

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

Кафедра электронных приборов

## **РАБОТА ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА В РЕЖИМЕ МАЛОГО СИГНАЛА**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

2012

**Бородин Максим Викторович**  
**Саликаев Юрий Рафаельевич**

Работа транзисторного каскада в режиме малого сигнала: методические указания к лабораторной работе для студентов направления «Электроника и микроэлектроника» (специальность 210105 – Электронные приборы и устройства) / М.В. Бородин, Ю.Р. Саликаев; 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. – 13 с.

Лабораторная работа выполняется с использованием программной среды QUCS (Quite Universal Circuit Simulator) и заключается в моделировании аналоговых цепей. Для обработки результатов и оформления отчёта могут применяться различные математические и офисные программные средства.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и микроэлектроника» (специальность 210105 – Электронные приборы и устройства) по дисциплине «Математические модели и САПР электронных приборов и устройств»

© Бородин Максим Викторович, 2012

© Саликаев Юрий Рафаельевич, 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.

## РАБОТА ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА В РЕЖИМЕ МАЛОГО СИГНАЛА

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления «Электроника и микроэлектроника»  
(специальность «Электронные приборы и устройства»)

Разработчик  
\_\_\_\_\_ М.В. Бородин  
\_\_\_\_\_ Ю.Р. Саликаев  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г

## Содержание

1 Введение.....	5
2 Лабораторная работа. Работа транзисторного каскада в режиме малого сигнала.....	5
2.1 Цель работы.....	5
2.2 Краткие сведения из теории.....	5
2.2.1 Усилитель с общим эмиттером.....	5
2.2.2 Усилитель с общим коллектором.....	7
2.3 Порядок проведения экспериментов.....	8
2.4 Контрольные вопросы.....	11
3 Содержание отчета.....	11
Список рекомендуемой литературы.....	12

## 1 Введение

Лабораторная работа выполняется с использованием программной среды QUCS (Quite Universal Circuit Simulator) и заключается в моделировании аналоговых цепей. Для обработки результатов и оформления отчёта могут применяться различные математические и офисные программные средства. В работе рассматриваются различные способы задания рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером.

При выполнении работы используются следующие приборы и элементы: биполярный транзистор 2N3904; биполярный транзистор 2N3906; источники постоянной ЭДС; резисторы; амперметры; вольтметры.

## 2 Лабораторная работа. Работа транзисторного каскада в режиме малого сигнала

### 2.1 Цель работы

В ходе выполнения работы необходимо:

- исследовать коэффициент усиления по напряжению в усилителях с общим эмиттером и общим коллектором; влияние входного сопротивления усилителя на коэффициент усиления по напряжению; влияние разделительного конденсатора на усиление переменного сигнала;
- определить фазовый сдвиг сигналов в усилителях;
- измерить входное сопротивление усилителя; выходное сопротивление усилителей;
- провести анализ влияния нагрузки усилителя на коэффициент усиления по напряжению; анализ влияния сопротивления  $R_3$  в цепи эмиттера на коэффициент усиления по напряжению.

### 2.2 Краткие сведения из теории

Коэффициент усиления по напряжению определяется отношением амплитуд выходного синусоидального напряжения ко входному:

$$K_y = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}.$$

#### 2.2.1 Усилитель с общим эмиттером

Схема усилителя с общим эмиттером представлена на рис. 2.1.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с ОЭ приближенно равен соотношению сопротивлений в цепи коллектора  $r_K$  к сопротивлению в цепи эмиттера  $r_3$ :

$$K_y = r_K / r_3,$$

где  $r_k$  - сопротивление в цепи коллектора, которое определяется параллельным соединением сопротивления коллектора  $R_K$  и сопротивлением нагрузки  $R_H$  (не показанном на рис. 2.15), чью роль может играть, например, следующий усилительный каскад:

$$r_k = \frac{R_K \cdot R_H}{R_H + R_K},$$

$r_э$  - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода, равное  $r_э = 25\text{мВ}/I_э$ .

Для усилителя с сопротивлением  $R_э$  в цепи эмиттера коэффициент усиления равен:

$$K_v = \frac{r_k}{r_э + R_э}.$$

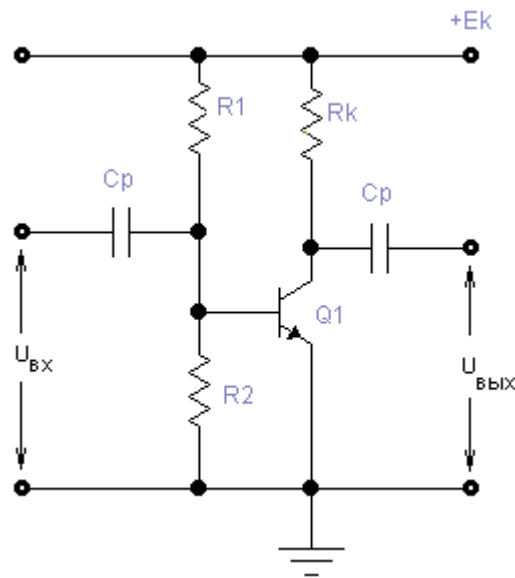


Рисунок 2.1

Входное сопротивление усилителя по переменному току определяется как отношение амплитуд синусоидального входного напряжения  $u_{ВХ}$  и входного тока  $i_{ВХ}$ :

$$r_{ВХ} = \frac{u_{ВХ}}{i_{ВХ}}.$$

Входное сопротивление транзистора  $r_l$  определяется по формуле:

$$r_l = \beta \cdot r_э.$$

Входное сопротивление усилителя по переменному току  $r_{ВХ}$  вычисляется как параллельное соединение сопротивлений  $r_l$ ,  $R_1$  и  $R_2$ :

$$\frac{1}{r_{ВХ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{r_l}.$$

Значение дифференциального выходного сопротивления схемы находится по напряжению  $u_{ХХ}$  холостого хода на выходе усилителя, которое может быть измерено как падение напряжения на сопротивлении

нагрузки, превышающем 200 кОм, и по напряжению  $u_{ВЫХ}$ , измеренного для данного сопротивления нагрузки  $R_H$ , из следующего уравнения, решаемого относительно  $r_{ВЫХ}$ :

$$\frac{u_{ВЫХ}}{u_{ХХ}} = \frac{R_H}{R_H + r_{ВЫХ}}.$$

**Примечание.** Сопротивление  $R_H \geq 200$  кОм можно считать разрывом в цепи нагрузки.

### 2.2.2 Усилитель с общим коллектором

Схема усилителя с общим коллектором (или эмиттерного повторителя) представлена на рис. 2.3.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с ОК определяется из следующего выражения:

$$K_V = \frac{R_Э}{R_Э + r_Э}.$$

Как видно из выражения, коэффициент усиления каскада с общим коллектором приближенно равен 1, поскольку  $r_Э$  обычно мало по сравнению с сопротивлением  $R_Э$ . Из-за этого свойства каскад называют эмиттерным повторителем. Входное сопротивление усилителя  $r_{ВХ}$  по переменному току определяется как отношение синусоидального входного напряжения  $u_{ВХ}$  и входного тока  $i_{ВХ}$ :

$$r_{ВХ} = \frac{u_{ВХ}}{i_{ВХ}}.$$

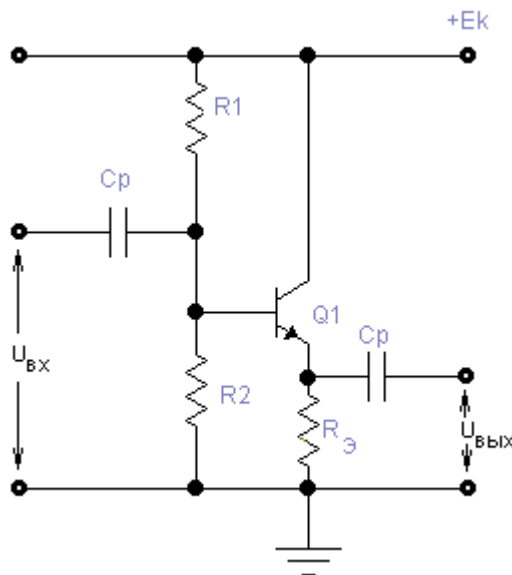


Рисунок 2.3

Входное сопротивление эмиттерного повторителя по переменному току определяется следующим выражением:

$$r_{TЭ} = \beta \cdot (r_{Э} + R_{Э}).$$

В данном случае для определения входного сопротивления каскада нужно принять во внимание сопротивление резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . С учетом сказанного получим:

$$\frac{1}{R_{ВХ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{r_{TЭ}}.$$

Также при расчете схем необходимо учитывать сопротивление нагрузки, которое включается параллельно сопротивлению эмиттера  $R_{Э}$ .

Из выражения для входного сопротивления видно, что эмиттерный повторитель обладает высоким входным сопротивлением по сравнению с каскадом с ОЭ.

В общем случае выходное сопротивление эмиттерного повторителя в  $(\beta_{AC} + 1)$  раз меньше сопротивления  $R_{ИСТ}$  источника сигнала на входе эмиттерного повторителя:

$$r_{ВЫХ} = \frac{R_{ИСТ}}{\beta_{AC} + 1} + r_{Э} \approx \frac{R_{ИСТ}}{\beta_{AC}} + r_{Э}.$$

Если сопротивление  $R_{ИСТ}$  источника сигнала на входе эмиттерного повторителя пренебрежимо мало, то выходное сопротивление эмиттерного повторителя будет равно дифференциальному сопротивлению перехода база-эмиттер:

$$r_{ВЫХ} = r_{Э}.$$

В случае, когда сопротивление  $R_{ИСТ}$  источника сигналов на входе очень велико (сравнимо с  $\beta_{AC} \cdot R_{Э}$ ), сопротивление  $R_{Э}$  должно быть учтено как включенное параллельно найденному выходному сопротивлению эмиттерного повторителя.

Экспериментально выходное сопротивление каскада можно определить по результатам двух измерений: измерения напряжения холостого хода  $U_{XX}$  (на выход каскада подключается сопротивление порядка 200 кОм и измеряется падение напряжения на нем) и измерения выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  при наличии нагрузки сопротивлением  $R_H$ . После измерения выходное сопротивление можно подсчитать по формуле:

$$r_{ВЫХ} = \frac{R_H \cdot (U_{XX} - U_{ВЫХ})}{U_{ВЫХ}}.$$

Благодаря высокому входному и низкому выходному сопротивлениям каскада с общим коллектором его очень часто используют в качестве согласующего между источником и нагрузкой.

### 2.3 Порядок проведения экспериментов

Создайте в QUCS новый проект. В названии проекта *не используйте* пробелы и кириллицу.



### Задание 1. Исследование каскада с общим эмиттером в области малого сигнала

1. Создать схему согласно рис. 2.3. Параметры всех компонентов должны соответствовать указанным на рисунке. В данной работе используется режим  моделирования переходного процесса, что позволяет получать развертку процессов во времени (осциллограмму).

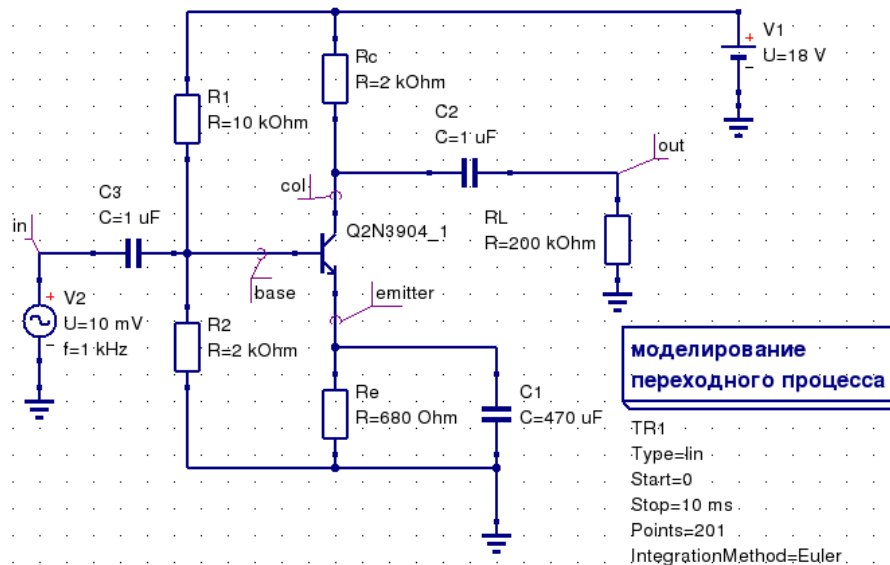


Рисунок 2.3

2. Запустить моделирование. Для установившегося режима записать результаты измерений амплитуд входного и выходного напряжений, разности фаз входного и выходного синусоидального сигнала (разность фаз можно определить по относительному сдвигу сигналов на осциллограмме). По результатам измерений амплитуд входного и выходного синусоидальных напряжений вычислить коэффициент усиления усилителя по напряжению.

3. Для схемы на рисунке определить ток эмиттера. По его значению вычислить дифференциальное сопротивление  $r_e$  эмиттерного перехода. Используя найденное значение, вычислить коэффициент усиления каскада по напряжению.

4. Подключить резистор  $R_D$  номиналом 1 кОм между точкой *in* и конденсатором  $C_3$ . Провести моделирование. Измерить амплитуды входного  $u_{BX}$  и выходного  $u_{ВЫХ}$  напряжений. Вычислить новое значение коэффициента усиления по напряжению усилительного каскада. По результатам измерения амплитуд напряжения  $u_{BX}$  и  $u_B$  вычислить входной ток  $i_{BX}$ . По значению  $u_{BX}$  и  $i_{BX}$  вычислить входное сопротивление  $r_{BX}$  усилителя по переменному току.

5. По значению коэффициента усиления тока  $\beta$ , полученному в задании 1 работы 1, и величине дифференциального эмиттерного сопротивления  $r_e$  вычислить входное сопротивление транзистора  $r_1$ . Вычислить значения  $r_{BX}$ , используя значения сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $r_1$ .

6. Закоротить резистор  $R_D$ , вернувшись к исходной схеме рис. 2.3. Установить номинал резистора  $R_L$  2 кОм. Затем включить симуляцию и измерить амплитуды входного и выходного синусоидального напряжения. Используя результаты измерений, вычислить новое значение коэффициента усиления по напряжению.

7. Используя результаты измерений амплитуды входного и выходного синусоидального напряжения в пункте 2 и пункте 6, значение сопротивления нагрузки в пункте 6, вычислить выходное сопротивление усилителя.

8. Установить номинал резистора  $R_L$  200 кОм. Провести моделирование и измерить постоянную составляющую выходного сигнала в точках с метками *col* и *out*.

9. Убрать шунтирующий конденсатор  $C_1$  и запустить моделирование. Измерить амплитуды входного и выходного синусоидального напряжения. По результатам измерений вычислить значение коэффициента усиления по напряжению каскада с ОЭ с сопротивлением в цепи эмиттера.

10. По величине сопротивления  $r_{Э}$  и значению сопротивления  $R_e$  вычислить значение коэффициента усиления по напряжению усилителя с ОЭ и сопротивлением в цепи эмиттера.

**Эксперимент 2.** Исследование каскада с общим коллектором в области малого сигнала.

1. Создать схеме согласно рис. 2.4. Параметры компонентов в схеме должны соответствовать параметрам указанным на рисунке.

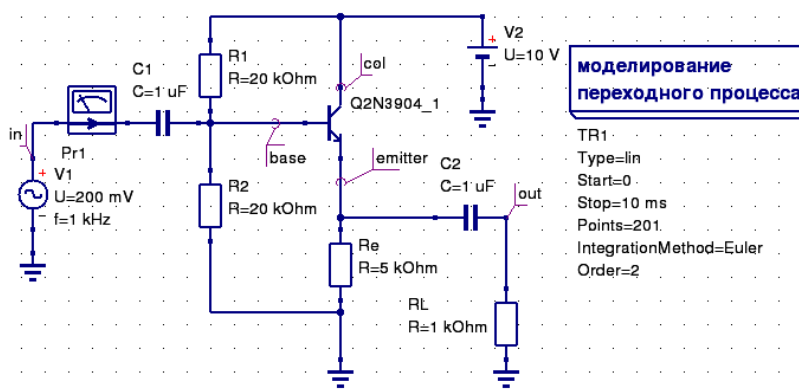


Рисунок 2.4

2. Запустить моделирование. Измерить постоянные составляющие напряжения в точках *base* и *emitter*. Вычислить постоянные составляющие напряжения в этих же точках и ток эмиттера, используя значения параметров компонентов схемы ( $U_{БЭ}=0,7$  В).

3. Измерить амплитуды входного и выходного напряжения. Определить разность фаз между входным и выходным напряжением (как в эксперименте 1). По результатам измерений вычислить коэффициент усиления по напряжению. Вычислить коэффициент усиления эмиттерного повторителя по напряжению, используя параметры схемы.

## 2.4 Контрольные вопросы

1. Какова разность фаз между входным и выходным синусоидальными сигналами в усилителе с ОЭ, с ОК?

2. Как влияет входное сопротивление на коэффициент усиления по напряжению?

3. Какова связь между входным напряжением (узел *in*) и напряжением на базе (узел *base*) при включении между ними сопротивления?

4. Какое влияние оказывает понижение сопротивления нагрузки на коэффициент усиления по напряжению?

5. Какова связь между входным сопротивлением усилителя и сопротивлением в цепи коллектора  $R_c$  ?

6. Как влияет сопротивление в цепи эмиттера  $R_e$  на коэффициент усиления по напряжению усилителя?

7. Каково отличие практического и теоретического значений коэффициента усиления по напряжению усилителя с ОК? Почему значение коэффициента усиления по напряжению меньше единицы?

8. Каково отличие практического и теоретического значений входного сопротивления по переменному току усилителя с ОК? Велико ли это значение?

9. Велико ли значение выходного сопротивления усилителя с ОК?

10. В чем заключено главное достоинство схемы усилителя с ОК? В чем главное назначение этой схемы?

## 3 Содержание отчета

По лабораторной работе необходимо составить отчёт, который должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие сведения из теории, содержащие расчётные формулы;
- схемы, собранные при проведении экспериментов в среде QUCS;
- результаты расчётов и экспериментов в виде таблиц и графиков;
- ответы на контрольные вопросы;
- выводы по проведённой работе.

## Список рекомендуемой литературы

1. Основы компьютерного моделирования наносистем / Ибрагимов И.М. , Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф. – М.: Изд-во «Лань» , 2010.- 384 с. ISBN 978-5-8114-1032-3: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=156](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=156)
2. Поршнева С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. + CD. - М.: Изд-во «Лань», 2011.- 736 с. ISBN 978-5-8114-1063-7 [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=650](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=650)
3. Моделирование компонентов и элементов интегральных схем / Петров М.Н., Гудков Г.В. - М.: Изд-во «Лань», 2011.- 464 с. ISBN 978-5-8114-1075-0 [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=661](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=661)
4. Основы автоматизированного проектирования [Текст] : учебник для вузов / Е. М. Кудрявцев. - М. : Академия, 2011. - 304 с. - ISBN 978-5-7695-6004-0
5. Математические модели и САПР электронных приборов и устройств: учебное пособие / Ю. Р. Саликаев.- Томск: ТУСУР, 2012. - 131 с. Препринт. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/>
6. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем : / И. Влах, К. Сингхал ; пер.: А. Ф. Обьедков, Н. Н. Удалов, В. М. Демидов ; ред. пер. А. А. Туркина. - М. : Радио и связь, 1988. - 560 с. - ISBN 5-256-00054-3
7. Компьютерное моделирование и проектирование: учебное пособие / Ю. Р. Саликаев.- Томск: ТУСУР, 2012. - 94 с. Препринт. Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/training/publications/2548>
8. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учебник для вузов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 360 с.

Учебное пособие

Бородин М.В., Саликаев Ю.Р.

Работа транзисторного каскада в режиме малого сигнала

Методические указания к лабораторной работе

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