

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра электроэнергетики и электромеханики**

# **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**

## **РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 13.03.02  
и специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2019**

УДК 622.2 (073)

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ. Расчет и моделирование аналоговых электронных устройств:** Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *А.А. Коржев., А.М. Камышнян.* СПб. 2019. 28 с.

Методические указания содержат краткие теоретические сведения и пример выполнения расчетного задания по разделу «Электронные усилители» дисциплины «Физические основы электроники».

Целью самостоятельной работы является закрепление теоретических знаний, полученных студентами при изучении лекционного материала, самостоятельное рассмотрение отдельных вопросов дисциплины, подготовка к промежуточной и итоговой аттестации.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль подготовки «Электропривод и автоматика») и специальности 21.05.04 «Горное дело» (специализация «Электрификация и автоматизация горного производства»).

Научный редактор проф. *В.А. Шпенст*

Рецензент канд. техн. наук *В.А. Соловьев* (ООО «НПК «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»)

## ВВЕДЕНИЕ

«Физические основы электроники» – комплексная общетехническая дисциплина, включающая: изучение студентами физических процессов в дискретных полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах; изучение их устройства, параметров, характеристик; принципов построения и функционирования типовых электронных устройств, а также основных методов их расчета.

Целью дисциплины является формирование у студентов базовых знаний в области промышленной электроники, подготовка выпускников к решению профессиональных задач, связанных с применением электронных приборов и устройств в промышленности, формирование у студентов современного научного мировоззрения, развитие творческого естественно-научного мышления, ознакомление с методологией научных исследований.

Основными задачами дисциплины являются:

- изучение принципов работы полупроводниковых приборов и устройств на их основе;
- овладение методами расчёта анализа и синтеза электронных схем различного назначения;
- формирование представлений о физических процессах в полупроводниковых приборах, интегральных микросхемах и электронных устройствах; навыков чтения схем существующих электронных устройств и разработки новых устройств на базе электронных приборов; навыков практического применения инженерных методов расчётов электронных устройств; способностей проектирования и использования электронной аппаратуры, мотивации к самостоятельному повышению уровня профессиональных навыков в области промышленной электроники.

Знания, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении бакалаврской выпускной квалификационной работы и изучении дисциплин «Управление техническими системами», «Проектирование систем автоматики», «Эксплуатация систем автоматики».

Самостоятельная работа студента – обязательная и неотъемлемая часть учебной работы студента по данной учебной дисциплине. Целью самостоятельной работы является закрепление теоретиче-

ских знаний, полученных студентами при изучении лекционного материала, самостоятельное рассмотрение отдельных вопросов дисциплины, подготовка к промежуточной и итоговой аттестации.

## **1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРОСТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. ПОСТРОЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

### **Моделирование переходных процессов**

Программа qucs (аббр. от англ Quite Universal Circuit Simulator – почти универсальный симулятор электронных цепей) представляет собой свободную программу для моделирования электронных цепей.

Рассмотрим моделирование переходного процесса в простой электронной цепи. После запуска программы в левой части окна следует выбрать вкладку «Компоненты» (см. рис. 1.1), которая содержит элементы электрических и электронных цепей, сгруппированных по назначению. Нужные элементы выбираются в данной вкладке и перетаскиваются в рабочее поле программы. Для соединения элементов между собой используется элемент «линия» в панели инструментов, для выбора элементов – кнопка в виде курсора. Для вращения элементов используется сочетание клавиш Ctrl+R или соответствующие пиктограммы на панели инструментов (см. рис. 1.2). Соединяя элементы, можно получить схему моделируемого устройства (см. рис. 1.3).

После соединения элементов между собой необходимо задать их параметры. Для этого необходимо щёлкнуть нужный элемент двойным щелчком и ввести цифры в соответствующие поля всплывающего меню «Изменение свойств компонента» (см. рис. 1.4). При вводе параметров элементов буква «k» - кило, «m» - мили, «u» - микро, «n» - нано, «p» - пико.

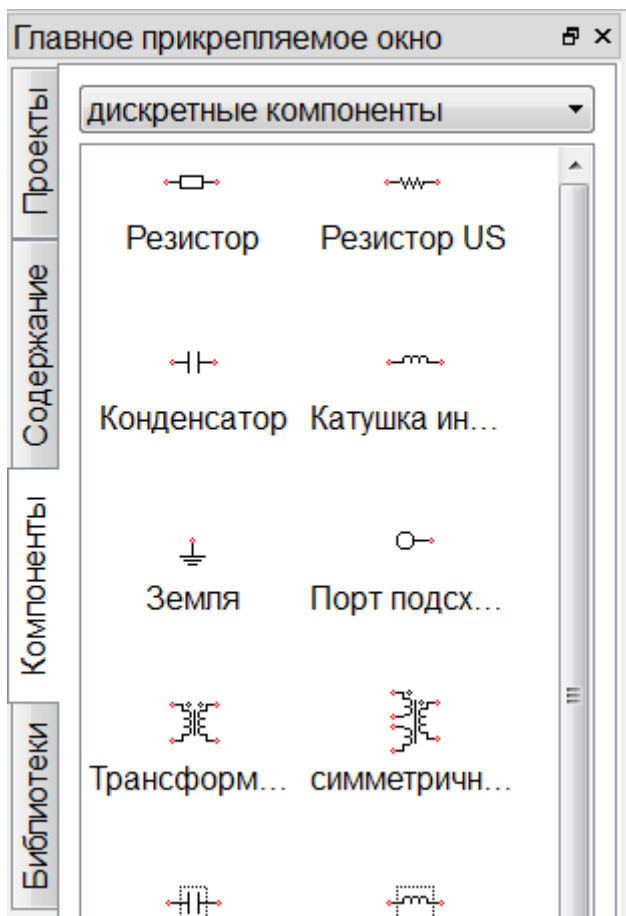


Рис. 1.1. Выбор вкладки «Компоненты»

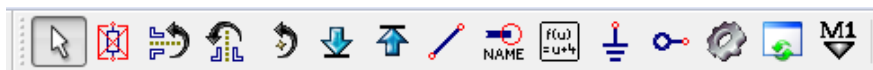


Рис. 1.2. Панель инструментов программы qucs

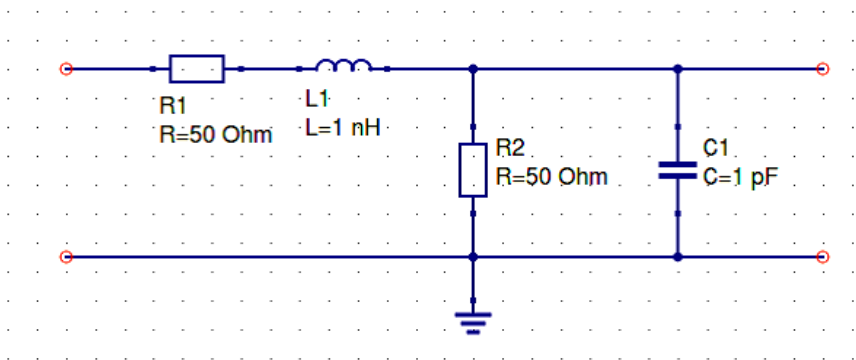


Рис. 1.3.Схема моделируемого устройства

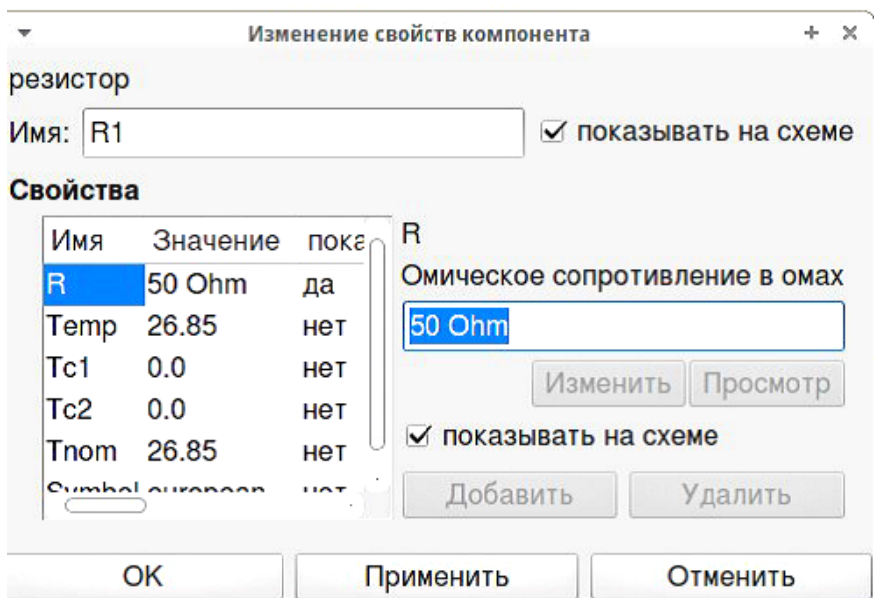


Рис. 1.4. Ввод параметров элементов схемы.

По окончании ввода параметров, схема принимает вид, представленный на рис. 1.5. Далее следует подключить к входу схемы

источник переменного напряжения, а к выходу — вольтметр (см. рис. 1.6), выбирая элементы в соответствующих группах элементов. Уставим параметры источника сигнала 10 V, 100 kHz. Для отображения частоты установим флажок «показывать на схеме».

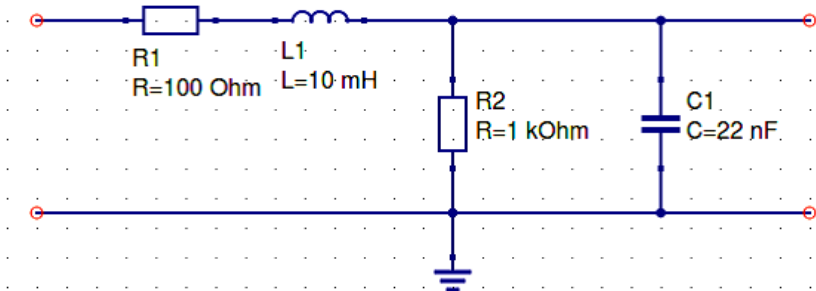


Рис. 1.5. Схема с заданными параметрами элементов

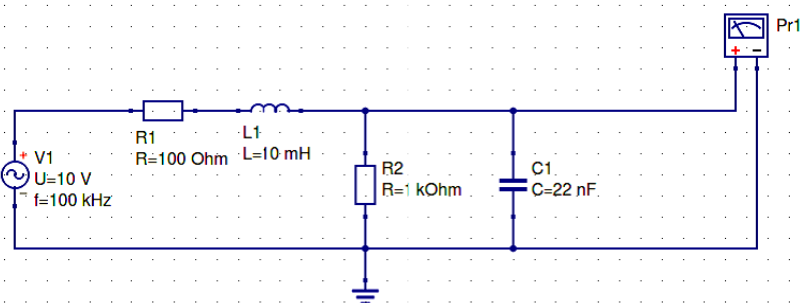


Рис. 1.6. Схема с подключенным источником сигнала и измерительным прибором

Для исследования переходных процессов необходимо установить вид моделирования. Для этого нужно выбрать в группе элементов «Виды моделирования» элемент «Моделирование переходного процесса» и перетащить его на поле схемы и задать параметры, в частности, время моделирования. Чтобы отобразить на схеме

входной и выходной сигнал, следует присвоить соответствующим проводникам метки с помощью соответствующей кнопки в верхней панели управления программы (рис. 1.2). В итоге, окно программы примет вид, представленный на рис. 1.7.

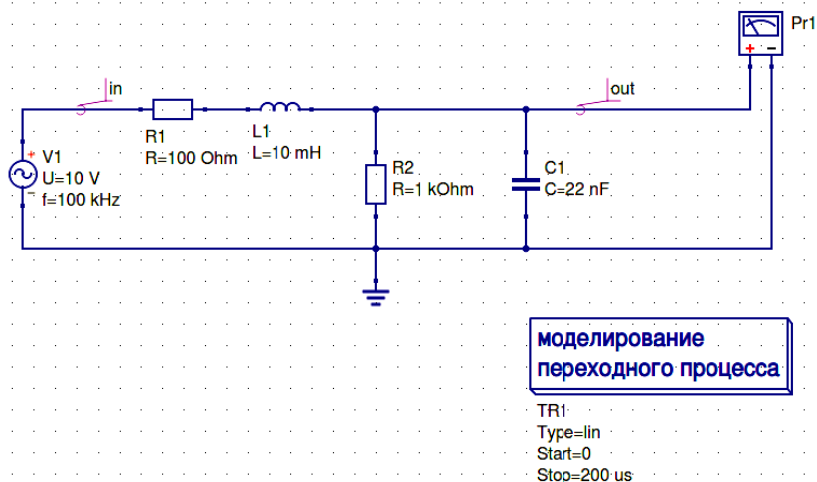


Рис. 1.7. Схема с выбранным режимом моделирования и установленными метками проводников

После нажатия клавиши F2 программой будет выполнено моделирование работы схемы и откроется рабочее поле для вывода результатов моделирования. Добавим к нему «Декартовскую диаграмму», путём перетаскивания в окно отображения результатов соответствующего элемента (выполняется аналогично перетаскиванию элементов схемы). По двойному щелчку добавленной нами диаграммы появится меню, представленное на рис. 1.8. В котором следует выбрать временную диаграмму входного «in.Vt» и выходного «out.Vt» напряжений. После выбора, диаграмма примет вид, представленный на рис. 1.8. График соответствует переходному процессу в схеме при подключении к входу в момент  $t=0$  источника синусоидального напряжения.



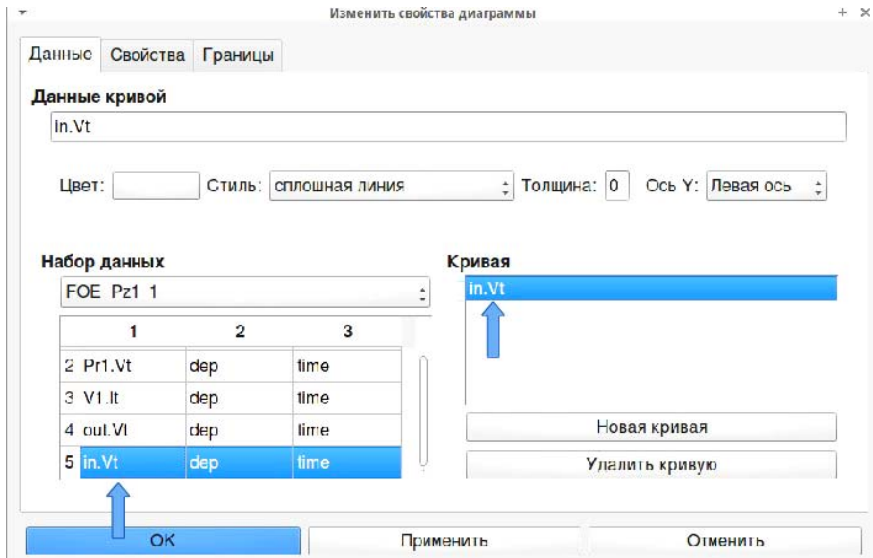


Рис. 1.8. Выбор отображаемых графиков

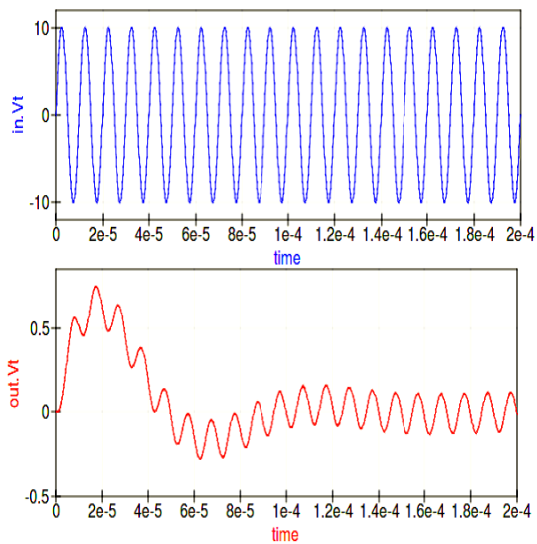


Рис. 1.9. Результат моделирования переходного процесса

## Построение амплитудно-частотных характеристик

Для построения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) схемы следует удалить элемент «Моделирование переходного процесса» и вставить на его место элемент «Моделирование на переменном токе», перейдя с вкладки отображения результатов моделирования на вкладку со схемой (рис. 1.10).

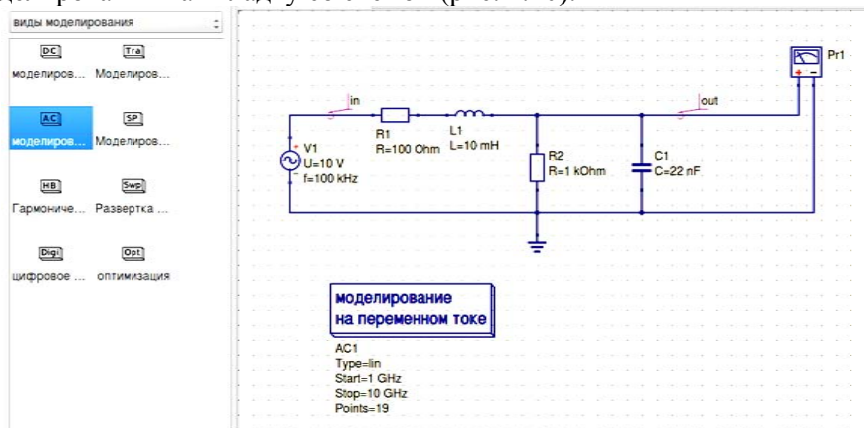


Рис. 1.10. Режим моделирования амплитудно-частотных характеристик

Далее, щелкнув этот элемент двойным щелчком, следует выбрать нужный частотный диапазон – «1Hz – 1MHz». После запуска модели (клавиша F2) и выбора отображаемой кривой, график примет вид, представленный на рис. 1.11. Для определения численных значений по графику можно использовать маркер в верхнем меню. Так, например, можно определить, какой частоте соответствует максимум выходного напряжения, т.е. частоту резонанса схемы.

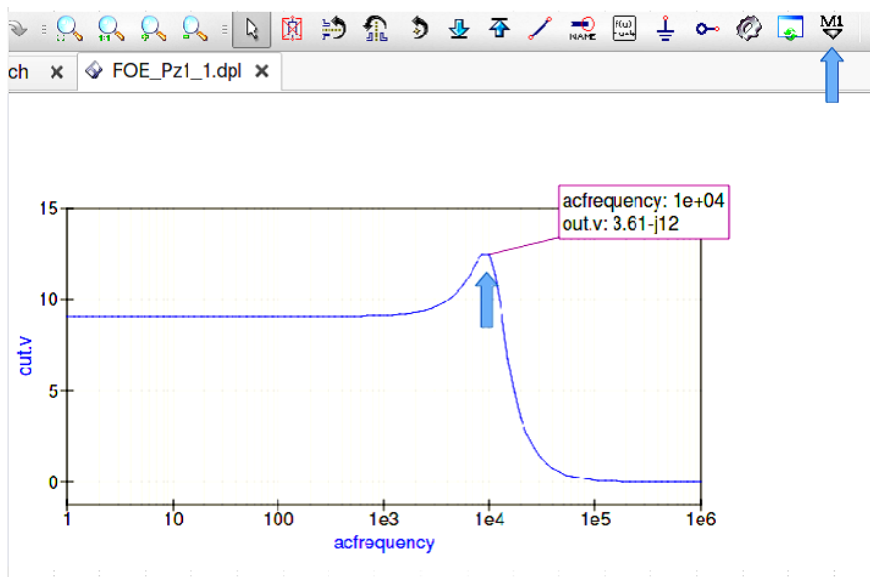


Рис. 1.11. Амплитудно-частотная характеристика

## Исследования влияния параметров схемы на её характеристики

Часто необходимо узнать, как тот или иной параметр электронной схемы влияет на её работу. Например, посмотрим, как изменится вид АЧХ схемы, если изменять сопротивление элемента R1. Для этого заменим значение сопротивления этого элемента с 100 Ohm на переменную R и добавим к модели режим «Развёртка параметра», настроив изменение сопротивления в диапазоне от 100 до 500 Ом с 5 точками в диапазоне. Схема модели примет вид, показанный на рис. 1.12, а графики, после запуска моделирования – на рис. 1.13. Глядя на графики, можно сразу понять, как именно меняется АЧХ схемы при изменении данного параметра. При необходимости варьируемых параметров может быть и больше одного, если добавить в модель соответствующее число переменных и блоков «Развёртка параметра».

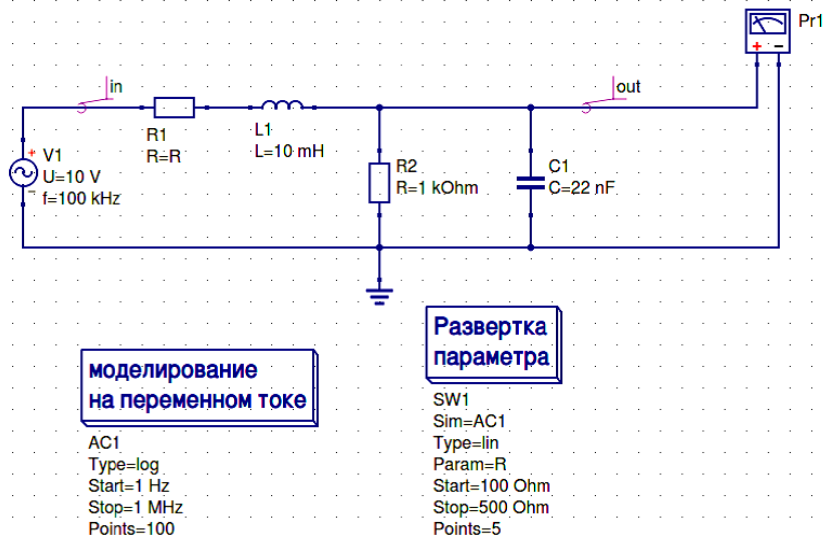


Рис. 1.12. Моделирование работы при вариации параметра

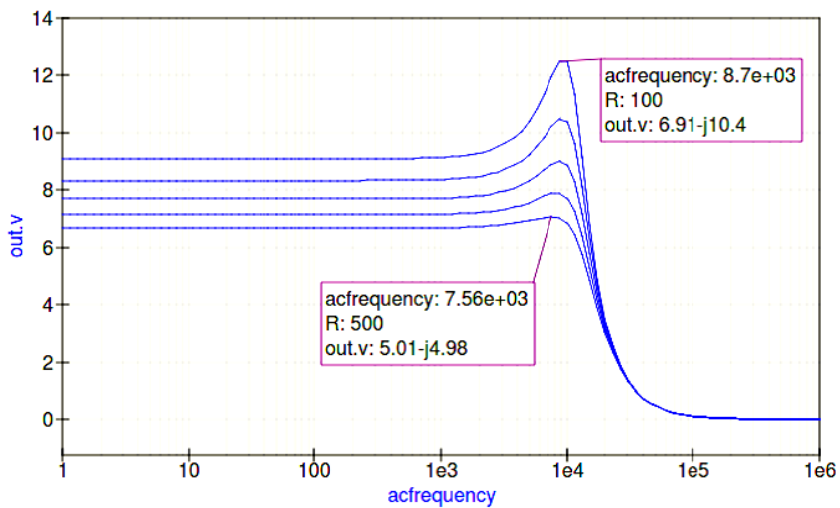


Рис. 1.13 Результат моделирования работы схемы при изменении  $e\delta$  параметра

## 2. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Рассмотрим расчёт и моделирование цепей с нелинейными электронными компонентами на примере известной схемы параметрического стабилизатора напряжения, схема которого представлена на рис. 2.1. Стабилизация напряжения в схеме достигается за счёт того, что при электрическом пробое стабилитрона  $VD$  ток через него резко увеличивается при практически неизменном напряжении. В результате чего при пробое избыток входного напряжения  $U_1$  будет теряться на балластном сопротивлении резистора  $R_1$ , а напряжение на нагрузке  $U_1$  останется практически неизменным.

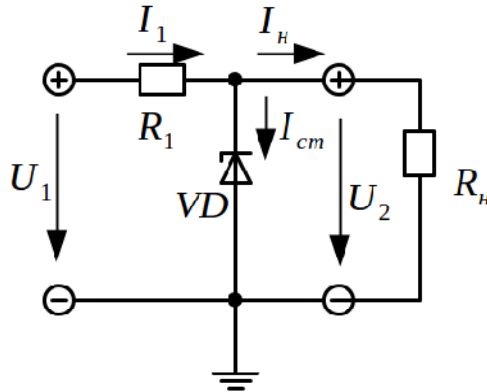


Рис. 2.1. Параметрический стабилизатор напряжения

Расчёт стабилизатора выполняется на основе следующих соотношений. Входное напряжение по второму закону Кирхгофа равно:

$$U_1 = U_{r1} + U_{vd}. \quad (2.1)$$

Согласно первому закону Кирхгофа

$$I_1 = I_{vd} + I_{н}. \quad (2.2)$$

По закону Ома:

$$U_{r1} = R_1(I_{vd} + I_{н}). \quad (2.3)$$

Из формул (1)-(3) нетрудно определить значение сопротивления балластного сопротивления  $R_1$

$$R_1 = \frac{U_1 - U_{vd}}{I_{vd} + I_H}. \quad (2.4)$$

Зная диапазон изменения тока нагрузки и входного напряжения, нетрудно определить соответствующий диапазон значений балластного сопротивления

$$R_1^{min} = \frac{U_1^{max} - U_{vd}^{max}}{I_{vd}^{max} + I_{vd}^{min}}, \quad (2.5)$$

$$R_1^{max} = \frac{U_1^{min} - U_{vd}^{min}}{I_{vd}^{min} + I_{vd}^{max}}. \quad (2.6)$$

Значение сопротивления выбирается из стандартного ряда и находящееся в найденном по формулам (2.5) и (2.6) диапазоне. Максимальный и минимальный ток стабилизатора может быть найден в его паспортных данных, которые при расчёте предполагаются известными.

Мощность, рассеиваемая в балластном сопротивлении, определяется по формуле

$$P_{r1} = (I_{vd}^{max} + I_H^{max})^2 R_1. \quad (2.7)$$

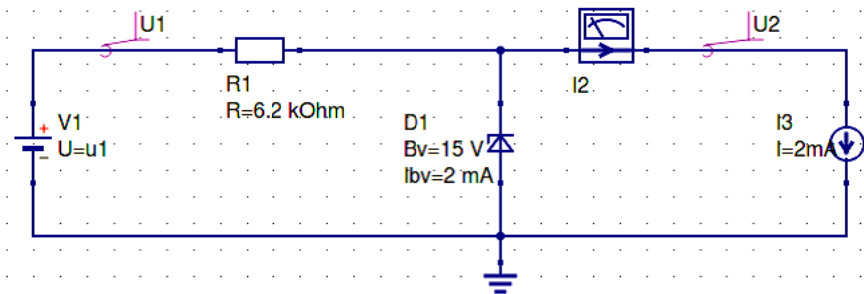
После расчёта стабилизатора по формулам (2.5-2.7) можно выполнить моделирование его работы в программе qucs. В данном случае моделирование производится в режиме «Моделирование на постоянном токе», причём интерес представляют две характеристики:

- характеристика передачи, когда варьируется величина входного напряжения, а ток остаётся неизменным (модель на рис. 2.2);

- нагрузочная характеристика, когда варьируется ток нагрузки при неизменной величине входного напряжения (модель на рис 2.4).

При моделировании использованы блоки развёртки параметров, которые позволяют варьировать параметры не только пассивных, но и активных компонентов схемы. Для отображения результатов, кроме графиков, целесообразно добавить в окно отображения результатов таблицу численных значений.

Результаты моделирования представлены на рис. 2.3 и 2.5, соответственно.



**моделирование  
на постоянном токе**

DC1

**Развертка  
параметра**

SW1  
Sim=DC1  
Type=lin  
Param=u1  
Start=24 V  
Stop=36 V  
Points=20

Рис. 2.2. Модель для построения характеристики передачи

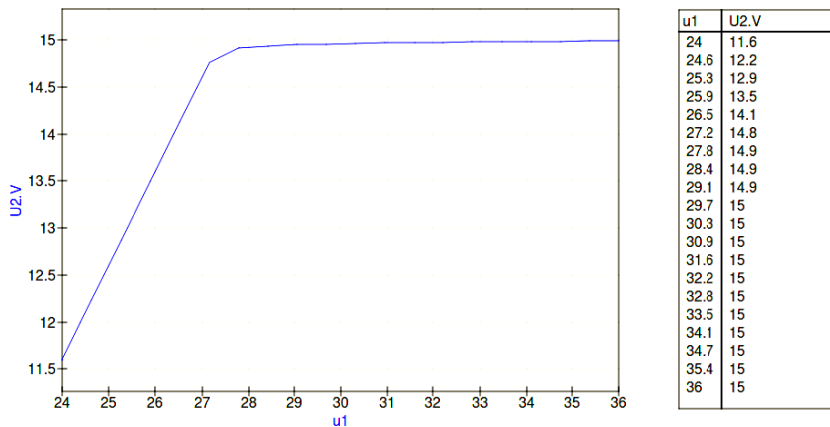
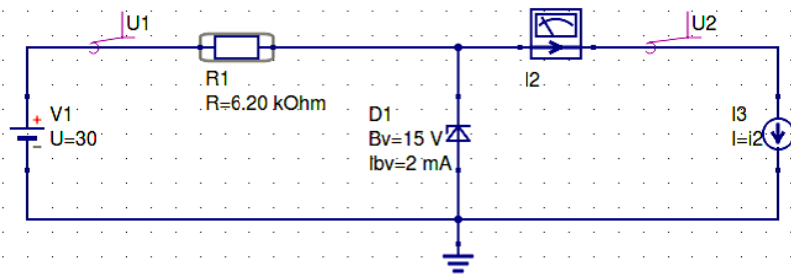


Рис. 2.3. Характеристика передачи стабилизатора



**моделирование  
на постоянном токе**

DC1

**Развертка  
параметра**

SW1  
Sim=DC1  
Type=lin  
Param=i2  
Start=0  
Stop=2 mA  
Points=20

Рис. 2.4. Модель для построения нагрузочной характеристики

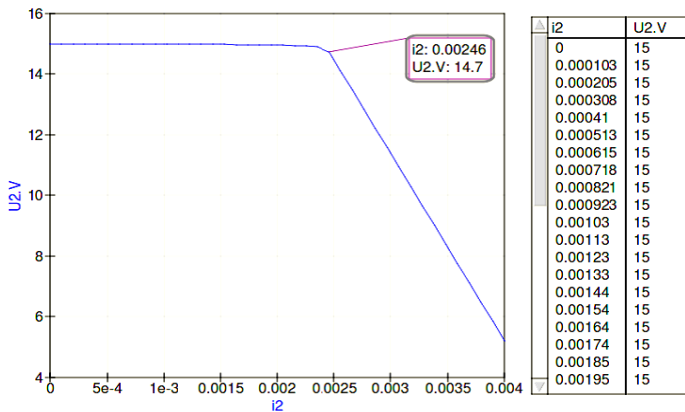


Рис. 2.5. Нагрузочная характеристика стабилизатора



### 3. РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ В РЕЖИМЕ ПОКОЯ

Первым этапом расчёта аналоговой усилительной схемы является расчёт режима покоя транзисторов. Обычно низкочастотные усилители напряжения работают в классе усиления А, что обеспечивает минимальный уровень гармонических усилений выходного сигнала, для чего необходимо выбрать соответствующие величины напряжений смещения. Низкий коэффициент полезного действия таких каскадов не имеет существенного значения, т.к. основную функцию усиления сигнала по мощности выполняют следующие за каскадами усиления напряжения усилители мощности, работающие в классе В или АВ.

Таким образом, цель расчёта на постоянном токе – определение таких параметров резисторов в схеме, при которых обеспечивается ток коллектора транзисторов близкий к номинальному, а потенциалы узлов схемы соответствуют линейному их режиму работы (класс усиления А).

Рассмотрим расчёт и моделирование схемы на примере усилителя, приведенного на рис. 3.1

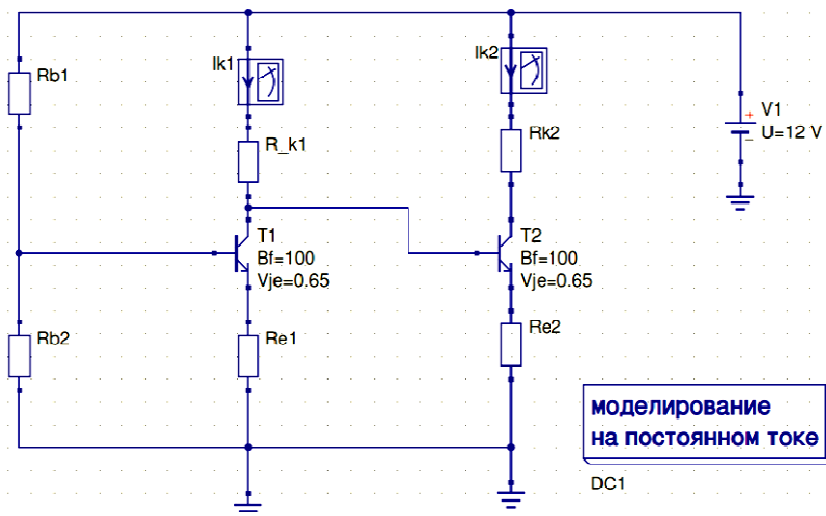


Рис. 3.1. Усилитель напряжения низкой частоты

Схема усилителя содержит два усилительных каскада с непосредственной связью на основе биполярных транзисторов n-p-n-типа, включенных по схеме с общим эмиттером. Коэффициент усиления по току транзисторов принят равным  $\beta = 100$ , а значение контактной разности потенциалов для кремниевых транзисторов принято равным  $\Delta\varphi_k = 0.65$  В. Данные параметры были введены в модель данных приборов. Требуемое значение тока покоя обоих транзисторов принято равным  $I_{k0} = 2$  мА, для контроля этих значений в схеме предусмотрены амперметры. Напряжение питания принято равным  $U_{\pi} = 12$  В.

Расчет будем вести от выхода усилителя к входу. Потенциал на коллекторе Т2 примем равным половине напряжения источника питания

$$U_{к2} = 0,5 \cdot U_{\pi}, \quad (3.1)$$

тогда при известном токе коллектора покоя

$$I_{к2} = I_k \quad (3.2)$$

получаем

$$R_{к2} = \frac{U_{\pi} - U_{к2}}{I_{к2}}. \quad (3.3)$$

Резистор в цепи эмиттера примем равным

$$R_{э2} = 0,25 \cdot R_{к2}. \quad (3.4)$$

Ток базы Т2 равен

$$I_{б2} = \frac{I_{к2}}{\beta}, \quad (3.5)$$

а ток его эмиттера

$$I_e = I_{к2} + I_{бТ2}. \quad (3.6)$$

Потенциал на эмиттере Т2 равен

$$U_{э} = I_{э} R_{э2}, \quad (3.7)$$

а на базе

$$U_{б2} = (\Delta\varphi_k + 0,1) + U_{э2}. \quad (3.7)$$

Потенциал коллектора Т1 равен

$$U_{к1} = U_{б2}, \quad (3.8)$$

поэтому при известном токе коллектора покоя  $I_{к1} = I_k$ , получаем

$$R_{к1} = \frac{U_{\pi} - U_{к1}}{I_{к1}}. \quad (3.9)$$

Резистор в цепи эмиттера примем равным

$$R_{э1} = 0,25 \cdot R_{к1}. \quad (3.10)$$

Ток базы Т1 равен

$$I_{61} = \frac{I_{K1}}{\beta}, \quad (3.11)$$

а ток эмиттера

$$I_{91} = I_{K1} + I_{61}. \quad (3.12)$$

Потенциал на эмиттере Т1 равен

$$U_{91} = I_{91} R_{91}, \quad (3.13)$$

а потенциал базы

$$U_{61} = (\Delta\varphi_K + 0,1) + U_{91}. \quad (3.14)$$

Ток резистора  $R_{62}$  примем равным

$$I_{62} = 5 \cdot I_{61}, \quad (3.15)$$

тогда

$$R_{62} = \frac{U_{61}}{I_{62}}. \quad (3.16)$$

Ток через резистор  $R_{b1}$

$$I_{61} = I_{62} + I_{61}. \quad (3.17)$$

Сопротивление резистора  $R_{b1}$

$$R_{61} = \frac{U_n - U_{61} - U_{91}}{I_1}. \quad (3.18)$$

Для моделирования работы схемы достаточно нажать клавишу F8, при этом результат моделирования будет выведен непосредственно на схеме модели. Из полученных значений видно, что расчёт усилителя по постоянному току выполнен верно, доказательством чего является приблизительное равенство токов покоя транзисторов принятому ранее значению 2 мА.

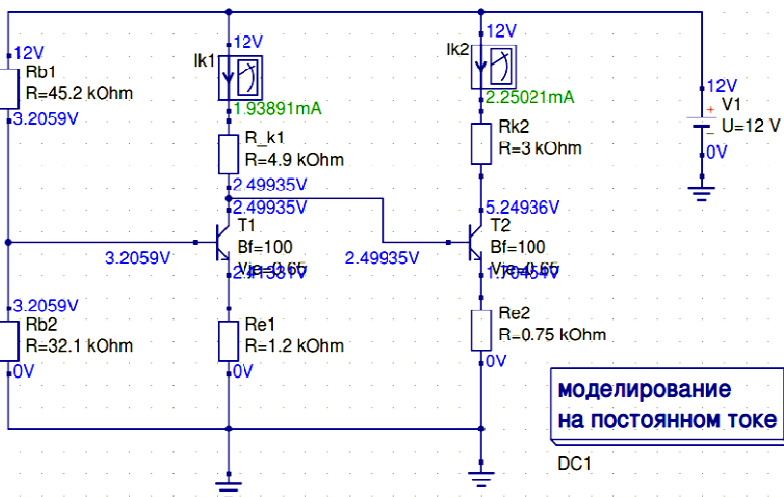


Рис. 3.2. Результат моделирования усилителя напряжения режиме покоя

#### 4. РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Операционный усилитель (ОУ) – это высококачественный усилитель постоянного тока (УПТ), работающий в режиме глубокой отрицательной обратной связи (ООС) и предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами.

Это наиболее распространенная аналоговая интегральная микросхема (ИМС). В ОУ сосредоточены основные достоинства усилительных схем. Идеальный операционный усилитель

имеет коэффициент усиления по напряжению  $K_u \rightarrow \infty$ , большое входное сопротивление  $R_{вх} \rightarrow \infty$ , малое выходное сопротивление  $R_{вых} \rightarrow 0$ , минимальный дрейф нуля, усиливает сигналы в широком спектре частот: от нуля до десятков мегагерц.

ОУ имеет два входа: вход 1 называют инвертирующим, вход 2 – неинвертирующим. Выходное напряжение  $U_{вых}$  связано с входными напряжениями  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  соотношением

$$U_{вых} = K_U (U_{вх2} - U_{вх1}). \quad (4.1)$$

Из (4.1) следует, что ОУ воспринимает только разность входных напряжений, называемую дифференциальным входным сигналом, и нечувствителен к любой составляющей входного напряжения, воздействующей одновременно на оба входа (синфазный входной сигнал).

В качестве источника питания ОУ используют двуполярный источник напряжения ( $+E_{п}$ ,  $-E_{п}$ ). Средний вывод этого источника, как правило, является общей шиной для входных и выходных сигналов. Применение двух источников питания при подключении нагрузки к их общей точке позволяет формировать на выходе двуполярное напряжение. Непосредственно в качестве усилителя ОУ без обратных связей не используется, так как выходное напряжение ограничено напряжением источника питания, а коэффициент усиления очень велик.

Рассмотрим расчёт и моделирование типовых схем включения операционного усилителя. Инвертирующая схема включения ОУ представлена моделью на рис. 4.1. Преимуществом этой схемы является стабильность работы, недостатком – влияние нагрузки схемы на входное сопротивление.

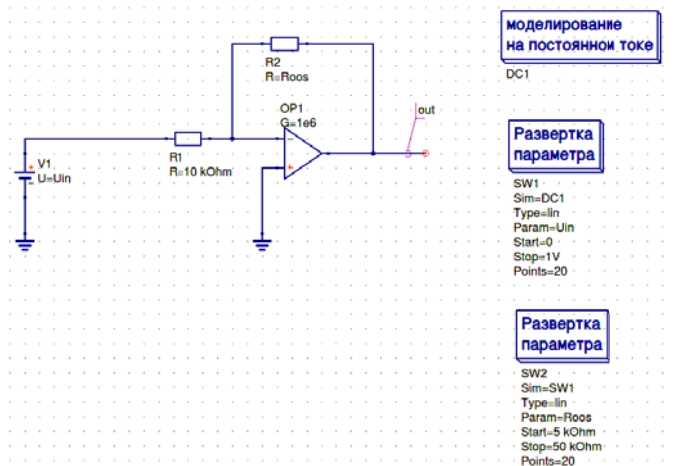


Рис. 4.1. Инвертирующая схема включения операционного усилителя

Коэффициент усиления схемы определяется параметрами внешних элементов

$$K_{oc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (4.2)$$

Для построения характеристики передачи воспользуемся двумя блоками развёртки параметров (см. рис. 4.1): первый из них изменяет входное напряжение от 0 до 1 В, а второй изменяет сопротивление цепи отрицательной обратной связи  $R_2$ . В результате моделирования получаются графики (рис. 4.2).

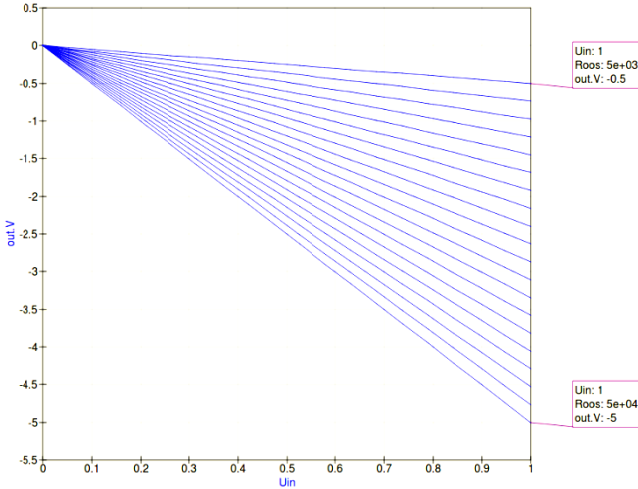


Рис. 4.2. Характеристики передачи инвертирующей схемы включения операционного усилителя

Неинвертирующая схема включения ОУ представлена моделью на рис. 4.3. Коэффициент усиления схемы определим по формуле

$$K_{oc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.3)$$

При выполнении моделирования аналогично инвертирующей схеме получены графики характеристик передачи, приведённые на рис. 4.4.

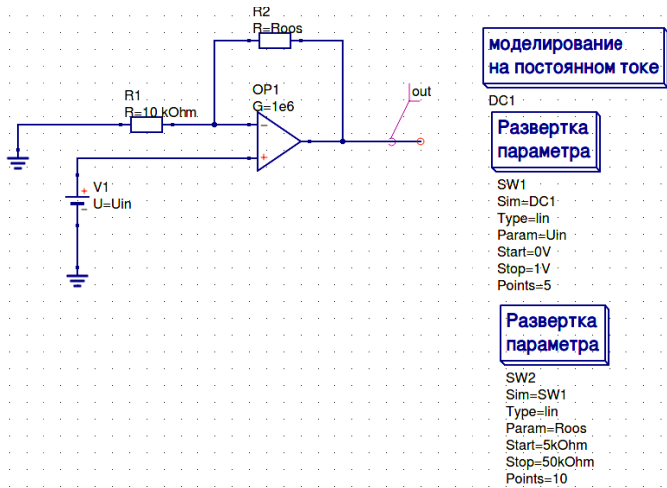


Рис. 4.3. Неинвертирующая схема включения операционного усилителя

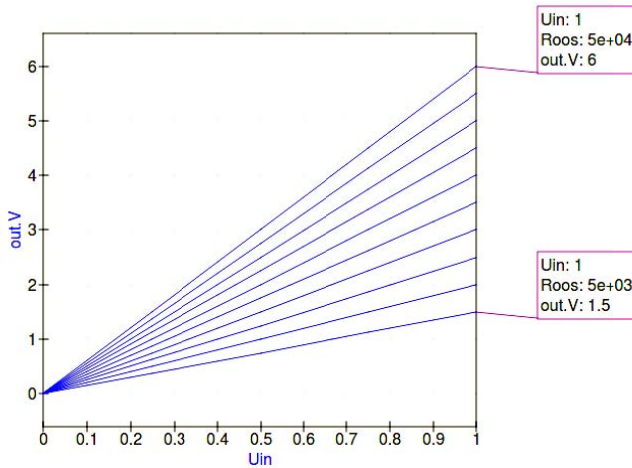


Рис. 4.4. Характеристики передачи неинвертирующей схемы включения операционного усилителя

Кроме усилительных схем, на практике находят применения схемы динамических звеньев, к которым относятся, например интегрирующая (рис. 4.5) и дифференцирующая (рис. 4.6) схемы

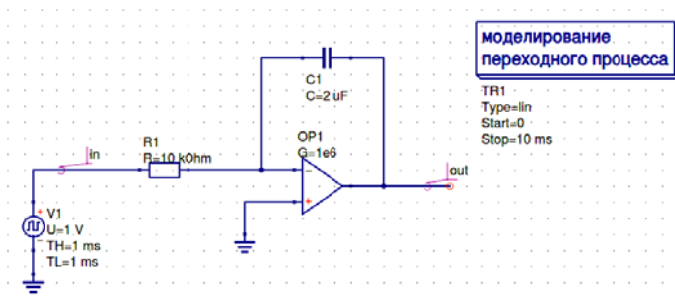
включения операционного напряжения. Их выходные напряжения определяются, соответственно, по формулам

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{ВХ}}(t) dt \quad (4.4)$$

и

$$U_{\text{ВЫХ}} = -RC \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}. \quad (4.5)$$

а)



б)

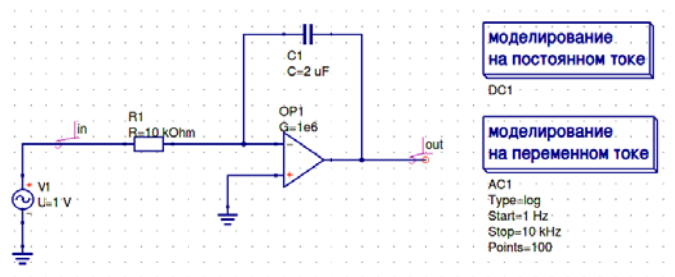
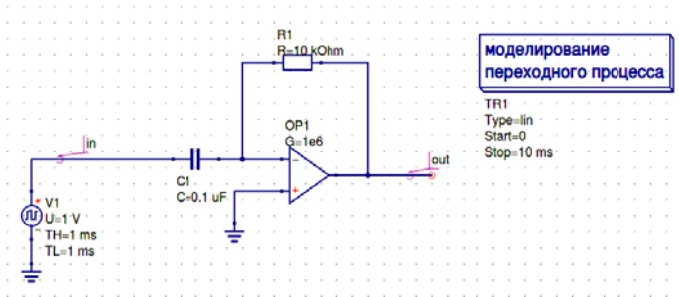


Рис. 4.5 Модели интегрирующего усилителя: а) для построения характеристик передачи, б) для построения амплитудно-частотной характеристики



а)



б)

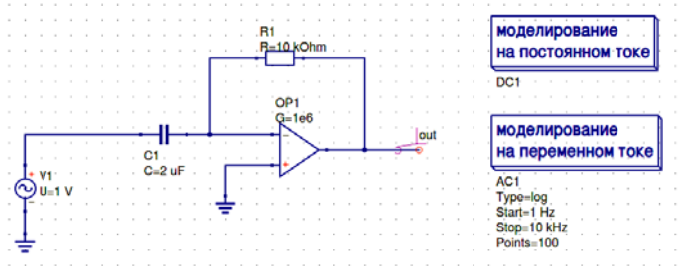


Рис. 4.6 Модели дифференцирующего усилителя: а) для построения характеристик передачи, б) для построения амплитудно-частотной характеристики

В качестве первого этапа исследования модели выполним построение реакции схемы на последовательность прямоугольных импульсов длительностью 1 мс с коэффициентом заполнения 0,5 (рис. 4.5 а и 4.6 а). Графики переходных процессов приведены, соответственно, на рис. 4.7 а) и б) соответственно, для интегрирующей и дифференцирующей схемы.

Так как интеграл от постоянного напряжения будет линейной функцией, то график реакции интегрирующего усилителя представляет собой последовательность линейно нарастающих и убывающих участков (рис. 4.7а).

Производная от постоянного напряжения равна нулю, поэтому напряжение на выходе дифференцирующей схемы (рис. 4.7б) будет иметь вид положительных и отрицательных всплесков большой амплитуды в моменты смена знака входным сигналом, т.к.

только в точках разрыва сигнала производная не равна нулю и, в теории, стремится к бесконечности.

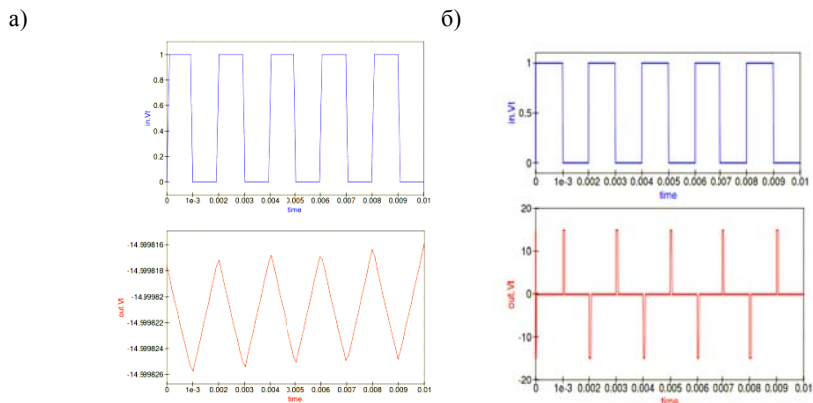


Рис. 4.7. Реакция интегрирующей (а) и дифференцирующей (б) схем включения ОУ на входной сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов

В качестве второго этапа исследования моделей рассмотрим построение их амплитудно-частотных характеристик (рис. 4.5 б, 4.6 б) при изменении частоты входного синусоидального сигнала постоянной амплитуды в диапазоне 1Гц - 10 кГц. Результаты моделирования приведены на рис. 4.8 а, б.

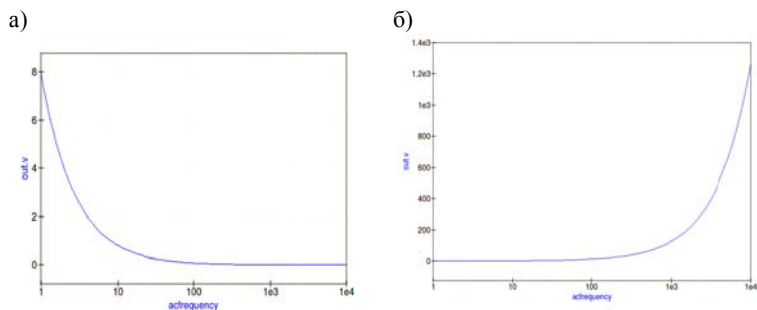


Рис. 4.8. Амплитудно-частотные характеристики интегрирующей (а) и дифференцирующей (б) схем включения ОУ

Амплитудно-частотная характеристика интегрирующей схемы (рис. 4.8 а) убывает с ростом частоты, т.е. схема пропускает только низкие частоты, для дифференцирующей схемы (рис. 4.8 б) характеристика меняется противоположенным образом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В методических указаниях приведены методы расчёта и моделирования на ЭВМ различных аналоговых устройств, с использованием свободно-распространяемой программы qucs. Данные методические указания могут быть использованы студентами при выполнении расчётно-графических работ, а также при выполнении самостоятельных расчётов электронных схем в ходе курсового и дипломного проектирования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гершунский Б.С.* Основы электроники. – М: Медиа, 2012, 422 с.
2. *Гололобов В.Н.* Компьютер в лаборатории радиолюбителя. – М: Наука и техника, 2018, 384 с.
3. *Ланчин В.И., Савельев Н.Р.* Электроника. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2008, 704 с.
4. *Умрихин В.В.* Физические основы электроники: Учебное пособие. – М: Альфа-М, 2012, 304.
5. *Щука А.А.* Электроника. – СПб: БХВ-Петербург, 2012, 800 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	2
1. Моделирование работы простых электрических цепей. Построение статических и динамических характеристик .....	4
2. Расчет и моделирование цепей с нелинейными электронными компонентами .....	13
3. Расчёт и моделирование усилительных каскадов в режиме покоя.	17
4. Расчёт и моделирование схем на основе операционных усилителей.....	20
Заключение .....	27
Библиографический список.....	27

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ**  
**РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ**  
**АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 13.03.02  
и специальности 21.05.04*

Сост.: *А.А. Коржев, А.М. Камышьян*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *А.А. Коржев*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 18.03.2019. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,6. Усл.кр.-отт. 1,6. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 75 экз. Заказ 217. С 80.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2