

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

Кафедра электронных приборов

## **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**

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

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

Операционный усилитель: 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. – 14 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.

## **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**

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. Операционный усилитель .....	5
2.1 Цель работы .....	5
2.2 Краткие сведения из теории .....	5
2.3 Порядок проведения экспериментов .....	10
2.4 Контрольные вопросы .....	12
3 Содержание отчета .....	13
Список рекомендуемой литературы .....	13

## 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.

## 2 Лабораторная работа. Операционный усилитель

### 2.1 Цель работы

В ходе выполнения работы необходимо:

- измерить входные токи операционного усилителя (ОУ); напряжение смещения ОУ; дифференциальное входное сопротивление ОУ;
- оценить величину среднего входного тока и разности входных токов ОУ;
- вычислить выходное сопротивление ОУ;
- измерить скорость нарастания выходного напряжения ОУ; коэффициент усиления неинвертирующего усилителя на ОУ; коэффициент усиления инвертирующего усилителя на ОУ.
- определить разность фаз между выходным и входным синусоидальным напряжением ОУ; разность фаз между выходным и входным синусоидальным напряжением ОУ;
- исследовать влияние коэффициента усиления усилителя на постоянную составляющую выходного напряжения; влияние коэффициента усиления схемы на постоянную составляющую выходного напряжения.

### 2.2 Краткие сведения из теории

Интегральный операционный усилитель характеризуется рядом параметров, описывающих этот компонент с точки зрения качества выполнения им своих функций. Среди параметров, обычно приводимых в справочных данных, основными являются следующие.

Средний входной ток  $I_{BX}$ . В отсутствие сигнала на входах ОУ через его входные выводы протекают токи, обусловленные базовыми токами входных биполярных транзисторов или токами утечки затворов для ОУ с полевыми транзисторами на входе. Входные токи, проходя через внутреннее сопротивление источника входного сигнала, создают падения напряжения на входе ОУ, которые могут вызвать появление напряжения на выходе в отсутствие сигнала на входе. Компенсация этого падения напряжения затруднена тем, что токи входов реальных ОУ могут отличаться друг от друга на 10...20%

Входные токи ОУ можно оценить по среднему входному току, вычисляемому как среднее арифметическое токов инвертирующего и

неинвертирующего входов:

$$I_{BX} = (I_1 + I_2) / 2,$$

где  $I_1$  и  $I_2$  соответственно токи инвертирующего и неинвертирующего входов. Разность входных токов  $\Delta I_{BX}$  определяется выражением:

$$\Delta I_{BX} = I_1 - I_2$$

В справочниках указывают модуль этой величины. Схема для измерения входных токов представлена на рис. 2.1.

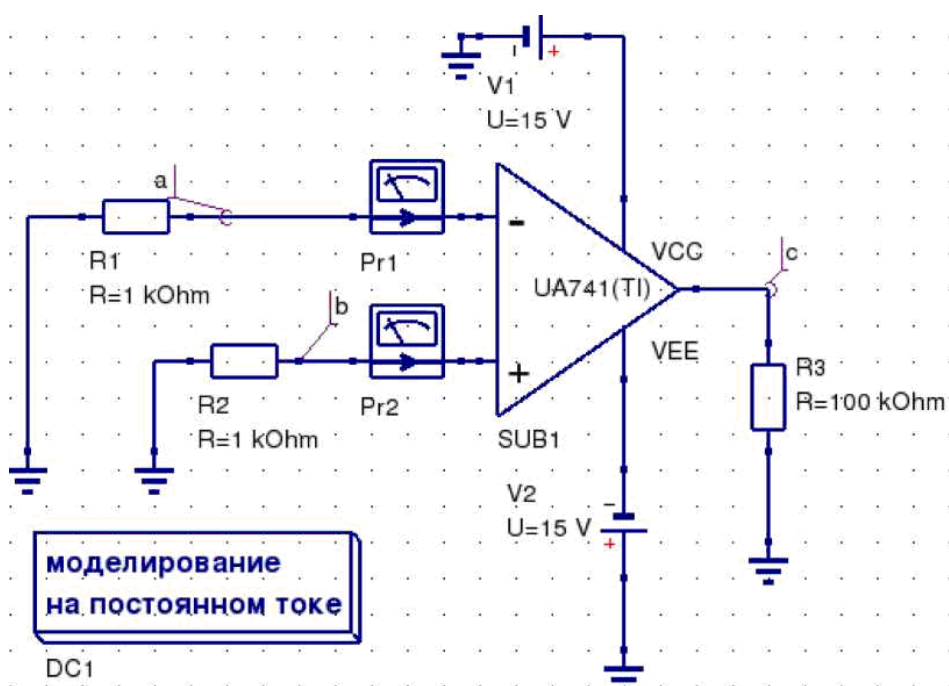


Рисунок 2.1

Коэффициент усиления напряжения на постоянном токе  $K_0$  - показатель ОУ, определяющий насколько хорошо выполняет ОУ основную функцию - усиление входных сигналов. У идеального усилителя коэффициент усиления должен стремиться к бесконечности.

Коэффициент усиления напряжения схемы усилителя на ОУ (рис. 2.2) вычисляется по формуле:

$$K_V = -R_1 / R_2$$

Напряжение смещения  $U_{CM}$  — значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы напряжение на его выходе было равно нулю.

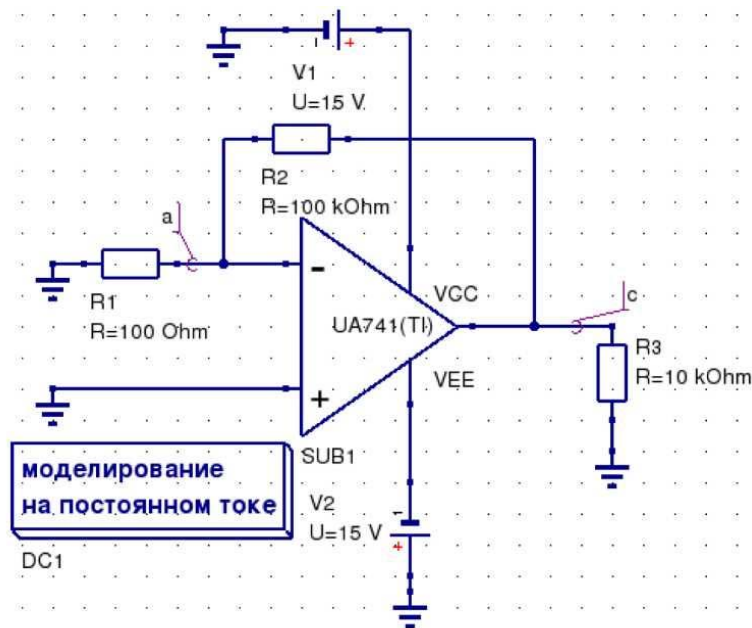


Рисунок 2.2

Напряжение смещения  $U_{CM}$  можно вычислить, зная выходное напряжение  $\Delta U_{ВЫХ}$  при отсутствии напряжения на входе и коэффициент усиления:

$$U_{CM} = \Delta U_{ВЫХ} / K_U$$

Входное сопротивление  $R_{ВХ}$ . Различают две составляющие входного сопротивления: дифференциальное входное сопротивление и входное сопротивление по синфазному сигналу (сопротивление утечки между каждым входом и "землей"). Входное дифференциальное сопротивление для биполярных ОУ находится обычно в пределах 10 кОм...10 МОм. Входное сопротивление по синфазному сигналу определяется как отношение приращения входного синфазного напряжения  $\Delta U_{ВХ.СФ}$  к вызванному приращению среднего входного тока  $\Delta I_{ВХ.СР}$ :

$$R_{ВХ.СФ.} = \Delta U_{ВХ.СФ} / \Delta I_{ВХ.СР}$$

Дифференциальное входное сопротивление наблюдается между входами ОУ и может быть определено по формуле:

$$R_{ВХ.ДИФ.} = \Delta U_{ВХ.} / \Delta I_{ВХ}$$

где  $\Delta U_{ВХ}$  — изменение напряжения между входами ОУ,  $\Delta I_{ВХ}$  — изменение входного тока.

Выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$  в интегральных ОУ составляет 20...2000 Ом. Выходное сопротивление уменьшает амплитуду выходного сигнала, особенно при работе усилителя, на сравнимое с ним

сопротивление нагрузки. Схема для измерения дифференциального входного сопротивления ОУ и выходного сопротивления приведена на рис. 2.3.

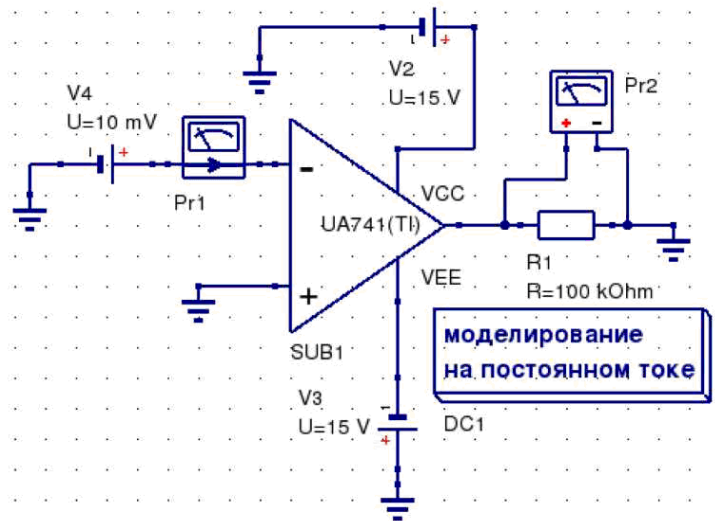


Рисунок 2.3

Скорость нарастания выходного напряжения  $V_{UBVIX}$  равна отношению изменения выходного напряжения ОУ ко времени его нарастания при подаче на вход скачка напряжения. Время нарастания определяется интервалом времени, в течении которого выходное напряжение ОУ изменяется от 10% до 90% от своих установившихся значений.

$$V_{UBVIX} = U_{BVIK} / t_{VCT}$$

Схема для измерения скорости нарастания выходного напряжения показана на рис. 2.4.

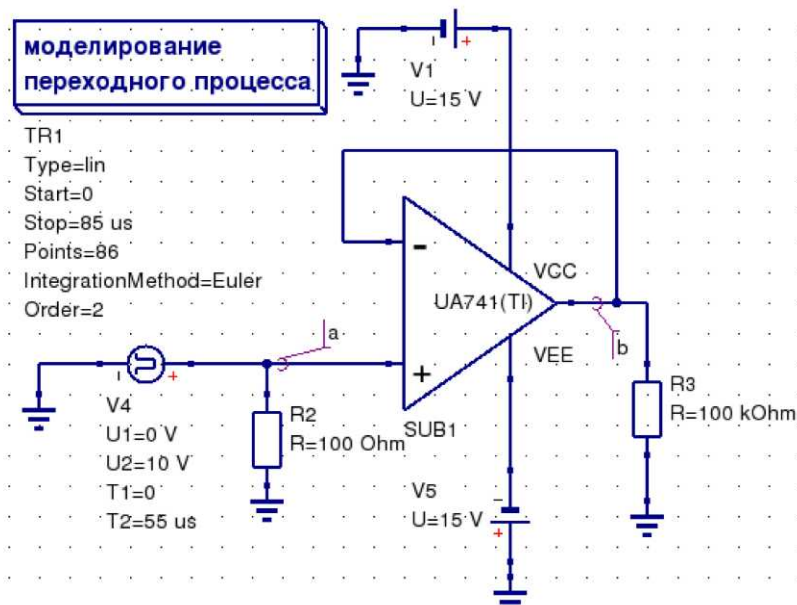


Рисунок 2.4



Измерения проводятся при подаче импульса в виде ступени на вход ОУ, охваченного отрицательной обратной связью (ООС) с общим коэффициентом усиления от 1 до 10.

Коэффициент усиления схемы неинвертирующего усилителя на ОУ вычисляется по формуле:

$$K_y = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Схема включения неинвертирующего усилителя приведена на рис. 2.5.

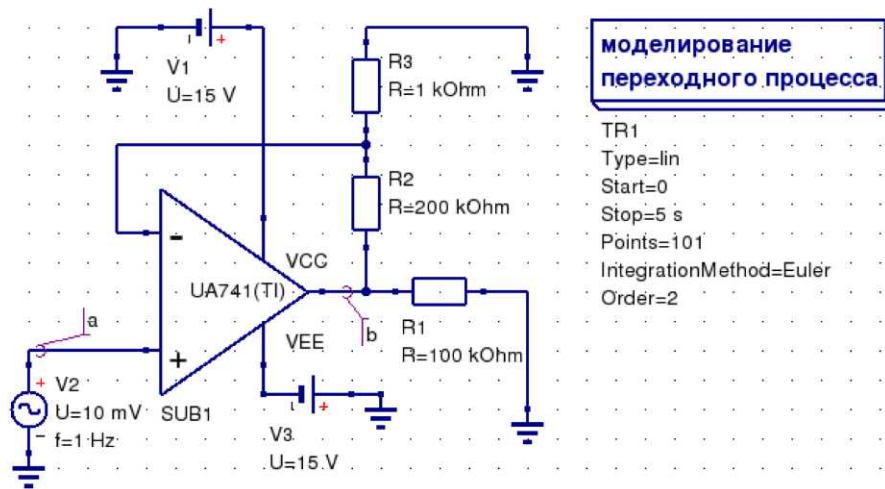


Рисунок 2.5

Постоянная составляющая выходного напряжения усилителя  $U_{0\text{ВЫХ}}$  определяется произведением напряжения смещения  $U_{\text{СМ}}$  на коэффициент усиления схемы  $K_y$ :

$$U_{0\text{ВЫХ}} = \dot{U}_{\text{СМ}} \cdot K_y$$

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя на ОУ с обратной связью (рис. 2.6.) вычисляется по формуле:

$$K_y = -\frac{R_f}{R_1}$$

Знак "минус" в формуле означает, что выходное напряжение инвертирующего усилителя находится в противофазе с входным напряжением.

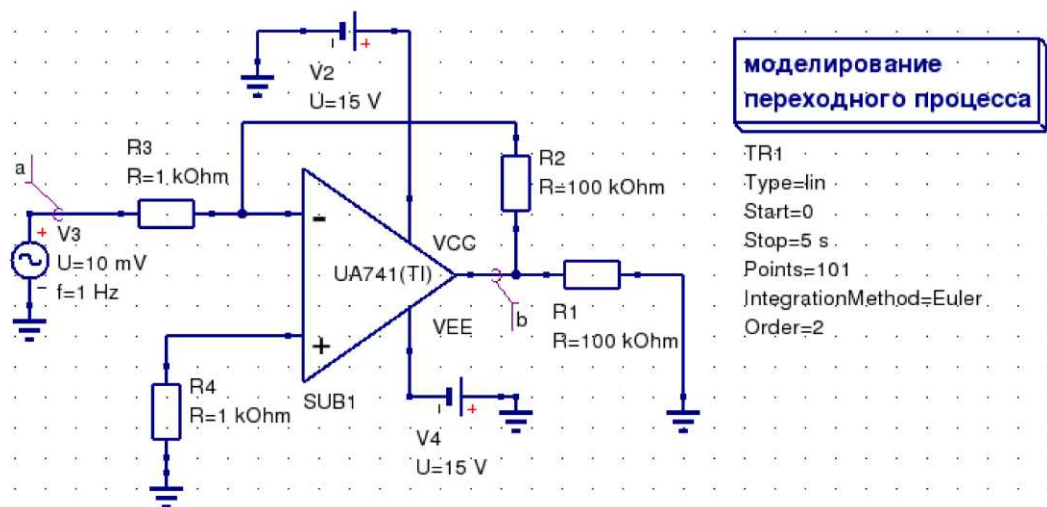


Рисунок 2.6

### 2.3 Порядок проведения экспериментов

Создайте в среде QUCS новый проект. В названии проекта не следует использовать пробелы и кириллицу.

#### Задание 1. Измерение входных токов

Создайте схему согласно рис. 2.1. Запустите моделирование. Измерьте входные токи ОУ. По результатам измерений вычислите средний входной ток  $I_{ВХ}$  и разность  $\Delta I_{ВХ}$  входных токов ОУ.

#### Задание 2. Измерение напряжения смещения

Создайте схему согласно рис. 2.2. Запустите моделирование. Занесите в отчет значение напряжения на выходе (в точке с). Рассчитайте коэффициент усиления схемы. Используя рассчитанное значение  $K_U$  и результат измерений, вычислите напряжение смещения  $U_{СМ}$ . Результаты вычислений также занесите в отчет.

#### Задание 3. Измерение входного и выходного сопротивлений

1. Создайте схему согласно рис. 2.3. Запустите моделирование. Измерьте входной ток  $I_{ВХ}$  и выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$ , запишите показания в отчет. Измените полярность источника V4 на входе усилителя (можно его перевернуть). Измерьте входной ток после переключения ключа. Рассчитайте изменения входного напряжения и тока. По полученным результатам вычислите дифференциальное входное сопротивление ОУ. Результаты занесите в отчет.

2. Уменьшайте сопротивление нагрузочного резистора R1 до тех

пор, пока выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  не будет примерно равно половине значения полученного в п.1. Запишите значение сопротивления  $R_1$ , которое в этом случае приблизительно равно выходному сопротивлению  $R_{\text{ВЫХ}} 0У$ , в отчет.

#### **Задание 4. Измерение времени нарастания выходного напряжения ОУ**

Создайте схему согласно рис. 2.4. Здесь используется режим моделирования переходного процесса, что позволяет получать временную развертку сигналов (осциллограммы). Запустите моделирование. Зарисуйте осциллограмму выходного напряжения в отчет. По осциллограмме определите величину выходного напряжения, время его установления и вычислите скорость нарастания выходного напряжения в В/мкс. Занесите результат в отчет.

#### **Задание 5. Работа неинвертирующего усилителя в режиме усиления синусоидального напряжения**

Создайте схему согласно рис. 2.5. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения  $K_U$  усилителя по заданным значениям параметров компонентов схемы. Запустите моделирование. Измерьте амплитуды входного  $U_{\text{ВХ}}$  (точка а) и выходного  $U_{\text{ВЫХ}}$  (точка б) синусоидальных напряжений. Также измерьте постоянную составляющую выходного напряжения  $U_{0\text{ВЫХ}}$  и разность фаз между входным и выходным напряжениями. По результатам измерений вычислите коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  усилителя. Результаты занесите в отчет.

Используя значение напряжения смещения  $U_{\text{СМ}}$ , вычисленное в задании 2, и вычисленное теоретическое значение коэффициента усиления, вычислите постоянную составляющую выходного напряжения  $U_{0\text{ВЫХ}}$ . Результаты расчета также занесите в отчет.

#### **Задание 6. Исследование влияния параметров схемы на режим её работы.**

В схеме, приведенной на рис. 2.5, уменьшите значение сопротивления  $R_1$  с 100 кОм до 10 кОм, амплитуду синусоидального напряжения генератора увеличьте до 100 мВ. Запустите моделирование. Повторите все операции задания 5 при новых параметрах компонентов. Результаты занесите в отчет.

#### **Задание 7. Работа усилителя в режиме усиления синусоидального напряжения**

Создайте схему согласно рис. 2.6. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения  $K_U$  усилителя по значениям параметров компонентов схемы. Запустите моделирование. Измерьте амплитуду входного  $U_{\text{ВХ}}$  (точка а) и выходного  $U_{\text{ВЫХ}}$  (точка б) синусоидального напряжения,

постоянную составляющую выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  и разность фаз между входным и выходным напряжением. По результатам измерений вычислите коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  усилителя. Результаты занесите в отчет.

Используя значение входного напряжения смещения  $U_{\text{СМ}}$ , полученное в задании 2 и найденное значение коэффициента усиления, вычислите постоянную составляющую выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Результаты вычислений также занесите в отчет.

### **Задание 8. Исследование влияния параметров схемы на режим её работы**

Установите значение сопротивления  $R_3$  равным 10 кОм, амплитуду синусоидального напряжения генератора - 100 мВ. Запустите моделирование. Для новых параметров схемы повторите все измерения и вычисления задания 7. Результаты занесите в отчет.

#### **2.4 Контрольные вопросы**

1 Отличается ли измеренное значение среднего входного тока  $I_{\text{вх}}$  от его номинального значения для ОУ  $\mu\text{A}741$ , взятого из паспортных данных?

2 Существенно ли отличие разности входных токов от номинального значения для ОУ  $\mu\text{A}741$ ?

3 Сравните между собой величины входного и выходного сопротивлений ОУ. Какова схема замещения ОУ как элемента электрической цепи?

4 Отличается ли экспериментальное значение скорости нарастания выходного напряжения от номинального значения?

5 В чем причина возникновения входных токов ОУ и разности входных токов? К чему они приводят при работе схем на ОУ?

6 Существенно ли различие в значениях измеренной и вычисленной постоянной составляющей выходного напряжения схемы на рис. 2.5?

7 Чем определяется постоянная составляющая выходного напряжения схемы на рис. 2.5?

8 Как рассчитать коэффициент усиления схемы на рис. 2.6?

9 Как измерить разность фаз между входным и выходным напряжением в схеме на рис. 2.6?

10 Какие параметры схемы на рис. 2.6 влияют на ее коэффициент усиления?

Примечание. Паспортные данные ОУ  $\mu\text{A}741$ :

- средний входной ток ОУ 0,08 мкА;
- разность входных токов ОУ 0,02 мкА;
- напряжение смещения ОУ 1 мВ;
- входное сопротивление ОУ 2 Мом;

- выходное сопротивление ОУ 75 Ом;
- скорость нарастания выходного напряжения ОУ 0,5 В/мкс.

### 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. Влаха, 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.

Операционный усилитель

Методические указания к лабораторной работе

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