эмиттерной стабилизацией режима

В данной схеме в эмиттерную цепь транзистора устанавливается сопротивление, обеспечивающее стабилизацию режима работы транзистора. Через сопротивление в цепи эмиттера протекает суммарный ток коллектора и базы, поэтому сопротивление этого резистора рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{э}} = U_{\text{э}} / (I_{\text{к0}} + I_{\delta 0}) \quad (1.2)$$

Напряжением на эмиттерном резисторе необходимо задаться. Типичное значение этого напряжения 2-3 В. Эмиттерный резистор стабилизирует режим работы транзистора тем лучше, чем больше на нем напряжение, однако при увеличении напряжения на эмиттерном резисторе уменьшается допустимый диапазон изменения напряжения между эмиттером и коллектором. При работе в усилительном режиме напряжение коллектор-эмиттер не должно быть ниже 1 - 1,5 В.

Сопротивления базового делителя рассчитываются исходя из того, что ток делителя много больше тока базы. Чем больше ток базового делителя, тем надежнее фиксирован потенциал базы, однако увеличение тока через сопротивления приводит к бесполезному расходованию энергии. Поэтому обычно считается достаточным десятикратный запас по току. Задавшись током делителя в десять раз большим тока базы легко рассчитать сопротивления базового делителя, через нижнее плечо делителя протекает только ток делителя:

Через верхнее плечо - суммарный ток делителя и базы:

$$R_{\delta 2} = \frac{(U_{\text{э}} + U_{\delta 0})}{I_{\text{дел}}} \quad (1.3)$$



$$R_{\delta 1} = \frac{U_{\text{итт}} - (U_{\text{э}} + U_{\delta 0})}{I_{\text{дел}} + I_{\delta 0}} \quad (1.4)$$

Задавшись напряжением источника питания, рассчитайте величины базового и коллекторного сопротивлений, проведите моделирование на постоянном токе и постройте для каждого случая табличные диаграммы, подтверждающую неизменное (по сравнению с выбранным ранее) положение рабочей точки.

## Лабораторная работа 2. Исследование характеристик и параметров полевого транзистора

### 2.1 Введение

*Цель работы:* определение статических характеристик полевого транзистора и вычисление с их помощью параметров транзистора. Эти характеристики и параметры потребуются при выполнении дальнейших лабораторных работ.

### 2.2 Контрольные вопросы

1. Почему для описания полевых транзисторов не используются входные характеристики?
2. Какая зависимость называется проходной характеристикой?
3. В каких случаях включается делитель в цепи затвора полевого транзистора, а в каких достаточно включить сопротивление между затвором и землей?
4. Как зависит крутизна полевого транзистора от смещения на затворе?
5. В какую сторону следует изменить напряжение питания полевого транзистора при увеличении сопротивления в цепи стока, чтобы при неизменном смещении на затворе напряжение на стоке тоже оставалось неизменным?

### 2.3 Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с параметрами модели полевого транзистора, с которым вам предстоит выполнять работу в соответствии с полученным вариантом задания:

Вариант	Транзистор
1	BF245A
2	BF245B
3	BF245C
4	2N4221
5	2N5460
6	2N5485
7	BSS123
8	BSS84
9	IRFZ24N
10	IRFZ34N
11	IRFZ44N
12	IRFZ46N
13	IRF730

2. Используя моделирование на постоянном токе и моделирование с разверткой параметра, снимите статическую проходную характеристику выбранного полевого транзистора  $I_{cm} = f(U_3)$ .

Для питания цепей затвора и стока целесообразно использовать отдельные источники. Не забудьте, что питающее напряжение стока и затвора противоположны по знаку: если полевой транзистор с n-каналом, на сток следует подавать положительное напряжение по отношению к истоку, а на затвор - отрицательное; для транзистора с p-каналом картина обратная: на сток следует подавать отрицательное напряжение по отношению к истоку, а на затвор - положительное.

Проходную характеристику снимите при фиксированном напряжении на стоке по отношению к истоку - (9-12) В. Максимальное (по модулю) напряжение на затворе по отношению к истоку выберите равным напряжению отсечки и изменяйте его до тех пор, пока происходит соответствующее увеличение тока стока.

Постройте табличную диаграмму вида 2.1 и декартов график проходной характеристики транзистора.

Таблица 2.1 - Статические характеристики полевого транзистора  
Условия измерения  $U_{ст} = \dots$  В.

$U_3$ , В									
$I_{cm}$ , мА									

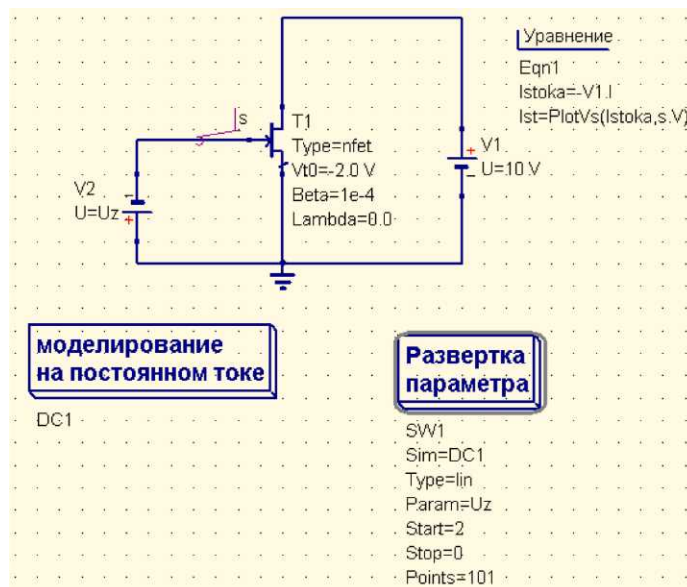


Рисунок 2.1 - Схема для снятия статических характеристик полевого транзистора

3. Выберите положение рабочей точки, используя построенную проходную характеристику. Определите крутизну транзистора в рабочей точке

$$S = \frac{dI_{cm}}{dU_3} \quad (2.1)$$

используя встроенную функцию  $\text{diff}(y,x)$ , аналогичную математической записи:

$$\frac{d}{dx}y. \quad (2.2)$$

Обеспечьте положение рабочей точки в новой схеме, где в цепи истока включено сопротивление:

$$R_u = \frac{|U_{зи}|}{I_{cm}}, \quad (2.3)$$

а в цепи затвора сопротивление 100 кОм (при этом увеличьте напряжение питания на величину  $U_{Ru}$ ). Наличие дополнительного источника смещения в цепи затвора не обязательно. С помощью резистора в цепи затвора потенциал затвора держится практически равным потенциалу общего провода (ток в цепи затвора близок к нулю), а потенциал истока оказывается выше потенциала общего провода на величину падения напряжения на резисторе в цепи истока. Таким образом, между затвором и истоком возникает разность потенциалов или смещение, равное по величине падению напряжения на  $R_u$ , причем «минус» этого напряжения приложен к затвору.

Выполните моделирование на постоянном токе и по его результатам проверьте, обеспечен ли выбранный режим (рис. 2.2).

В схеме рис. 2.2 вольтметр Pr2 измеряет напряжение на затворе по отношению к общему проводу  $U_з$ , а вольтметр Pr3 - напряжение на затворе по отношению к истоку  $U_{зи}$ .

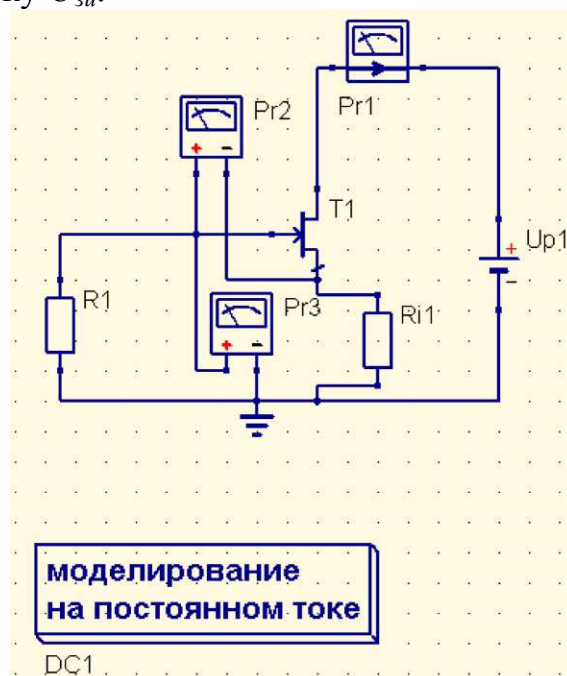


Рисунок 2.2 - Проверка положения рабочей точки

4. Увеличьте сопротивление в цепи истока вдвое, добавив соответственно напряжение питания, и вновь обеспечьте тот же режим работы транзистора с помощью делителя в цепи затвора, рис. 2.3.

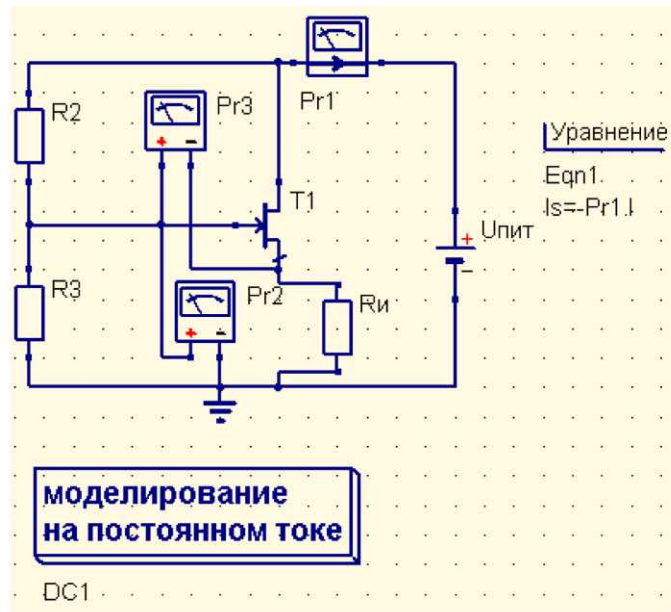


Рисунок 2.3 - Смещение с помощью одного источника питания

При этом

$$U_{ист} = I_{см} \cdot R_u, \quad U_з = U_{ист} + U_{зл},$$

с другой стороны

$$U_з = U_{пит} \cdot \frac{R_{з2}}{R_{з1} + R_{з2}}.$$

5. Включите в цепь стока сопротивление порядка 1 кОм и вновь обеспечьте выбранный режим работы транзистора, подбирая напряжение источника питания и сопротивления  $R_u$ , рис. 2.4.

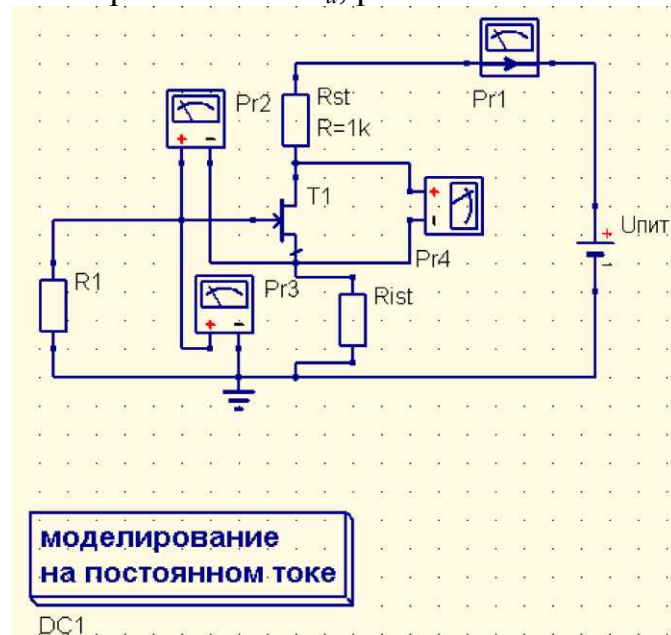


Рисунок 2.4 - Исследование каскада на полевом транзисторе при наличии сопротивления в цепи стока

Напряжение между стоком и истоком должно соответствовать режиму, заданному в рабочей точке. Для контроля этого напряжения в схеме добавлен вольтметр Pr4. Помните, что:

$$U_{cm0} = U_{nut} - I_{cm0}(R_{cm} + R_u), R_u = \frac{|U_z|}{I_{cm}}. \quad (2.4)$$

Для всех случаев постройте табличные диаграммы показаниями приборов, иллюстрирующие правильность обеспечения рабочей точки.

### **Лабораторная работа 3. Исследование усилительного каскада на биполярном (полевом) транзисторе на переменном токе (средние и нижние частоты)**

#### **3.1 Введение**

*Цель работы:* исследование влияния изменения параметров реостатного каскада на биполярном (полевом) транзисторе на его коэффициент усиления, частотные и фазовые характеристики в области нижних частот.

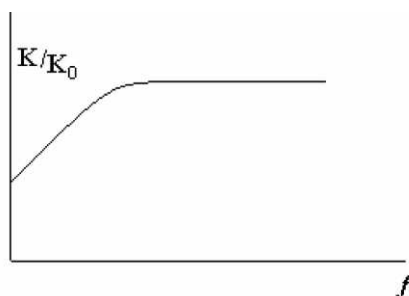
Исследование каскада на биполярном (полевом) транзисторе на переменном токе включает измерение коэффициента усиления, исследование частотной и фазовой характеристик и определение по ним нижней частоты на заданном уровне.

Исследования могут быть выполнены как для каскада на полевом транзисторе, так и для каскада на биполярном. Ниже дан вариант исследования для биполярного транзистора. Заменяв транзистор на полевой и обеспечив режим его работы как было описано в лабораторной работе №2, можно точно так же исследовать влияние разделительных емкостей и сопротивления нагрузки на характеристики каскада.

#### **3.2 Контрольные вопросы**

1. Каковы физические причины появления линейных искажений в каскаде на биполярном (полевом) транзисторе?
2. Изобразите эквивалентную схему каскада, изображенного на рис. 3.1., для средних и нижних частот.
3. Как рассчитать искажения, создаваемые разделительной емкостью на входе?
4. Как рассчитать искажения, создаваемые разделительной емкостью на выходе?
5. Какая из разделительных емкостей создает большие линейные искажения (стоящая на входе или выходе), если внутреннее сопротивление источника сигнала 100 Ом, входное сопротивление каскада 1 кОм, сопротивление в цепи коллектора 1 кОм и нагрузка чисто емкостная - емкость нагрузки 100 пФ?
6. Как изменяется сквозной коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе при изменении внутреннего сопротивления источника сигнала?
7. Как связаны между собой модуль коэффициента передачи на некоторой частоте и фазовый сдвиг на этой же частоте?
8. Как изменяется нижняя граничная частота каскада при изменении емкостей разделительных конденсаторов?
9. Какие искажения прямоугольного импульса возникают за счет разделительных емкостей? Поясните механизм возникновения этих искажений.

10. Изобразите форму искаженного прямоугольного импульса, прошедшего через усилитель, имеющий приведенную ниже частотную характеристику:



### 3.3 Порядок выполнения работы

1. Продолжите изучение описания моделирования процессов в электронных схемах с помощью программы Qucs. Научитесь выполнять моделирование на переменном токе и моделирование с разверткой параметра. Для этого соберите схему, показанную на рис. 3.1, подключите к базовой цепи транзистора источник переменного тока, задайте частоту колебаний тока 1 кГц и амплитуду 10 мВ. Выполните моделирование переходного процесса, постройте графики изменения напряжения в базовой и коллекторной цепи транзистора. Убедитесь в противофазности входного и выходного напряжений.

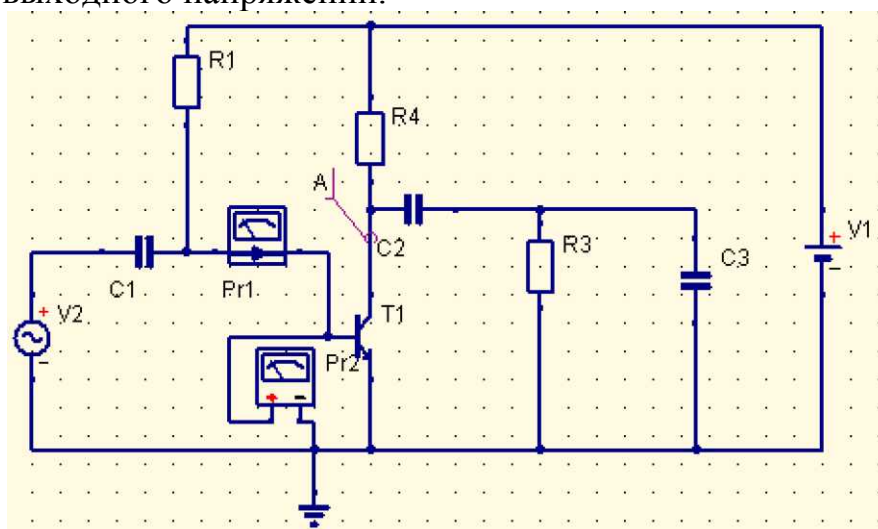


Рисунок 3.1 - Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Рассчитайте входное сопротивление транзистора на переменном токе в рабочей точке. Для этого удобно использовать показания приборов. При выполнении моделирования одновременно на постоянном и переменном токе прибор фиксирует и ту и другую величину. Например, для получения переменного тока в цепи базы транзистора нужно посмотреть показания прибора с малым индексом Pr1.i, а для определения величины постоянного тока - показания с большим индексом Pr1.I. Удобно ввести в схему блок вычислений, в котором определить выражения для вычисления сопротивления на переменном токе.



$$R_{\approx} = \frac{U_{\approx}}{I_{\approx}} \quad (3.1)$$

2. Выберите  $R_{li} = R_{lt} = 1\text{кОм}$  и  $R_6$  таким образом, чтобы обеспечить необходимый режим работы транзистора так, как это делалось при выполнении лабораторной работы №1. Обеспечьте ток покоя транзистора (5 4 10) мА (для контроля тока покоя в цепь коллектора можно включить амперметр, величину тока покоя можно определить и расчетным путем, зная падение напряжения на коллекторном резисторе и его номинал). Емкость нагрузки  $C_n$  выберите равной 10-20 пФ (при выполнении настоящей

лабораторной работы можно  $C_n$  и не подключать, поскольку она оказывает влияние на верхних частотах, а исследование относится к области нижних частот). Емкость разделительных конденсаторов

$$C_{p1} = C_2 = 20 \text{ мкФ.}$$

*При исследовании каскада на полевом транзисторе емкость конденсаторов в этом и последующих экспериментах можно выбрать на порядок меньше.*

Выберите частоту источника переменного напряжения равной 1-5 кГц и амплитуду напряжения 2-5 мВ. Проведя моделирование переходного процесса, постройте графики входного и выходного напряжений и убедитесь, что они противофазны. Длительность моделирования выбирайте в пределах 5-10 мс. Определите фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением с помощью моделирования на переменном токе и построения табличной диаграммы этих напряжений. При выполнении моделирования на переменном токе установите не диапазон частот, а постоянное значение частоты, соответствующее частоте источника переменного напряжения.

Уменьшите емкость одного из разделительных конденсаторов в 100-500 раз и, повторно проведя моделирование переходного процесса, убедитесь что фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями изменился. Попробуйте определить в какую сторону и на сколько произошло изменение. Проверьте себя, выполнив моделирование на переменном токе и построив табличную диаграмму напряжений, зафиксируйте новую величину фазового сдвига и рассчитайте ее изменение.

Обратите внимание на изменение амплитуды выходного напряжения и дайте ему объяснение.

Выводы по пункту 2.

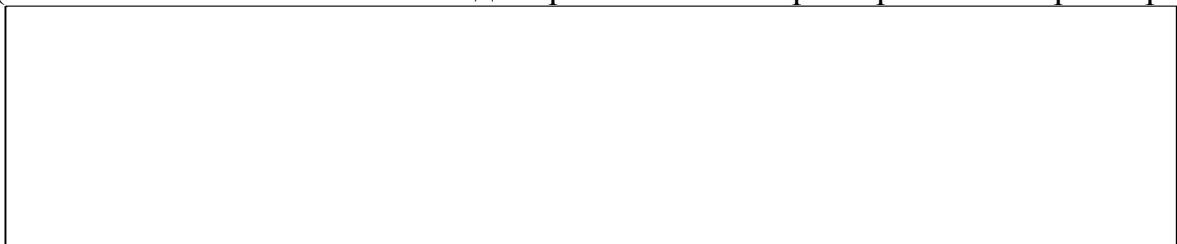
3. Для нескольких значений  $R_{it}$  измерьте коэффициент усиления, нижнюю граничную частоту на уровне 0,7 (-3 дБ) и фазовый сдвиг на этой частоте. Все измерения выполняются при моделировании на постоянном и переменном токе. Рекомендуется выразить коэффициент усиления в децибелах с помощью функции  $\text{dB}(K/K_0)$ . Для определения  $f_H$  примените функцию  $\text{xvalue}(\text{KdB}, -3)$ , где  $\text{KdB}$  - коэффициент усиления в децибелах. При этом рассмотрите варианты:  $R_H > R_K$  и  $R_H \gg R_K$ ,  $R_H$  соизмеримо с  $R_K$ ,  $R_H < R_K$  и  $R_H \ll R_K$ . Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1- Влияние изменения сопротивления нагрузки

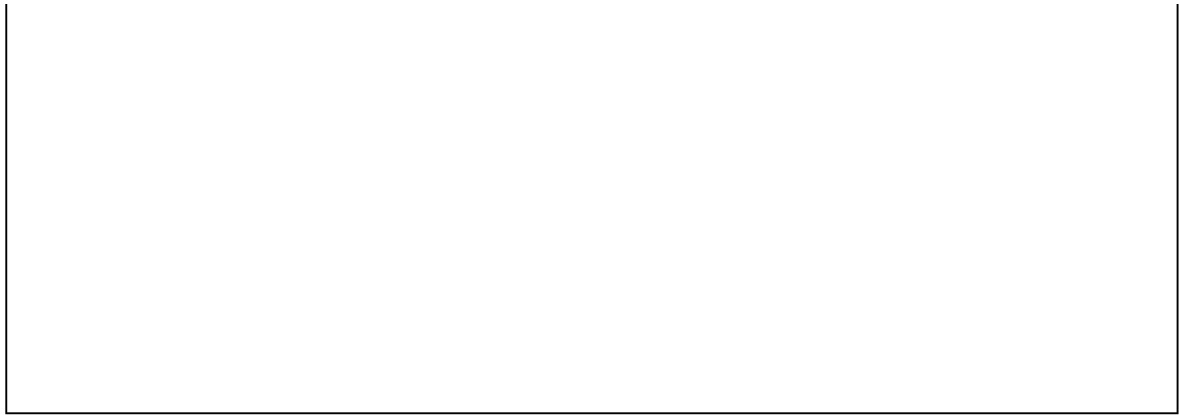
Условия:  $e_{ген} = \dots$ ,  $U_{ex} = \dots$ ,  $C_{p1} = \dots$ ,  $C_{p2} = \dots$ ,  $R_K = \dots$ ,  $C_H = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$  и т.д.

$R_H$	$10R_K$	$5R_K$	$2R_K$	$R_K$	$0,5R_K$	$0,2R_K$	$0,1R_K$
$U_{вых}$ , мВ							
$K_0$							
$f_H$							
$\varphi_H$							
$U_{min}$ , В							
$R_{\bar{\sigma}}$ , кОм							

Постройте график зависимости коэффициента усиления и  $f_H$  от  $R_H$  (Можно использовать моделирование с разверткой параметра).



Зависимость коэффициента усиления от  $R_H$



### Зависимость $f_H$ от $R_H$

Коэффициент усиления можно вычислять, как отношение  $U_{вых}$  к  $U_{вх}$ .

Выполняя эксперимент, обратите внимание на то, что фазовые сдвиги, измеренные на граничных частотах остаются практически неизменными. Объясните полученный результат. В последующих экспериментах фазовые сдвиги можно не измерять и при необходимости лишь контролировать.

Эксперимент по пункту 3 можно повторить, изменяя  $R_k$  при  $R_H = Const$ .

Однако при изменении сопротивления в цепи коллектора следует выполнять пересчет элементов, обеспечивающих режим работы транзистора:

$$U_{пит} = U_{к0} + R_k I_{к0}, \quad (3.2)$$

где  $U_{к0}$  - напряжение на коллекторе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке,  $I_{к0}$  - ток коллектора в рабочей точке.

$$R_b = \frac{U_{пит} - U_{б0}}{I_{б0}}, \quad (3.3)$$

где  $U_{б0}$  - напряжение на базе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке,  $I_{б0}$  - ток базы в рабочей точке.

Аналогичным образом строится и таблица для фиксированного значения  $R_H$  и изменяющегося  $R_k$ . Результаты измерения показывают одинаковый характер зависимостей в двух экспериментах.

Таблица 3.2 - Влияние изменения сопротивления в цепи коллектора

Условия:  $e_{ген} = \dots$ ,  $U_{ax} = \dots$ ,  $C_{p1} = \dots$ ,  $C_{p2} = \dots$ ,  $R_n = \dots$ ,  $C_n = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$  и т.д.

$R_k$	$10R_n$	$5R_n$	$2R_n$	$R_n$	$0,5R_n$	$0,2R_n$	$0,1R_n$
$U_{вых}, \text{ мВ}$							
$K_{(1)}$							
$f_n$							
$\varphi_n$							

Выводы по пункту 3

4. Исследуйте влияние изменения емкости разделительных конденсаторов на входе и на выходе на полосу пропускания каскада. В каждом эксперименте изменяется только одна из разделительных емкостей, вторая при этом остается неизменной (при выполнении этого эксперимента можно увеличить емкость  $C_{p2}$ , когда исследуется влияние на полосу пропускания емкости  $C_{p1}$  и наоборот).

Таблица 3.3 - Влияние емкости  $C_{p1}$

Условия:  $U_{пит} = \dots$ ,  $R_k = \dots$ ,  $R_n = \dots$ ,  $C_{p2} = 1 \text{ мкФ}$ ,  $C_n = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$  и т.д.

$C_{p1}$	200 мкФ	100 мкФ	40 мкФ	20 мкФ	10 мкФ	4 мкФ	2 мкФ
$f_n$							
$\varphi_n$							

Таблица 3.4 - Влияние емкости  $C_{p2}$

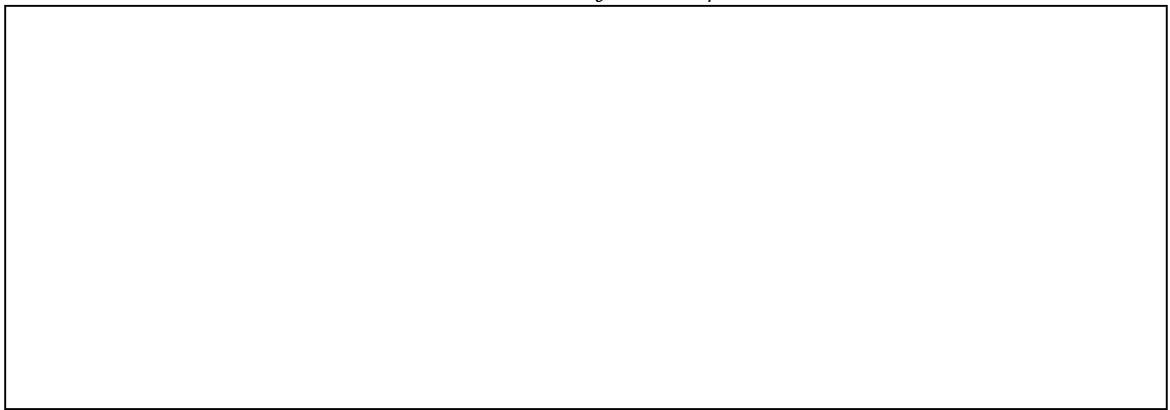
Условия:  $U_{пит} = \dots$ ,  $R_k = \dots$ ,  $R_n = \dots$ ,  $C_{p1} = 1 \text{ мкФ}$ ,  $C_n = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$  и т.д.

$C_{p2}$	200 мкФ	100 мкФ	40 мкФ	20 мкФ	10 мкФ	4 мкФ	2 мкФ
$f_n$							
$\varphi_n$							

Используя моделирование с разверткой параметра постройте графики зависимости  $f_n$  от  $C_2$  и от  $C_{p1}$ , объясните, почему разные разделительные емкости по-разному влияют на  $f_n$ . Чем объясняется отсутствие заметных изменений фазового сдвига?



Зависимость  $f_n$  от  $C_{p1}$



Зависимость  $f_n$  от  $C_{p2}$

Для большей наглядности несколько частотных и, отдельно, фазовых характеристик можно разместить на одном графике. Для получения расчетных данных используйте моделирование с разверткой параметра и списком значений.

*Выводы по пункту 4*

## **Лабораторная работа 4. Исследование усилительного каскада на биполярном (полевом) транзисторе на переменном токе (верхние частоты)**

### **4.1 Введение**

*Цель работы:* исследование влияния изменения параметров реостатного каскада на биполярном (полевом) транзисторе на его характеристики в области верхних частот.

Исследование каскада на биполярном (полевом) транзисторе на переменном токе включает измерение коэффициента усиления, исследование частотной и фазовой характеристик и определение по ним верхней граничной частоты на заданном уровне.

Исследования могут быть выполнены как для каскада на полевом транзисторе, так и для каскада на биполярном. Ниже дан вариант исследования для биполярного транзистора. Заменяв транзистор на полевой и обеспечив режим его работы как это было выполнено в лабораторной работе №2, можно точно так же исследовать влияние разделительных емкостей и сопротивления нагрузки на характеристики каскада.

### **4.2 Контрольные вопросы**

1. Каковы физические причины появления линейных искажений в каскаде на биполярном (полевом) транзисторе?
2. Как изменятся искажения на верхних частотах, если при неизменных остальных параметрах увеличить сопротивление нагрузки?
3. Каким образом и почему изменяются линейные искажения каскада на биполярном (полевом) транзисторе, если меняется сопротивление нагрузки следующего за ним каскада?
4. Как изменится коэффициент усиления каскада на биполярном (полевом) транзисторе, если меняется сопротивление нагрузки следующего за ним каскада?
5. Как изменяется коэффициент усиления и сквозной коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе при изменении внутреннего сопротивления источника сигнала?
6. Как связаны между собой модуль коэффициента передачи на некоторой частоте и фазовый сдвиг на этой же частоте?
7. Чем определяются входная и выходная динамические емкости биполярного (полевого) транзистора? Каково физическое содержание каждой из них?
8. Как изменяется фазовый сдвиг на верхней граничной частоте, измеренной на уровне -3 дБ, при изменении емкости нагрузки?

### 4.3 Порядок выполнения работы

1. Возможный вариант схемы для исследования тот же, что и в лабораторной работе № 3 - см. рис. 3.1.

2. Выберите  $R_K = R_n = 1\text{кОм}$  и  $R_b$  таким образом, чтобы обеспечить необходимый режим работы транзистора. Обеспечьте ток покоя транзистора (5 - 10) мА (для контроля тока покоя в цепь коллектора можно включить амперметр, величину тока покоя можно определить и расчетным путем, зная падение напряжения на коллекторном резисторе и его номинал). Измерьте входное сопротивление транзистора на переменном токе в выбранном режиме. Емкость нагрузки  $C_n$  выберите равной 10-20 пФ, емкость разделительных конденсаторов  $C_{p1} = C_2 = 20\text{ мкФ}$ .

Выполнив моделирование на переменном токе в диапазоне частот 1 кГц - 100 МГц, определите частоту на которой модуль коэффициента передачи начинает уменьшаться. Задайте частоту источника переменного напряжения в 2-5 раз меньше найденной частоты и амплитуду напряжения 2-5 мВ. Проведя моделирование переходного процесса, постройте графики входного и выходного напряжений и убедитесь, что они противофазны. Длительность моделирования выбирайте так, чтобы на графике можно было построить несколько периодов колебаний. Определите фазовый сдвиг между входным и выходным напряжением с помощью моделирования на переменном токе и построения табличной диаграммы этих напряжений. При выполнении моделирования на переменном токе установите постоянное значение частоты, соответствующее частоте источника переменного напряжения.

Увеличьте емкость  $C_n$  в 50-100 раз и, повторно проведя моделирование переходного процесса, убедитесь что произошло изменение фазового сдвига. Попробуйте определить в какую сторону и на сколько произошло изменение. Проверьте себя, выполнив моделирование на переменном токе и построив табличную диаграмму напряжений, зафиксируйте новую величину фазового сдвига и рассчитайте ее изменение.

*Выводы по пункту 2.*

3. Для различных значений  $R_{ji}$  и  $R_n$  измерьте коэффициент усиления, верхнюю граничную частоту на уровне 0,7 (-3 дБ) и фазовый сдвиг на этой частоте. Рассмотрите варианты:  $R_K > R_n$  и  $R_K \gg R_n$ ,  $R_K$  соизмеримо с  $R_n$ ,  $R_K < R_n$  и  $R_K \ll R_n$ .



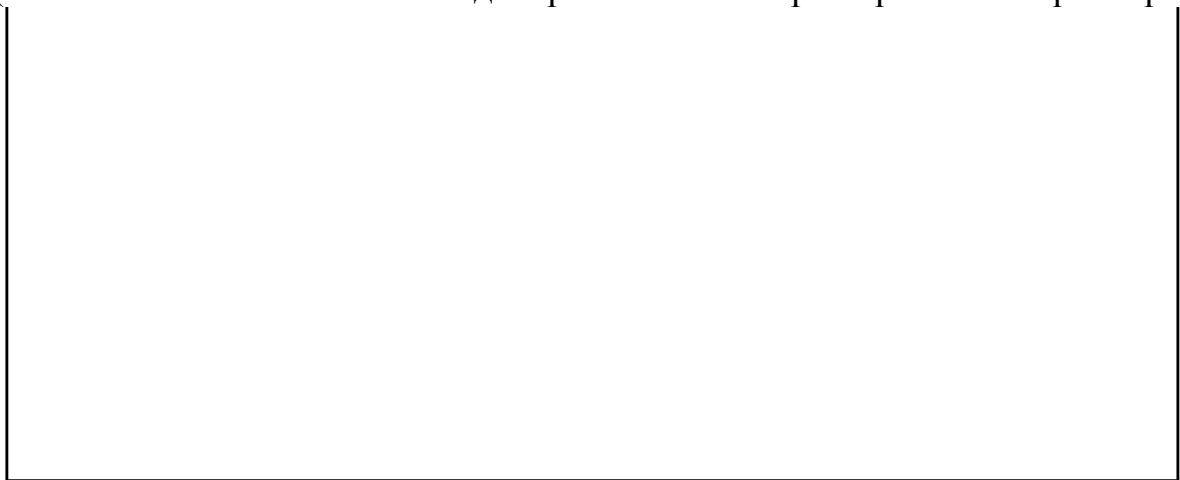
Вначале сделайте эксперимент для фиксированного значения  $R_k$  и изменяющегося  $R_n$ . Результаты измерений занесите в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Влияние сопротивления нагрузки

Условия:  $e_{ген} = \dots$ ,  $U_{ax} = \dots$ ,  $C_{p1} = C_{p2} = \dots$ ,  $C_n = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$  и т.д.

$R_n$	$10R_k$	$5R_k$	$2R_k$	$R_k$	$0,5R_k$	$0,2R_k$	$0,1R_k$
$U_{вых}$ , мВ							
$K_0$							
$f_e$							
$\Pi = K_0 \cdot f_e$							
$\varphi_e$							

Постройте график зависимости коэффициента усиления и  $f_e$  от  $R_n$  (Можно использовать моделирование с разверткой параметра).



Зависимость коэффициента усиления от  $R_n$



Зависимость  $f_e$  от  $R_n$

Повторите измерения для двух значений  $R_k$ .

Таблица 4.2 – Влияние сопротивления в цепи коллектора

Условия:  $e_{ген} = \dots$ ,  $U_{ax} = \dots$ ,  $C_{p1} = C_{p2} = \dots$ ,  $R_n = \dots$ ,  $C_n = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$  и т.д.

$R_k$	$U_{вых}$ , мВ	$K_0$	$f_e$	$\Pi = K_0 \cdot f_e$	$\varphi_e$	$U_{пит}$ , В	$R_0$ , кОм
$R_k = 5R_n$							
$R_k = R_n$							
$R_k = 0,2R_n$							

При изменении сопротивления в цепи коллектора следует пересчитать элементы, обеспечивающие режим работы транзистора:

$$U_{нпт} = U_{к0} + R_k I_{к0}, \quad (4.1)$$

где  $U_{к0}$  - напряжение на коллекторе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке,  $I_{к0}$  - ток коллектора в рабочей точке;

$$R_{\delta} = \frac{U_{нпт} - U_{\delta0}}{I_{\delta0}}, \quad (4.2)$$

где  $U_{\delta0}$  - напряжение на базе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке,  $I_{\delta0}$  ток базы в рабочей точке.

Коэффициент усиления можно вычислять, как отношение  $U_{вых}$  к  $U_{вх}$ .

Выполняя эксперимент, обратите внимание на то, что фазовые сдвиги, измеренные на граничных частотах остаются практически неизменными. Объясните полученный результат.

*Выводы по пункту 3*

4. Исследуйте влияние изменения  $R_{ген}$  на сквозной коэффициент усиления. Для этого при  $R_k = 1$  кОм измерьте  $K_{скв} = U_{вых} / e_{ген}$  при нескольких значениях  $R_{ген}$  (допустим  $R_{ген} = 100$  Ом,  $200$  Ом,  $500$  Ом и  $1$  кОм). Постройте зависимость  $K_{скв}$  от  $R_{ген}$  (используйте моделирование с разверткой параметра, задав диапазон значений для  $R_{ген}$  от  $100$  Ом до  $1$  кОм).

Таблица 4.3 - Влияние  $R_{ген}$  на сквозной коэффициент усиления

Условия:  $e_{ген} = \dots$ ,  $C_{p1} = C_{p2} = \dots$ ,  $R_k = \dots$ ,  $R_n = \dots$ ,  $C_n = \dots$  и т.д.

$R_{ген}$							
$U_{вых}$ , мВ							
$K_{скв}$							

Зависимость  $K_{скв}$  от  $R_{ген}$

Выводы по пункту 4

5. Исследуйте влияние изменения емкости нагрузки на полосу пропускания каскада. При этом измеряйте коэффициент усиления, верхнюю граничную частоту на уровне 0,7 (-3 дБ) и вычисляйте площадь усиления.

Таблица 4.4. Влияние изменения емкости нагрузки

Условия:  $e_{ген} = \dots$ ,  $U_{ax} = \dots$ ,  $R_x = \dots$ ,  $R_n = \dots$ ,  $C_{p1} = C_{p2} = \dots$  и т.д.

$C_n$							
$U_{ax}$ , мВ							
$f_a$							
$\Pi = K_U \cdot f_a$							
$\varphi_e$							

Постройте зависимость  $f_B$  и площади усиления от  $C_n$

Зависимость  $f_B$  от  $C_n$

Зависимость площади усиления от  $C_n$

*Выводы по пункту 5*

6. Включите последовательно два одинаковых каскада. Изменяйте сопротивление нагрузки второго каскада, а коэффициент усиления и верхнюю граничную частоту измеряйте на выходе первого. Одновременно измеряйте коэффициент усиления второго каскада. Выбирайте  $R_n$  второго каскада меньшим, равным и большим  $R_k$ . Результаты занесите в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 - Влияние сопротивления нагрузки второго каскада

Условия эксперимента:  $U_{\text{вх}} = \dots$ ,  $R_{k1} = \dots$ ,  $C_{p1} = C_{p2} = \dots$ ,  $R_{k2} = \dots$  и т.д.

$R_{k2}$	$10R_{k2}$	$5R_{k2}$	$2R_{k2}$	$R_{k2}$	$0,5R_{k2}$	$0,2R_{k2}$	$0,1R_{k2}$
$U_{\text{вых1}}, \text{ мВ}$							
$U_{\text{вых2}}, \text{ мВ}$							
$K_{01}$							
$f_{\text{с}}$							
$K_{02}$							

*Выводы по пункту 6*

## Лабораторная работа 5. Исследование пассивных схем плавной регулировки усиления

### 5.1 Введение

Цель работы: сравнительное исследование регулировочных характеристик и частотных свойств различных способов регулировки усиления с помощью пассивных цепей.

### 5.2 Теоретическая часть

В случае  $R_{zen} = 0$  и  $R_{ex}$ , стремящегося к бесконечности ( $R_{ex} \gg R_{pez}$ ), для схемы рис. 5.1 а:

$$R_{pez} = \frac{1}{2\pi f_{0.7} C_{ex}}, \quad (5.1)$$

(отметим, что для этой схемы случай  $R_{ex} \gg R_{pez}$  лишен смысла, т.к. регулировка усиления в этом случае отсутствует). Для схемы рис. 5.1 б:

$$R_{pez} = \frac{4}{2\pi f_{0.7} C_{ex}}. \quad (5.2)$$

В случае  $R_{zen} > 0$  и  $R_{ex}$ , соизмеримого с  $R_{pez}$ , для схемы рис. 5.1 а:

$$R_{экс} = \frac{1}{2\pi f_{0.7} C_{ex}}, \quad R_{pez} = \frac{R_{экс} R_{ex}}{R_{ex} - R_{экс}} - R_{zen}, \quad (5.3)$$

Для схемы рис. 5.1 б верхняя граничная частота минимальна в случае равенства сопротивлений выше и ниже движка потенциометра:

$$R_{zen} + (1-m)R_{pez} = \frac{mR_{pez} R_{ex}}{mR_{pez} + R_{ex}}, \quad (5.4)$$

а параллельное соединение этих сопротивлений дает  $R_{3Ке}$ , определяющее верхнюю граничную частоту, как и в схеме рис. 5.1 а:

$$R_{экс} = \frac{1}{2\pi f_{0.7} C_{ex}}. \quad (5.5)$$

Здесь  $m$  - доля сопротивления ниже движка регулировочного потенциометра. В результате:

$$R_{pez} = \frac{R_{ex}(4R_{экс} - R_{zen}) - 2R_{экс}(2R_{экс} - R_{zen})}{R_{ex} - 2R_{экс}}, \quad (5.6)$$

при этом

$$m = \frac{2R_{экс} R_{ex}}{4R_{экс}(R_{ex} - R_{экс}) + R_{zen}(2R_{экс} - R_{ex})} \quad (5.7)$$

### 5.3 Контрольные вопросы

1. Каковы физические причины изменения  $U_{\text{вых}}$  при изменении положения движка регулировочного сопротивления?
2. Какая из схем на рис. 5.1 обеспечивает большую глубину регулировки усиления при одинаковых значениях регулировочных сопротивлений?
3. Чем объяснить изменение верхней граничной частоты в схемах на рис. 5.1 при изменении коэффициента передачи на средних частотах?
4. Сравните полосы пропускания исследуемых схем при одинаковой глубине регулировки усиления.

### 5.4 Порядок выполнения работы

1. Соберите схемы пассивной регулировки усиления (рис. 5.1).

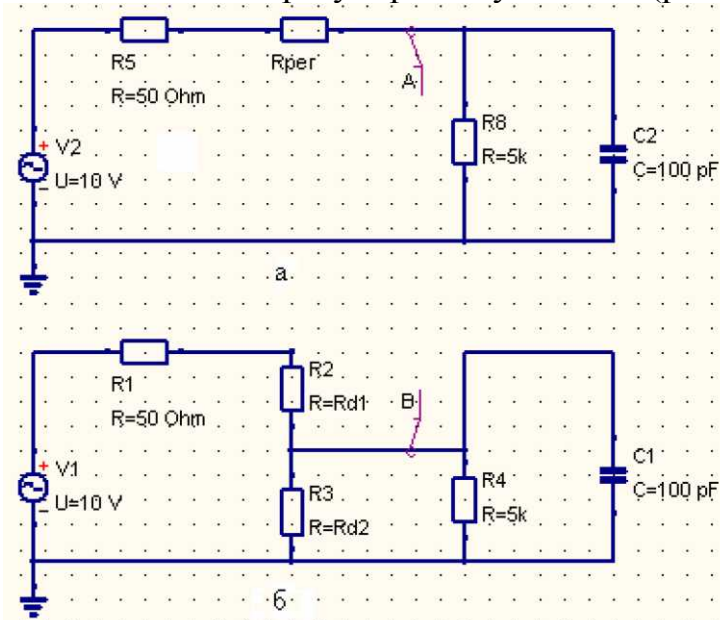


Рисунок 5.1 - Схемы пассивной регулировки усиления

В программе Qucs нет элемента «переменный резистор», чаще всего в таком элементе просто нет необходимости. Тем не менее, моделирование работы переменного резистора можно выполнить. Изменять величину регулировочного резистора в схеме на рисунке 5.1 а легко с помощью моделирования с разверткой параметра. Для моделирования работы потенциометра - резистора, подключенного всеми тремя выводами можно использовать делитель напряжения - рис. 5.1 б. При перемещении движка потенциометра происходит одновременное изменение сопротивлений верхнего и нижнего плеча делителя. Сопротивление верхнего плеча потенциометра можно также изменять с помощью моделирования с разверткой параметра, допустим изменения задаются от максимальной величины до значения, близкого к нулю. Чтобы при этом происходило согласованное изменение сопротивления нижнего плеча делителя, его

значение нужно задать с помощью уравнения, в котором из максимальной величины сопротивления потенциометра вычитается сопротивление верхнего плеча делителя.

Максимальное значение регулировочного резистора выбирается таким образом, чтобы верхняя граничная частота на уровне 0,7 для каждой из схем составляла 1 МГц (внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_{ген}$  примите равным 50-100 Ом, сопротивление нагрузки  $R_{ex} = 5$  кОм (входное сопротивление усилителя, на входе которого стоит регулятор усиления) и емкость нагрузки  $C_{ex} = 100$  пФ). Расчетные формулы даны в приложении в конце описания данной работы.

2. Изменяйте значение регулировочного сопротивления от 0 до максимального значения и постройте регулировочную характеристику (зависимость модуля коэффициента передачи на средних частотах от величины регулировочного сопротивления). Под регулировочным сопротивлением в схеме на рис. 5.1 б понимается сопротивление нижнего плеча делителя.

Во всех точках измерьте верхнюю граничную частоту на уровне 0,7 и сопоставьте регулировочные характеристики (зависимость модуля коэффициента передачи цепи от величины регулирующего элемента) и частотную зависимость регулируемого усиления.

Результаты измерений занесите в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Условия:  $R_{ген} = \dots$ ,  $R_{ex} = \dots$ ,  $C_{ex} = \dots$ ,  $e_{ген} = \dots$

$R_{рег}$							
$U_{вых}$							
$K_0$							
$f_в$							

3. Исследуйте влияние изменения внутреннего сопротивления источника сигнала и входного сопротивления устройства на регулировочную характеристику и полосу пропускания. Для этого повторите измерения по пункту 2 еще дважды (изменив сопротивление источника сигнала, а затем - при прежнем значении сопротивления источника сигнала, изменив сопротивление нагрузки, имитирующее входное сопротивление усилителя, коэффициент усиления которого регулируется).

Таблица 5.2

Условия:  $R_{ген} = \dots$ ,  $R_{ex} = \dots$ ,  $C_{ex} = \dots$ ,  $e_{ген} = \dots$

$R_{рег}$							
$U_{вых}$							
$K_0$							
$f_в$							



Таблица 5.3

УСЛОВИЯ:  $R_{ген} = \dots$ ,  $R_{ex} = \dots$ ,  $C_{ex} = \dots$ ,  $e_{ген} = \dots$ 

$R_{рег}$							
$U_{свх}$							
$K_{(1)}$							
$f_{в}$							

*Выводы по проделанной работе*

## **Лабораторная работа №6. Исследование активных схем плавной регулировки усиления**

### **6.1 Введение**

Цель работы: сравнительное исследование регулировочных характеристик и частотных свойств различных способов плавной регулировки усиления.

### **6.2 Контрольные вопросы**

1. Какова зависимость крутизны биполярного транзистора от режима его работы?
2. Как зависит коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе от его крутизны в рабочей точке?
3. Как и за счет чего изменяется верхняя граничная частота каскада при изменении режима работы транзистора?
4. Чем определяется коэффициент передачи входной цепи на средних частотах и чем вызвано его изменение при изменении режима работы транзистора?
5. Какими способами (схемами подключения к источнику питания) можно обеспечить режим работы биполярного транзистора?
6. Как зависит верхняя граничная частота входной цепи от коэффициента усиления каскада и почему?
7. С чем связаны изменения нижней граничной частоты входной цепи при изменении коэффициента усиления каскада (в каждом из способов регулировки усиления)?
8. Чем объяснить, что нижняя граничная частота выходной цепи практически не меняется при изменении коэффициента усиления каскада (в каждом из способов регулировки усиления)?

### **6.3 Порядок выполнения работы**

1. Исследуйте влияние изменения режима работы биполярного транзистора на коэффициент усиления каскада. Для этого соберите схему усилителя на сопротивлениях на биполярном транзисторе с питанием фиксированным током базы, рис. 6.1.

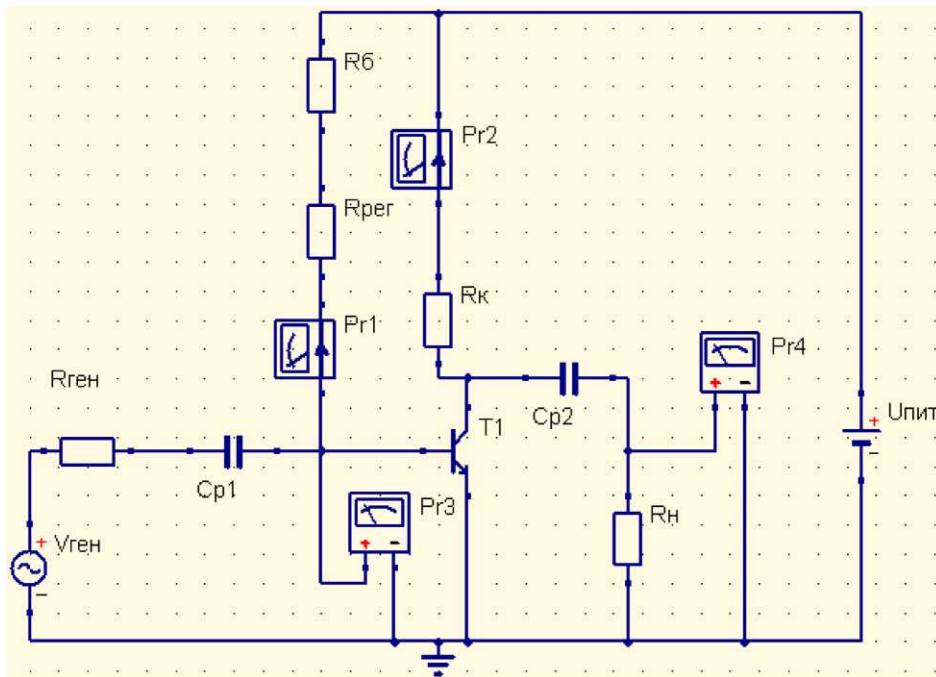


Рисунок 6.1 - Схема регулировки усиления изменением режима транзистора с помощью сопротивления в цепи базы

Выполните моделирование на постоянном и переменном токах с разверткой параметра. В качестве параметра выступает  $R_{пер}$  - часть сопротивления в цепи базы. При определении

диапазона изменения сопротивления ориентируйтесь на величину тока коллектора, она должна изменяться от 1 до 10-15 мА.

Контролируйте режим транзистора (записывайте значения постоянного тока базы и коллектора). Добавьте блок вычислений, в котором определите сквозной и обычный коэффициент усиления, а также верхнюю граничную частоту для входной и выходной цепи на уровне 0,7 (внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_{ген}$  примите равным 50-100 Ом). Выполните моделирование переходного процесса и постройте график выходного напряжения для контроля его формы (она не должна искажаться).

С помощью функции PlotVs() определите функцию и постройте регулировочную характеристику (в данном случае - зависимость коэффициента усиления от режима работы транзистора, то есть от постоянной составляющей тока коллектора, поскольку изменение усиления происходит за счет изменения режима работы транзистора) и кривую зависимости верхней граничной частоты входной и выходной цепей на уровне 0,7 от регулирующего параметра. Одновременно оцените зависимость коэффициента передачи входной цепи на частоте генератора от изменения режима. Результаты измерений занесите в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 - Исследование влияния изменения режима работы транзистора на коэффициент усиления и полосу пропускания

## каскада

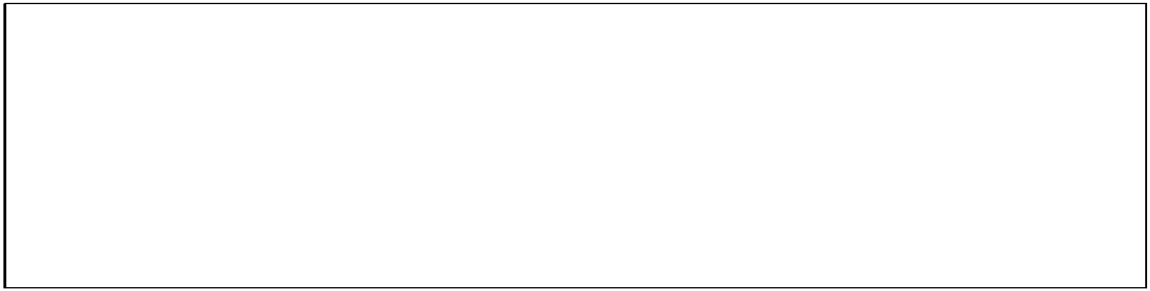
Условия эксперимента:  $U_{пит} = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$ ,  $f_{ген} = \dots$  и т.д.

$R_{\delta}$ , кОм							
$U_{вх}$ , мВ							
$U_{вых}$ , мВ							
$K_{вх}$							
$K_{вых}$							
$f_{ввх}$							
$f_{ввых}$							
$f_{нвх}$							
$f_{нвых}$							

Зависимость коэффициента передачи входной цепи ( $K_{вх}$ ) от тока покоя коллектора

Зависимость коэффициента усиления каскада ( $K_{вых}$ ) от тока покоя коллектора

Зависимость  $f_{ввых}$  от тока покоя коллектора



Зависимость  $f_{в\ ex}$  от тока покоя коллектора

Убедитесь, что изменение верхней граничной частоты в процессе регулировки не связано с изменением амплитуды выходного напряжения. Для этого в одной из исследованных точек снимите амплитудную характеристику (зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного), измеряя параллельно верхнюю граничную частоту. Пока амплитудная характеристика остается линейной, изменение верхней граничной частоты не наблюдается. Результаты данного эксперимента оформите в виде таблицы.

*Выводы по пункту 1*

2. Возможен другой способ изменения режима транзистора - изменением сопротивления резистора в цепи эмиттера (зашунтированного конденсатором большой емкости, чтобы исключить появление отрицательной обратной связи, влияние которой на коэффициент усиления и полосу пропускания изучается в пункте 3).

Соберите схему эмиттерной стабилизации, выбрав  $R_e$  таким образом, чтобы при максимальном токе коллектора (10-15 мА) падение напряжения на нем было порядка 3 В. Ток делителя напряжения в цепи базы выберите в 10-50 раз больше базового тока транзистора. Напряжение на коллекторе и ток коллектора возьмите равными соответствующим значениям в средней точке измерений по пункту 1.

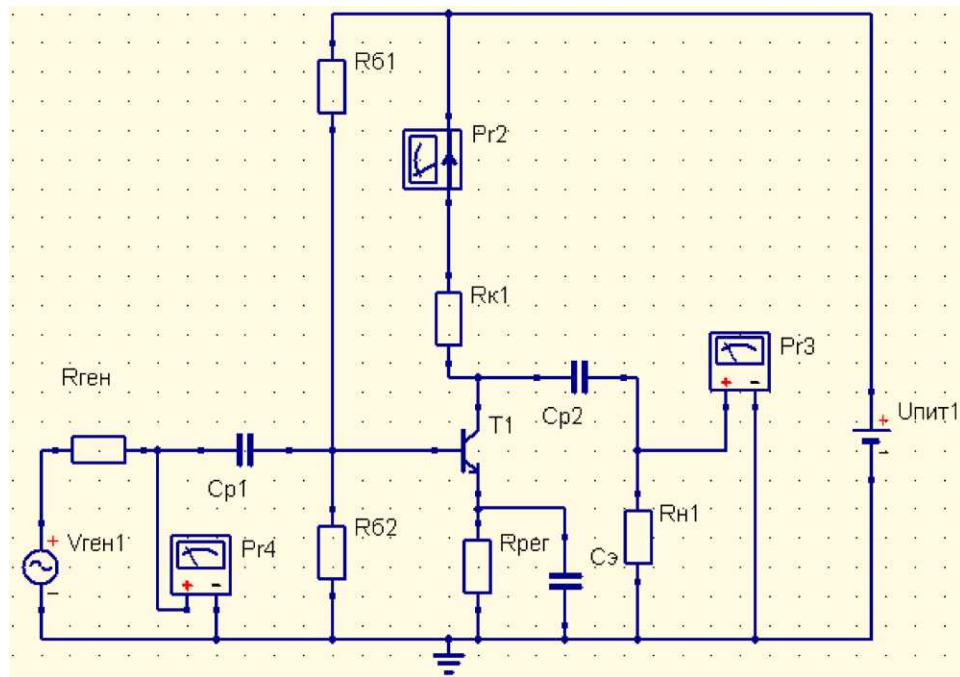


Рисунок 6.2 - Схема регулировки усиления изменением режима с помощью переменного сопротивления в цепи эмиттера

Выполните моделирование с разверткой параметра, в качестве параметра выступает сопротивление в цепи эмиттера, зашунтированное конденсатором емкостью 500 мкФ. Повторите построения пункта 1 и сравните полученные результаты.

Для того, чтобы убедиться, что способ изменения режима не имеет существенного значения до тех пор, пока  $R_{б}$  не станет соизмеримым с входным сопротивлением транзистора, нет смысла снимать много точек. Достаточно измерений в двух-трех точках.

3. Модернизируйте схему рис. 6.2 рассчитав величину ее элементов таким образом, чтобы ток покоя коллектора был максимальным из фигурировавших в экспериментах 1 и 2. Добавьте в цепь эмиттера незашунтированный регулировочный резистор, как показано на рис. 6.3. При изменении сопротивления регулировочного резистора режим работы транзистора изменяться не будет. Диапазон изменения сопротивления задайте таким образом, чтобы коэффициент усиления изменялся примерно во столько же раз, во сколько его изменяли в пункте 1.

По измеренному в выбранной точке коэффициенту усиления оцените крутизну транзистора и выберите регулировочное сопротивление так, чтобы обеспечить заданное изменение коэффициента усиления. Для расчета используйте формулы:

$$S = \frac{K_0}{R_{эв}}, \quad R_{эв} = \frac{R_{к} R_{н}}{R_{к} + R_{н}}, \quad R_{рег} = \frac{A-1}{S}, \quad (6.1)$$

где  $A$  - глубина регулировки усиления.

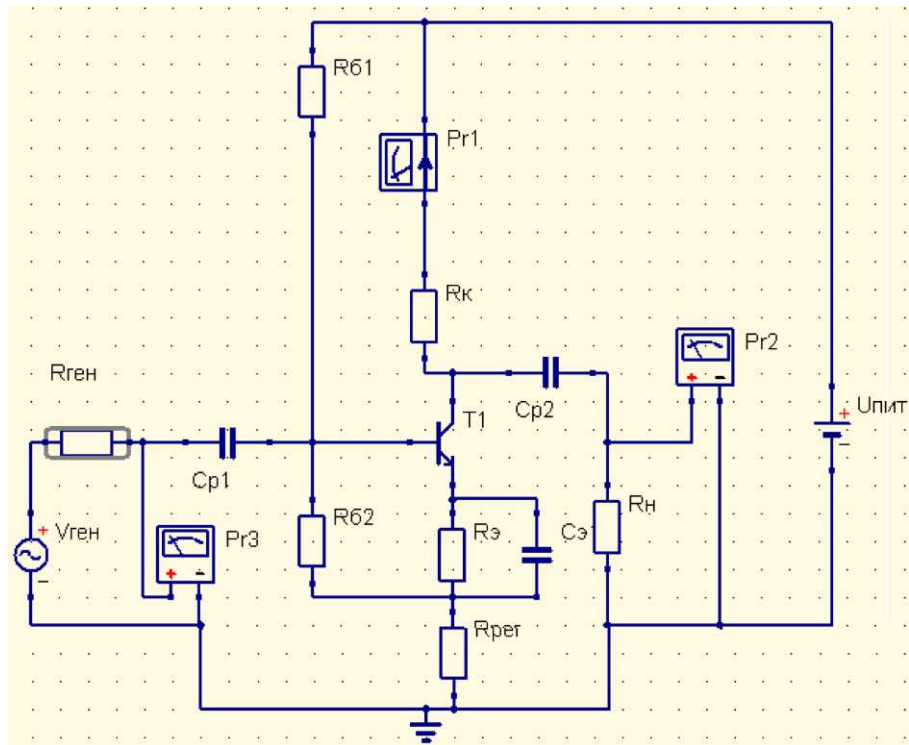


Рисунок 6.3 - Схема регулировки усиления изменением глубины обратной связи

Повторите измерения, необходимые для оценки зависимости коэффициента усиления, сквозного коэффициента усиления и верхней граничной частоты от величины регулирующего параметра (регулирующего сопротивления в цепи эмиттера). Результаты измерений занесите в таблицу 6.2, аналогичную таблице 6.1.

Сравните изменение верхних граничных частот при одних и тех же изменениях коэффициентов усиления в различных схемах регулировки.

Таблица 6.2 - Исследование влияния изменения глубины обратной связи на коэффициент усиления и полосу пропускания каскада

Условия эксперимента:  $e_{ген} = \dots$ ,  $R_{ген} = \dots$ ,  $f_{ген} = \dots$ ,  $I_{к0} = \dots$  и т.д.

$R_{рег}$ , кОм							
$U_{вх}$ , мВ							
$U_{вых}$ , мВ							
$K_{вх}$							
$K_{вых}$							
$f_{ввх}$							
$f_{ввых}$							
$f_{нвх}$							
$f_{нвых}$							



Зависимость коэффициента передачи входной цепи ( $K_{вх}$ ) от глубины обратной связи

Зависимость коэффициента усиления каскада ( $K_{вых}$ ) от глубины обратной связи

Зависимость  $f_{с\text{вых}}$  от глубины обратной связи

Зависимость  $f_{с\text{вх}}$  от глубины обратной связи

Верхняя граничная частота каскада при различных значениях коэффициента усиления для сравнения двух схем регулировки

*Выводы по пункту 3*

## Лабораторная работа 7. Определение высокочастотных параметров биполярных транзисторов

### 7.1 Введение

Цель работы: научиться определять высокочастотные параметры биполярных транзисторов (емкость коллекторного перехода  $C_{об}$  и постоянную времени транзистора  $\tau$ ) и на их основе входную динамическую емкость.

### 7.2 Теоретическая часть

Искажения, создаваемые входной цепью каскада, описываются постоянной времени верхних частот входной цепи:

$$\tau_{вх} = C_{вх\ дина} \cdot \frac{R_{зех} \cdot R_{ex}}{R_{зех} + R_{ex}}, \quad (7.1)$$

где  $R_{зех}$  - выходное сопротивление источника сигнала,  $R_{ex}$  - входное сопротивление каскада,  $C_{вх\ дина}$  - входная динамическая емкость каскада, определяемая суммой:

$$C_{вх\ дина} \approx \frac{\tau}{r_{б}} + C_{об} \cdot (1 + K_0), \quad (7.2)$$

где  $K_0$  - коэффициент усиления каскада,  $\tau$  - постоянная времени транзистора,  $r_{б}$  - объемное сопротивление базы,  $C_{об}$  - емкость перехода база-коллектор.

Искажения, создаваемые выходной цепью каскада, определяются постоянной времени верхних частот выходной цепи:

$$\tau_{вых} = \tau + C_{об} \cdot (1 + S_0 r_{б}) \cdot R_{экв} + C_n \cdot R_{экв}, \quad (7.3)$$

где  $S_0$  крутизна транзистора в рабочей точке,  $R_{экв}$  - эквивалентное сопротивление нагрузки каскада, состоящее из параллельно включенных выходного сопротивления транзистора  $R_i$ , сопротивления коллектора  $R_k$  и сопротивления нагрузки  $R_n$ :

$$R_{экв} = R_i \parallel R_k \parallel R_n \approx \frac{R_k \cdot R_n}{R_k + R_n}. \quad (7.4)$$

### 7.3 Контрольные вопросы

1. Как можно измерить входное сопротивление некоторого устройства (например, транзистора)?
2. Чем отличается входная емкость транзистора от его динамической емкости?
3. Как и почему изменяется емкость коллекторного перехода при изменении напряжения на переходе?
4. При отсутствии  $C_n$  постоянная времени какой цепи больше - входной или выходной и почему?

5. Как изменяется полоса пропускания входной цепи каскада при изменении его коэффициента усиления и почему?

#### 7.4 Порядок выполнения работы

1. Выберите рабочую точку транзистора, высокочастотные параметры которого подлежат измерению. При выборе рабочей точки целесообразно пользоваться характеристиками транзистора, измеренными при выполнении лабораторной работы №1. Желательно, чтобы рабочая точка находилась на линейном участке входной (проходной) характеристики транзистора.

Для определения  $C_{бх}$  и  $\tau$  можно использовать соотношение (7.1). Для этого необходимо предварительно определить входное сопротивление и крутизну транзистора в рабочей точке. Для измерений может быть использована схема, изображенная на рис. 7.1 (здесь и далее для примера взят транзистор 2N2222A).

При измерении  $R_{ex}$  и  $S_0$  частота генератора выбирается примерно равной 1-5 кГц, чтобы исключить влияние изменения этих параметров по мере увеличения частоты. Как видно из рис. 7.1, емкость разделительного конденсатора на входе выбрана равной 1 мкФ, также чтобы исключить влияние искажений, теперь уже на низких частотах.

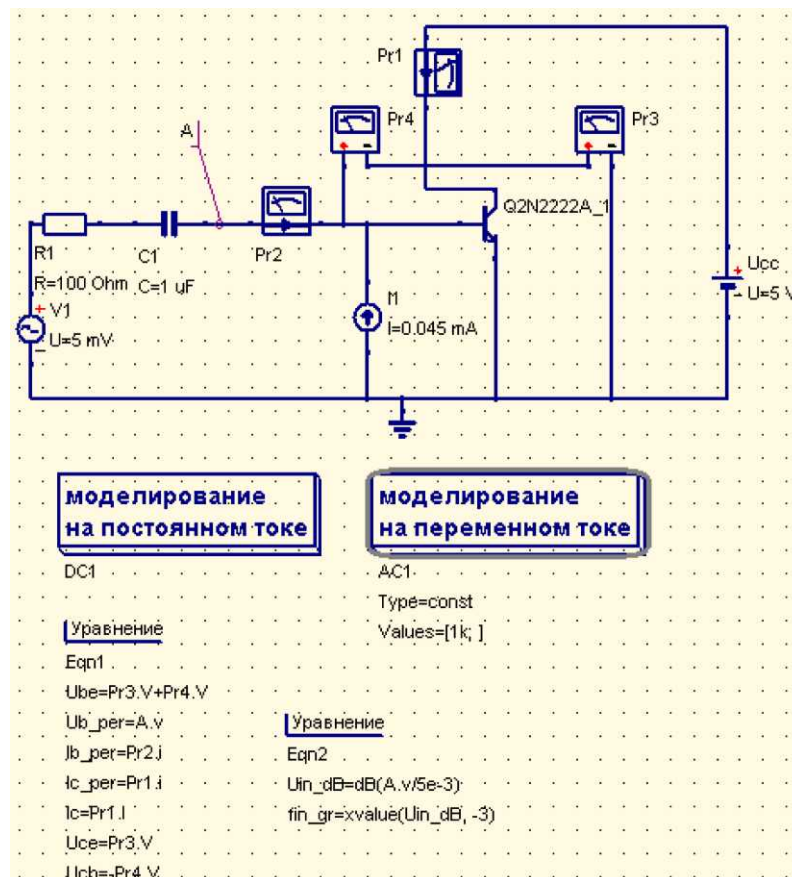


Рисунок 7.1 - Схема измерения параметров транзистора 2N2222A на переменном токе

В результате измерений для схемы рис. 7.1 были получены табличные диаграммы постоянных и переменных напряжений, показанные на рис. 7.2 и 7.3.

Расчет показывает, что входное сопротивление на переменном токе равно:

$$R_{вх} = U_{бэ} / I_{бэ} = 4.25 \cdot 10^{-3} / 6.4 \cdot 10^{-6} = 664 \text{ Ом},$$

а крутизна транзистора

$$: S_0 = I_{кэ} / U_{бэ} = 1.23 \cdot 10^{-3} / 4.25 \cdot 10^{-3} = 289 \text{ мА/В}.$$

number	Uce	Ube	Ucb	Ic
1	5	0.659	4.34	0.00847

Рисунок 7.2 - Результаты измерений на постоянном токе

acfrequency	Ib_per	Ic_per	Ub_per
1e03	6.4e-06 / 11.8°	0.00123 / 11.7°	0.00425 / 11.7°

Рисунок 7.3 - Результаты измерений на переменном токе

2. Для определения  $f_{в\text{вх}}$  следует измерить верхнюю граничную частоту  $f_{г\text{вх}}$  частотной характеристики входной цепи на уровне 0,7 (-3 дБ). Если в предыдущем эксперименте мы выполняли моделирование на переменном токе, установив фиксированную частоту, то теперь зададим диапазон частот от 1 кГц до 100 МГц. Разбив этот диапазон на 10 тысяч точек, используем уже известный прием, выразим переменное напряжение на входе (метка А) в децибелах с помощью функции dB(y/x), где y - это переменное напряжение в схеме, отмеченное меткой А (A.v), а x - амплитуда напряжения сигнала генератора. В нашем случае амплитуда напряжения генератора - 5 мВ. После этого с помощью функции xvalue(y,x) (y - входное напряжение в дБ, x = -3), найдем частоту, на которой амплитуда уменьшается на 3 дБ, рис. 7.4.

В нашем примере  $f_{г\text{вх}} = 4,79 \text{ МГц}$ . При этом  $\tau_{г\text{вх}} = 1/2\pi f_{г\text{вх}}$  и  $C_{г\text{вх}} = \frac{\tau}{r_{бэ}} + C_{бк}$ ,

поскольку в схеме на рис. 7.1 отсутствует сопротивление в цепи коллектора и, следовательно, коэффициент усиления равен нулю.

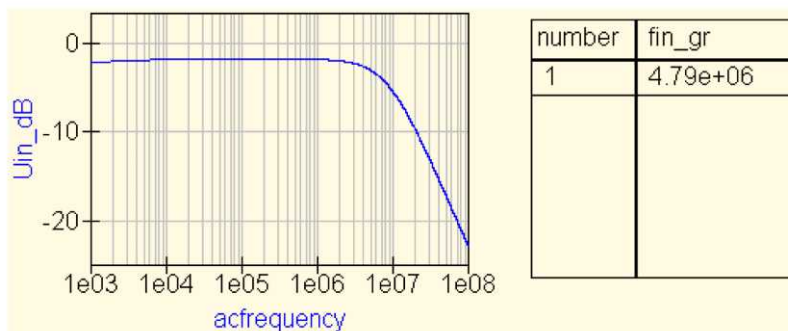


Рисунок 7.4 - Определение верхней граничной частоты входной цепи

Так как в формуле (7.2) две неизвестные величины ( $r_6$  - известно из списка параметров транзистора - 1,37 Ом), то необходимо выполнить еще одно измерение с другими условиями, чтобы найти еще одно значение  $C_{вх\ дин}$  и составить систему уравнений для двух неизвестных. Добавим сопротивление в цепь коллектора и, изменив напряжение источника питания, добьемся того же режима работы транзистора. В нашем примере постоянный ток коллектора составлял 8,47 мА и если сопротивление в цепи коллектора будет иметь величину 1 кОм, значит мы должны увеличить напряжение источника питания на 8,47 В, рис. 7.5.

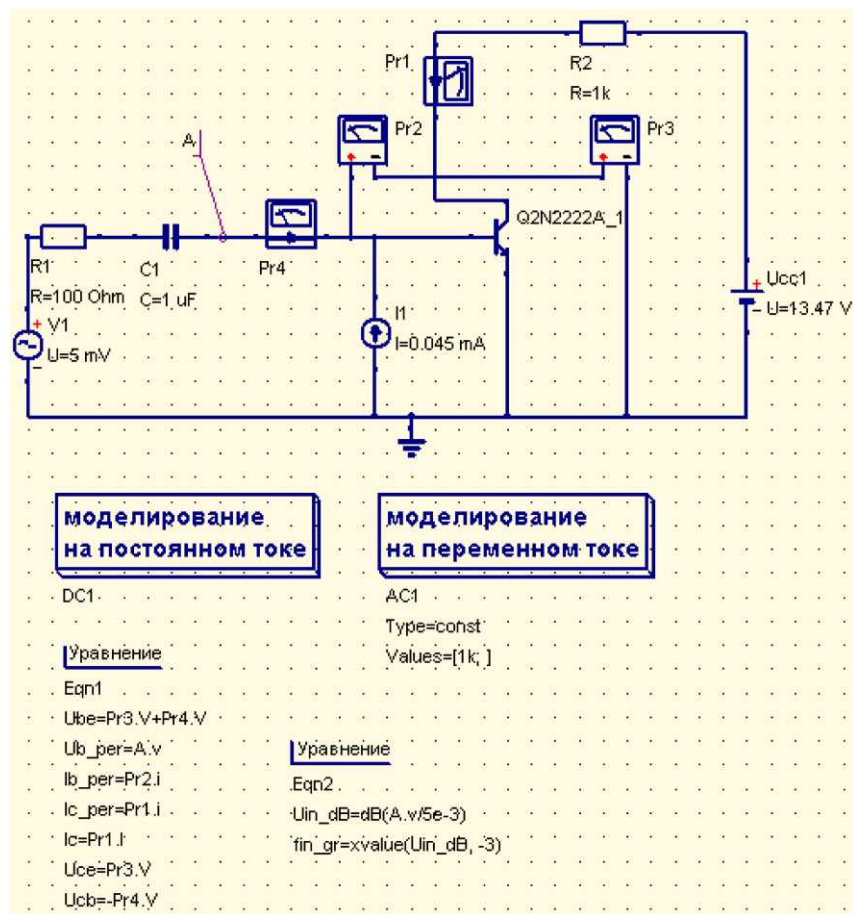


Рисунок 7.5 - Схема измерения для случая  $R_k \neq 0$

Получив новые значения напряжений и токов, рис. 7.6 - 7.7, рассчитаем те же величины, которые были получены в предыдущем случае и коэффициент усиления.

number	Ube	Ucb	Uce	Ic
1	0.659	4.34	5	0.00847

Рисунок 7.6 - Результаты измерений на постоянном токе с нагрузкой в цепи коллектора

acfrequency	lb_per	lc_per	Ub_per	U_rc
1e03	6.43e-06 / 12.3°	0.00115 / 11.7°	0.00424 / 11.7°	1.15 / -168°

Рисунок 7.7 - Результаты измерений на переменном токе с нагрузкой в цепи коллектора

Расчет с изменившимися условиями дает величину входного сопротивления на переменном токе:

$$R_{ex} = U_6 / I_{6\approx} = 4.24 \cdot 10^{-3} / 6.43 \cdot 10^{-6} = 659 \text{ Ом},$$

крутизну в рабочей точке:

$$S_0 = I_{x\approx} / U_{6\approx} = 1.15 \cdot 10^{-3} / 4.24 \cdot 10^{-3} = 271 \text{ мА/В},$$

и коэффициент усиления  $K_0 = U_{к\approx} / U_{6\approx} = 1.15 / 4.24 \cdot 10^{-3} = 271$ .

Моделирование на переменном токе в заданном диапазоне частот дает новое значение верхней граничной частоты  $f_{вех} = 531 \text{ кГц}$ , рис. 7.8.

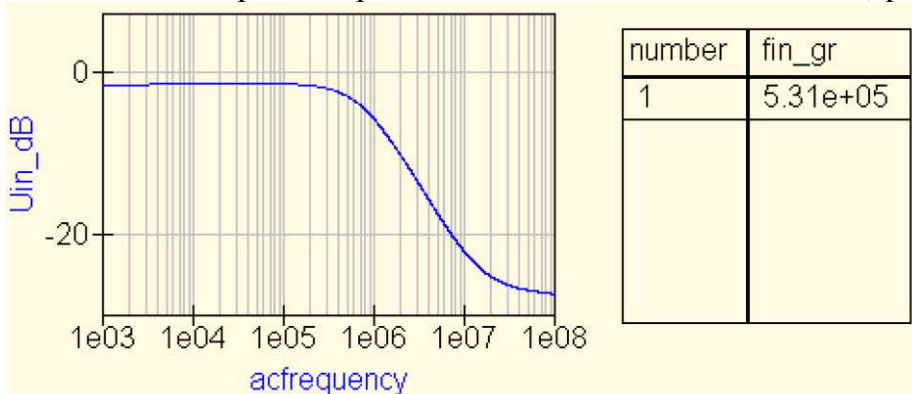


Рисунок 7.8 - Верхняя граничная частота цепи с коллекторной нагрузкой

Известно, с одной стороны, что динамическая емкость определяется соотношением:

$$C_{ex\text{дин}} = \frac{\tau_{ex}}{R_{экс}}, \text{ где } R_{экс} = \frac{R_{ген} \cdot R_{ex}}{R_{ген} + R_{ex}}, \text{ а } \tau_{ex} = \frac{1}{2\pi f_{ex}}, \quad (7.5)$$

с другой, она определяется выражением (7.2), это дает нам возможность составить и решить систему уравнений (7.6) для нахождения  $C_{бк}$  и  $\tau$ :

$$\frac{\tau}{r_b} + C_{бк} = \frac{1}{2\pi f_{ex1}} \cdot \frac{R_{ген} + R_{ex1}}{R_{ген} \cdot R_{ex1}},$$

$$\frac{\tau}{r_b} + C_{бк}(1 + K_0) = \frac{1}{2\pi f_{ex2}} \cdot \frac{R_{ген} + R_{ex2}}{R_{ген} \cdot R_{ex2}}. \quad (7.6)$$

В рассматриваемом примере  $C_{бк} = 11,33 \text{ пФ}$ ,  $\tau = 0,5 \text{ нс}$ .

Результаты определения высокочастотных параметров полезно проверить, используя их для расчета постоянной времени выходной цепи по формуле (7.3). Выполнив затем моделирование на переменном токе и определив верхнюю граничную частоту с помощью такого «измерения»,



можно рассчитать  $\tau_{в\ вых}$  сравнить ее со значением, рассчитанным по формуле (7.3).

При выполнении этого эксперимента необходимо исключить влияние входной цепи на полосу пропускания. Для этого следует сделать  $R_{zen}$  равным нулю, рис. 7.9.

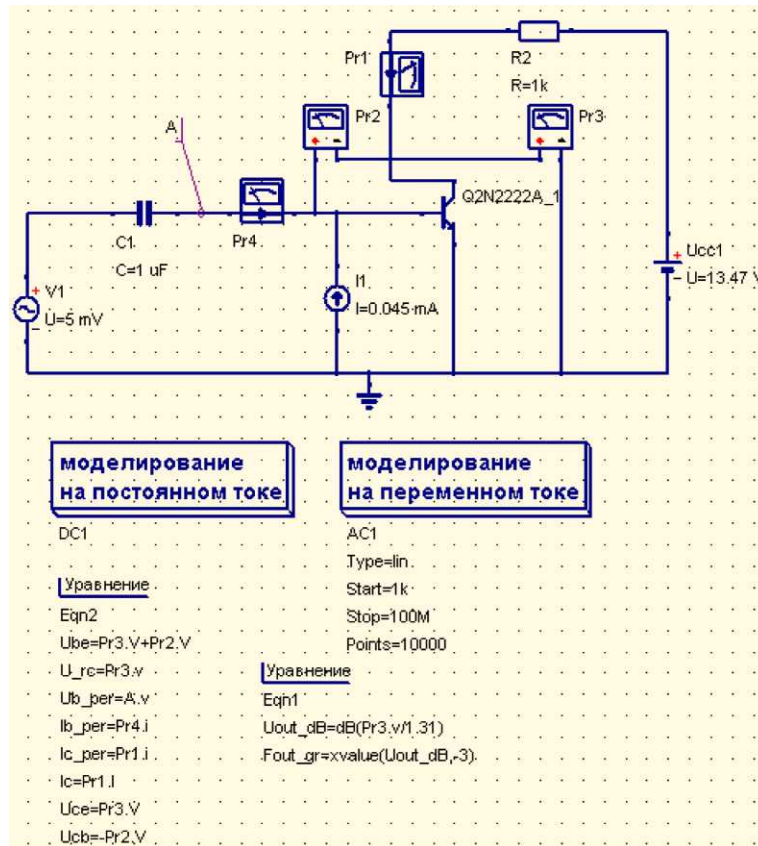


Рисунок 7.9 - Измерение частотных свойств выходной цепи при нулевом сопротивлении источника сигнала

Вычисленное по формуле (7.3) значение  $\tau_{в\ вых}=16,04$  нс ( $f_{в\ вых}=9,91$  МГц), верхняя граничная частота, измеренная на выходе усилительного каскада (с помощью моделирования)  $f_{в\ вых}=15,9$  МГц. Довольно высокую погрешность можно объяснить неточностью физических параметров модели транзистора.

3. Увеличьте напряжение питания с тем, чтобы постоянное напряжение между коллектором и базой увеличилось примерно вдвое ( $I_{k0}$  сохраните тем же, что и ранее). Вновь определите  $C_{бх}$  и  $T$  описанным выше способом и оцените влияние изменения напряжения между коллектором и базой (эксперимент можно выполнить два-три раза).

4. Верните напряжение питания к первоначальному значению. Увеличьте  $I_{k0}$  примерно вдвое и оцените влияние изменения тока на  $C_{бх}$  и  $T$ .

В описании данной лабораторной работы предложен один из способов измерения высокочастотных параметров биполярных транзисторов. Предложите свой способ решения этой задачи, изобразите схему



измерений, определите  $C_{6x}$  своим способом и сравните с измеренным ранее.

Учебное пособие

Агеев Е.Ю.

Компьютерное моделирование и проектирование.  
Лабораторный практикум. Часть 2

Методические указания к лабораторным работам

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40