

Министерство образования Российской Федерации
Амурский государственный университет

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ**

Учебно-методическое пособие для студентов специальности
01.04.00 – физика

Благовещенск
2003

Компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств.
Копылова И.Б. Благовещенск: Амурский гос. Ун-т. 2002. - 21с.

Составитель:

Копылова И.Б.

Содержит описание 3 лабораторных работ по дисциплине
«Основы радиоэлектроники».

Для студентов специальности 01.04.00 – физика.

Рецензент: доктор физ.-мат. наук, профессор Барышников
С.В.

Амурский государственный университет, 2003

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Методика моделирования	4.
Работа 4-1- Изучение работы биполярного транзистора	6.
Работа 4-2- Изучение работы усилителя на биполярном транзисторе	11.
Работа 4-3 -Изучение работы LC-генератора	15.
Список литературы	20.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Физическое моделирование электронных устройств часто невозможно из-за их сложности. В этом случае можно перейти к математическому моделированию не только самих устройств, но и режимов их работы, что чаще всего и делается при разработке новых устройств. Однако метод математического моделирования лишен наглядности и возможности быстрого изменения параметров схемы с целью улучшения характеристик и оптимизации схемы. Появление средств вычислительной техники и стандартных программ значительно облегчает задачу конструирования радиотехнических систем.

Данное методическое пособие включает описание трех лабораторных работ, которые выполняются с помощью математического моделирования средствами вычислительной техники.

Изучение работы электронных схем осуществляется методом моделирования с применением прикладной программы Electronics Workbench (EWB 4.1) и текстового редактора Microsoft Word.

Программа Electronics Workbench включает в себя библиотеку различных радиоэлементов, приборов и позволяет построить схему любого радиоэлектронного устройства, т.е. работа осуществляется аналогично работе любого графического редактора с тем отличием, что элементная база радиоэлектронных элементов уже присутствует в программе. Окно программы содержит меню, линейку контрольно-измерительных приборов и линейку библиотек компонентов (рис.1). Остается лишь выбрать нужные элементы и соединить их в области экрана с помощью “линии” согласно выбранной схемы. Выбор нового элемента схемы осуществляется двойным щелчком левой клавиши мыши по выбранному элементу. Установка в нужной части схемы происходит только при появлении черной точки рядом с изображением элемента. При необходимости можно поставить в схему новый прибор или развернуть его для наблюдения результатов опыта.

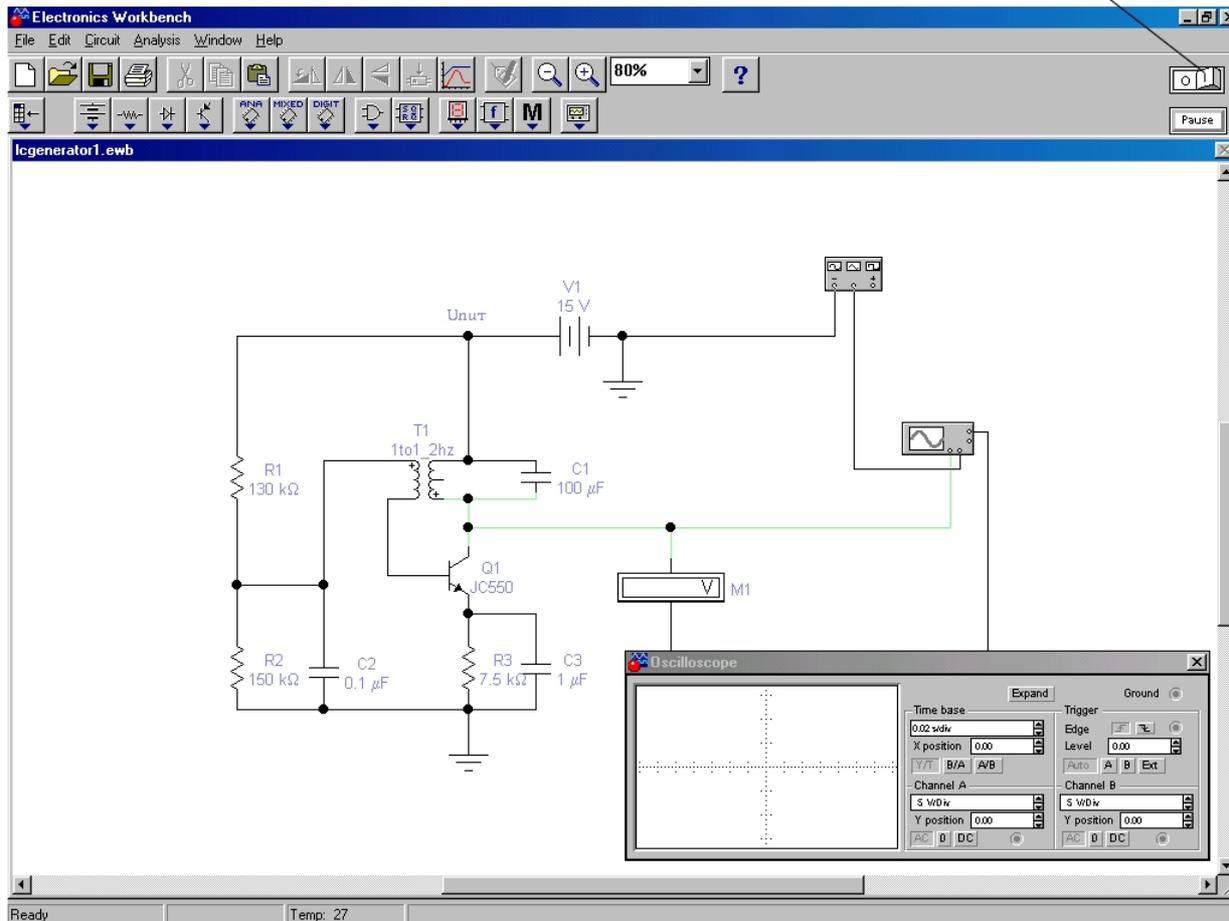


Рис. 1

Номинальные значения элементов схемы можно изменить путем двойного щелчка левой клавиши мыши по выбранному компоненту на схеме устройства. В открывшемся диалоговом окне (рис.2) на закладке Value выставить значение номинала выбранного элемента и единиц измерения. Для завершения ввода значений нажать ОК. При изменении номинала электронного элемента программа моделирования отключается, поэтому после установки нового элемента или изменении параметров схемы необходимо заново запустить программу моделирования нажатием кнопки, установленной на панели управления (кнопка находится в верхнем правом углу экрана).

Запуск файла осуществляется левой клавишей мыши. Переключение между документом и программой осуществляется сочетанием клавиш Alt+Tab.

Внимание: после запуска программы повторный запуск приводит к возникновению ошибки и зависанию программы. Для устранения возникшей ситуации нажать одновременно клавиши Alt+Enter+Del, в диалоговом окне выбрать задачу Wewb32, нажать кнопку “Завершить задачу”.

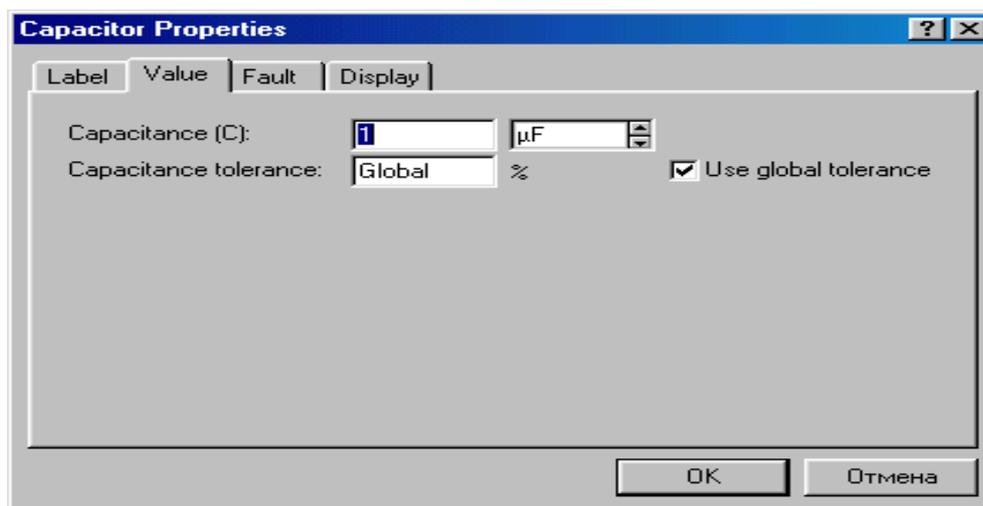


Рис.2

После запуска программы на экране появится схема изучаемого устройства. Перед выполнением работы необходимо задать параметры схемы (значения входных параметров, номиналы элементов схемы) и включить в ветви схемы необходимые приборы (амперметры, вольтметры, осциллограф), с помощью которых можно контролировать значение и форму входных и выходных параметров. Установка приборов осуществляется с использованием кнопки instruments на панели управления. Введение прибора в активный режим осуществляется нажатием левой клавиши мыши, при этом прибор окрашивается в красный цвет.

Таким образом, изменение параметров схемы, значений входящих сигналов, включение в схему измерительных приборов позволит снять основные характеристики электронных схем и смоделировать режимы их работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4-1

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить работу биполярного транзистора.
2. Снять входную характеристику транзистора в схеме с общей базой (ОБ)

$$I_э = f(U_{эб}).$$

3. Снять выходные характеристики транзистора $I_к = f(U_{кб})$.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Транзистор – это полупроводниковый электропреобразовательный прибор, который служит для преобразования (усиления) тока или напряжения.

Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника и имеет два р-п перехода. От каждого слоя полупроводника выведен электрод: слева – эмиттер (Э), справа – коллектор (К), в середине – база (Б), первый переход образуется между эмиттером и базой, второй – между базой и коллектором.

Существуют транзисторы n-p-n и p-n-p типа (рис.1).

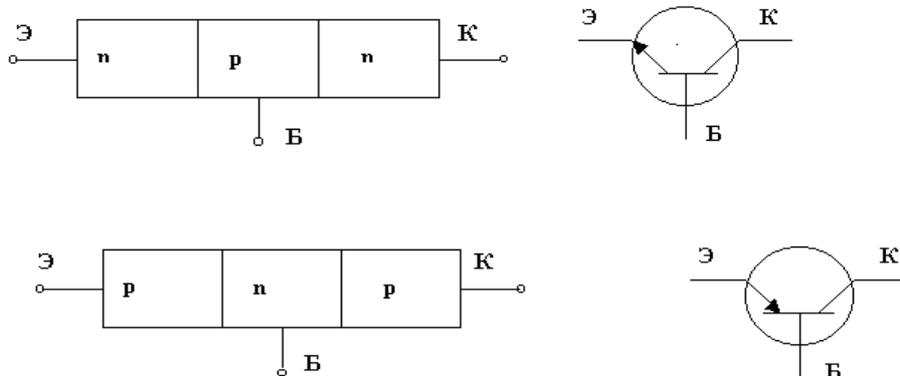


Рис.1

меньше (от 20-30 мкм до 1мкм), что обеспечивает проникновение носителей из эмиттера в коллектор.

Рассмотрим работу биполярного транзистора. Транзистор может Название биполярного транзистор получил потому, что носителями тока являются заряды двух знаков: электроны (n-носители), дырки (p-носители). По сравнению с толщиной эмиттера и коллектора толщина базы значительно работать в трех режимах: отсечки, насыщения, активном.

Режим отсечки: оба p-n перехода закрыты. При этом через транзистор протекает небольшой тепловой ток. Работа транзистора в таком режиме не является эффективной.

Режим насыщения: оба перехода открыты. При этом через транзистор течет большой ток, что в конечном итоге может привести к разрушению транзистора.

Активный режим: это режим усиления тока или напряжения.

Основным условием работы является включение первого (эмиттерного перехода) в прямом направлении (переход открыт), а второго (коллекторного) перехода в обратном направлении (переход закрыт).

Существует также инверсный режим работы транзистора, когда коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный в обратном. Коэффициент передачи при этом близок к единице.

Рассмотрим работу p-n-p транзистора в активном режиме (рис.2).

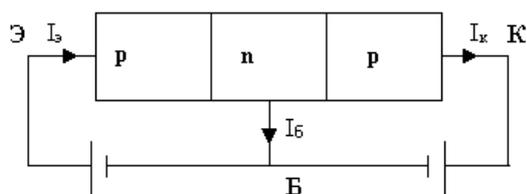


Рис.2

Переход эмиттер – база смещен в прямом направлении (открыт), переход база – коллектор смещен в обратном направлении (закрыт), что осуществляется включением в переходы источников питания соответствующей полярности.

Т.к. толщина базы очень мала, то дырки переходят через базу, и только небольшое их количество рекомбинирует с электронами базы. Поэтому $I_э \gg I_б$. Восполнение носителей, которые рекомбинировали в базе происходит за счет подключения базы к

источнику питания. Дырки, перешедшие из эмиттера в базу, становятся не основными носителями базы, поэтому они втягиваются в коллектор полем, которое создано между базой и коллектором. В результате ток, протекающий в коллекторе, почти равен току эмиттера $I_c \approx I_e$. Если записать более точно, то

$$I_c = \alpha_{cm} I_e + I_{co} \quad (1)$$

где α_{cm} – статический коэффициент передачи эмиттерного тока.

I_{co} – обратный ток коллектора (течет в отсутствии эмиттерного тока).

Таким образом, ток коллектора оказывается больше, чем ток эмиттера, т.е. происходит усиление тока.

Характеристики транзистора зависят от способа включения транзистора в схему.

Существует три схемы включения транзисторов: с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК), с общей базой (ОБ) (рис.3). В схеме с ОЭ входными параметрами являются ток базы I_b и напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$, выходными – ток коллектора I_c и напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$; в схеме с ток ОК - входные параметры ток базы I_b , напряжение база-коллектор $U_{бк}$; в схеме с ОБ - входные параметры ток эмиттера I_e , напряжение эмиттер-база $U_{эб}$, выходные - ток коллектора I_c , напряжение коллектор-база $U_{кб}$.

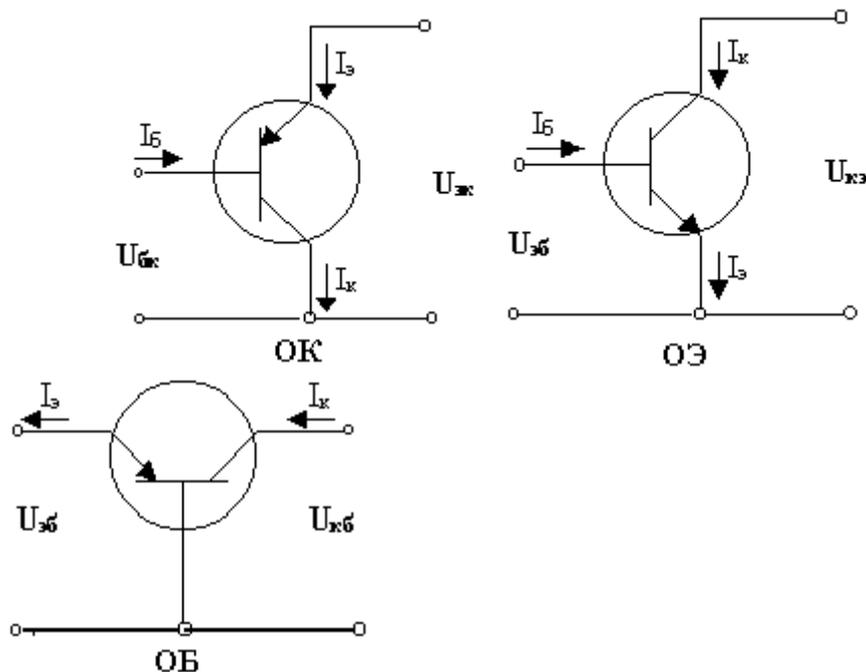


Рис.3

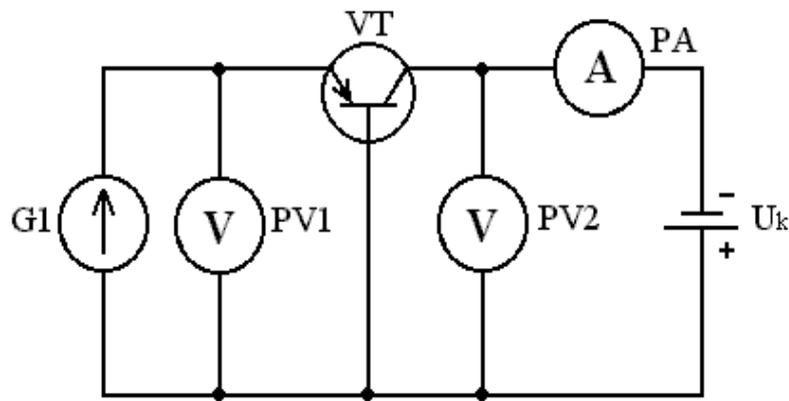


Рис.4.

В данной работе необходимо построить входные и выходные характеристики транзистора с ОБ (общей базой). Рассмотрим основные свойства этой схемы (рис.4).

Эмиттерный переход включен в прямом направлении. Входное сопротивление транзистора

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{э}}}{\Delta I_{\text{э}}} \quad \text{при } U_{\text{к}} = \text{const} \quad (1)$$

Входное сопротивление составляет единицы и десятки Ом. Входной характеристикой является зависимость $I_{\text{э}} = f(U_{\text{эб}})$.

Коллекторный переход включен в обратном направлении. При этом в переходе протекает ток $I_{\text{к0}}$, обусловленный не основными носителями. Если $I_{\text{э}} = 0$, то $I_{\text{к0}} \neq 0$.

Выходное сопротивление схемы:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{к}}} \quad \text{при } I_{\text{э}} = \text{const} \quad (2)$$

Выходное сопротивление достигает нескольких мегаом (МОм). Выходной характеристикой является зависимость $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}})$.

Т.к. часть носителей перешедших через переход создает ток базы $I_{\text{б}}$, а часть носителей рекомбинирует, то $I_{\text{к}} < I_{\text{э}}$.

Коэффициент усиления по току

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}} \quad \text{при } U_{\text{к}} = \text{const} \quad (3)$$

Величина коэффициента усиления α для различных транзисторов лежит в пределах $K_I = 0,75 - 0,99$.

Усиление по току в этой схеме не происходит. Однако в этой схеме происходит усиление по напряжению

$$K_u = \frac{\Delta U_{\text{к}}}{\Delta U_{\text{э}}} = \frac{\Delta I_{\text{к}} R_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}} R_{\text{э}}} = \frac{\Delta R_{\text{к}}}{\Delta R_{\text{э}}} \quad (4)$$

Входное и выходное напряжения находятся в одной фазе. Такое включение транзистора чаще всего используется в усилителях напряжения.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Запустите программу. В режиме диалога выберите ответ “да” и нажмите левую клавишу мыши.

2. Снять ВАХ входа транзистора с общей базой $I_э = f(U_{эб})$ при $U_{кб} = const$. Напряжение $U_{кб}$ выбрать 0,5 В – 5 В. $U_{эб}$ изменять в пределах (0,1 - 10) В.

Изменение $U_{эб}$ производится на вкладке Value в диалоговом окне, которое открывается нажатием левой клавиши мыши. Снятие значений тока $I_э$ производится с помощью амперметра, включенного в эмиттерную цепь транзистора.

! После смены номиналов произвести запуск моделирования схемы сочетанием клавиш Ctrl + G , остановка процесса моделирования осуществляется сочетанием клавиш Ctrl + T.

Снять входные характеристики для 3- 5 значений напряжения коллектор-база $U_{кб}$.

3. Снять выходные характеристики транзистора. Значения $U_{кб}$ изменять в пределах (0,1 - 10) В, значения тока эмиттера выбирать в пределах (1,5 - 10) mA

$I_к = f(U_{кб})$ при $I_э = const$. Изменение тока эмиттера $I_э$ производится на вкладке Value в диалоговом окне, которое открывается нажатием левой клавиши мыши.

Снять выходные характеристики для 5-6 значений тока эмиттера $I_э$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляет транзистор?
2. Перечислить и описать основные режимы работы транзистора.
3. Описать работу транзистора в активном режиме.
4. Что такое коэффициент усиления?
5. Каким образом транзистор включается в схему?
6. Что такое входная характеристика?
7. Что собой представляет выходная характеристика?

8. Особенности схемы с ОБ (общей базой).

ЛИТЕРАТУРА

[1]: §1.2.1-1.2.3; [3]: §5.4; [6]: §4.8 .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4-2

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить работу биполярного транзистора в режиме усиления.
2. Определить коэффициент передачи по току и по напряжению.
3. Установить зависимость коэффициента передачи напряжения от параметров схемы.
4. Изучить методы стабилизации режима работы усилителя.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Режим усиления тока или напряжения является одним из основных режимов работы биполярного транзистора. Коэффициент усиления транзистора определяется отношением выходного тока (напряжения) к входному току (напряжению). Величина коэффициента усиления зависит от способа включения транзистора в электронную схему. Наиболее широко используется схема включения с общим эмиттером (рис. 1).

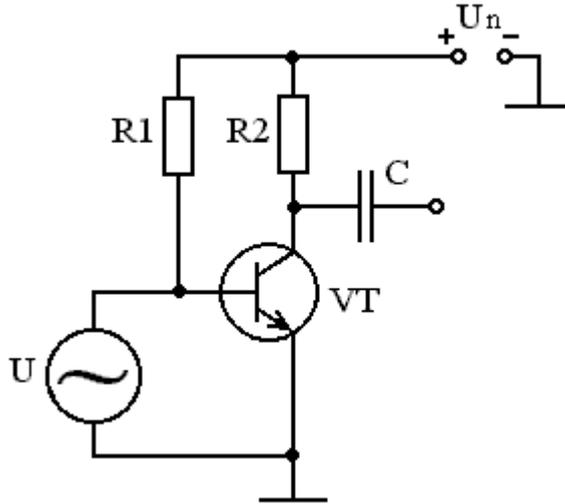


Рис.1

Рассмотрим основные характеристики такого усилителя. Входными параметрами являются ток базы $I_{\bar{o}}$ и напряжение между базой и эмиттером $U_{\bar{o}\bar{э}}$. Выходными параметрами – ток коллектора I_{κ} и напряжение между коллектором и эмиттером $U_{\kappa\bar{э}}$. Т.к. напряжение $U_{\bar{o}\bar{э}}$ подается на эмиттерный переход в прямом направлении, то небольшое изменение напряжения приводит к значительному изменению тока базы и работе транзистора в активном режиме. Переход база-коллектор закрыт. Входное сопротивление схемы:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\bar{o}\bar{э}}}{\Delta I_{\bar{o}}} \quad \text{при } U_{\kappa\bar{э}} = \text{const} \quad (1)$$

Входное сопротивление достаточно высокое (сотни Ом, десятки кОм).

Выходное сопротивление схемы:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\kappa\bar{э}}}{\Delta I_{\kappa}} \quad \text{при } I_{\bar{o}} = \text{const} \quad (2)$$

По порядку величины сопротивление составляет десятки и сотни кОм.

Согласно законам Кирхгофа

$$I_{\bar{э}} = I_{\kappa} + I_{\bar{o}} \quad (3)$$

Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\bar{o}}} \quad (4)$$

Коэффициент усиления по напряжению зависит от величины коллекторного сопротивления R_{κ} .

$$K_U = \frac{\Delta U_{\kappa\bar{э}}}{\Delta U_{\bar{o}\bar{э}}} \quad (5)$$

Напряжение, снимаемое с коллектора, изменяется в противофазе с выходным напряжением.

На выходе схемы включается разделительный конденсатор C . Его назначение – фильтрация постоянной составляющей выходного сигнала.

Кроме того, в реальном усилителе предусмотрена стабилизация рабочей точки транзистора. Для этого на входе схемы ставится делитель R_1 и R_2 (рис.2.) . При этом токи, протекающие в цепях транзистора, будут постоянными $I_b = const$, $I_s = const$, $I_k = const$.

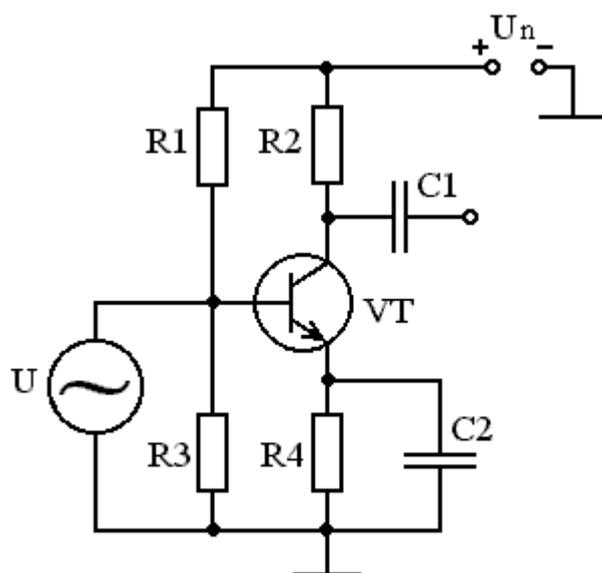


Рис.2

Для стабилизации режима работы при изменении температуры в цепь эмиттера включается резистор R_4 . Вместе с резисторами R_1 и R_3 резистор R_4 образуют цепь отрицательной обратной связи (ООС) по току. Именно наличие ООС и обеспечивает термостабилизацию. При возрастании температуры через транзистор начинает течь обратный ток коллектора, который обусловлен наличием неосновных носителей тока, величина обратного тока возрастает с ростом температуры. Напряжение на резисторе R_4 возрастает, что приводит к перераспределению напряжения питания U_n на резисторах R_1 и R_3 таким образом, что напряжение на сопротивлении R_2 возрастает, ток через резистор увеличивается до номинального значения. Дополнительное падение напряжения на R_4 в эмиттерной цепи приводит к снижению коэффициента усиления по напряжению, т.к. уменьшается входное напряжение при работе на переменном токе.

Для исключения ООС по переменному току резистор R_4 шунтируют конденсатором достаточно большой емкости C_2 ($R \gg \omega C$).

При расчетах усилителей на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером (ОЭ) исходят из характеристик конкретного транзистора и получения нужного коэффициента усиления. На выходных характеристиках транзистора строят нагрузочные линии по постоянному и переменному току, а затем рассчитывают параметры схемы.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Запустить программу изучения работы усилителя с помощью левой клавиши мыши. Ответить “да” в режиме запуска файла.

2. Заготовить таблицу

Таблица

U_{BX}	B	
v_{BX}	$Гц$	
$v_{ВЫХ}$	$Гц$	
$U_{ВЫХ}$	B	

3. Ввести в схему амперметр и вольтметр на входе и выходе. Для этого открыть вкладку “индикаторы” и мышью перетащить нужный элемент и установить в нужное место (перемещение элемента возможно при появлении рядом с элементом черного кружка, что достигается нажатием левой клавиши мыши).

4. На вкладке “VALUE” задать параметры входного сигнала. Параметры входного сигнала можно изменять в пределах: напряжение (1-1000)В; частота - (1-100) Гц. Затем определить сигналы на выходе схемы. Результаты записать в таблицу.

5. Рассчитать коэффициент передачи по току и напряжению.

6. Подключить к схеме делитель $R_1 = 50$ КОм и $R_3 = 10$ кОм и повторить п.3 для 3-5 значений входного сигнала.

7. Ввести в схему термостабилизирующую цепочку ($R_4 = 2$ КОм, $C_2 = 0,01$ мФ).

8. Выполнить пункт п.3 для 3-5 значений входного сигнала.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить основные характеристики усилителя с ОЭ.
2. Что такое коэффициент усиления? Как определяется коэффициент усиления по току и по напряжению?
3. Каким образом происходит усиление тока в схеме с общим эмиттером (ОЭ)?
4. Какого назначения делитель напряжения на входе усилителя?
5. Какие функции выполняют конденсаторы на входе и выходе усилителя.
6. Каким образом происходит стабилизация работы усилителя при повышении температуры.

ЛИТЕРАТУРА

[1]: §1.2.5; [2]: §3.4; [3]: §§ 5.6-5.8; [4]: §1.2 [6]: §7.1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4-3

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ LC-ГЕНЕРАТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить работу LC-генератора.
2. Построить график зависимости частоты колебаний от параметров LC-контура.
3. Построить амплитудно-частотную характеристику генератора.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для создания периодических незатухающих сигналов различной формы применяются генераторы. Различают генераторы с самовозбуждением, автогенераторы и генераторы с внешним возбуждением.

Генерирование незатухающих колебаний в реальных схемах невозможно без дополнительных устройств. Часть энергии рассеивается на элементах схемы. Поэтому для поддержания колебаний эти потери энергии необходимо восполнять.

Как правило, энергия рассеивается на активных элементах и резисторах. Если обозначить потери в виде сопротивления потерь R_p , то для восполнения потерь в схему нужно ввести отрицательное сопротивление $R_{p(-)}$, которое будет восполнять потери энергии выделившейся на сопротивлении R_p .

В реальных схемах введение отрицательного сопротивления эквивалентно работе активных элементов: транзисторов, туннельных диодов, терморезисторов, тиристоров и т.д. на ниспадающем участке вольт-амперной характеристики ВАХ (касательная в каждой точке такой характеристики определяет производную, имеет смысл сопротивления, знак производной отрицательный). Широко применяется для этой цели введение положительной обратной связи (ПОС), а также параметрическое возбуждение колебаний.

В зависимости от глубины ПОС и частоты задающего контура различают генераторы: гармонических колебаний, релаксационных колебаний (прямоугольной, пилообразной формы и т.д.).

Рассмотрим работу автогенератора синусоидальных колебаний, построенного на биполярном транзисторе (рис.1).

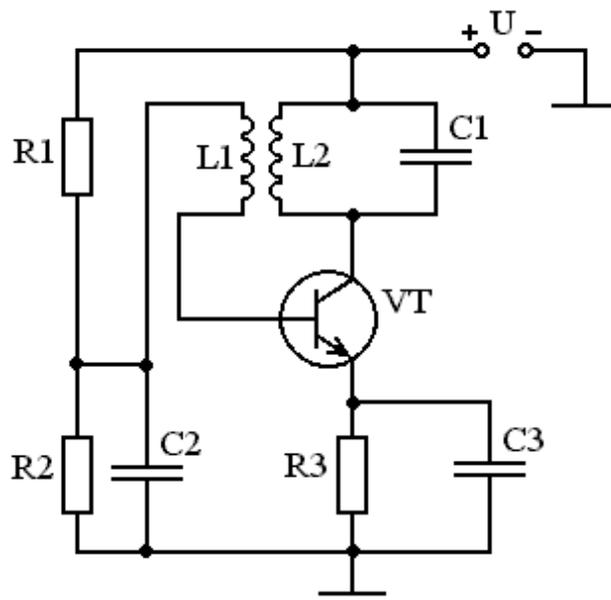


Рис. 1

Условием генерации синусоидальных колебаний является равенство энергии потерь и энергии, вводимой в контур генератора.

С помощью резисторов R_1 и R_2 на базу транзистора подается положительное смещение, которое обеспечивает режим работы транзистора по постоянному току. Это напряжение необходимо в момент запуска генератора. После возникновения колебаний постоянная составляющая тока базы может стать отрицательной за счет выпрямления переменной составляющей тока базы.

Для компенсации постоянной составляющей тока базы в схему вводятся конденсаторы C_2 и C_3 , которые шунтируют резисторы R_2 и R_3 .

Схема представляет собой усилитель с ПОС, в которую включен колебательный контур. Колебательный контур включен в коллекторную цепь транзистора. Колебательный контур индуктивно, через катушку L_2 связан с входом усилителя (базовой цепью транзистора), в которую включается катушка индуктивности L_1 .

Коэффициент ПОС β должен удовлетворять условию

$$\beta \geq \frac{1}{K_o} \quad (1)$$

где K_o - коэффициент усиления усилителя, обеспечивающий возникновение колебаний.

При протекании тока в катушке L_2 в контуре наводится э.д.с. и происходит зарядка конденсатора и, как следствие, возникают электромагнитные колебания. При уменьшении амплитуды колебаний, возникающих в колебательном контуре, в цепи ПОС возникает компенсирующая э.д.с., что приводит к изменению тока в цепи базы. Такой процесс эквивалентен появлению отрицательного сопротивления, которое компенсирует потери в контуре. Таким образом, в генераторе возникают незатухающие

электромагнитные колебания. Частота генерирующих колебаний зависит от параметров колебательного контура

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2)$$

Блок-схема генератора представлена на рис. 2.

U_1 и U_2 - амплитуды синусоидальных напряжений. Амплитуды U_1 и U_2 будут стационарными, если выполняются условия:

$$\begin{aligned} U_2 &= K_{cp} U_1 \\ U_1 &= \beta U_2 \quad \text{или} \\ U_1 &= \beta K_{cp} U_1 \\ \beta K_{cp} &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

K_{cp} - средний коэффициент передачи усиления;

β - глубина ПОС (коэффициент передачи).

$$K_{cp} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} = -S_{cp} Z_{эк} \quad (4)$$

S_{cp} - крутизна характеристики транзистора,

$Z_{эк}$ - эквивалентное сопротивление колебательного контура.

С учетом $\beta = \frac{1}{K_{cp}}$ получим

$$-S_{cp} Z_{эк} \beta = 1 \quad (5)$$

Учитывая комплексный характер $Z_{эк}$ и синусоидальный характер колебаний можно записать:

$$\beta = |\beta| e^{j\varphi_\beta}; \quad Z_{эк} = |Z_{эк}| e^{j\varphi_k}; \quad S_{cp} = |-S_{cp}| e^{j\varphi_s}$$

$$|\beta| / |Z_{эк}| / |-S_{cp}| = 1 \quad (6)$$

$$\varphi_s + \varphi_k + \varphi_\beta = 2n\pi \quad (7)$$

$$n = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$$

Выражение (6) называют балансом амплитуд, (7) - балансом фаз.

В генераторе условия (6) и (7) поддерживаются автоматически.

При изменении параметров контура изменяется и сопротивление контура и частота колебаний таким образом, что баланс фаз восстанавливается.

Чем выше добротность контура, тем круче его фазовая характеристика и тем выше способность колебательного контура поддерживать стабильную частоту. Поэтому условием стабильности частоты является баланс фаз.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Запустить программу выполнения работы.
2. Изучить содержание аннотации к выполнению данной работы, переключившись в текстовый редактор сочетанием клавиш Alt+Tab.
3. Запустить программу моделирования сочетанием клавиш Ctrl+G или при помощи кнопки (рис.2).
4. На экране осциллографа наблюдать вид генерируемых колебаний. Определить частоту и амплитуду по осциллографу. Сравнить с расчетной частотой (формула 2).
5. Изменить параметры схемы (колебательного контура) и повторить выполнение п.4.
6. Повторить выполнение п.5 5-10 раз.
7. Результаты выполнения работы внести в таблицу.

Таблица

<i>№ n/n</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>f</i>	<i>f₁</i>	<i>U_m</i>
	<i>Гн</i>	<i>МкФ</i>	<i>Гц</i>	<i>Гц</i>	<i>В</i>

8. По данным таблицы построить зависимость частоты колебаний от параметров колебательного контура $f=F(LC)$ и $f_1=F(LC)$ (f_1 - расчетная частота колебаний генератора).
9. Построить зависимость $U_m=F(f)$ и $U_m=F(f_1)$. Сравнить полученные кривые. Проанализировать ход АЧХ.
10. Сделать выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основное назначение и классификация генераторов сигналов.
2. Изобразить схему LC-генератора и пояснить назначение всех элементов схемы.
3. Что такое положительная обратная связь? Зачем ПОС вводится в схему?
4. Получить условия баланса фаз и амплитуд для схемы генератора.
5. Что такое амплитудно-частотная характеристика генератора?

ЛИТЕРАТУРА

[1]: §2.3.1; [2]: §5.2; [3]: §14.3,14.8; [4]: §4.1; [6]: §8.1.

ЛИТЕРАТУРА

1.В.И.Лачин. Н.С.Савелов. Электроника. Ростов н/Д.: «Феникс». 2000.С.448.

2.В.И.Нефедов. Основы радиоэлектроники. М.: Высш.шк.. 2000. С.399.

3.Е.И.Манаев. Основы радиоэлектроники. М.: Советское радио.1976. С.480.

4. М.Мэндл. 200 избранных схем электроники. М.: «Мир». 1980.С.344.

5. В.И.Карлащук. Электронная лаборатория на IBM PC. М.: «Солон-Р». 1999. С.506.