

Лабораторная работа №4 по курсу «Радиотехнические устройства и системы»

Введение в Qucs

Кузнецов В.В., ассистент кафедры ЭИУ1-КФ

20 октября 2013 г.

1 Цель работы

Цель данного руководства — рассмотрение процедуры проведения моделирования аналоговых электрических схем в программе Qucs.

Данная программа основана на вновь разработанном ядре схемотехнического моделирования (разработка совместно с Берлинским институтом высокочастотной техники) и работает под управлением операционных систем (ОС) Linux и Windows. В данной программе возможно моделирование аналоговых и цифровых схем, моделирование на постоянном и переменном токе и моделирование переходного процесса. Недостатком программы является разделение аналогового и цифрового моделирования.

Родной операционной системой для Qucs является Linux, и при работе на этой системе следует ожидать наибольшей производительности. Настоятельно рекомендуется использовать для работы программы ОС Linux.

Версию Qucs для Linux можно установить в один клик, используя пакетный менеджер, а версию для Windows можно скачать бесплатно с сайта разработчика <http://qucs.sourceforge.net>.

2 Интерфейс программы

2.1 Главное окно

После загрузки Qucs показывается главное окно, которое выглядит примерно как на рис.1. С правой стороны расположена рабочая область (3), в которой содержатся схемы, документы показа данных и т.д. С помощью вкладок (2) над этой областью можно быстро переключиться на любой документ, открытый в данный момент. С левой стороны главного окна Qucs находится еще одна область (8), содержание которой зависит от состояния вкладок, расположенных слева от нее: "Проекты", "Содержание" и "Компоненты". С помощью выпадающего списка (1), расположенного над областью (8) можно выбирать группы компонентов, которые будут размещаться на схеме. Доступны следующие группы компонентов: дискретные компоненты, источники, измерители, линии передачи, нелинейные компоненты, устройства Verilog, цифровые компоненты, файловые компоненты, диаграммы, рисунки. Компоненты размещаются на схеме методом перетаскивания из области (8) на рабочую область (3). Типы моделирования размещаются на схеме так же как и компоненты.

Над рабочей областью располагается главное меню и панель инструментов. Назначение пунктов меню и кнопок на панели инструментов понятно из их названия. Стоит отметить

кнопку вставки уравнений (5), с помощью которой можно размещать на схеме уравнения. С помощью кнопки вставки имени узла (6) можно задавать имена узлам на схеме, а с помощью кнопки (7) — соединять компоненты проводами. Запустить моделирование можно и с клавиатуры, нажав клавишу F2 или с помощью кнопки (4).

Кнопка (10) служит для возврата в режим выделения компонентов. После нажатия на эту кнопку по левому щелчку мыши происходит выделение компонентов на схеме.

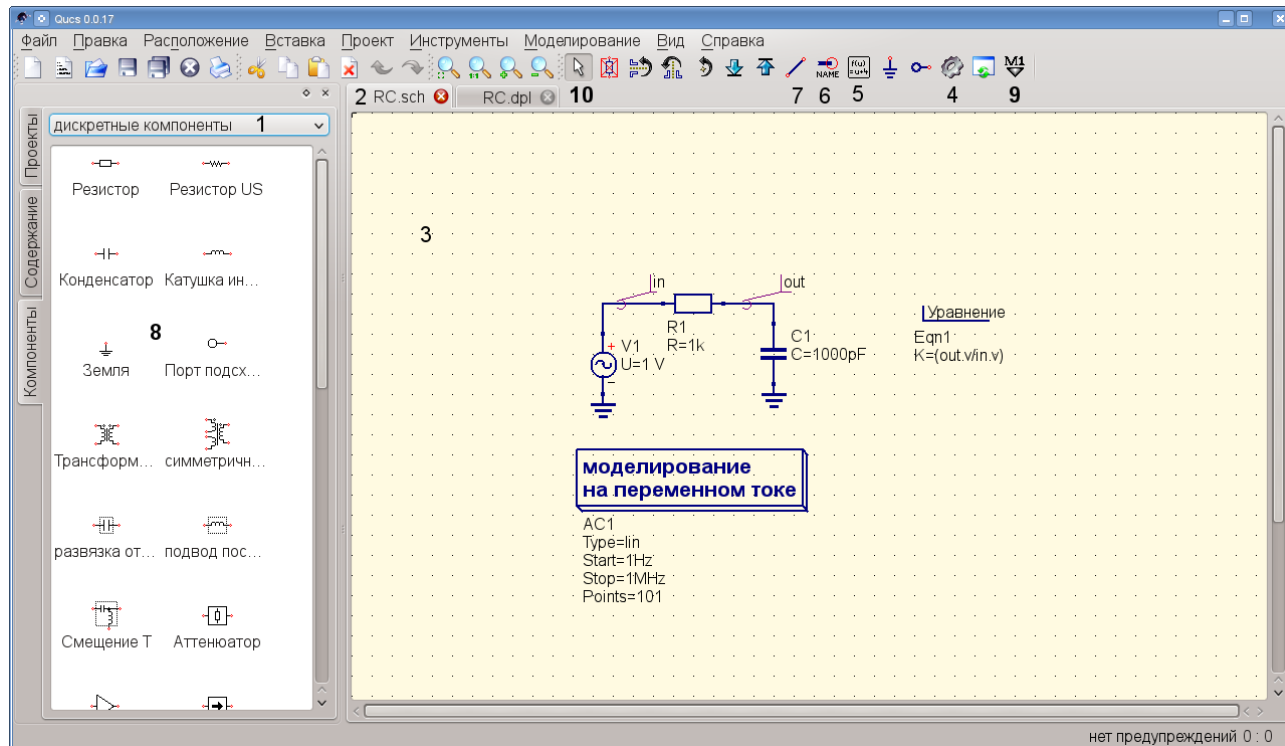


Рис. 1. Главное окно программы Qucs. 1 — выпадающий список с типами компонентов, видов моделирования и диаграмм; 2 — вкладки с открытыми схемами; 3 — рабочая область; 4 — кнопка запуска моделирования; 5 — кнопка вставки уравнения; 6 — кнопка вставка имени узла; 7 — кнопка вставки проводов; 8 — область выбора компонентов; 9 — кнопка вставки маркера на график; 10 — кнопка перехода в режим выделения компонентов

По правому щелчку мыши на любом компоненте можно открыть контекстное меню компонента. По двойному щелчку мыши открывается диалоговое окно свойств компонента, в котором можно задавать, например сопротивление резисторов, ёмкость конденсаторов, параметры транзисторов и т.п. Ещё параметры компонентов можно изменить по левому щелчку мыши на значении сопротивления, ёмкости и т.п. в рабочей области. При этом параметр подсвечивается и с клавиатуры можно напечатать новое значение параметра и затем нажать клавишу Enter. Для видов моделирования задаются параметры моделирования, например отрезок времени для моделирования переходного процесса или диапазон частот при моделировании на переменном токе.

Компоненты соединяются с помощью проводов. Провода добавляются на схему нажатием на кнопку (7) на рис.1. Схема не будет работать без заземления (GND). Заземление — это особый компонент, который добавляется на схему при помощи кнопки с пиктограммой заземления на панели инструментов.

2.2 Библиотека компонентов

Выбрав пункт меню Инструменты-> Библиотека компонентов, можно открыть библиотеку компонентов (см. рис.2).

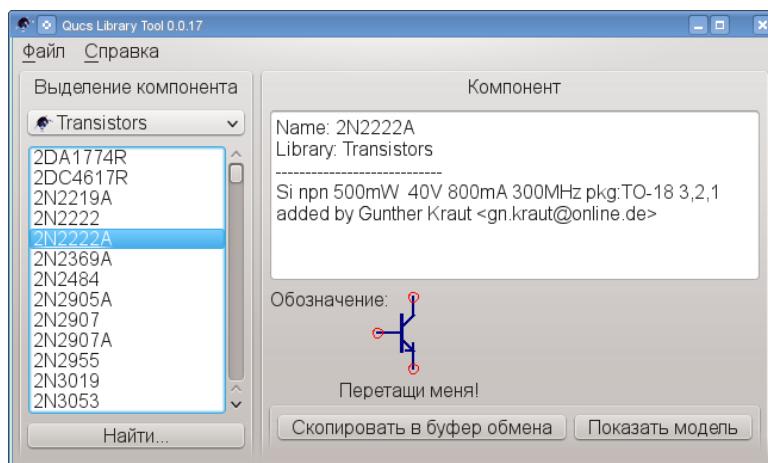


Рис. 2. Библиотека компонентов

Библиотека содержит готовые модели для различных электронных компонентов (диоды, транзисторы, операционные усилители), которые из окна библиотеки можно перетаскивать на схему.

2.3 Сохранение и открытие документов

После запуска Qucs у Вас еще нет ни одного документа, поэтому нажмите кнопку сохранения на панели инструментов (или используйте главное меню: Файл->Сохранить) чтобы сохранить документ без названия, который заполняет рабочую область (3). После этого появится диалоговое окно для ввода имени нового документа. Введите "firstSchematic" и нажмите кнопку "Сохранить". Файлы схем Qucs имеют расширение sch и сохраняются в формате XML.

Чтобы открыть схему Qucs в главном меню нужно выбрать Файл->Открыть, или нажать кнопку на панели инструментов. В диалоговом окне выбрать файл с расширением sch, например "firstSchematic.sch".

3 Моделирование на постоянном токе

Целью моделирования на постоянном токе (DC-analysis) является расчёт рабочей точки электронных схем. Предполагается, что через все узлы схемы протекает постоянный ток.

Рассчитаем режим работы транзистора в однокаскадном усилителе. Сначала размещаем на поле схемы все компоненты (см. рис. 3) и соединяем их проводами. Чтобы поместить на схему транзистор выбираем в главном меню Инструменты->Библиотека компонентов, в выпадающем списке в открывшемся окне (см. рис.2) выбираем библиотеку Transistors. И в списке выбираем транзистор 2N2222A и перетаскиваем его на схему.

Элементы R и C находятся в группе «Дискретные компоненты» в списке (1) на рис.1, а источник постоянного тока (батарея) в группе «Источники».

После того, как схема сформирована нужно задать типы моделирования. Для этого в выпадающем списке (1) в левой части окна программы (см. рис.1) выбираем пункт «Виды моделирования». Из области компонентов (8) перетаскиваем на схему компонент

«Моделирование на постоянном токе». Параметры для моделирования на постоянном токе задавать не нужно.

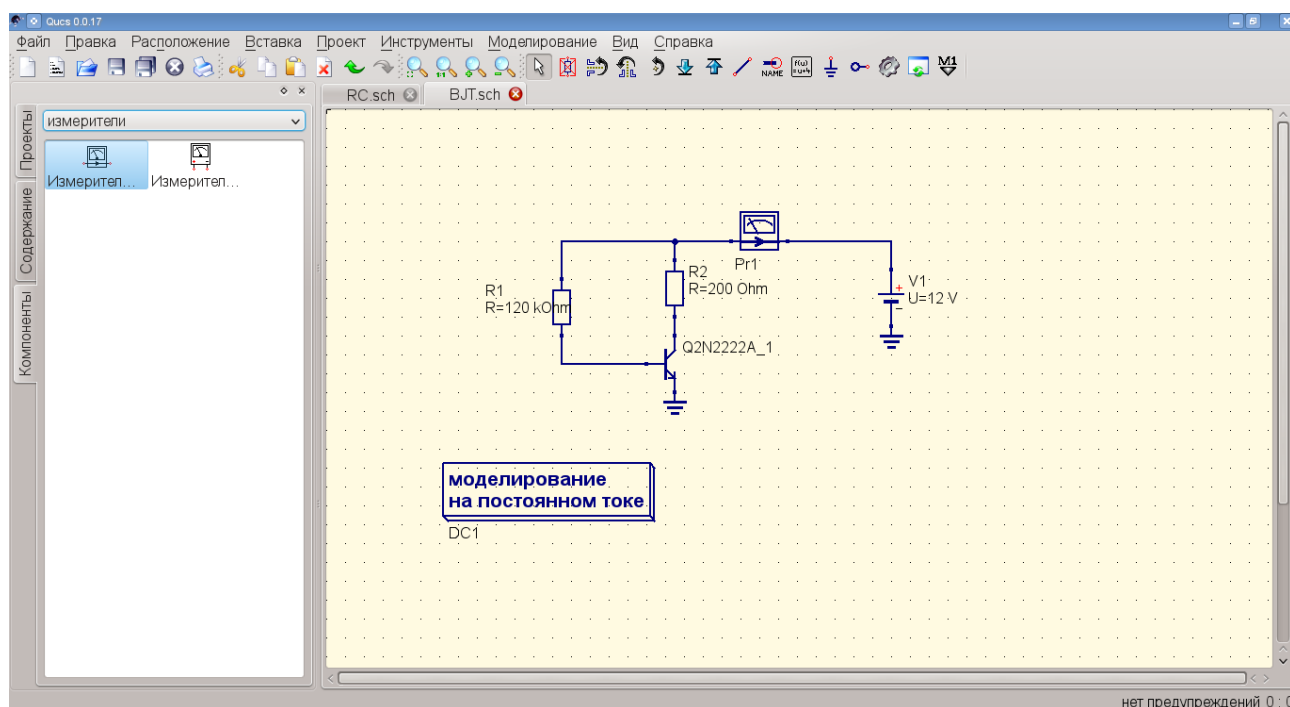


Рис. 3. Схема для моделирования на постоянном токе

Теперь сохраняем схему, например в файл BJT.sch, выбрав в главном меню Файл->Сохранить. Моделирование на постоянном токе запускается нажатием на клавишу F8 на клавиатуре. Qucs рассчитывает рабочую точку транзисторного каскада и показывает напряжения на узлах схемы (узел — точка соединения двух или более компонентов) рядом с этими узлами. Чтобы посмотреть токи в ветвях схемы, нужно последовательно с компонентов включить специальный компонент — измеритель тока. После проведения моделирования на постоянном токе, рядом с измерителем тока отображается рассчитанное значение тока. Значение напряжения подсвечивается синим цветом, а тока — зелёным. Результат расчёта рабочей точки нашего транзисторного каскада показан на рис.4.

Задание: Подобрать резистор R1 в цепи базы транзистора, чтобы напряжение на коллекторе было равно 6 В.

4 Моделирование переходного процесса

Моделирование переходного процесса (Transient Analysis) позволяет получить отклик на выходе схемы на какое-либо входное воздействие. Например если на вход усилителя мы подаём синусоидальный сигнал, то в результате анализа переходных процессов мы получим сигнал на выходе усилителя.

Смоделируем отклик транзисторного однокаскадного усилителя низкой частоты, если на его вход подано синусоидальное напряжение амплитудой 200 мВ и частотой 10 кГц.

Для этого сначала собираем схему усилителя (см. рис. 5). Особенностью этой схемы является, то что двум узлам, соответствующим входу и выходу усилителя, заданы имена in и out соответственно при помощи кнопки (6) на рис.1. Кроме моделирования переходного процесса для схем, содержащих активные компоненты, нужно обязательно проводить расчёт рабочей точки. Для этого поместим на схеме компонент моделирования на постоянном токе.

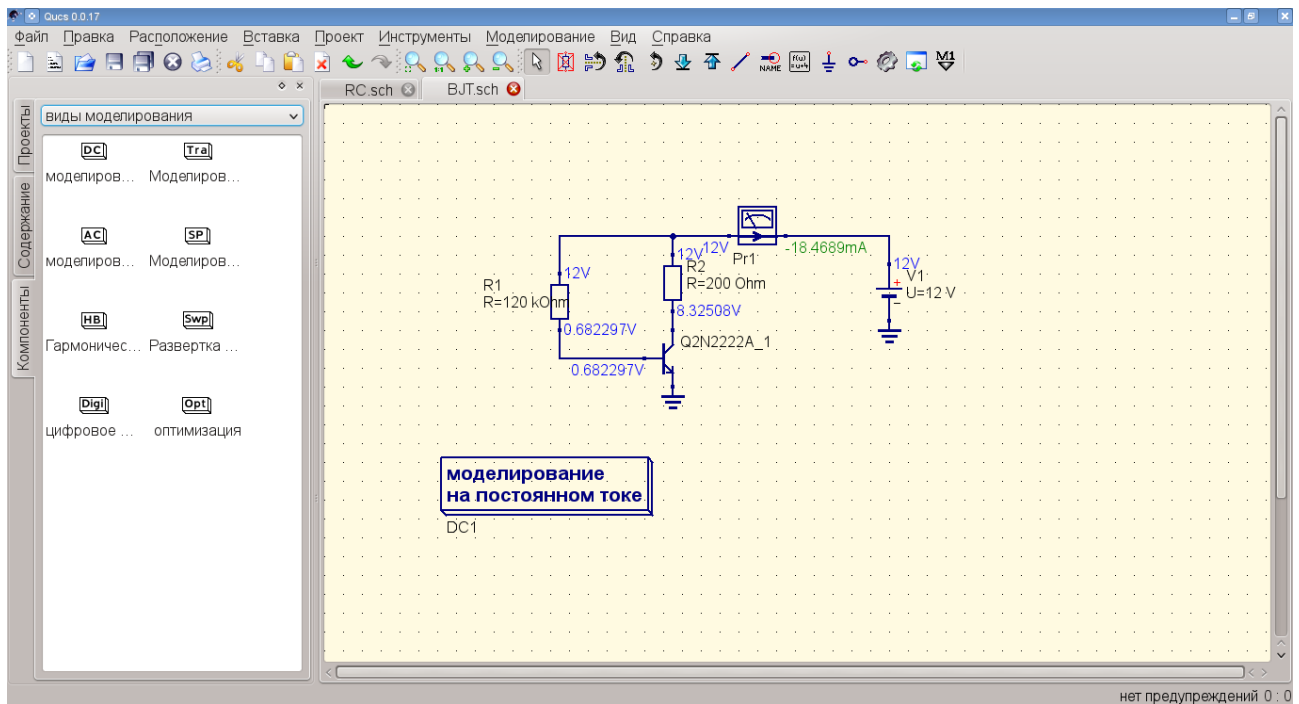


Рис. 4. Расчёт рабочей точки транзисторного каскада

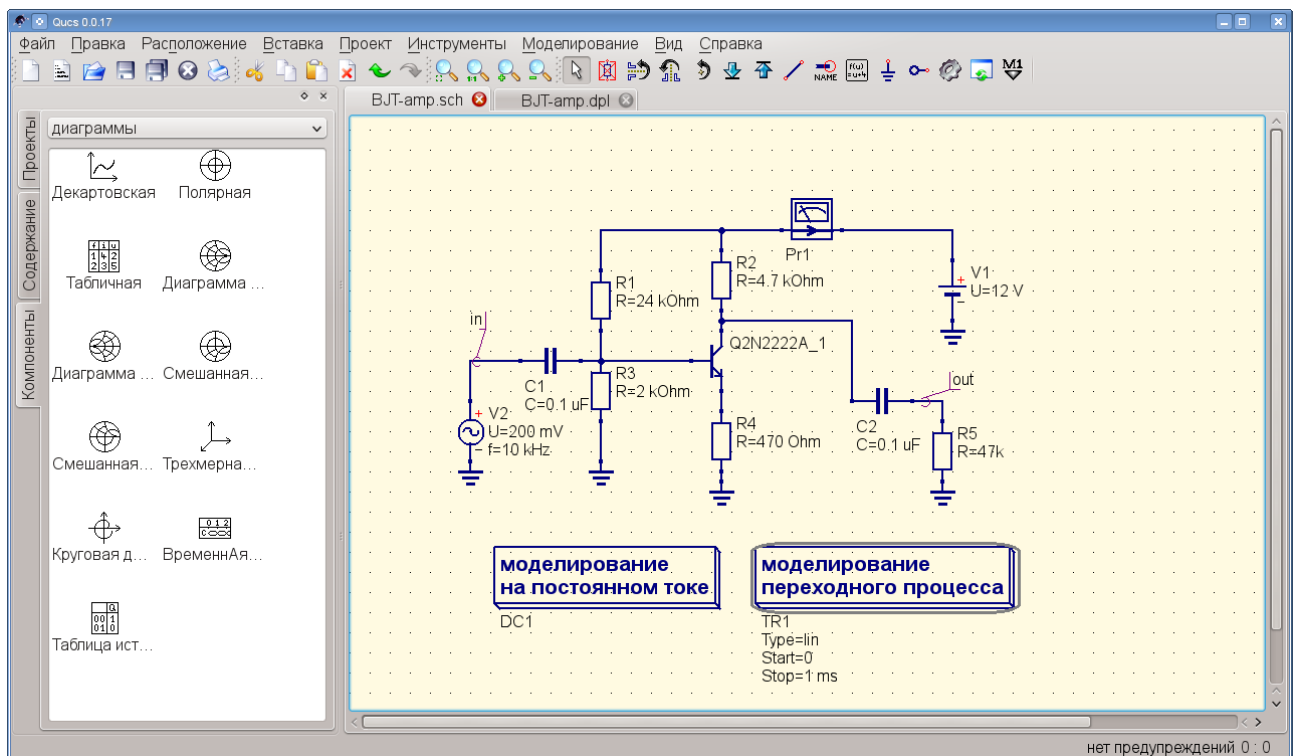


Рис. 5. Однокаскадный транзисторный усилитель

После того как все компоненты размещены на рабочем поле схемы и соединены между собой проводами и перед тем как запустить моделирование, нужно задать параметры моделирования переходного процесса: длительность моделирования и число точек для расчёта. Для этого дважды щёлкнем на виртуальном компоненте TR1, и в открывшемся окне вводим параметры для моделирования переходного процесса (см. рис.6). Начало мо-

делирования 0мс, конец моделирования 1мс (1 ms) и шаг моделирования 1 мкс = 10^{-6} с. Установка таких параметров обеспечивает моделирование схемы на отрезке времени от включения (0 мс) до 1 мс. Рассчитываются напряжения и токи в компонентах схемы через каждую 1 мкс. Все буквы в обозначениях единиц измерений на рис.6 строго латинские. Русские буквы не допускаются.

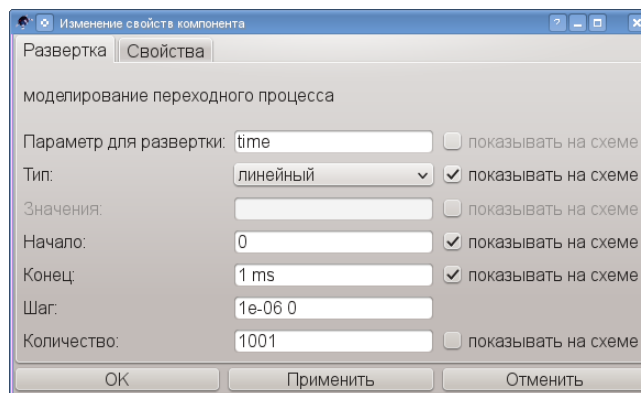


Рис. 6. Установка параметров моделирования переходного процесса

Чтобы запомнить параметры моделирования необходимо в диалоговом окне нажать ОК. После того как мы установили все параметры моделирования, запускаем моделирование нажатием на F2 на клавиатуре или нажав кнопку моделирования на панели инструментов. Происходит расчёт и после его окончания создаётся пустая вкладка страницы просмотра (см. рис. 7). Чтобы посмотреть полученные временные диаграммы напряжений на входе и на выходе усилителя, нужно на этой странице сначала разместить график, а потом установить параметры этого графика.

Чтобы поместить на странице просмотра график, нужно перетащить на страницу просмотра специальный компонент (см. рис.7). После размещения график будет пустой.

Моделированию переходного процесса соответствует применение осциллографа при налаживании и проверке реальных электронных устройств. Некоторые программы, аналогичные Qucs, даже используют виртуальный осциллограф для этих целей. И

На практике, однако, важнее не вид осциллографа, а вид осциллограмм. Получающие все большее распространение осциллографические приставки к компьютеру ориентированы именно на запоминание и показ осциллограмм. Эти же функции становятся обязательным атрибутом и остальных осциллографов. Результаты моделирования переходного процесса в Qucs можно наблюдать в виде привычной диаграммы, если выбрать в группе диаграммы Декартовский вид отображения данных. Сигналы могут быть импульсными или синусоидальными, или любой произвольной формы. Но они соответствуют тому, что вы увидели бы на экране осциллографа, если проверяли бы работу схемы на макетной плате.

После того, как на странице просмотра размещён график, нужно разместить на графике нужные кривые. После моделирования создаётся служебный файл, называемый «набор данных». В наборе данных содержатся результаты расчётов. Чтобы добавить на график кривую, нужно в свойствах графика выбрать нужный нам результат из набора данных. Если дважды щёлкнуть мышью по графику, помещённому на странице просмотра, то откроется окно установки свойств графика (рис. 8).

В ревой части открывшегося окна находятся результаты расчётов. Осциллограммы переходного процесса имеют следующее обозначение: **имя_уза.Vt** (см. рис.8). Результаты переходного процесса всегда обозначаются **.Vt**. Чтобы на графике разместить осциллограммы переходного процесса на входе и на выходе усилителя, нужно дважды щёлкнуть

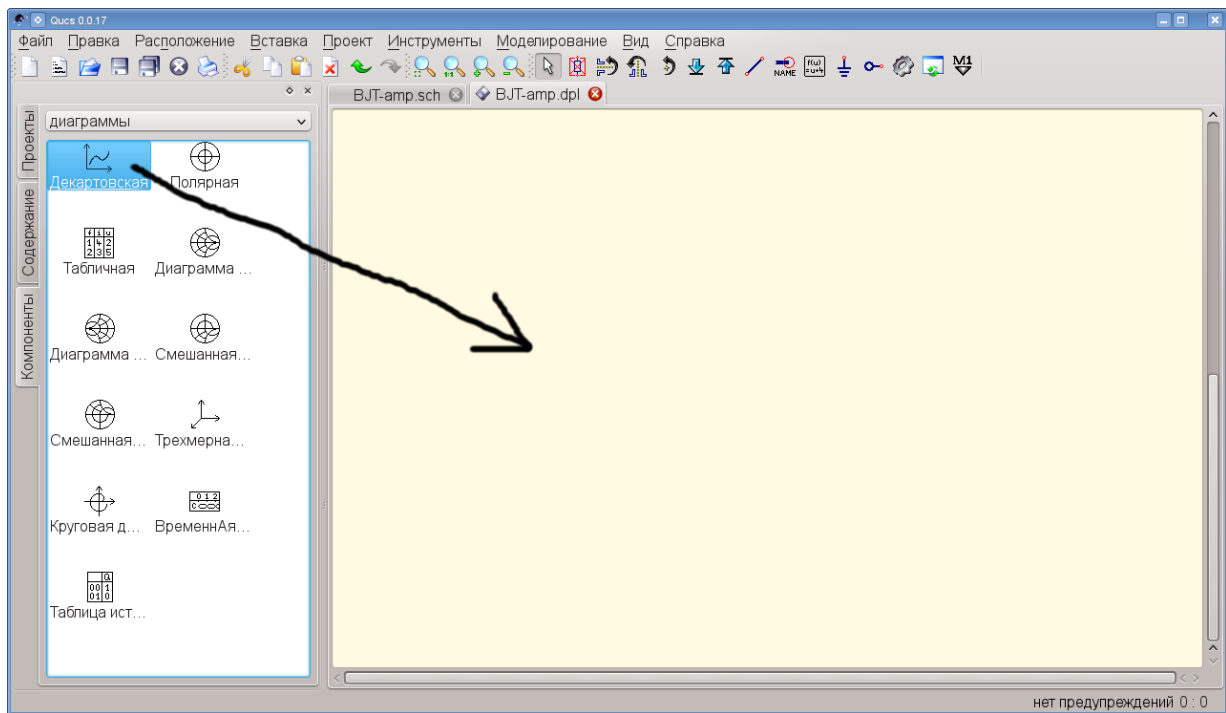


Рис. 7. Размещение на странице просмотра диаграммы

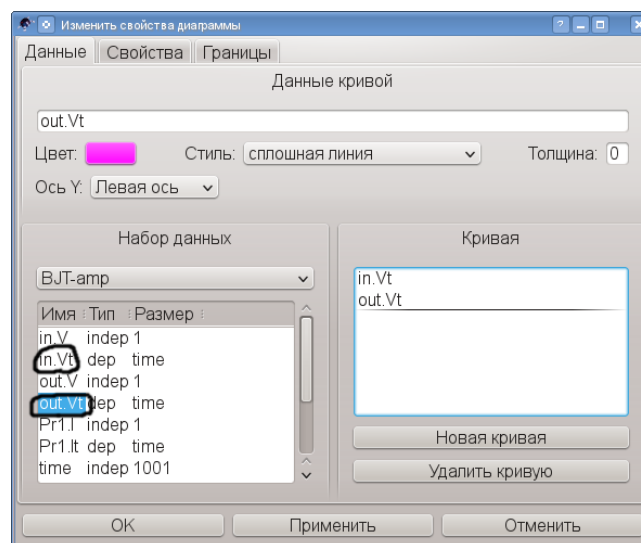


Рис. 8. Установка параметров диаграммы и отображаемых кривых на диаграмме

по имени результата в левой части окна, и он перемещается в правую часть окна. Чтобы посмотреть на графике осциллограммы напряжения на входе и на выходе усилителя, нужно разместить на нём кривые *in.Vt* и *out.Vt*, отмеченные на рис. 8.

В результате на странице просмотра отобразятся осциллограммы напряжений на входе и на выходе усилителя (рис. 9). На рисунке видно, что на графиках размещены маркеры. Маркеры вставляются на кривые на осциллограмме с помощью кнопки (9) в главном окне программы (см. рис.1). Маркеры являются аналогом курсорных измерений в осциллографе. С помощью маркеров можно узнать, например, напряжение в определённый момент времени. На рисунке с помощью маркеров мы можем узнать уровень напряжения на пиках синусоиды.

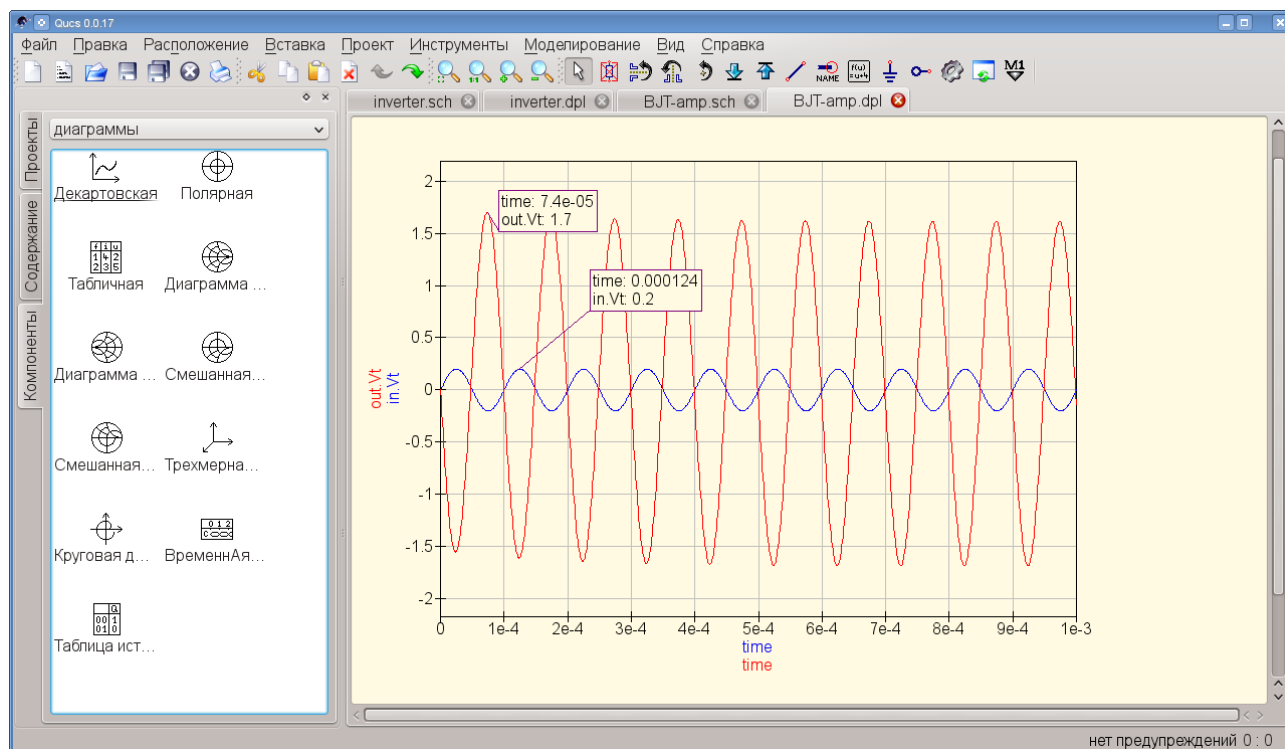


Рис. 9. Результаты моделирования переходного процесса. Маркеры на осциллограммах.

Итак, мы промоделировали работу однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе. Из осциллограмм напряжения на входе и на выходе усилителя видно, что выходной сигнал находится в противофазе к входному и значительно больше его по амплитуде. Поделив напряжения на выходе и на входе усилителя, получим коэффициент усиления $K_y = 1.7 \text{ В} / 0.2 \text{ В} = 8.5$.

5 Моделирование на переменном токе

Моделирование на переменном токе (AC analysis) позволяет получить амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ) электронного устройства.

АЧХ — это зависимость модуля коэффициента передачи от частоты.

Исследуем АЧХ и ФЧХ однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе из предыдущего раздела. Сначала собираем схему (см. рис.10).

Схема повторяет схему из предыдущего раздела (рис.5), но здесь добавляются два новых компонента: «Моделирование на переменном токе» (AC1) и «Уравнение». Компонент «Моделирование на переменном токе» находится в группе компонентов «Виды моделирования» и служит для задания параметров (начальная и конечная частота и число точек расчёта) расчёта схемы на переменном токе. Чем больше мы возьмём точек расчёта, тем медленнее будет моделирование, но тем точнее будет форма АЧХ.

В ходе моделирования на переменном токе последовательно изменяется частота источника переменного тока (V2 на схеме рис.5) от начальной до конечной частоты и для каждой частоты производится расчёт напряжений и токов в схеме.

Мы будем моделировать АЧХ в диапазоне частот от 100 Гц до 10 МГц (10^7 Гц). Рассчитаем АЧХ по 1000 точкам. Чтобы установить эти параметры нужно дважды щёлкнуть мышью по компоненту моделирование на переменном токе. Открывается диалоговое окно (рис.11), и в нём нужно ввести параметры в соответствующие поля ввода.

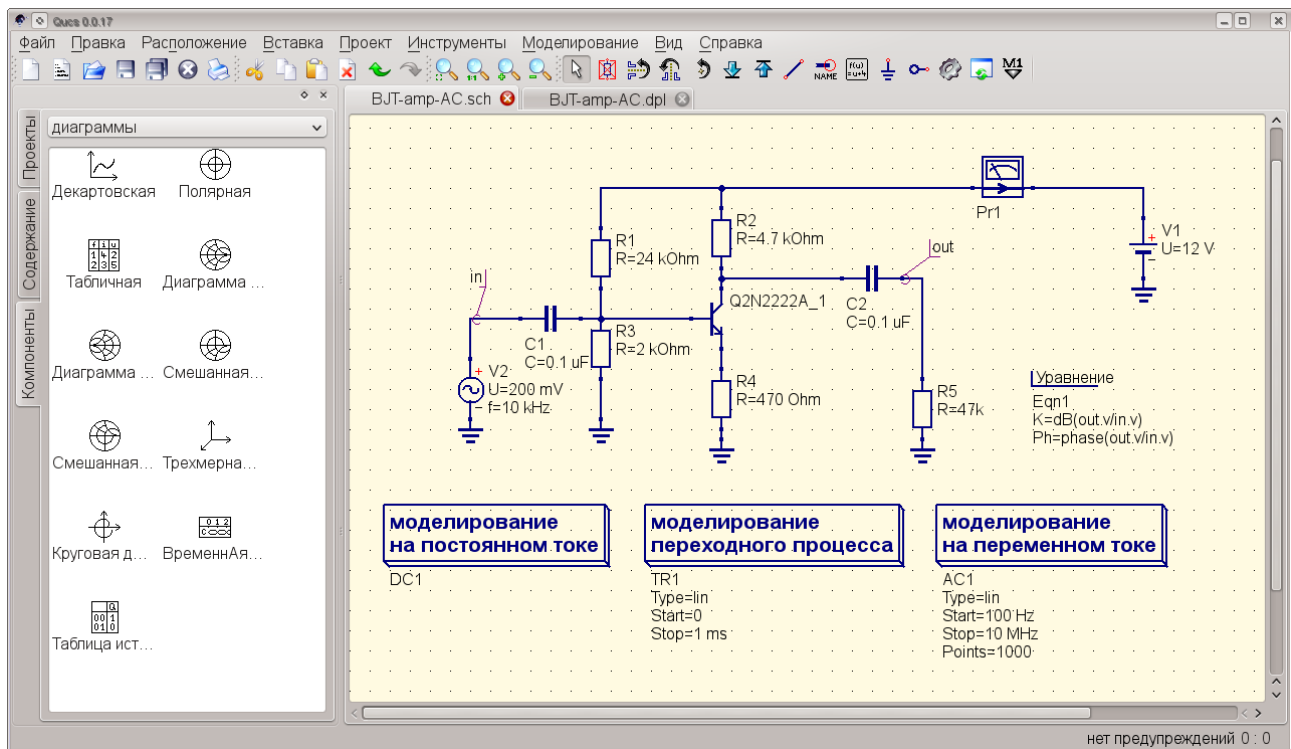


Рис. 10. Схема для моделирования на переменном токе.

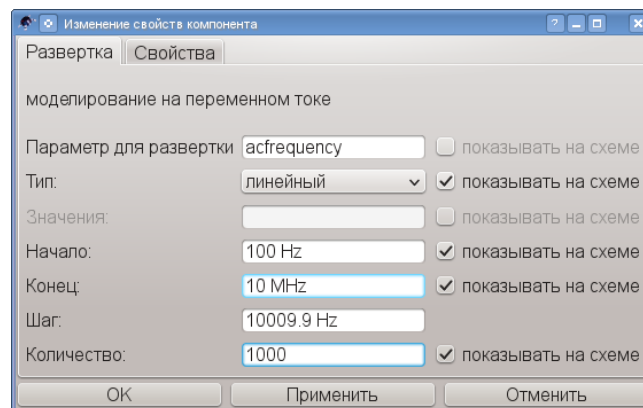


Рис. 11. Установка параметров моделирования на переменном токе.

Компонент «Уравнение» нужен для того, чтобы вычислить коэффициент усиления усилителя, зная напряжения на его выходе и входе и затем построить график зависимости коэффициента усиления от частоты.

Как известно, АЧХ $K(f)$ определяется как отношение образов сигналов в частотной области по выходу и по входу. АЧХ является зависимостью коэффициента усиления схемы от частоты. АЧХ часто выражают в децибелах (дБ).

$$K(f) = \left| \frac{U_{out}(f)}{U_{in}(f)} \right| \quad (1)$$

АЧХ упрощённо можно представить как зависимость коэффициента усиления схемы (отношение выходного сигнала к входному) от частоты.

ФЧХ $P(f)$ определяется как аргумент (фазовый угол) отношения образов сигналов на

входе и на выходе в частотной области:

$$P(f) = \arg \left(\frac{U_{out}(f)}{U_{in}(f)} \right) \quad (2)$$

ФЧХ показывает сдвиг фаз между выходным и входным сигналами схемы в зависимости от частоты.

В данных формулах $U_{out}(f)$ — это по сути зависимость амплитуды выходного сигнала при постоянной амплитуде входного синусоидального сигнала от частоты входного сигнала, которую мы и получаем при моделировании электронного устройства на переменном токе.

Теперь, чтобы получить зависимость коэффициента усиления от частоты для нашего усилителя нужно, задать уравнение, по которому он будет рассчитываться. Для этого дважды щёлкаем мышью по компоненту «Уравнение» и входим в окно редактирования уравнений (рис. 12) Мы поместили узел являющийся входом схемы как **in**, а являющийся выходом схемы как **out**. Частотному образу (зависимости напряжения от частоты) напряжения на выходе будет соответствовать выражение **out.v**, а на входе **in.v**.

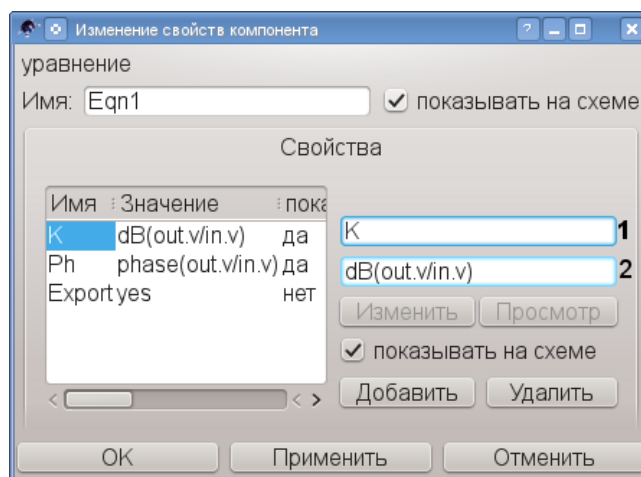


Рис. 12. Задание уравнений.

Чтобы получить коэффициент усиления, нужно поделить напряжение на выходе на напряжение на входе. Для этого вводим в окне на рис.12 в поле ввода (1) символ **K**, а в поле ввода (2) — выражение **dB(out.v/in.v)**. Функция **dB()** пересчитывает значение коэффициента усиления в децибелах (дБ). Теперь когда поля ввода заполнены, нажимаем кнопку «Добавить». Можно переходить к редактированию нового уравнения, по которому будет рассчитываться ФЧХ.

Чтобы задать уравнение для ФЧХ снова заполняем поля ввода. В поле ввода (1) вводим **Ph**, а в поле ввода (2) — выражение **phase(out.v/in.v)**. Функция **phase()** вычисляет аргумент (фазу) комплексного числа в градусах.

После того, как уравнения и параметры моделирования заданы, запускаем моделирование нажатием на клавишу **F2**. Несколько секунд происходит моделирование, и по его окончании можно посмотреть результаты расчёта АЧХ и ФЧХ усилителя.

После завершения моделирования переходим на страницу просмотра и размещаем там две диаграммы (для АЧХ и для ФЧХ) методом перетаскивания (рис.7). Теперь нужно разместить на диаграмме результаты расчётов АЧХ и ФЧХ. На первой диаграмме размещаем кривую **K** (АЧХ), как показано на рис.13, а на второй диаграмме — кривую **Ph** (ФЧХ). Чтобы войти в диалог установки параметров диаграммы, нужно дважды щёлкнуть мышью по диаграмме.

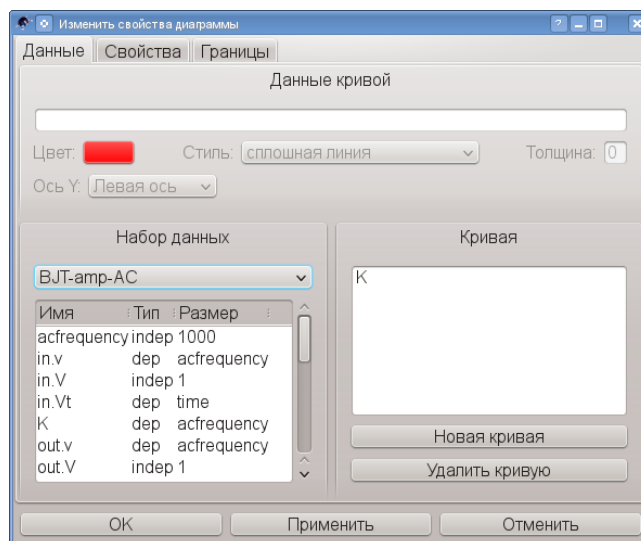


Рис. 13. Установка параметров диаграммы для просмотра результатов моделирования на переменном токе.

На частотных характеристиках ось частот обычно изображают в логарифмическом масштабе. Чтобы установить логарифмический масштаб по оси частоты нужно зайти в свойства диаграммы и перейти в открывшемся диалоговом окне на вкладку «Свойства» и устанавливаем переключатель «Логарифмическая разметка по оси X» (рис.14).

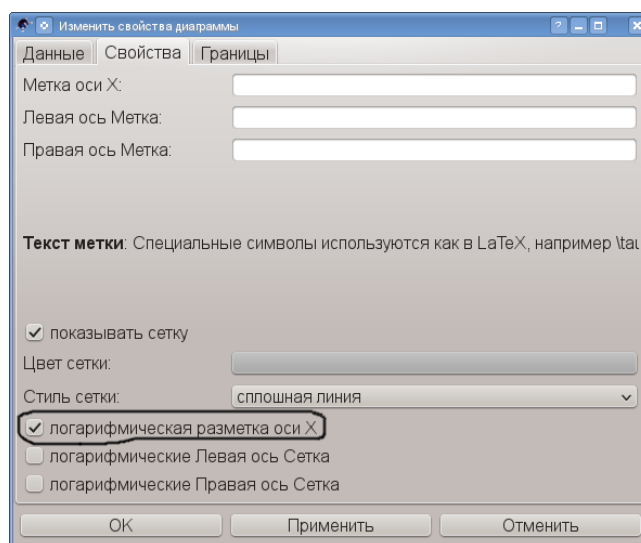


Рис. 14. Установка логарифмической шкалы по оси X (частота).

После того, как все установки свойств диаграмм сделаны в соответствии с рис.13, 14, можно видеть результаты расчёта АЧХ и ФЧХ однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе (рис. 15).

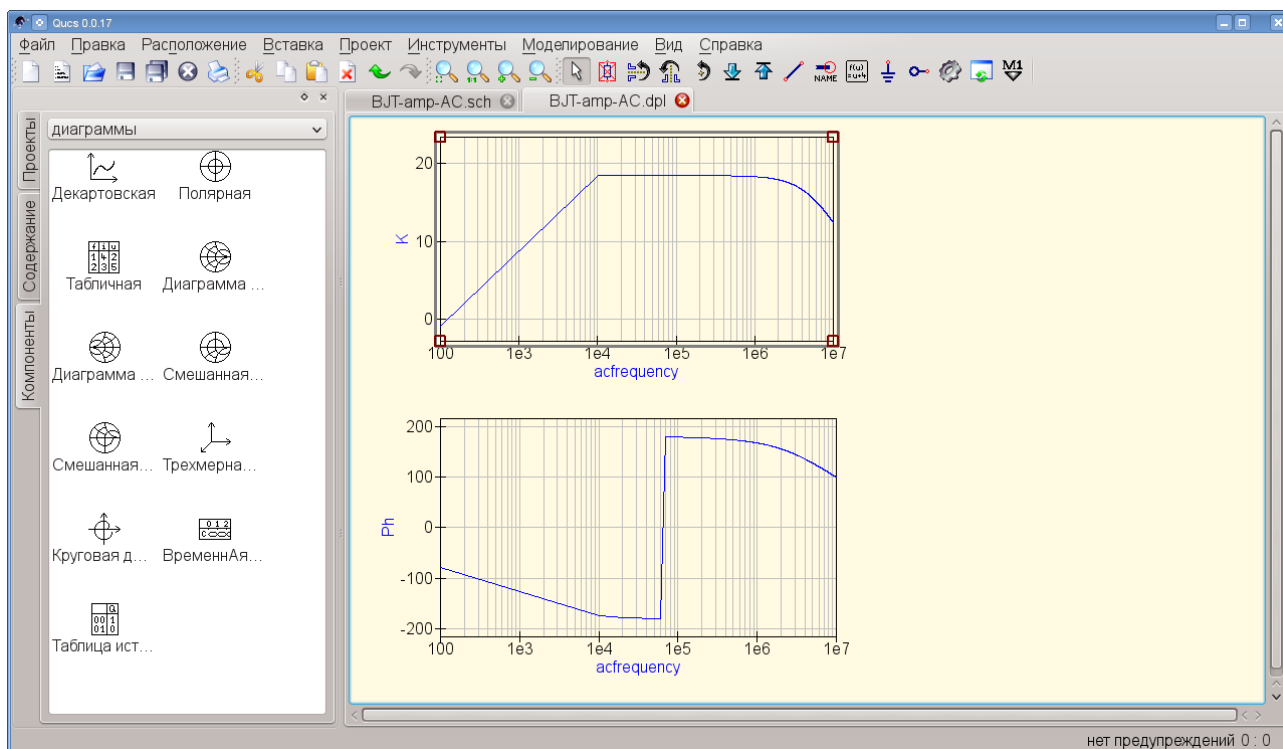


Рис. 15. Результаты моделирования АЧХ и ФЧХ транзисторного усилителя.

6 Параметрический анализ

Параметрический (развёртка параметра, Parameter Sweep) анализ позволяет исследовать как меняются параметры схемы (например коэффициент усиления) при изменении параметра (например сопротивления в цепи коллектора транзистора).

Для параметрического анализа будем использовать ту же схему, что и для моделирования на переменном токе. Исследуем зависимость коэффициента усиления однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе от сопротивления в цепи коллектора. Схему, собранную в Qucs, можно видеть на рис. 16. По сравнению со схемой из предыдущего раздела 10, в ней добавлен новый компонент — тип моделирования «Развёртка параметра» (выделено на рисунке). Также теперь сопротивлению в цепи коллектора нужно изменить номинал. В поле для номинала нужно вписать R_k (выделено на рисунке).

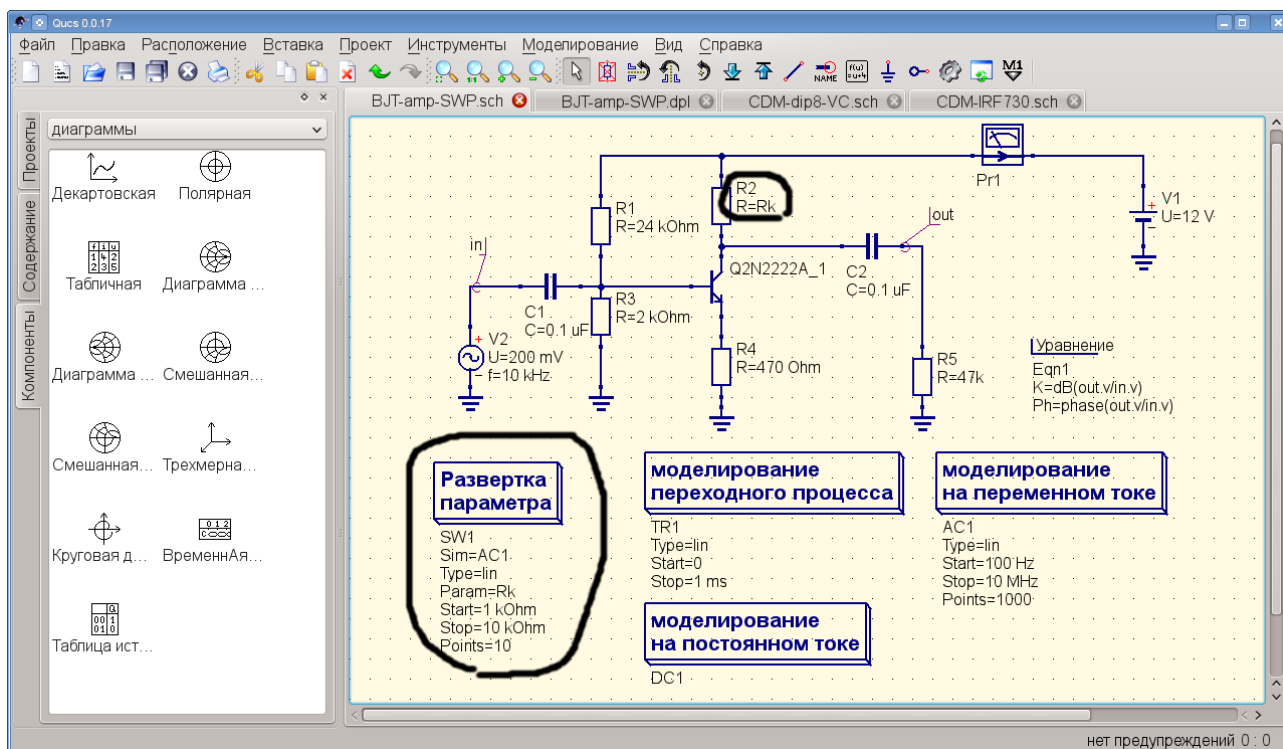


Рис. 16. Схема для параметрического анализа

После того, как все компоненты размещены на схеме, нужно задать параметры моделирования для развёртки параметра (рис. 17). Мы будем исследовать вид АЧХ усилителя при изменении сопротивления в цепи коллектора транзистора. Поэтому в поле «Моделирование» выбираем из выпадающего списка AC1 (наименование компонента, которому соответствует моделирование на переменном токе). В поле «Параметр для развёртки» указываем R_k , то есть сопротивление коллектора. Его номинал мы будем изменять от 1 кОм до 10 кОм, поэтому заполняем поля «Начало» и «Конец» указанными значениями. На этом установка параметров для этого вида моделирования закончена.

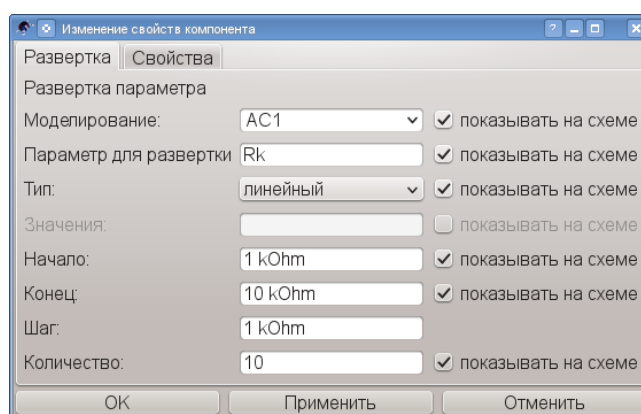


Рис. 17. Установка параметров для параметрического анализа

После установки параметров нажимаем F2 и запускаем моделирование. По окончании моделирования переходим на страницу просмотра. Там размещаем диаграмму для коэффициента усиления так же как и в предыдущем разделе (см. рис.13). Получаем результат моделирования — семейство АЧХ усилителя при сопротивлении коллектора от 1 до 10 кОм (рис. 18).

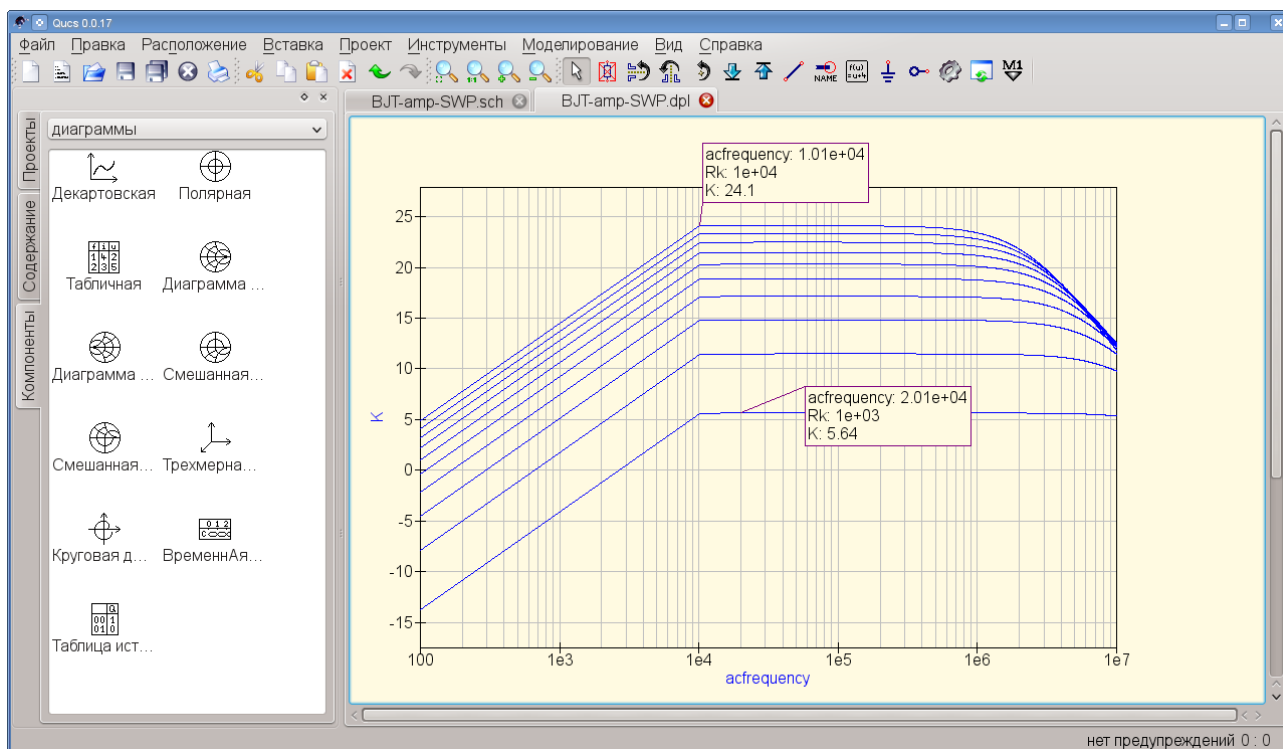


Рис. 18. Результаты параметрического анализа

Чтобы узнать коэффициент усиления усилителя при начальном и конечном сопротивлении резистора в цепи коллектора, на диаграмме размещены маркеры.

7 Контрольное задание. Резонансный усилитель.

Резонансный усилитель — усилитель сигналов с узким спектром частот, лежащих в полосе пропускания резонансной цепи, являющейся его нагрузкой. Резонансный усилитель применяется для усиления сигналов с радиочастотой в телевидении, радиоприёме, радиосвязи.

Резонансный усилитель можно реализовать на различных активных элементах: радиолампах, биполярных транзисторах, полевых транзисторах. Далее рассмотрим схему резонансного усилителя на полевом транзисторе с управляющим р-п переходом (JFET). Типовая схема такого усилителя показана на рис. 19.

Входной сигнал подаётся в цепи затвора полевого транзистора, а выходной сигнал снимается со стока полевого транзистора. Полевой транзистор включён по схеме с общим истоком. В качестве нагрузки истока используется параллельный колебательный контур, состоящий из индуктивности L и ёмкости C . Конденсаторы $C5$ и $C4$ — блокировочные. Они нужны для замыкания на землю токов высокой частоты.

Коэффициент усиления резонансного усилителя зависит от частоты входного сигнала. Максимум усиления имеется на резонансной частоте колебательного контура в цепи стока полевого транзистора, которая определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Поэтому данная схема усилителя и называется резонансной. Для индуктивности $L = 11\text{мкГн}$ и ёмкости конденсатора $C = 47\text{пФ}$, как указано на схеме рис.19, получим резонансную частоту $f \approx 7\text{МГц}$.

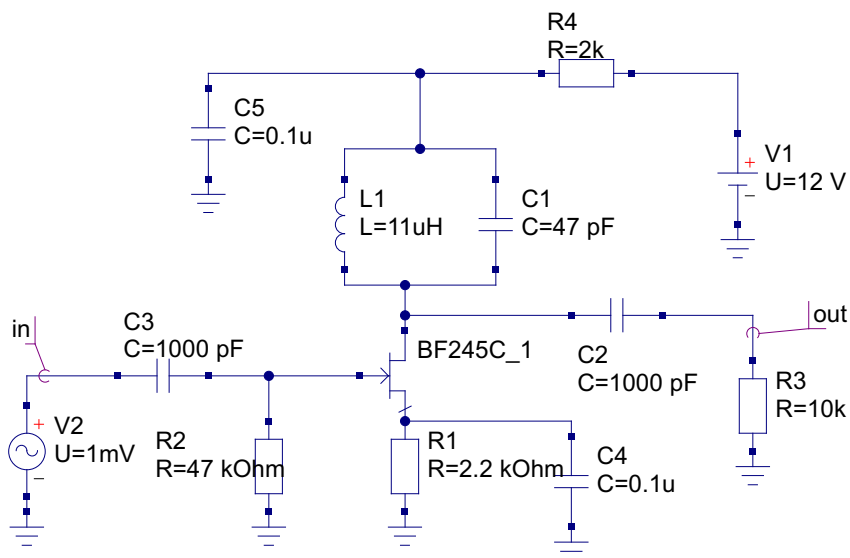


Рис. 19. Установка параметров для параметрического анализа

Задание: промоделировать схему резонансного усилителя на полевом транзисторе (рис. 19). Частоту источника переменного тока на входе схемы выбрать равной 7 МГц. Провести моделирование на постоянном токе (DC analisys), моделирование переходного процесса (Transient analisys) и моделирование на переменном токе (AC analisys).

Полевой транзистор использовать типа BF245C. Модель для этого полевого транзистора взять из библиотеки компонентов (рис.2). Она находится в группе JFETs в выпадающем списке в диалоге выбора компонентов (рис. 2).

Для моделирования переходного процесса взять параметры (см. рис.6): начало моделирования 0, конец моделирование 5 мкс, число точек 1001.

Для моделирования на переменном токе взять параметры (см. рис. 11): начальная частота 5 МГц, конечная частота 10 МГц, число точек 1001.

8 Заключение

В результате выполнения лабораторной работы произведено ознакомление с типами анализа электронных схем в схемотехническом моделировщике Qucs. Выполнен анализ работы резонансного усилителя на полевом транзисторе.