

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ**  
**Кафедра информатики**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**  
**«СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ»**

**по спецкурсу**  
**«Автоматизация проектирования в**  
**электронике»**

**МИНСК**

**2000**

УДК 621.396.6(076.5)  
ББК 32.884в6я73  
М54

Автор – составитель  
кандидат технических наук **И. М. Шевкун.**

Рецензент  
кандидат технических наук, доцент *В. С. Садов.*

Утверждено на заседании кафедры информатики  
27 октября 2000 г., протокол № 3

**Методические** указания к лабораторной работе «Схемотехническое моделирование» / Авт.-сост. И. М. Шевкун. – Мн.: БГУ 2000. – 26 с.

В пособии рассматриваются методы подготовки и схемотехнического моделирования электрических схем.

Предназначено для студентов 4-5 курсов факультета радиофизики и электроники БГУ.

**УДК 621.396.6(076.5)**  
**ББК 32.884в6я73**

© БГУ, 2000

## **ВВЕДЕНИЕ**

Схемотехническое моделирование – важный этап проектирования многих изделий электронной техники (ИЭТ): цифровых и аналоговых интегральных схем (ИС), электронных схем разной степени сложности, реализованных на дискретных элементах, блоков радиоаппаратуры и электронных изделий в целом. Программы схемотехнического моделирования, развитие которых началось в 60-х годах, достигли, в настоящее время, высокого уровня совершенства. При этом они, как правило, входят в состав высоко интегрированных систем автоматизированного проектирования (САПР).

На схемотехническом уровне, как и на этапе логического моделирования, основными задачами являются проблемы анализа [1]. Задачи параметрической оптимизации требуют больших вычислительных затрат и применяются только к схемам небольшого размера. Принято выделять следующие основные задачи схемотехнического моделирования [2]: расчет статического режима, переходных процессов и частотных характеристик. Современные программы схемотехнического моделирования, например, программа PSpice, рассматриваемая здесь, позволяют решать и другие задачи: расчет малосигнальных передаточных функций и чувствительностей в режиме по постоянному току, спектральный анализ, расчет уровня внутреннего шума, некоторые виды многовариантного и статистического анализа.

Целью работы является ознакомление с САПР DesignLab, имеющей в своем составе программу PSpice, изучение способов графической подготовки схем и выполнение основных видов их анализа, решение ряда типовых задач схемотехнического проектирования.

## **1. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

### **1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Схемотехническое (электрическое) моделирование представляет собой моделирование электрических процессов в электронных устройствах, обычно изображаемых в виде принципиальных электрических схем, т.е. соединений условных обозначений элементов схемы (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и т.д.). Схемотехническое моделирование учитывает реальные физические ограничения в электрических процессах – законы сохранения. Этим оно отличается от логического моделирования, при котором рассматриваются только информационные потоки в схеме. Упомянутые ограничения описываются

первым и вторым законами Кирхгофа, которые вытекают из законов сохранения заряда и энергии и называются обычно законами электрического равновесия [1]. Необходимость выполнения этих законов в каждой расчетной точке требует решения соответствующих уравнений электрического равновесия.

В связи с этим в математическую модель электронного устройства входят не только модели отдельных элементов и уравнения их связи, как и в логическом моделировании, но и уравнения электрического равновесия, составляемые на основе законов Кирхгофа и называемые обычно топологическими уравнениями [2]. Уравнения отдельных элементов схемы называются компонентными. Таким образом, математическая модель в общем случае состоит из двух подсистем уравнений – компонентной и топологической.

Более высокая степень строгости описания электронных схем при схемотехническом моделировании позволяет получить более точные сведения о процессах в схеме по сравнению с логическим моделированием. Платой за это служит увеличение времени моделирования из-за необходимости решения уравнений равновесия.

Цель схемотехнического моделирования состоит обычно в определении формы и параметров величин тока и напряжения, возникающих в разных точках схемы. Для этого приходится решать основные задачи схемотехнического моделирования – расчет статического режима, переходных процессов и частотных характеристик. На основе решения этих задач можно далее вычислить параметры сигналов (фронт, длительность, задержку и др.), рассчитать спектр выходного сигнала, чувствительность схемы к изменению параметров ее элементов, решить задачи статистического анализа схемы и оптимизации ее параметров.

## 1.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ

Во многих современных программах схемотехнического моделирования используется базис узловых потенциалов  $\varphi$ . Исходная модель схемы имеет при этом вид

$$\vec{I}(\vec{\varphi}) = 0, \quad (1)$$

где  $\vec{I}$  - вектор узловых токов, включающий токи во всех ветвях схемы,  $\vec{\varphi}$  - вектор узловых потенциалов, включающий потенциалы во всех узлах за исключением одного, опорного, потенциал в котором полагается равным нулю. Выражение (1) является топологической системой

уравнений схемы. Для получения окончательной системы уравнений, которую следует решать, нужно дополнить систему (1) компонентными уравнениями для всех элементов, присутствующих в схеме. В общем случае такое уравнение имеет вид

$$I_{ij} = f(\varphi_i - \varphi_j), \quad (2)$$

где  $I_{ij}$  - ток между  $i$ -м и  $j$ -м узлами,  $\varphi_i$  и  $\varphi_j$  - потенциалы соответствующих узлов. После подстановки соотношений (2) в систему (1) получаем окончательную математическую модель схемы (ММС), представляющую собой систему нелинейных алгебраических уравнений. Известны несколько методов решения такой задачи, однако на практике используется вариант метода Ньютона

$$Y(\vec{\varphi}^{(k)}) \Delta \vec{\varphi}^{(k)} = -\vec{I}(\vec{\varphi}^{(k)}), \quad (3)$$

где  $Y$  - матрица узловых проводимостей,  $\Delta \vec{\varphi}^{(k)} = \vec{\varphi}^{(k+1)} - \vec{\varphi}^{(k)}$  - вектор поправок,  $k$  - индекс ньютоновских итераций. Таким образом, на каждой итерации необходимо решать систему линейных алгебраических уравнений (3), особенностью которой является большая размерность (моделируемые схемы могут содержать десятки тысяч узлов) и сильная разреженность матрицы системы. Такие системы обычно решают методом LU разложения, который позволяет учесть разреженность матрицы. Кроме того, при решении задачи (3) применяют специальные приемы, улучшающие сходимость метода Ньютона [2].

### 1.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В этом случае топологической системой уравнений также является выражение (1). Однако компонентные уравнения имеют вид, отличный от (2). Так, например, ток, текущий через конденсатор, равен

$$I_{ij}^{(c)} = C \frac{d(\varphi_i - \varphi_j)}{dt} \quad (4)$$

что, после подстановки в (1) приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Решением последней являются потенциалы в узлах схемы как функции времени  $t$ .

В программах анализа электронных схем наибольшее распространение получили неявные методы дискретизации систем дифференциальных уравнений. Типичный алгоритм неявного интегрирования включает в себя следующие процедуры, повторяющиеся на каждом шаге по времени:

- определение величины шага интегрирования по времени  $h_m$ ;
- вычисление начального приближения  $\vec{\Phi}_{m0}$  к искомому вектору  $\vec{\Phi}_m$ ;
- вычисление  $\vec{\Phi}_m$  путем решения системы разностных уравнений.

Используются разные методы для оценки  $h_m$  [1], однако подход, примененный в программе PSpice, является достаточно удачным. При выполнении первого шага интегрирования величина шага выбирается в соответствии с начальными установками программы. После проведения расчетов выполняется оценка того, как сильно изменилось состояние схемы. Если изменения велики, например, максимальное изменение потенциала превышает заданное значение, расчет первого шага повторяется, но величина шага берется в два раза меньшей. При этом вновь выполняется проверка изменений. Когда таким, экспериментальным, путем найдена требуемая величина шага, расчет последнего прекращается и переходят к выполнению очередного шага по времени. Его величина считается равной величине предыдущего шага. Если же изменения в схеме очень малы, т.е. схема ведет себя очень медленно, повторный расчет не выполняется, но величина следующего шага по времени берется в два раза большей. Таким образом, программа отслеживает поведение схемы, выбирая величину шага по времени.

Такой подход позволяет легко решать и вторую задачу, задачу выбора начального приближения. В этом случае в качестве начального распределения потенциала берется решение, полученное на предыдущем шаге по времени. Малость шага обеспечивает хорошую точность такого выбора.

Использование неявных разностных схем при аппроксимации компонентных уравнений приводит к системам нелинейных алгебраических уравнений, которые решаются методом Ньютона.

#### 1.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Передаточная характеристика анализируемой схемы определяется как отношение

$$F(j\omega) = u_{\text{вых}}(j\omega) / u_{\text{вх}}(j\omega), \quad (5)$$

где  $(j\omega)$  - комплексная частота. Метод узловых потенциалов позволяет легко формировать узловые уравнения и для частотной области. В этом случае сохраняется общий подход к формированию узловых уравнений. Изменяются только компонентные уравнения реактивных ветвей, принимающие следующий вид:

$$I_{ij}^{(C)} = j\omega C(\varphi_i - \varphi_j) \qquad I_{ij}^{(L)} = -\frac{j}{\omega L}(\varphi_i - \varphi_j) \qquad (6)$$

При этом в схеме замещения постоянные источники напряжения закорачиваются, а постоянные источники тока размыкаются. Все нелинейные ветви линеаризуются в рабочей точке. В результате имеем систему линейных уравнений схемы в частотной области, которая решается одним из известных методов.

## 1.5. ОСОБЕННОСТИ КОМПОНЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ

Компонентное уравнение является фактически математической записью вольт-амперной характеристики (ВАХ) элемента схемы, соединяющего два узла схемы и чем точнее будет такая запись, тем точнее будут результаты моделирования схемы. Кроме того, компонентные уравнения должны обеспечивать непрерывную зависимость тока от напряжения, а также непрерывность первой и второй производных, что необходимо в связи с использованием метода Ньютона. И, наконец, громоздкость компонентных уравнений может привести к значительным затратам процессорного времени. Этим объясняется тот факт, что для наиболее сложных элементов схемы, полупроводниковых приборов, используется, как правило, несколько вариантов моделей компонента. Пользователь, в каждом конкретном случае, может выбрать тот или иной вариант модели, обеспечивающий как приемлемую точность, так и достаточное быстродействие счета.

Важной особенностью большинства полупроводниковых приборов, транзисторов, например, является наличие у них более чем двух выводов. Три вывода имеют большинство биполярных и полевых транзисторов в дискретном исполнении. Многие полевые транзисторы имеют четыре вывода. В интегральной схемотехнике используются транзисторы, число выводов которых достигает десяти. А метод узловых потенциалов требует, чтобы все элементы схемы были двухвыводными, иначе нельзя записать уравнение баланса токов (1). Эта проблема решается с помощью эквивалентных схем, содержащих только двухвыводные элементы. Такие схемы замещают транзистор при схемотехническом моделировании. Поэтому в отношении многовыводных элементов принято говорить модель компонента, а не компонентное уравнение.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Программа SPICE (Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis) – одна из наиболее известных и распространенных программ схемотехнического моделирования. Она была разработана в начале 70-х годов в Калифорнийском университете и оказалась очень удачной. С тех пор она интенсивно развивалась и де-факто стала неофициальным промышленным стандартом программ такого рода. Используемые в ней математические модели полупроводниковых приборов включены во многие аналогичные программы (например, Micro-Cap V, ДИСП-ПК и др.), а формат входного языка SPICE поддерживается большинством пакетов САПР (OrCAD 7, P-CAD 8.5, ACCEL EDA 12 и др.) [3]. Первая версия этой программы для IBM PC, PSpice, создана фирмой MicroSim в 1984 году. Эта и последующие версии используют те же алгоритмы, что и SPICE, тот же формат представления входных и выходных данных.

Первая САПР, построенная на основе PSpice, была создана в 1990 г. и называлась Design Center 5.0. Она имела графический интерфейс пользователя и работала под управлением ОС Windows 3x. Седьмая версия, работающая под ОС Windows 95/NT, получила название DesignLab и версия 7.1 этой САПР используется в настоящем спецкурсе. Система имеет традиционную для таких программ организацию. Графический редактор Schematics, позволяющий готовить библиотеки графических примитивов (условных обозначений элементов схемы) и моделируемые схемы, является оболочкой (управляющей программой) системы, используемой для запуска остальных программ. Из нее вызывается программа PSpice, редактор входных воздействий StmED, графический постпроцессор Probe, выполняется переход в подсистему проектирования печатных плат, основой которой является графический редактор PCBoards и программа автоматической трассировки SPECSTRA.

В САПР DesignLab сохранена общая структура входного языка для описания задания на моделирование. Это задание может быть подготовлено без использования графических средств Schematics. Для этого на бумаге рисуется схема, присваиваются имена всем узлам схемы и ее элементам. С помощью текстового редактора готовится текстовый файл, имеющий расширение .cir и содержащий описание моделируемой схемы и директивы моделирования. Директивой является любая

строка, начинающаяся с символа точка в первой позиции. Основные директивы следующие [3]:

- .AC – расчет частотных характеристик;
- .DC – расчет режима по постоянному току;
- .END – конец задания;
- .ENDS – конец описания подсхемы (макромодели);
- .GLOBAL – определение глобальных узлов схемы;
- .IC – задание начальных условий;
- .MC – статистический анализ по методу Монте-Карло;
- .MODEL – описание моделей элементов схемы;
- .NOISE – расчет уровня внутреннего шума;
- .OPTIONS – задание параметров и режимов работы программы;
- .PARAM – определение глобальных параметров;
- .PROBE – передача данных в графический постпроцессор Probe;
- .SENS – расчет малосигнальных чувствительностей в режиме по постоянному току;
- .STEP – вариация параметров;
- .SUBCKT – начало описания подсхемы (макромодели);
- .TEMP – задание температуры схемы;
- .TF – расчет малосигнальных передаточных функций в режиме по постоянному току;
- .TRAN – расчет переходных процессов;
- .WCASE – расчет наихудшего случая.

Таким образом, используя директивы, можно выполнить детальный анализ схемы.

## 2.1. ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМЫ И ИХ МОДЕЛИ

Описание анализируемой схемы состоит из набора строк описаний элементов схемы. Строка описания элемента имеет следующую структуру:

<имя элемента> <имена узлов подключения элемента>[<имя модели>]  
+[<числовые данные>]

Здесь и далее в квадратных скобках указаны необязательные параметры, знак + в первой позиции – признак строки продолжения. Первый символ имени элемента определяет его тип:

- B – арсенид-галлиевый полевой транзистор с каналом n-типа;
- C – конденсатор;
- D – диод;

E – источник напряжения, управляемый напряжением;  
 F – источник тока, управляемый током;  
 G – источник тока, управляемый напряжением;  
 H – источник напряжения, управляемый током;  
 I – независимый источник тока;  
 J – полевой транзистор с управляющим p-n переходом;  
 K – взаимная индуктивность или трансформатор;  
 L – индуктивность;  
 M – МОП-транзистор;  
 N – аналого-цифровой преобразователь на входе цифрового устройства;  
 O – цифро-аналоговый преобразователь на выходе цифрового устройства;  
 Q – биполярный транзистор;  
 R – резистор;  
 S – ключ, управляемый напряжением;  
 T – линия задержки;  
 V – независимый источник напряжения;  
 W – ключ, управляемый током;  
 U – цифровое устройство;  
 X – подсхема (макромодель).

Остальные символы имени (не более 131) – цифры или буквы латинского алфавита. Имена узлов подключения перечисляются в определенном порядке, установленном для каждого элемента. Числовые данные определяют численные значения параметров элемента. При этом используются суффиксы, определяющие масштабирующие коэффициенты: F – фемто ( $10^{-15}$ ), P – пико ( $10^{-12}$ ), N – нано ( $10^{-9}$ ), U – микро ( $10^{-6}$ ), M – милли ( $10^{-3}$ ), K – кило ( $10^3$ ), MEG – мега ( $10^6$ ), G – гига ( $10^9$ ), T – тера ( $10^{12}$ ).

Рассмотрим более детально описания некоторых элементов.

1. Резистор описывается предложением

Rxxx <узел1> <узел2> <сопротивление (ом)>

2. Конденсатор описывается предложением

Sxxx <узел1> <узел2> <емкость (фарада)> [<IC=начальная энергия>]

Параметр IC здесь и при описании индуктивности определяет начальную энергию, запасенную в элементе.

3. Индуктивность описывается предложением

Lxxx <узел1> <узел2> <индуктивность (генри)> [<IC=начальная энергия>]

4. Независимый источник напряжения описывается предложением

Uxxx <+узел> <-узел> <напряжение (вольт)>

При включении в схему любых источников напряжения и тока обязательно указывается их полярность.

5. Независимый источник тока описывается предложением

Ixxx <+узел> <-узел> <ток (ампер)>

6. Диод описывается предложением

Dxxx <узел анода> <узел катода> <имя модели>

Диод, как и остальные полупроводниковые приборы, описывается его математической моделью, встроенной в программу. Эта модель имеет 29 параметров [3], определяемых по специальной, достаточно сложной методике. Поэтому имя модели является обязательным параметром.

7. Биполярный транзистор описывается предложением

Qxxx <узел коллектора> <узел базы> <узел эмиттера> <имя модели>

В PSpice используются две модели биполярного транзистора – модель Гуммеля-Пуна и модель Эберса-Молла. Первая модель является более точной, но более сложной, что сказывается на времени моделирования. Общее число параметров того варианта модели Гуммеля-Пуна, который используется в программе, 59. Модель автоматически упрощается до модели Эберса-Молла, если опустить некоторые параметры.

8. МОП–транзистор описывается предложением

Mxxx <узел стока> <узел затвора> <узел истока> <узел подложки> <имя модели> [<геометрические параметры транзистора>]

В PSpice полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы) описываются шестью разными наборами формул (шестью моделями), выбор которых определяется параметром LEVEL, принимающим значения от 1 до 6. Модель первого уровня (LEVEL=1) используются в тех случаях, когда требования к точности расчетов невысоки. Модели второго (LEVEL=2) и третьего (LEVEL=3) уровней учитывают многие тонкие эффекты, например, эффекты короткого и узкого каналов. Модель третьего уровня имеет некоторые преимущества по сравнению с моделью (LEVEL=2). Она включает более простые формулы и ее параметры легче определять. Параметры моделей с 4-го по 6-й уровень рассчитываются по справочным данным с помощью специальной программы идентификации.

Наличие геометрических размеров областей транзистора является еще одной особенностью всех моделей МОП-транзистора. Это облегчает

расчет параметров модели транзистора и упрощает подготовку и моделирование схемы, реализованной в виде монолитной ИС. Геометрические параметры дискретных МОП-транзисторов содержатся в описании модели.

## 2.2. ГРАФИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СХЕМЫ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Подготовка схемы состоит в размещении на поле рисунка условно-графических изображений всех компонентов схемы и нанесении проводов, соединяющих выводы компонентов. После загрузки графредактора Schematics он находится в режиме подготовки схемы. По команде **Draw/Get New Part** выбираем компонент и наносим его на рисунок. Внешний контур компонента указывает его геометрические размеры, что облегчает правильное взаимное расположение компонентов. По команде **Draw/Wire** рисуем провода. Для этого подводим курсор к выводу компонента или к уже имеющемуся проводу, нажатием левой клавиши мыши отмечаем начало проводника и далее проводим его до другого вывода компонента или другого проводника. Все изломы выполняются одинарным нажатием левой клавиши мыши. Прокладка данного проводника завершается либо на свободном выводе компонента, либо на другом проводе. Нельзя вести проводник через выводы компонентов или незавершенные провода, т.к. это приводит к соединению их друг с другом. Двойным нажатием левой клавиши или одинарным нажатием правой клавиши завершаем ввод всех проводов. Электрическое соединение пересекающихся проводников отмечается точкой.

Схемное обозначение компонента и его номинал редактируются двойным нажатием левой клавиши на соответствующем тексте. Появляется текстовое окно, в котором указывается новое обозначение или номинал. Следует отметить, что при нанесении компонента на схему его обозначение проставляется автоматически в соответствии с принятыми в системе правилами. Поэтому не следует изменять обозначения элементов без особой необходимости. Однако его можно переместить в другое место чертежа, предварительно выделив соответствующий текст.

На схеме обязательно должен быть узел “земля”, потенциал которого считается равным нулю. Для этого на рисунок схемы наносится элемент **GND\_ANALOG**.

Для облегчения дальнейшего анализа результатов моделирования

удобно нанести на схему маркеры, которые отмечают те величины, графики которых будут строиться программой **Probe**. Так, например, по команде **Mark Voltage/Level** помечается узел, потенциал которого следует отобразить в графическом виде. Если нужно отметить разность потенциалов двух узлов, используется команда **Mark Voltage Differential**. Ток, текущий через вывод компонента, помечается командой **Mark Current into Pin**.

Директивы моделирования задаются по команде **Analysis/Setup**. В раскрывшемся меню выбирают нужный вид анализа, помечая его в графе **Enabled**, и щелчком мыши по кнопке с именем вида анализа раскрывают меню задания параметров моделирования. Расчет режима по постоянному току (**DC Sweep**) проводится при вариации одного или нескольких источников постоянного напряжения или тока. Нужно указать обозначение источника, характер изменения переменной (**Lin** – линейный масштаб, **Oct** – логарифмический октавный, **Dec** – логарифмический декадный), диапазон изменения переменной и шаг.

Расчет переходных процессов выполняется по директиве **Transient**. Ее параметрами являются **Print Step** (шаг вывода данных), **Final Time** (конечное время), **No-Print Delay** (начальный момент времени вывода данных), **Step Ceiling** (максимальный шаг). Переходные процессы всегда рассчитываются с момента времени  $t=0$  до момента “конечное время”. Перед началом расчета переходных процессов рассчитывается режим по постоянному току. Шаг интегрирования выбирается автоматически. Результаты вычислений выводятся в виде таблиц или графиков с интервалом времени, задаваемым параметром “шаг вывода данных”. Если задан параметр “начальный момент времени вывода данных”, то вывод начинается с этого момента. Максимальное значение шага интегрирования устанавливается параметром “максимальный шаг”. Если он не указан, то максимальный шаг берется равным “конечное время”/50.

Расчет амплитудно-частотных характеристик выполняется по директиве **AC Sweep**. Эта директива задает диапазон частот в пределах “начальная частота” (**Start Freq.**), “конечная частота” (**End Freq.**), “количество точек” (**Total Pts.**). Параметр **Lin** устанавливает линейный шаг по частоте, параметры **Oct** и **Dec** определяют логарифмический характер изменения частоты октавами и декадами соответственно. Расчет характеристик в частотной области выполняется после определения режима по постоянному току и линеаризации нелинейных компонентов

(это делается автоматически, никаких дополнительных директив не требуется).

Моделирование выполняется по команде **Analysis/Simulate**. При этом появляется информационное окно, в которое выводится текущее состояние процесса моделирования.

### 2.3. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования, полученные программой PSpice, записываются в файлы данных (имеют расширение .txt и .dat). Файлы первого типа содержат информацию в текстовом виде. Файлы второго типа используются для передачи информации в программу графической обработки результатов **Probe**. Эта программа не только строит графики полученных результатов, но и может выполнять их обработку, включая сложные арифметические и алгебраические вычисления, взятие интегралов, преобразование Фурье, измерение параметров импульсов, частотных характеристик и т.п.

Программа загружается автоматически после завершения моделирования. В окне программы отображаются графики тех величин, которые были отмечены маркерами. Лишние графики можно убрать, пометив имя соответствующей переменной, отображенной под осью X, и нажав клавишу Delete. Добавить график можно выполнив команду **Trace/Add** и выбрав переменную из списка переменных (левое окно). В правом окне приведен список функций, доступных при обработке результатов расчетов. По команде **Plot/X Axis settings** можно изменить параметры оси X. Параметры оси Y изменяются по команде **Plot/Y Axis settings**. Координаты точек на графиках считываются с помощью двух курсоров, выводимых по команде **Tools/Cursor/Display**. В дополнительном окне отображаются текущие координаты обоих курсоров и расстояние между ними по двум осям координат.

### 3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

В предлагаемых заданиях следует использовать следующие элементы схемы:

Q2N2222 – биполярный транзистор структуры n-p-n;

Q2N2907A – биполярный транзистор структуры p-n-p;

IRF150 – n-канальный МОП транзистор;

IRF9140 – p-канальный МОП транзистор;

Q2N2907A – биполярный транзистор структуры p-n-p;

IRF150 – n-канальный МОП транзистор;

IRF9140 – p-канальный МОП транзистор;

D1N4002 – диод;

D1N750 – стабилитрон (используется в схеме на рис. 4);

VDC – источник постоянного напряжения;

VSIN – синусоидальный генератор с фиксированной частотой;

VAC – синусоидальный генератор с перестраиваемой частотой (использовать для построения АЧХ);

VPULSE – генератор импульсов.

3.1. Построить семейства выходных ВАХ биполярных транзисторов структуры n-p-n (Рис.1а) и p-n-p (Рис.1б).

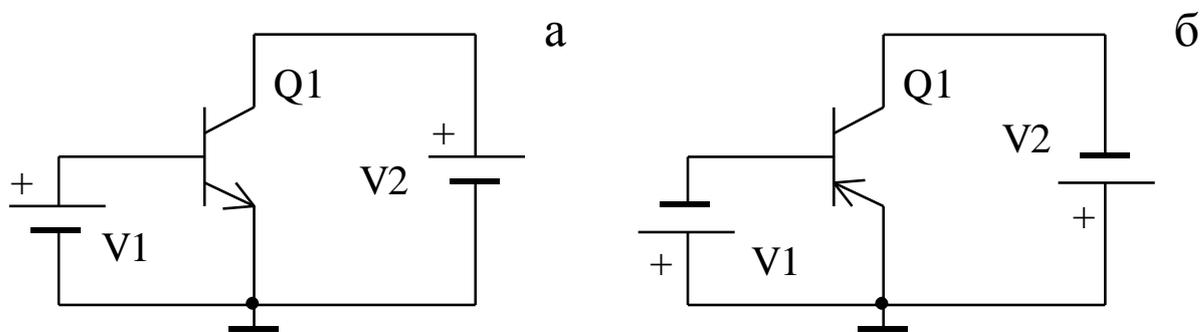


Рис. 1

3.2. Построить семейства выходных ВАХ n-канального (Рис.2а) и p-канального (Рис.2б) МОП транзисторов.

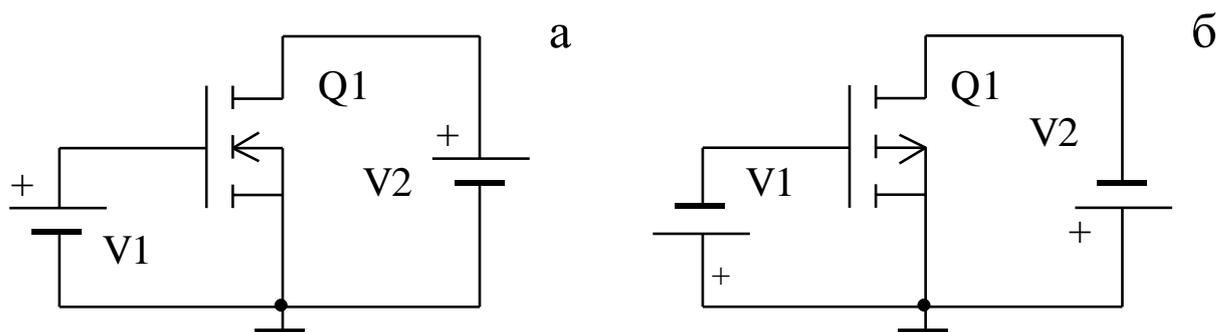


Рис. 2

3.3. Построить зависимость коэффициентов усиления n-p-n и p-n-p биполярных транзисторов от тока коллектора в схеме с общей базой (Рис.3 а и б) и общим эмиттером (Рис. 1 а и б).

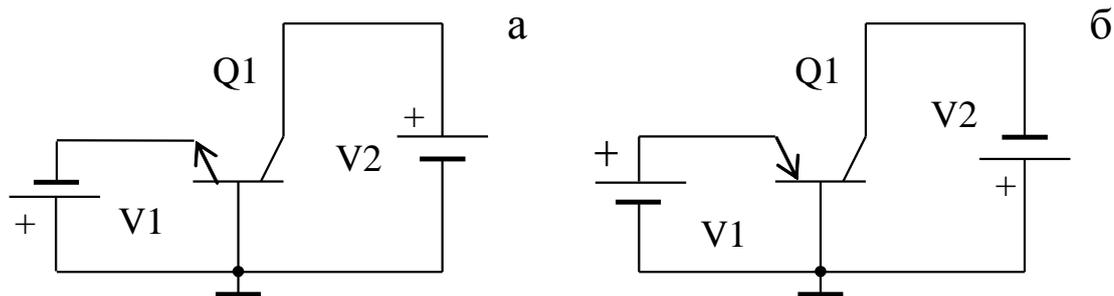


Рис. 3

3.4. Выполнить моделирование схемы простейшего стабилизатора (рис. 4). Построить зависимость коэффициента стабилизации ( $\Delta U_{\text{ВЫХ}}/\Delta U_{\text{ВХ}}$ ) в интервале входных напряжений от 6В до 20В.

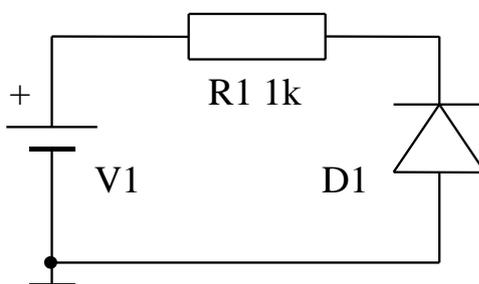


Рис. 4

3.5. Выполнить анализ переходных процессов в формирователях прямоугольных импульсов (рис.5,6,7). Рассчитать крутизну переднего и заднего фронтов при входной частоте 100кГц, длительность импульсов. Найти чувствительность схемы на частоте 100кГц. Найти предельную частоту работы формирователя при амплитуде входного сигнала 0,1В. Выходной сигнал снимать с коллектора транзистора Q2.

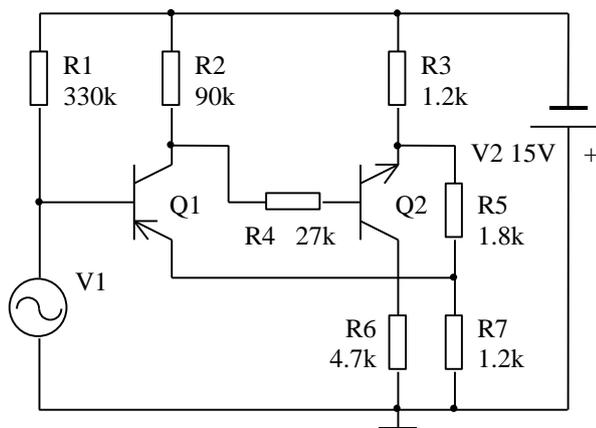


Рис. 5

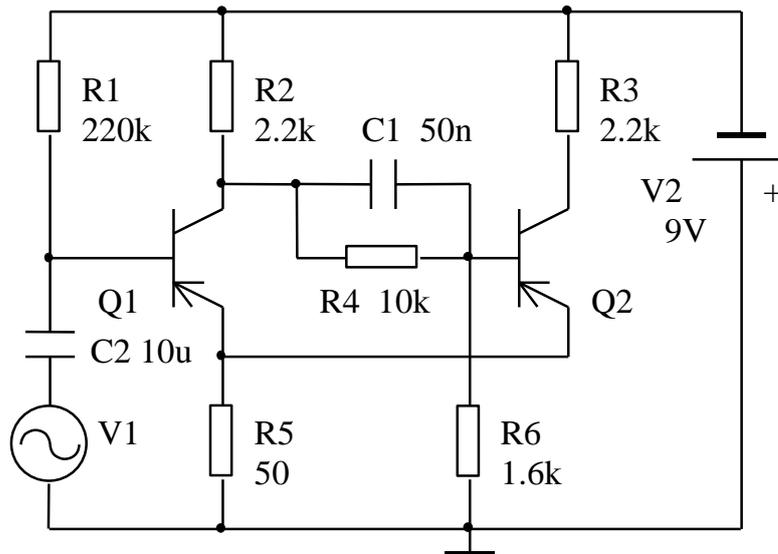


Рис. 6

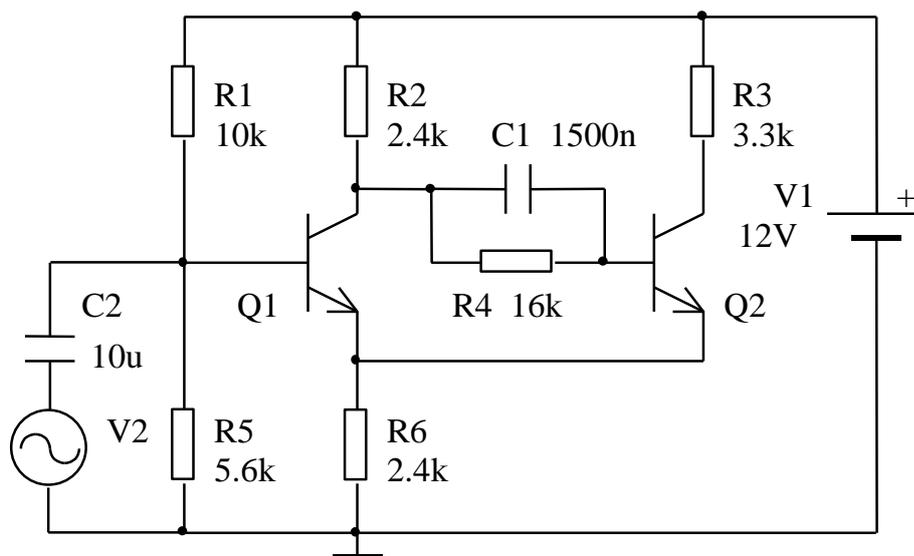


Рис. 7

3.6. Выполнить анализ переходных процессов в формирователе коротких импульсов (рис. 8). Определить длительность импульса, крутизну переднего и заднего фронтов при входной частоте 100кГц. Найти чувствительность формирователя на частоте 100кГц. Найти предельную частоту работы формирователя при амплитуде входного сигнала 0,1В. Выходной сигнал снимать в точке А.

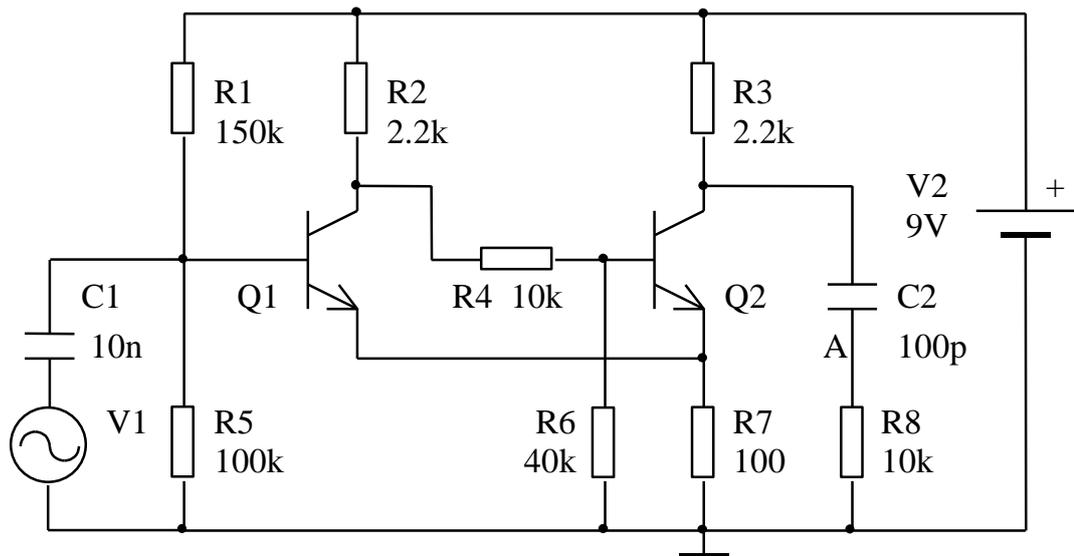


Рис. 8

3.7. Выполнить анализ переходных процессов в сумматоре синусоидальных сигналов (рис.9). Определить размах колебаний и спектральный состав выходного сигнала. Выходной сигнал снимать в точке соединения резисторов R4 и R7.

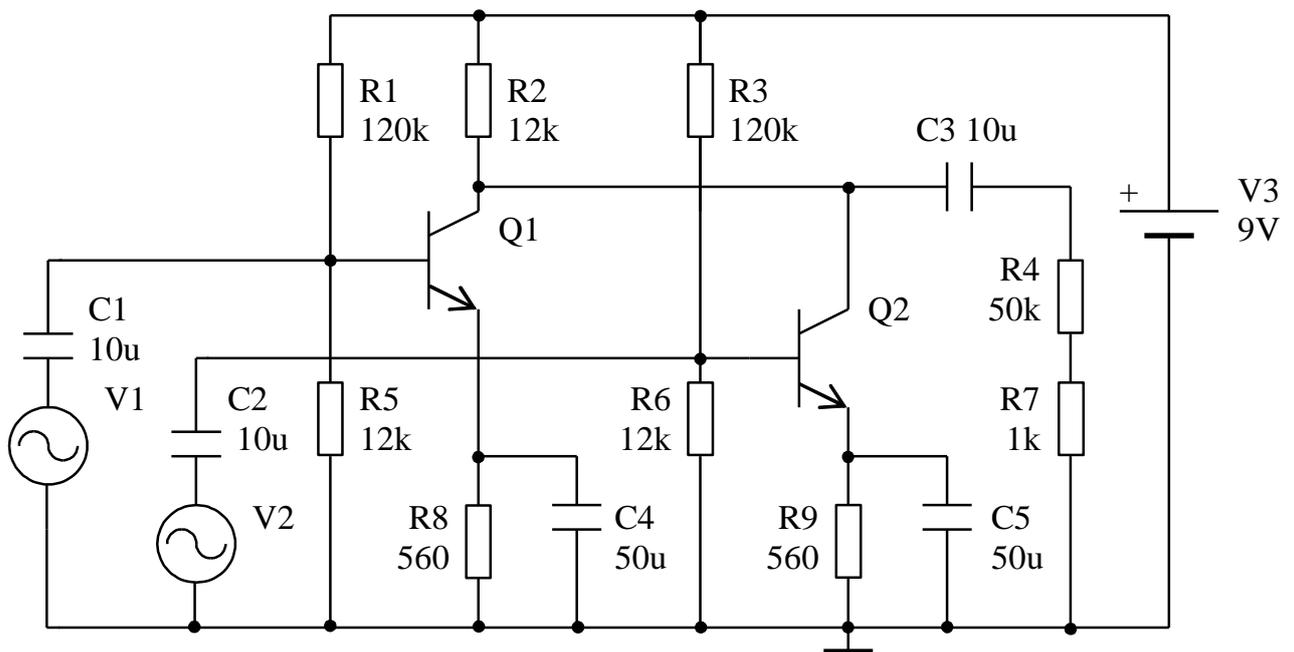


Рис. 9

3.8. Выполнить анализ переходных процессов в мультивибраторе (рис.10). Определить размах и период колебаний, частоту и спектральный состав выходного сигнала. Выходной сигнал снимать с коллектора транзистора Q2.

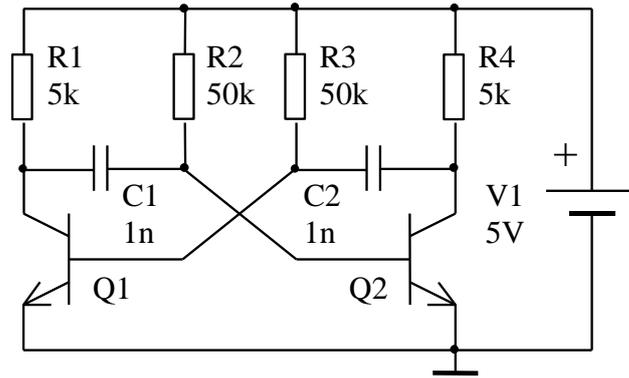


Рис. 10

3.9. Выполнить анализ переходных процессов в трехкаскадном мультивибраторе (рис.11). Определить размах и период колебаний, частоту и спектральный состав выходного сигнала. Выходной сигнал снимать с коллектора транзистора Q3.

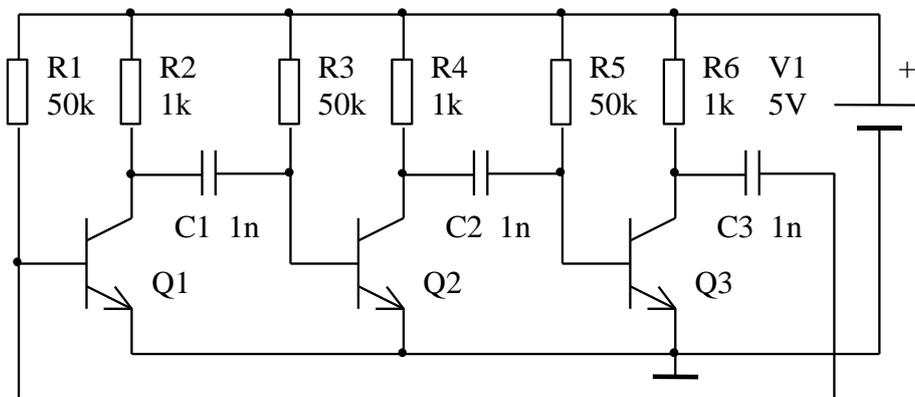


Рис. 11

3.10. Выполнить анализ переходных процессов в схемах импульсных генераторов (рис.12, 13, 14). Определить размах и период колебаний, частоту и спектральный состав выходного сигнала. Выходной сигнал снимать в точке А.

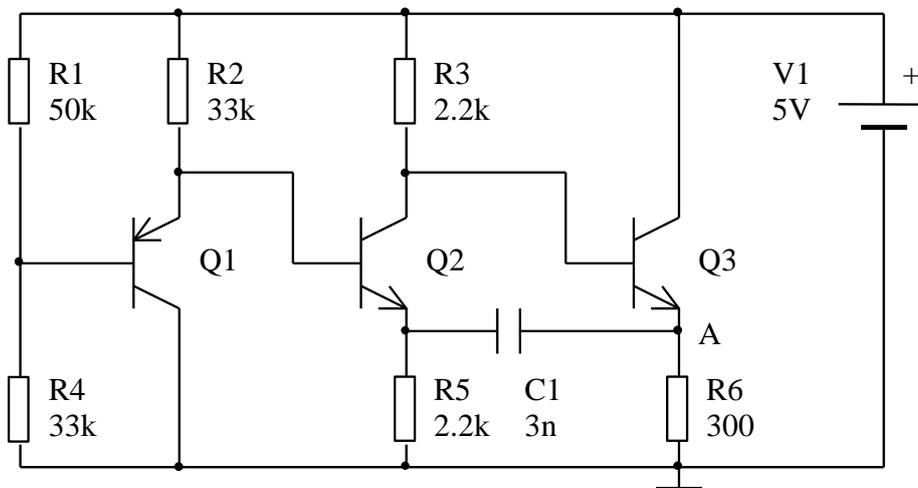


Рис. 12

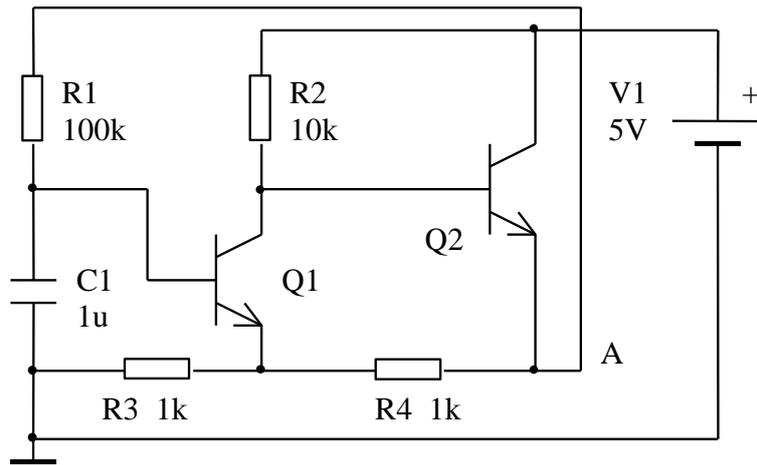


Рис. 13

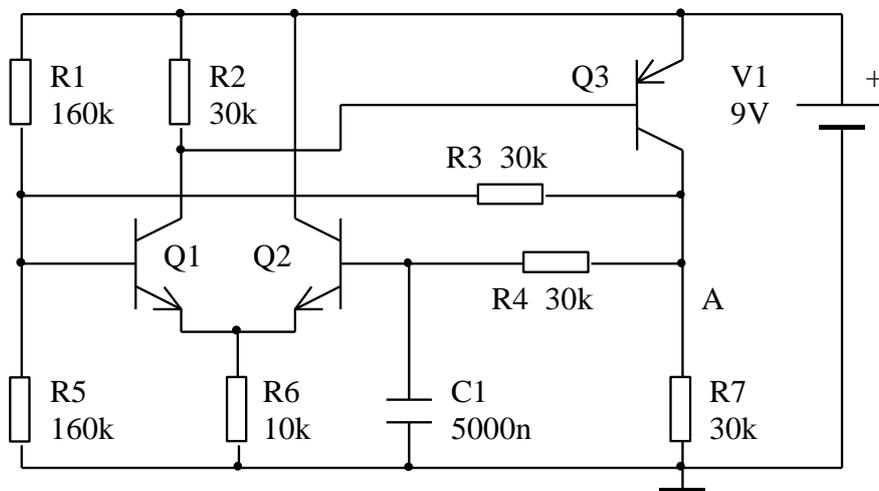


Рис. 14

3.11. Выполнить анализ переходных процессов в генераторе синусоидальных сигналов (рис. 15). Рассчитать амплитуду, период и частоту выходного сигнала. Определить его спектральный состав и коэффициент нелинейных искажений (он равен отношению амплитуд 2-й и 1-й гармоник). Выходной сигнал снимать с коллектора транзистора Q1.

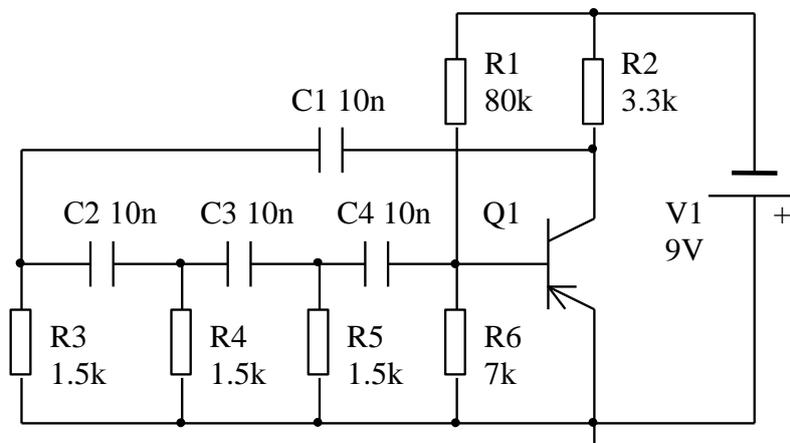


Рис. 15

3.12. Выполнить анализ переходных процессов в высокочастотном генераторе синусоидальных сигналов (рис. 16). Рассчитать амплитуду, период и частоту выходного сигнала. Определить его спектральный состав и коэффициент нелинейных искажений (он равен отношению амплитуд 2-й и 1-й гармоник). Выходной сигнал снимать с коллектора транзистора Q1.

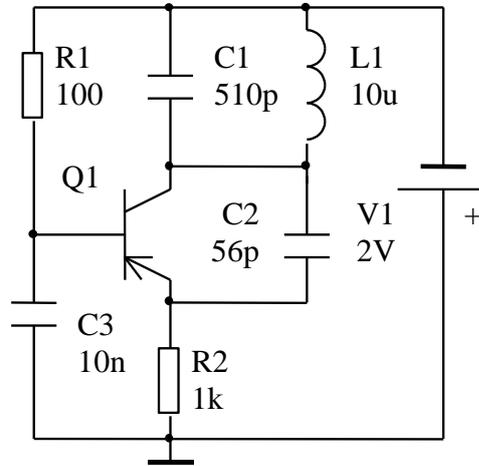


Рис. 16

3.12. Выполнить анализ переходных процессов в генераторах пилообразного напряжения (рис. 17, 18). Рассчитать размах, период и частоту выходного сигнала. Определить начало и окончание рабочего участка одного из периодов. Для схемы рис.17 это задний фронт, для схемы рис.18 – передний фронт. Определить его длительность и перепад напряжения. Выходной сигнал снимать в точке А. На схеме рис. 18 полевой транзистор с управляющим р-п переходом J1 имеет обозначение JbreakP.

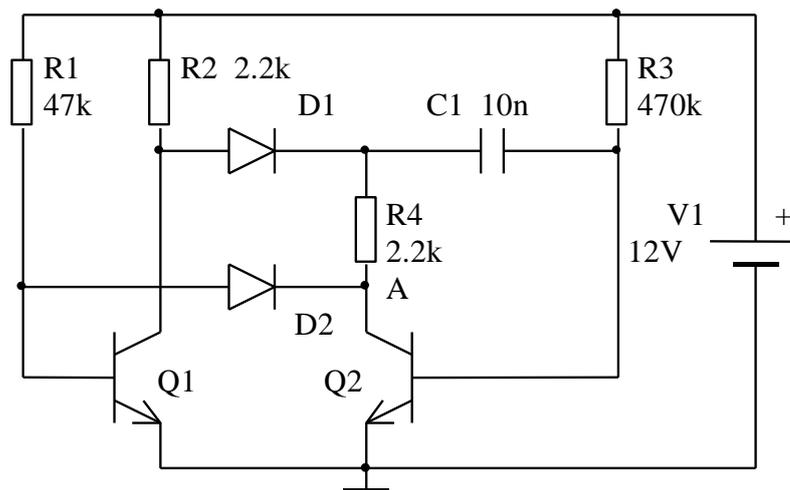


Рис. 17

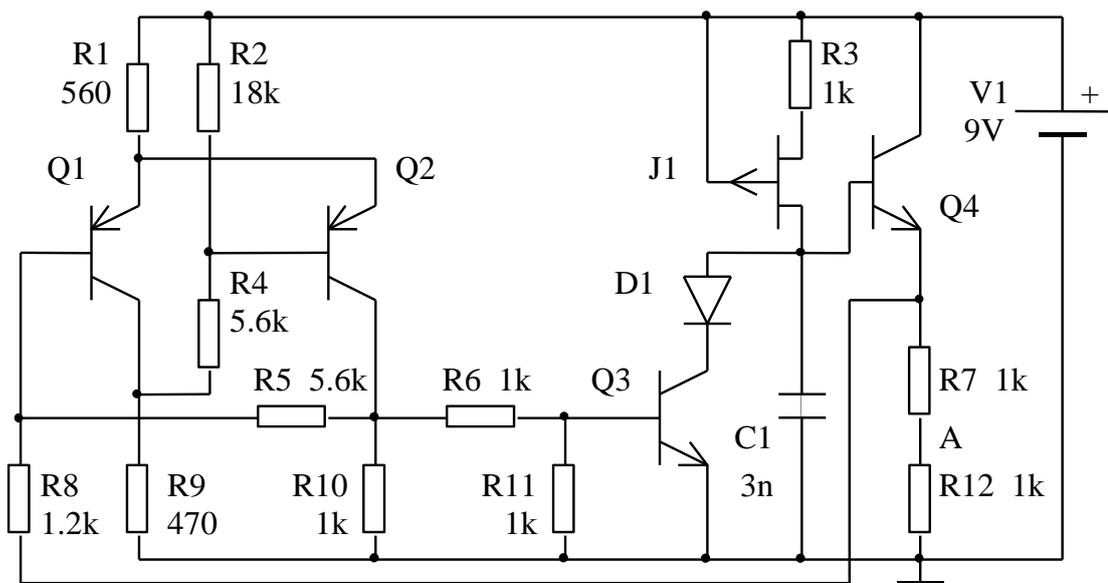


Рис. 18

3.13. Выполнить анализ переходных процессов в генераторе ступеньчатого напряжения (рис. 19). Рассчитать размах, период и частоту выходного сигнала. Определить крутизну переднего фронта, шаг ступени по времени и напряжению, неравномерность величины ступени. Исследовать зависимость выходного сигнала от напряжения питания и размаха входного напряжения. Выходной сигнал снимать в точке А.

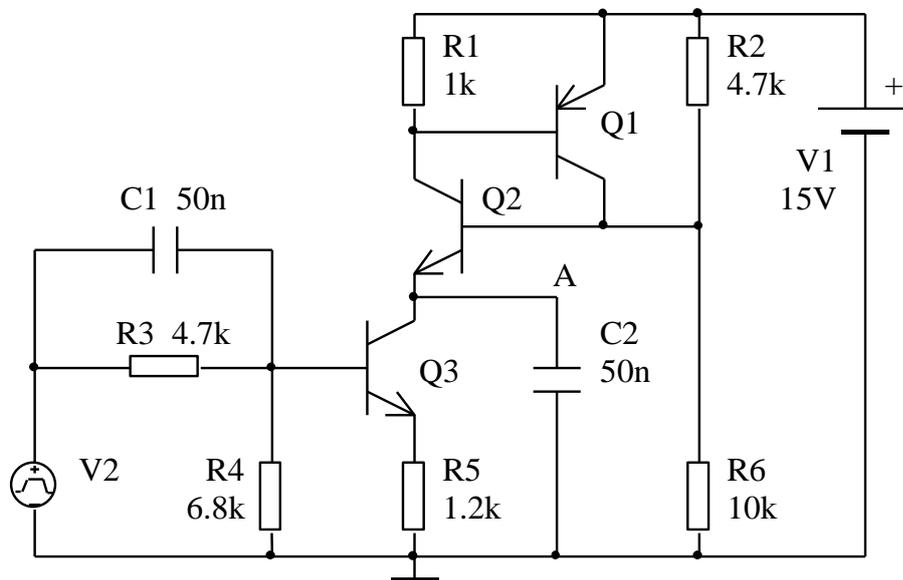


Рис. 19

3.12. Построить амплитудно-частотную характеристику последовательных колебательных контуров (рис. 20 а и б). Обе схемы рис. 20 можно рассматривать как частотно зависимый делитель напряжения, где резистор R1 образует одно плечо делителя, а колебательный контур

L1, C1 – другое плечо. Найти резонансную частоту, обеспечивающую максимальное ослабление сигнала, рассчитать коэффициент ослабления при расстройке в 1, 5 и 10 кГц от резонансной частоты. Выходной сигнал снимать с верхнего вывода резистора R1.

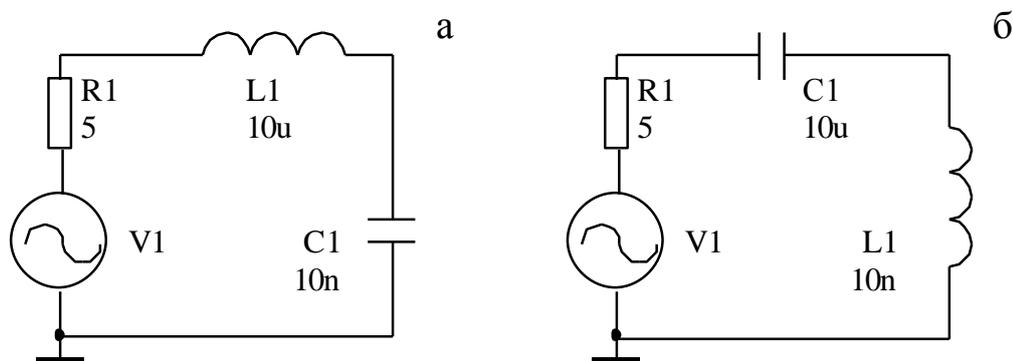


Рис. 20

3.13. Построить амплитудно-частотную характеристику параллельных колебательных контуров (рис. 21 а и б). Обе схемы рис. 21 можно рассматривать как частотно зависимый делитель напряжения, где резистор R1 образует одно плечо делителя, а колебательный контур L1, C1 – другое плечо. Найти резонансную частоту, обеспечивающую минимальное ослабление сигнала, рассчитать коэффициент ослабления при расстройке в 1, 5 и 10 кГц от резонансной частоты. Выходной сигнал снимать с верхнего вывода резистора R1.

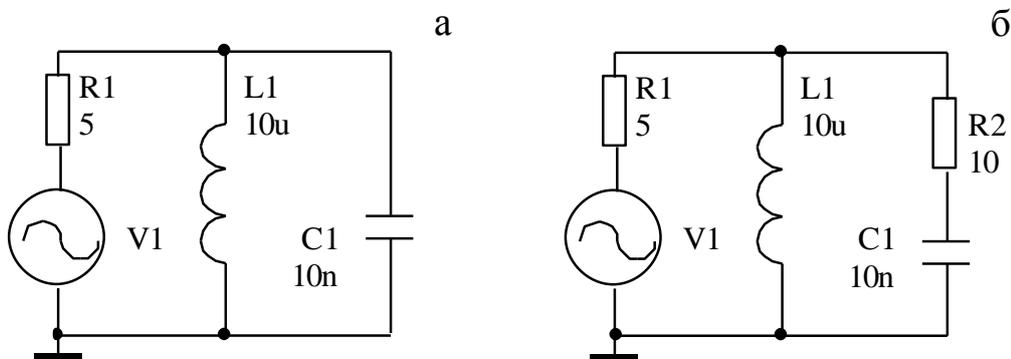


Рис. 21

3.14. Построить амплитудно-частотную характеристику режекторного фильтра (рис. 22). Определить частоту, на которой обеспечивается максимальное подавление и соответствующий коэффициент подавления. Выходной сигнал снимать с эмиттера транзистора Q1. Амплитуда входного сигнала 0,01В.

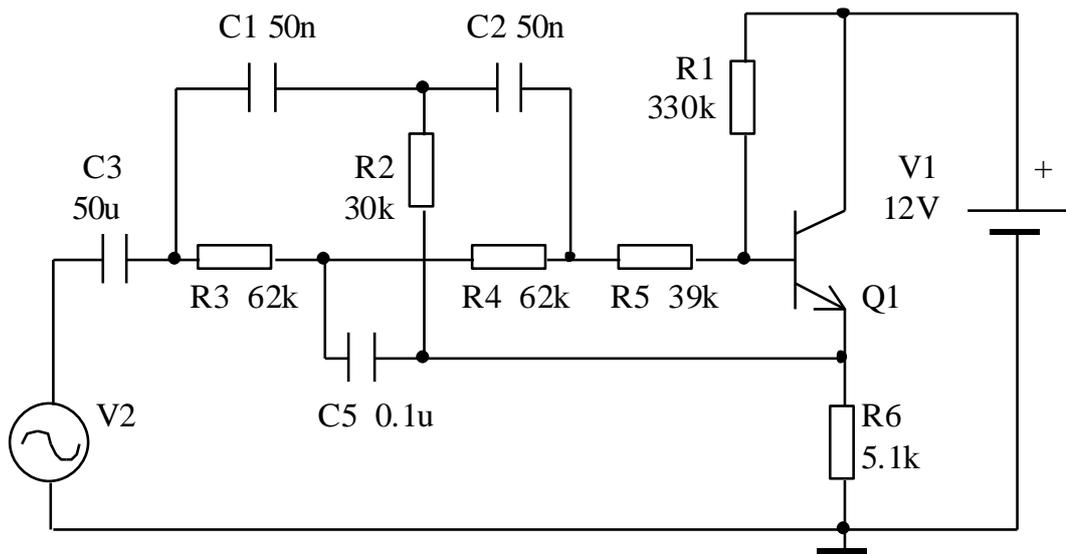


Рис. 22

3.16. Построить амплитудно-частотную характеристику взвешивающего фильтра (рис. 23). Выходной сигнал снимать в точке А. Амплитуда входного сигнала 0,01В.

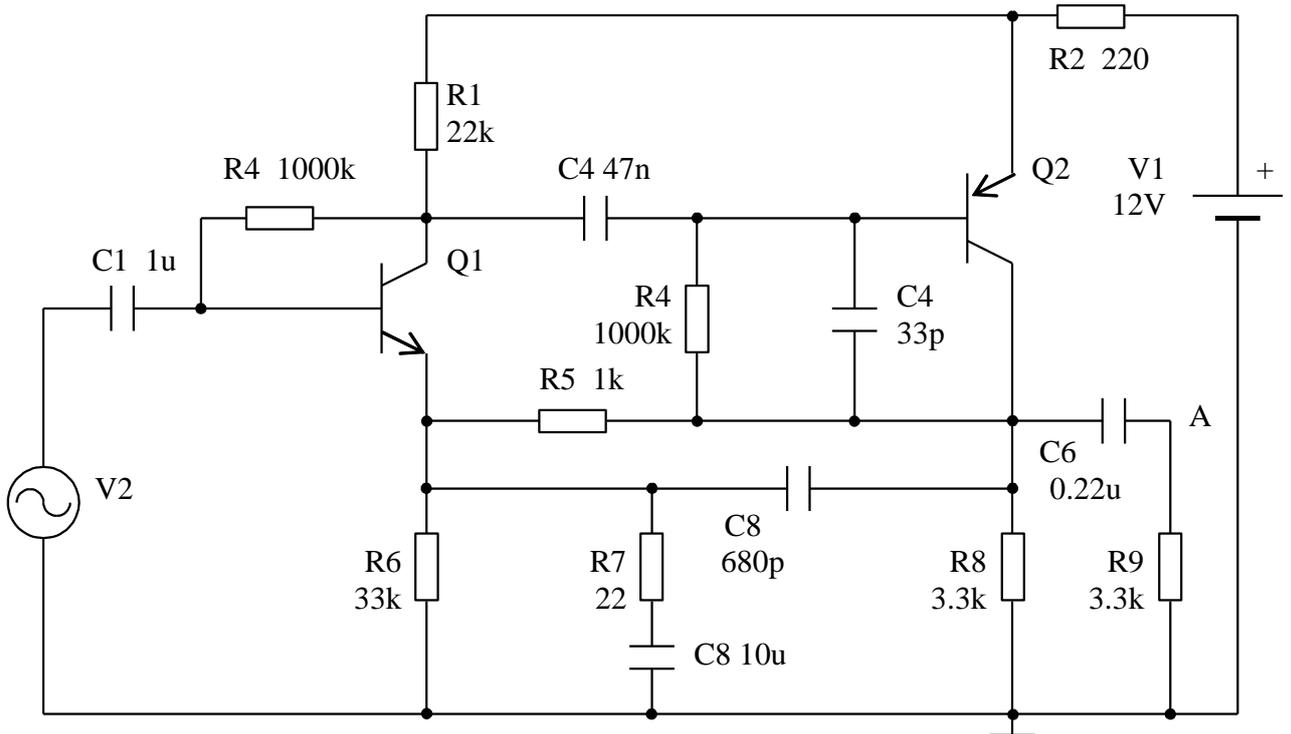


Рис. 23

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Норенков И.П., Маничев В.Б.* Системы автоматизированного проектирования электронной и вычислительной аппаратуры. - М.: Высшая школа, 1983. - 272 с.
2. *Ильин В.Н., Фролкин В.Т., Бутко А.И., Камнева Н.Ю., Тихомирова Е.М.* Автоматизация схемотехнического проектирования. - М.: Радио и связь, 1987. - 368 с.
3. *Разевиг В.Д.* Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). - М.: СК Пресс, 1996. - 268 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	3
1.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
1.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ	4
1.3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ	5
1.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	6
1.5 ОСОБЕННОСТИ КОМПОНЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ	7
2. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММ СХЕМО– ТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	8
2.1 ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ И ИХ МОДЕЛИ	9
2.2 ГРАФИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА СХЕМЫ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	12
2.3 АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	14
3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	14
ЛИТЕРАТУРА	25

Учебное издание

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**  
**«СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ»**

**по спецкурсу**  
**«Автоматизация проектирования в**  
**электронике»**

Автор-составитель

**Шевкун Игорь Михайлович**

В авторской редакции

Налоговая льгота – Общегосударственный классификатор  
Республики Беларусь ОКРБ 007-98, ч. 1; 22.11.20.600

Подписано в печать 11.12.2000. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,63. Уч. – изд. л. 1,6. Тираж 30 экз. Зак.

Белорусский государственный университет  
Лицензия ЛВ № 315 от 14.07.98.  
220050, Минск, пр. Ф. Скорины, 4

Отпечатано на копировально-множительной технике  
факультета радиофизики и электроники.  
Белгосуниверситет.  
220050, Минск, ул. Курчатова, д. 7.