

Московский государственный университет  
имени М. В. Ломоносова

---

Физический факультет  
кафедра фотоники и физики микроволн

О. Ю. Волков

**ПРАКТИКУМ ПО РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**  
**АНАЛОГОВЫЕ СХЕМЫ**

Методическое пособие для студентов  
и преподавателей практикума

Москва – 2012

УДК 378.162.33, 004.942, 53.083.8

ББК 22.3

## **Практикум по радиоэлектронике: аналоговые схемы**

Учебно-методическое пособие для студентов II курса физического факультета МГУ и преподавателей практикума по радиоэлектронике. М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. — 26 с.

**ISBN 978-5-8279-0102-0**

Представлено переработанное описание цикла задач по аналоговой электронике с введением ряда новых элементов подготовки студентов к выполнению задач, технологии выполнения и в формы отчёта по результатам. Пособие ориентировано на этап тестирования в весеннем семестре 2011/2012 учебного года методов схемотехнического моделирования разрабатываемых аналоговых пассивных и активных преобразователей сигналов, использования элементов поверхностного монтажа в процессе создания рабочих схем, технике распределённого управления учебной лабораторией. Материал пособия в равной мере адресован студентам и преподавателям, принимающим участие в проекте, и служит основой для последующего тематического развития аналогового раздела практикума по радиоэлектронике.

Рецензенты: д.ф.м.н. профессор *А.М. Салецкий*,  
к.ф.м.н. доцент *Г.В. Белокопытов*

*ВОЛКОВ Олег Юрьевич*

## **Практикум по радиоэлектронике: аналоговые схемы**

Подписано в печать 24.04.2012

Объем 1,2 п.л. Тираж 50 экз.

Заказ №

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.  
119991, Млсква, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Отпечатано в отделе оперативной печати  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

ISBN 978-5-8279-0102-0

© Волков О.Ю., 2012

# Задачи

<b>1</b>	<b>Линейные RC-цепи</b>	<b>3</b>
1.1	Практическая часть . . . . .	4
1.2	Обработка результатов измерений . . . . .	5
1.3	Моделирование в среде gEDA . . . . .	5
1.4	Контрольные вопросы . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Усилитель на биполярном транзисторе</b>	<b>6</b>
2.1	Практическая часть . . . . .	9
2.2	Обработка результатов измерений . . . . .	10
2.3	Контрольные вопросы. . . . .	11
<b>3</b>	<b>Операционный усилитель</b>	<b>12</b>
3.1	Практическая часть . . . . .	14
3.2	Обработка результатов измерений . . . . .	15
3.3	Контрольные вопросы . . . . .	15
<b>4</b>	<b>RC-генератор с цепью Вина</b>	<b>16</b>
4.1	Практическая часть . . . . .	17
4.2	Обработка результатов измерений . . . . .	18
4.3	Контрольные вопросы . . . . .	18
	<b>Приложения</b>	<b>19</b>
	Построение графиков в программе gnuplot . . . . .	19
	Работа в системе gEDA . . . . .	20
	Маркировка радиодеталей . . . . .	23
	Монтажная схема . . . . .	24
	<b>Литература</b>	<b>25</b>

# Задача 1

## Линейные RC-цепи

Линейные RC-цепи строятся на основе конденсаторов и резисторов. Простейшими цепями являются дифференцирующая и интегрирующая цепочки.

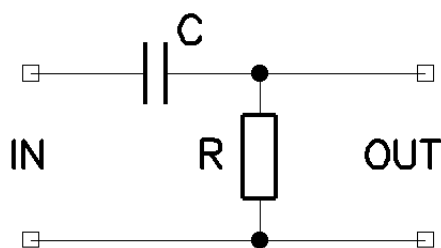


Рис. 1.1: Фильтр верхних частот

Дифференцирующая цепочка изображена на рис. 1.1. Она состоит из конденсатора, включенного между входом и выходом, а также резистора, включенного параллельно выходу. Такая цепочка представляет из себя фильтр верхних частот первого порядка. Он используется

для выделения высоких частот из сигнала и часто используется в обработке аудиосигналов. Еще одно важное применение фильтра верхних частот — устранение лишь постоянной составляющей сигнала, для чего частоту среза выбирают достаточно низкой, значительно ниже минимальной частоты полезного сигнала. Частота среза находится по уровню -3 дБ от максимального коэффициента передачи и рассчитывается по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (1.1)$$

Формула (1.1) оставляет произвол для выбора значений  $R$  и  $C$ . Поскольку к выходу фильтра всегда подключается нагрузка (осциллограф), то необходимо выбирать значение  $R$  много меньше входного сопротивления нагрузки, а емкость  $C$  много больше емкости нагрузки. Если нагрузка обладает слишком низким сопротивлением, можно использовать его вместо  $R$ , а сам резистор  $R$  не устанавливать.

С другой стороны, сопротивление  $R$  должно быть много больше выходного сопротивления источника сигнала (генератора), подключаемого ко входу фильтра. Таким образом, получаем условия:

$$R_{\text{ген}} \ll R \ll R_{\text{осц}}, \quad C \gg C_{\text{осц}}, \quad (1.2)$$

при этом для приборов в практикуме  $R_{\text{ген}} = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{осц}} = 1 \text{ МОм}$ ,  $C_{\text{осц}} \approx 100 \text{ пФ}$ .

Интегрирующая цепочка изображена на рис. 1.2. Она состоит из резистора, соединяющего вход и выход, а также конденсатора, шунтирующего выход. Такая цепочка представляет собой фильтр нижних частот первого порядка, используемый для выделения низких частот в сигнале, для сглаживания сигнала. Частота среза рассчитывается по формуле (1.1). Требования по выбору  $R$  аналогичны предыдущему случаю (1.2).

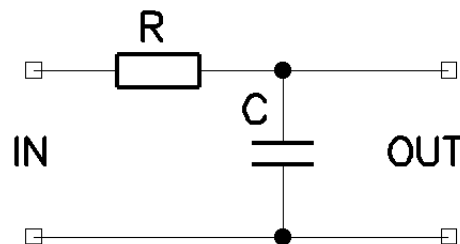


Рис. 1.2: Фильтр нижних частот

## 1.1 Практическая часть

Параметры: частота среза RC цепочки  $f$ .

1. Для заданной частоты рассчитать значения  $R$  и  $C$ .
2. Из полученных деталей собрать фильтр верхних частот. Измерить АЧХ и ФЧХ в диапазоне от 20 Гц до 50 кГц по логарифмической шкале: 20, 50, 100, 200, 500 Гц; 1, 2, 5, 10, 20, 50 кГц. Для каждой частоты записать значение коэффициента передачи фильтра и сдвига фаз, а также ошибки измерения фазы и амплитуды по экрану осциллографа (чувствительность и развертку осциллографа выбирать таким образом, чтобы ошибки измерения были минимальны). Посмотреть работу схемы при подаче импульсного сигнала. Зарисовать форму сигнала на выходе.
3. Собрать фильтр нижних частот, измерить АЧХ и ФЧХ для тех

же значений частоты. Посмотреть работу схемы и зарисовать форму сигнала при подаче импульсного сигнала.

## 1.2 Обработка результатов измерений

1. Построить графики зависимости АЧХ обоих фильтров в одних и тех же координатных осях, в логарифмическом масштабе, с учетом ошибок измерений (см. стр. 19). Нанести теоретические кривые.
2. То же для ФЧХ обоих фильтров.
3. Сравнить экспериментальные и теоретические кривые.

## 1.3 Моделирование в среде gEDA

1. Нарисовать в gEDA (см. стр. 20) схему фильтра нижних частот, с подключенным к ней источником переменного тока.
2. Получить графики зависимости АЧХ и ФЧХ в логарифмическом и линейном масштабе (режим *AC*).
3. Посмотреть работу схемы при подаче импульсного сигнала во времени (режим *Transient*).
4. Повторить задание для фильтра верхних частот.

## 1.4 Контрольные вопросы

1. Что такое напряжение и сила тока?
2. Резистор, конденсатор, катушка индуктивности.
3. Закон Ома. Закон Ома для участка цепи.
4. Схемы фильтра нижних и верхних частот первого порядка.
5. АЧХ и ФЧХ фильтров нижних и верхних частот.
6. Полосовые фильтры. Фильтры второго и более порядков.

## Задача 2

### Усилитель на биполярном транзисторе

Биполярный транзистор является простейшим полупроводниковым усилительным элементом. Различают две структуры биполярных транзисторов —  $pnp$  и  $npn$ . Существуют три основные схемы включения транзисторов — с общим эмиттером, общим коллектором и общей базой. На рисунке 2.1 изображена схема усилителя на  $npn$  транзисторе, включенного по схеме с общим эмиттером. Сопротивления  $R1$  и  $R2$  задают напряжение смещения на базе транзистора. Сопротивление  $R3$  является нагрузкой. Сопротивление  $R4$  формирует отрицательную обратную связь схемы — ограничивает коэффициент усиления и стабилизирует работу схемы. Конденсатор  $C1$  выполняет две функции — ограничивает усиление на низких частотах и устраняет постоянную составляющую входного сигнала. Конденсатор  $C2$  ограничивает усиление на высоких частотах. Конденсатор  $C3$  устраняет постоянную составляющую в выходном сигнале. Транзистор находится в линейном режиме. Дополнительное сопротивление  $R12$  и перемычка  $J1$  служат для измерения входного сопротивления усилителя.

Рассмотрим работу схемы с идеальным транзистором (обладающим бесконечно большим коэффициентом усиления) по постоянному току, то есть при отсутствии входного сигнала. Пусть на схему подается некоторое напряжение питания  $E_{п}$ . В состоянии покоя, когда входной сигнал отсутствует, на коллекторе транзистора должно быть напряжение, равное половине напряжения питания. Тогда падение напряжения на сопротивлении  $R3$  будет тоже равно половине напряжения питания. Ток через коллектор транзистора должен

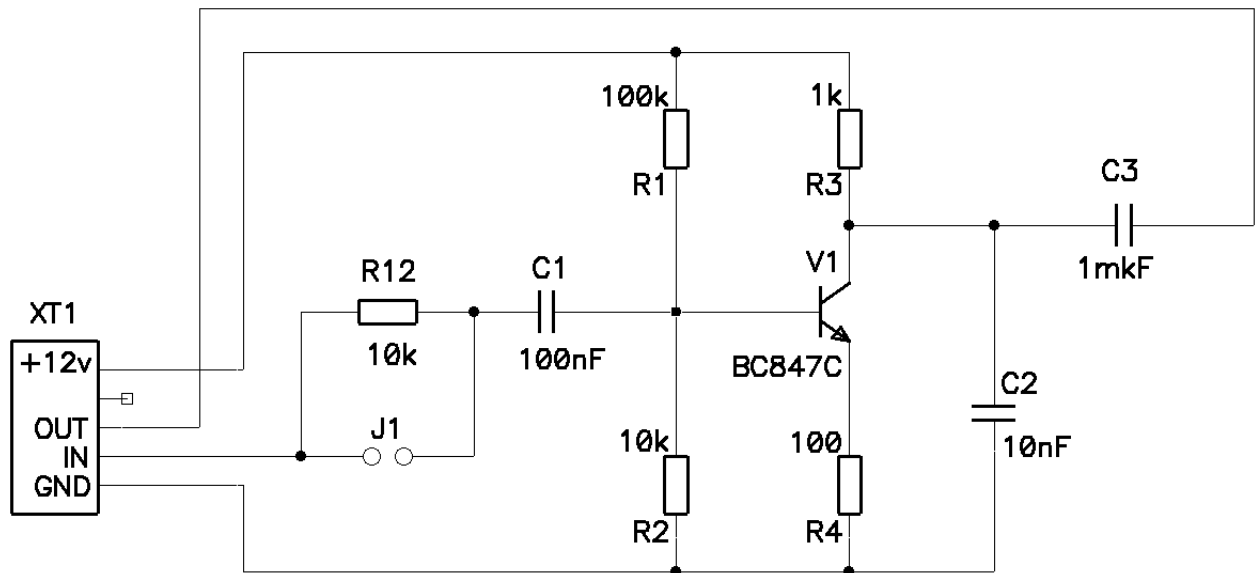


Рис. 2.1: Усилитель низкой частоты на биполярном прп транзисторе.

быть равен току, протекающему через резистор  $R3$ . Таким образом  $I_K = E_{II}/(2 R3)$ . У идеального транзистора ток базы бесконечно мал, ток эмиттера равен току коллектора. Таким образом, напряжение на эмиттере транзистора равно:  $U_э = E_{II} R4/(2 R3)$ . Напряжение на переходе база-эмиттер кремниевого маломощного транзистора, находящегося в активном режиме, составляет приблизительно 0.66 В. Таким образом, напряжение на базе должно быть:  $U_б = 0.66 + U_э = 0.66 + E_{II} R4/(2 R3)$ . Это напряжение должно задаваться делителем из сопротивлений  $R1$  и  $R2$ , то есть  $U_б = E_{II} R2/(R1 + R2)$ . Таким образом, для идеального транзистора получаем  $0.66 + E_{II} R4/(2 R3) = E_{II} R2/(R1 + R2)$ , откуда можно выразить значение  $R1$ :

$$R1 = \frac{E_{II} R2}{0.66 + (E_{II} R4/2 R3)} - R2 = R2 \left( \frac{1}{(0.66/E_{II}) + (R4/2 R3)} - 1 \right). \quad (2.1)$$

Соотношение сопротивлений  $R3$  к  $R4$  определяет коэффициент усиления схемы по напряжению на переменном сигнале (это следует из того, что ток через  $R3$  равен току через  $R4$ , а любое изменение напряжения на базе вызывает такое же изменение напряжения на  $R3$ ):

$$K = R3/R4. \quad (2.2)$$

Выходное сопротивление усилителя полностью определяется значением сопротивления  $R3$ . Входное сопротивление приблизительно рав-



но  $R_{\text{вх}} = R1 R2 / (R1 + R2) \approx R2$ , так как  $R1$  обычно в несколько раз больше  $R2$ , а транзистор идеален. Таким образом

$$R2 = \frac{1}{1/R_{\text{вх}} - 1/R1}, \quad R3 = R_{\text{вых}}. \quad (2.3)$$

Конденсатор  $C1$  и входное сопротивление усилителя образуют фильтр верхних частот. Конденсатор  $C2$  и выходное сопротивление схемы — фильтр нижних частот. Для заданных верхней и нижней частоты среза получаем:

$$C1 = \frac{1}{2\pi f_{\text{н}} R2}, \quad C2 = \frac{1}{2\pi f_{\text{в}} R3}, \quad (2.4)$$

где  $f_{\text{н}}$  и  $f_{\text{в}}$  — соответственно нижняя и верхняя частоты среза, определяющие полосу пропускания усилителя.

Конденсатор  $C3$  служит для развязки выхода усилителя по постоянному току. Расчет емкости производится исходя из значений сопротивления и емкости нагрузки и значения нижней границы полосы пропускания. Поскольку нагружать усилитель на нагрузку, сопротивление которой меньше выходного сопротивления усилителя не рекомендуется, считаем:

$$C3 \gg \frac{1}{2\pi f_{\text{н}} R3}. \quad (2.5)$$

Если к усилителю подключается нагрузка, имеющая развязку по входу, то установка конденсатора  $C3$  не обязательна (его можно заменить перемычкой).

Условия применимости полученного расчета:

1. Коэффициент усиления транзистора ( $h21$ ) должен быть много больше  $K$ . Современные транзисторы имеют коэффициент усиления от 500, поэтому данный расчет можно считать верным при  $K$  не превышающим 50.
2. Ток, идущий через цепочку  $R1 R2$  много больше тока базы транзистора. Так как ток базы транзистора в  $h21$  раз меньше токов эмиттера и коллектора, получим

$$\frac{E_{\text{п}}}{R1 + R2} \gg \frac{E_{\text{п}}}{2 h21 R3}.$$

Таким образом получаем условие  $R1 + R2 \ll 2 h21 R3$  или

$$R1 \ll 1000 R3. \quad (2.6)$$

3. Входное сопротивление транзистора должно быть много больше  $R2$ , иначе его придется учитывать при расчете входного сопротивления усилителя. Поскольку  $R_{тр} = r_б + (1 + h21)(r_э + R4)$ , где  $r_б$  и  $r_э$  — внутренние сопротивления базы и эмиттерного перехода транзистора, имеем  $R2 \ll h21 R4$  или

$$R2 \ll 500 R4. \quad (2.7)$$

4. Усилитель не должен шунтировать источник сигнала (генератора), то есть  $R2 \gg R_{ген}$ . Современные генераторы имеют выход с сопротивлением 50 Ом, поэтому

$$R2 \gg 50 \text{ Ом}. \quad (2.8)$$

## 2.1 Практическая часть

Параметры: коэффициент усиления  $K$ , входное сопротивление  $R_{вх}$ , выходное сопротивление  $R_{вых}$ , частоты среза  $f_n$ ,  $f_v$ .

1. Вывести формулу для расчета сопротивления  $R1$ , если условие (2.6) не выполняется. Оценить напряжение на коллекторе транзистора, если установить в схему сопротивление  $R1$ , рассчитанное по формуле (2.1).
2. Рассчитать значения всех элементов схемы. Провести компьютерное моделирование в пакете gEDA с целью проверки правильности расчета.
3. Смонтировать детали (кроме резистора  $R12$ ). Подключить схему к источнику питания, установив на последнем напряжение 12 В. Убедиться, что на коллекторе транзистора напряжение равно половине напряжения питания, то есть 6 В.

4. Установить на генераторе напряжение 100 мВ. Смонтировать сопротивление R12 (равное по значению сопротивлению R2) и измерить АЧХ и ФЧХ в точке соединения резистора R12 и конденсатора C1 по логарифмической шкале в диапазоне от 20 Гц до 5 МГц.
5. Замкнуть переключку J1 и измерить АЧХ и ФЧХ усилителя в том же диапазоне частот.
6. Установить на генераторе частоту  $f_0 = \sqrt{f_H f_B}$ . Увеличивая напряжение сигнала на генераторе от начального значения 50 мВ измерить зависимость напряжения и коэффициента гармоник на выходе усилителя. Зафиксировать форму сигнала при значении коэффициента гармоник 5%, 10% и 20%.
7. При помощи пакета gEDA провести моделирование работы схемы усилителя без конденсаторов C2 и C3 (напряжение снимать непосредственно с коллектора транзистора) в диапазоне 100 кГц – 100 МГц.

Эта и последующие задачи выполняются на печатной плате. Краевой разъем платы обеспечивает ее подключение к источнику питания, генератору и осциллографу.

## 2.2 Обработка результатов измерений

1. На основе измерений в п. 4 рассчитать значение внутреннего сопротивления усилителя по входу на каждой частоте (активное и реактивное). Построить графики зависимости входного сопротивления (активной и реактивной части) от частоты.
2. Построить графики для АЧХ и ФЧХ, измеренных в п. 5. Определить нижнюю и верхнюю частоты среза, а так же усиление на частоте  $f_0 = \sqrt{f_H f_B}$ .
3. Построить графики зависимости выходного напряжения и коэффициента гармоник от напряжения на входе усилителя (на графике с общей осью X).

4. На основе моделирования в gEDA (п. 7) рассчитать емкость коллекторного перехода транзистора. Рассчитать  $h_{21}$  транзистора.

### 2.3 Контрольные вопросы.

1. Что такое полупроводник. Простейший диод, его вольт-амперная характеристика.
2. Устройство биполярного транзистора и принцип работы.
3. Зависимость токов базы, коллектора, эмиттера от параметров транзистора.
4. Три основные схемы включения биполярного транзистора. Входное и выходное сопротивление схем.
5. Работа схемы с общим эмиттером. Температурная стабилизация усилительного каскада. Отрицательная обратная связь.
6. Внутреннее сопротивление, паразитные емкости, частотные параметры транзистора.

## Задача 3

### Операционный усилитель

Операционный усилитель (ОУ) — микросхема, состоящая из нескольких транзисторов, имеющая два входа (инвертирующий и неинвертирующий) и один выход. Основа операционного усилителя — дифференциальный каскад (рис. 3.1), состоит из двух одинаковых транзисторов V1 и V2, нагруженных на одинаковые сопротивления R1 и R3. В эмиттерной цепи транзисторов расположен источник тока (V3, V4, R2, R4). Формируемый им ток  $I = 0.66/R4$  распределяется между резисторами R1 и R3 в соответствии с напряжениями на входах каскада. Напряжение на выходе операционного усилителя зависит лишь от разности напряжений на его входах:

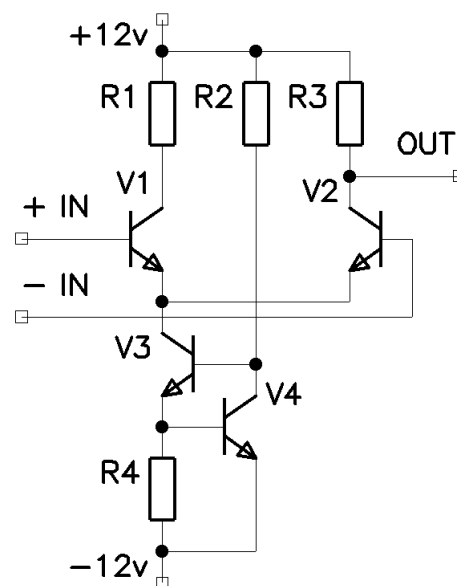


Рис. 3.1: Пример дифференциального каскада на биполярных транзисторах.

$$U_{OUT} = K_0(U_+ - U_-),$$

где  $K_0$  — собственный коэффициент усиления операционного усилителя по напряжению. Смысл работы операционного усилителя — в усилении противофазного сигнала. Синфазный сигнал операционный усилитель не усиливает, благодаря наличию источника тока.

Операционный усилитель обладает очень высоким собственным коэффициентом усиления, в несколько десятков тысяч раз. Чтобы на его основе построить усилитель, обладающий заданным коэффициентом усиления по напряжению  $K$  (обычно много меньшим соб-

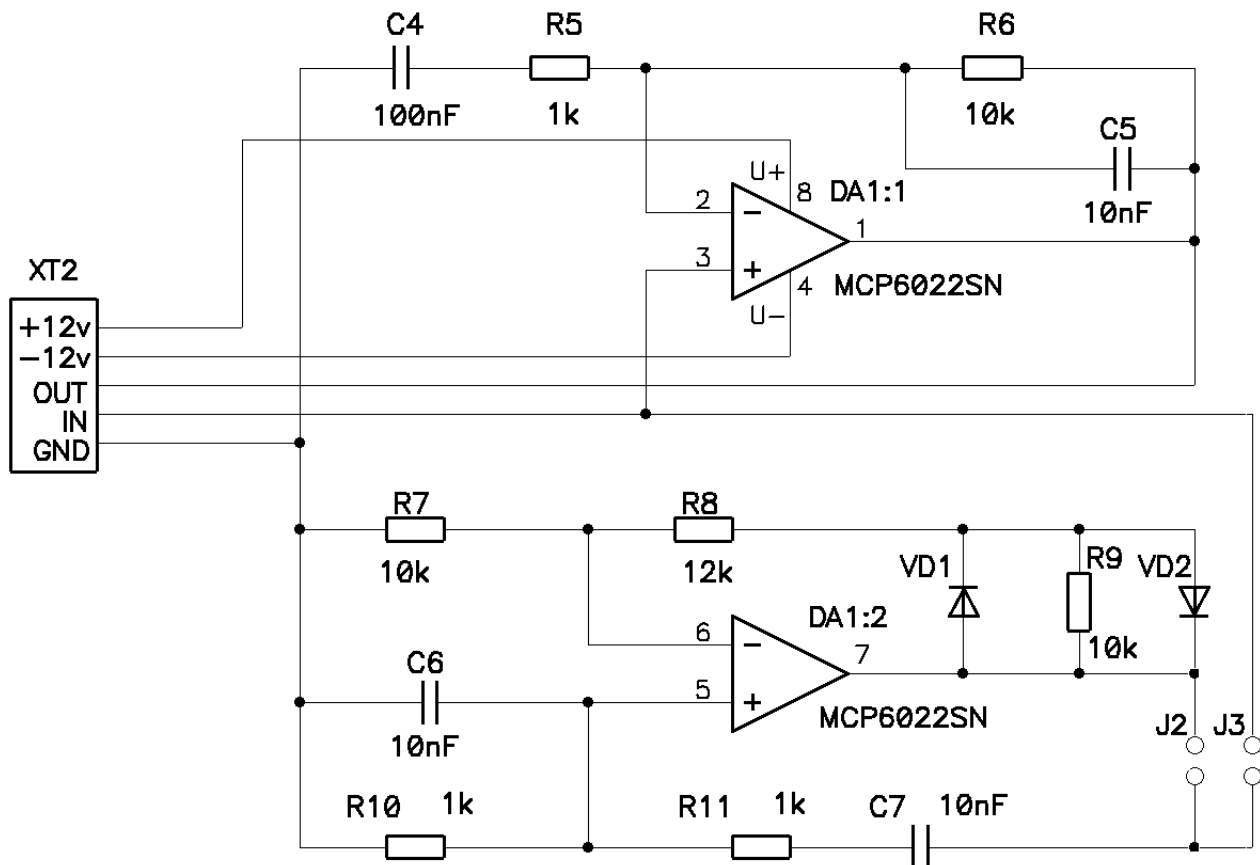


Рис. 3.2: Усилитель низкой частоты на ОУ (DA1:1) и RC-генератор с цепью Вина (DA1:2).

ственного коэффициента усиления ОУ) используют схему с обратной связью, когда инвертирующий вход усилителя соединяется с его выходом через делитель напряжения. Такая связь называется отрицательной обратной связью (ООС). Если с выходом операционного усилителя через делитель соединен неинвертирующий вход, получается положительная обратная связь (ПОС).

Обратная связь может содержать не только активные элементы (сопротивления), но и реактивные (конденсаторы). Реактивные элементы позволяют задать частотную зависимость коэффициента усиления. Если входной сигнал подается на неинвертирующий вход — получается неинвертирующий усилитель. Если на инвертирующий вход — инвертирующий усилитель. Во втором случае отрицательная обратная связь образует делитель напряжения между выходом операционного усилителя и источником входного сигнала.

Рассмотрим работу неинвертирующего усилителя с отрицательной обратной связью, работающего в диапазоне частот от  $f_H$  до  $f_B$  (рис. 3.2, DA1:1). Нижняя частота задается за счет цепочки последо-

вательно соединенных  $C4$  и  $R5$ , верхняя — за счет  $C5$  и  $R6$ , включенных параллельно:

$$C4 = \frac{1}{2\pi f_H R5}, \quad C5 = \frac{1}{2\pi f_B R6}. \quad (3.1)$$

Коэффициент усиления определяется на частоте  $f_0 = \sqrt{f_H f_B}$  как

$$K = \frac{R6}{R5} + 1, \quad (3.2)$$

при условии, что  $f_H \ll f_0 \ll f_B$ . Если это условие не выполняется, то для расчета надо использовать общую формулу:  $K(f) = \frac{Z2(f)}{Z1(f)} + 1$ , где  $Z1$  и  $Z2$  комплексные сопротивления цепей между землей и входом ( $Z1$ ), входом и выходом ( $Z2$ ). Для нашей схемы:

$$K(f) = \frac{1}{(R5 + \frac{1}{i2\pi f C4})(\frac{1}{R6} + i2\pi f C5)} + 1.$$

Неоднозначность расчета значений конденсаторов и резисторов по формулам (3.1) и (3.2) разрешается из условий, чтобы сопротивления были много меньше входного сопротивления операционного усилителя и много больше его выходного сопротивления. Типичные значения входного сопротивления от 1 до 10 МОм, выходного — от 20 до 2000 Ом.

### 3.1 Практическая часть

Параметры: коэффициент усиления  $K$ , частоты среза  $f_H$ ,  $f_B$ .

1. Рассчитать значения элементов схемы. Провести компьютерное моделирование в пакете gEDA с целью проверки правильности расчета.
2. Смонтировать детали DA1, C4, R5, R6. Подключить схему к двухканальному источнику питания с напряжением в каждом канале 12 В. Подключить генератор, установив на нем размах синусоидального сигнала, равный  $\frac{20V}{K}$ , где  $K$  — заданный коэффициент усиления схемы. Измерить АЧХ и ФЧХ в диапазоне от 20 Гц до 5 МГц по логарифмической шкале.

3. Уменьшить напряжение на выходе генератора в 10 раз. Повторно измерить АЧХ и ФЧХ.
4. Установить конденсатор С5. Повторно измерить АЧХ и ФЧХ.

### 3.2 Обработка результатов измерений

1. Построить графики в общих координатных осях для АЧХ, измеренных в пп. 2, 3, 4. Определить нижнюю и верхнюю частоты среза, а так же усиление на частоте  $f_0$ .
2. Построить графики в общих координатных осях для ФЧХ, измеренных в пп. 2, 3, 4.
3. Определить частоту единичного усиления ОУ.
4. Определить максимальную скорость нарастания выходного напряжения усилителя.
5. Рассчитать собственный коэффициент усиления ОУ.

### 3.3 Контрольные вопросы

1. Как работает дифференциальный каскад. Роль источника тока. Какую роль выполняют другие каскады ОУ.
2. Параметры ОУ: входное и выходное сопротивления, максимальная скорость нарастания выходного напряжения, частота единичного усиления.
3. Положительная и отрицательная обратная связь, инвертирующая и неинвертирующая схемы включения ОУ.
4. Расчет коэффициента усиления для схемы с отрицательной обратной связью (инвертирующая и неинвертирующая).
5. Влияние обратной связи на входное и выходное сопротивление ОУ (инвертирующая и неинвертирующая схемы).
6. Методика определения частоты единичного усиления ОУ.



## Задача 4

### RC-генератор с цепью Вина

Если неинвертирующий усилитель с отрицательной обратной связью дополнить цепочкой с положительной обратной связью, причем на какой либо частоте коэффициент передачи цепочки положительной обратной связи, умноженный на коэффициент усиления усилителя с ООС будет больше или равен 1, система превратится в генератор. Если полученный коэффициент будет больше 1 — получится генератор прямоугольного сигнала. Для того, чтобы получился генератор синусоидального сигнала — коэффициент усиления должен быть как можно ближе к 1. Чем он ближе к 1, тем меньше будут искажения формы сигнала.

Чтобы обеспечить генерацию на определенной частоте — в цепи положительной обратной связи должны быть времязадающие цепочки, обеспечивающие максимальный коэффициент усиления только на заданной частоте. Примером может служить цепь Вина, состоящая из двух резисторов и двух конденсаторов.

Схема генератора с цепью Вина представлена на рисунке 3.2 (DA1:2), страница 13. Сопротивления  $R_7$ – $R_9$  образуют ООС с коэффициентом передачи меньшим  $1/3$ . Сопротивления  $R_{10}$ ,  $R_{11}$ , конденсаторы  $C_6$ ,  $C_7$  образуют положительную обратную связь — цепь Вина. Если оба резистора и оба конденсатора одинаковы, такая цепочка имеет максимальный коэффициент передачи равный  $1/3$  и нулевой сдвиг фаз на частоте

$$f_0 = 1/(2\pi RC), \quad (4.1)$$

где  $R = R_{10} = R_{11}$ , а  $C = C_6 = C_7$ .

Для обеспечения работы генератора, цепь ООС должна иметь коэффициент передачи равный  $1/3$ . Это можно добиться используя нелинейные элементы, например два параллельно соединенных (анод к катоду) диода, шунтирующие часть сопротивления в цепи обратной связи. Диоды VD1, VD2 шунтируют сопротивление R9, когда амплитуда напряжения на диодах вызывает их открывание. За счет этого, с ростом амплитуды сигнала на выходе генератора коэффициент передачи ООС увеличивается, приближаясь к  $1/3$ , что вызывает снижение коэффициента усиления до 1. Резисторы R7–R9 должны удовлетворять условиям:

$$2 R7 > R8, \quad 2 R7 < R8 + R9. \quad (4.2)$$

Конкретные значения резисторов определяют амплитуду генерации и величину нелинейных искажений.

Для расчета амплитуды генерации необходимо учитывать вольт-амперную характеристику диодов. Поскольку ток в цепи обратной связи не велик, диоды начинают открываться уже при амплитуде в несколько десятых долей вольта. Значения резисторов R7–R9 удобнее подобрать экспериментально, моделируя работу схемы в gEDA, наблюдая параметры сигнала на выходе схемы, а также форму и величину напряжения на диодах.

## 4.1 Практическая часть

Параметры: частота генерации  $f_0$ , амплитуда выходного сигнала  $A_0$ .

1. Рассчитать значения элементов схемы. Провести компьютерное моделирование в пакете gEDA с целью проверки правильности расчета. Подобрать значения R7–R9 для достижения заданной амплитуды выходного сигнала генератора.
2. Смонтировать детали R7–R11, C6, C7, VD1, VD2, замкнуть переключку J2, подключить схему к двухканальному источнику питания с напряжением в каждом канале 12 В. Измерить частоту и размах генерации. Зафиксировать форму сигнала. Измерить коэффициент гармоник сигнала.

3. Разомкнуть переключку J2, замкнуть J3. Подключить генератор, установить размах сигнала 0.5 В. Измерить АЧХ и ФЧХ цепи Вина в точках  $0.1f_0$ ,  $0.2f_0$ ,  $0.5f_0$ ,  $f_0$ ,  $2f_0$ ,  $5f_0$ ,  $10f_0$ .
4. Установить на генераторе частоту, равную частоте генерации  $f_0$ . Измерить размах выходного напряжения и коэффициент гармоник на выходе операционного усилителя в зависимости от напряжения, подаваемого на цепь Вина с генератора (от 0.5 до 5 В, шаг 0.5 В; от 5 до 10 В, шаг 1 В; от 10 до 20 В, шаг 2 В).

Выход RC-генератора имеет отдельную контактную площадку на печатной плате.

## 4.2 Обработка результатов измерений

1. Построить АЧХ и ФЧХ цепи Вина.
2. Построить в одних осях график зависимости выходного напряжения (на операционном усилителе) и коэффициента гармоник от напряжения, подаваемого с внешнего генератора.

## 4.3 Контрольные вопросы

1. Что такое цепь Вина, ее АЧХ и ФЧХ.
2. Расчет цепи Вина по параметрам схемы при неодинаковых сопротивлениях и конденсаторах.
3. Условие генерации. Нелинейные искажения формы сигнала.
4. Коэффициент гармоник, вычисление, измерение.
5. Варианты построения RC-генераторов гармонических колебаний.
6. RC-генератор с цепью Вина.

# Приложения

## Построение графиков в программе *gnuplot*

Программа *gnuplot* позволяет построить несколько графиков в одних координатных осях. Порядок работы следующий:

1. Набрать экспериментальные данные в файл *data*. Каждая строка файла представляет собой набор параметров, измеренных для одного значения аргумента (для АЧХ или ФЧХ — частоты). Колонки разделяются символом табуляции или пробелом. Первая колонка содержит значение частоты в герцах, вторая и третья — измеренные значения для первой кривой и погрешность измерения, четвертая и пятая — то же для второй кривой.
2. Отредактировать файл *graph.gnuplot* редактором *gedit*, задав названия графиков и прочие параметры. Теоретические кривые задаются в виде формул — функций  $F1(f)$  и  $F2(f)$ .
3. Запустить программу *gnuplot*, нажатием на файл *graph.gnuplot*. Если файлы *graph.gnuplot* и *data* не содержат ошибок, на рабочем столе появится файл *graph.ps* (в случае ошибок рекомендуется запустить *gnuplot* в терминале).
4. Просмотреть сформированный файл *graph.ps* при помощи программы *Document Viewer*. Для внесения изменений — повторить пункты 2 и 3.
5. Распечатать полученный график на принтере (*File—Print*).

Файл *graph2.gnuplot* показывает возможность расположения двух зон рисования друг под другом на одном листе. Данные для графиков каждой зоны берутся из отдельных файлов — *data* и *data2*.

## Работа в системе gEDA

Создание и редактирование принципиальной схемы осуществляется в редакторе *gEDA Schematic Editor*. Порядок создания новой схемы следующий:

1. Запустить программу (*Main Menu—Electronics—gEDA Schematic Editor*).
2. В режиме добавления компонент (*Add—Component...*) выбрать:
  - из библиотеки *Basic devices* — резисторы *resistor*, конденсаторы *capacitor*, источники питания *battary* и другие элементы;
  - из *Power rails* символы общего провода (*Gnd*) и шин питания (*Vcc*, *Vss*, ...) (одинаковые символы, расположенные в разных частях схемы, считаются соединенными между собой);
  - из *SPICE simulation elements* источники входного сигнала *vdc*, *vac*, транзисторы *spice-npn*, *spice-pnp*, модели элементов *spice-model* и др.
3. Осуществить поворот компонент в соответствии со схемой (меню *Edit*). Повернуть названия компонент, чтобы все надписи были расположены горизонтально.
4. Отредактировать порядковые номера компонент (двойной щелчок по названию).
5. Добавить значения — атрибут *value* (при выделенном изображении компонента *Add—Attribute...*).
6. Добавить соединения (*Add—Net*). Выйти из режима добавления соединений (*Edit—Select Mode*).
7. Присвоить имена интересующим вас цепям — атрибут *netname* (при выделенной цепи *Add—Attribute...*). Цепи с одинаковыми именами, расположенные в разных частях схемы, считаются соединенными между собой.
8. Сохранить файл схемы с нужным именем. Заккрыть программу.

Моделирование осуществляется в программе *GNU Spice GUI*. Порядок работы следующий:

1. Запустить программу (*Main Menu—Electronics—GNU Spice GUI*). Импортировать схему (*File—Import*).
2. В меню *Settings* выбрать работу с симулятором *NG-Spice*. Установить режим работы симулятора *DC*, *AC* или *Transient*. Для режима *AC* необходимо выбрать вычисляемые параметры *Complex parts* (рекомендуется снять галочку *Mag. in dB* чтобы напряжение измерялось в вольтах). Для *Transient* указать метод старта *Initial Conditions*, рекомендуется выбирать холодный старт — *Cold*.
3. Установить значения параметров *DC/AC/Transient sweep* таким образом, чтобы число вычисляемых значений не превышало 800.
4. Задать источник сигнала *Signal sources* и его параметры. Для режима *Transient* нажать *Setup ...* и заполнить или секцию *Sinusoid*, или *Pulse* — для формирования синусоидального или импульсного входного сигнала соответственно.
5. Задать в столбце *Nodes* цепи для измерения относительно земли и/или компоненты в столбце *Components* (измерение на компоненте зависит от того, какой стороной он включен, поэтому могут быть отрицательные значения).
6. Запустить создание списка (*Simulate—Create*) и при отсутствии ошибок запустить моделирование (*Simulate—Run*). Если моделирование прошло успешно, на рабочем столе будет создан файл с именем "*НазваниеСхемы.ngspice.(dc/ac/tr)*".
7. Просмотреть полученные значения и при необходимости построить график (*Simulate—Results ...*).
8. Для внесения изменений в принципиальную схему (находясь в *GNU Spice GUI*) войти в редактор схем (*Simulate—Results ...*), внести необходимые изменения в схеме, сохранить схему, закрыть редактор схем, вернуться в *GNU Spice GUI*, перечитать файл схемы (*File—Reload*).

Построение и анализ графика осуществляется в программе *Gwave* (запуск из программы моделирования *Simulate—Results ...*). При этом, на экране открывается два окна — основное, в котором рисуются графики и дополнительное, со списком графиков. Порядок работы следующий:

1. В меню *Options* выбрать необходимый режим по горизонтали (*X Axis scale*).
2. Выбрать верхнюю область рисования (щелчком по ней). Из второго окна добавить нужные графики (двойным щелчком). Повторить для второй области.
3. Используя меню по правой кнопке мыши — выбрать необходимый масштаб отображения графиков. Провести необходимые измерения.
4. Создать изображение графика. Для этого войти в *File—Plot...*, задать имя файла и папку его размещения (кнопка *Browse*, рекомендуется класть файл на рабочий стол), выбрать программу для построения — *GNUPlot*, поставить галочку *Keep Tempfiles*. Построить файл (*Plot*). На рабочем столе должны появиться 3 файла: изображение графика, файл данных, файл с расширением *gnuplot*.
5. Закрыть программу.
6. Открыть полученный файл в программе *Document Viewer*. Убедиться в правильности графика. Закрыть окно *Document Viewer*. При необходимости повторить моделирование и построение графика, изменив необходимые параметры.
7. Отредактировать файл с расширением *gnuplot*, или использовать *graph2.gnuplot* (см. стр. 19). Выполнить его.
8. Открыть измененный файл изображения графика в программе *Document Viewer*. Убедиться в правильности графика и внесенных изменений. Распечатать график на принтере (*File—Print*).

## Маркировка радиодеталей

Существуют ряды стандартных значений: E3, E6, E12 и E24. Название ряда определяет число элементов в нем. Каждый ряд соответствует определенному допуску в номиналах деталей. Детали из ряда E6 имеют допуск  $\pm 20\%$ , E12 —  $\pm 10\%$ , E24 —  $\pm 5\%$ .

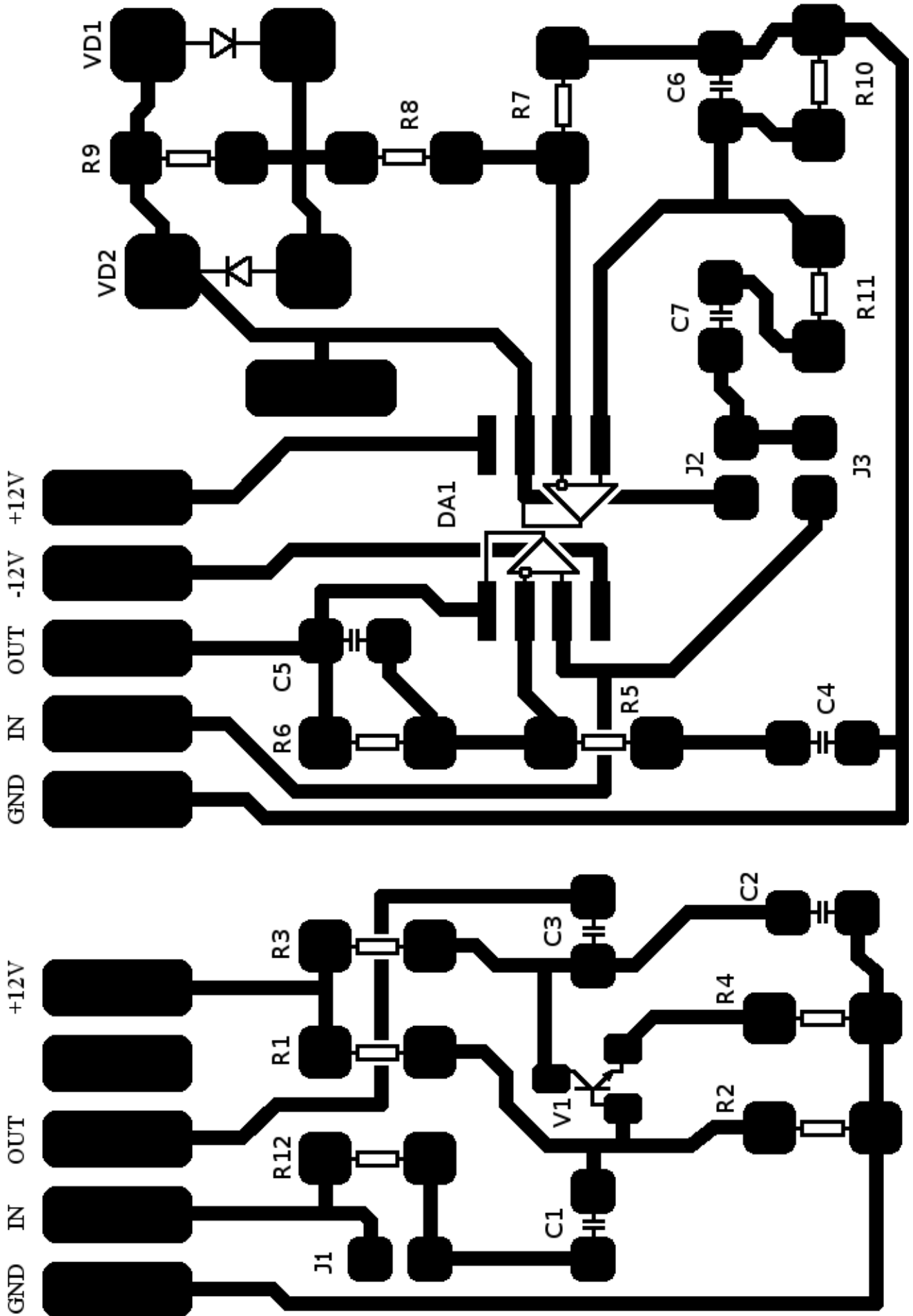
E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,1				2,4				5,1
		1,2	1,2			2,7	2,7			5,6	5,6
			1,3				3,0				6,2
	1,5	1,5	1,5		3,3	3,3	3,3		6,8	6,8	6,8
			1,6				3,6				7,5
		1,8	1,8			3,9	3,9			8,2	8,2
			2,0				4,3				9,1

Резисторы выпускаются по ряду E24 и обозначаются в омах, килоомах и мегаомах. Омы обозначают числом, или числом с буквами "E" или "R", килоомы — буквой "к", мегаомы — "М". Часто букву ставят на место запятой, например M51 = 0,51 МОм = 510 кОм, 4к7 = 4,7 кОм. Резисторы поверхностного монтажа маркируют трехзначным числом, где первые 2 знака обозначают номинал, а третий знак — степень множителя по основанию 10. Например, маркировка 123 означает  $12 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 12 \text{ кОм}$ .

Конденсаторы выпускаются по ряду E12 или E6, обозначаются в микрофарадах, нанофарадах и пикофарадах. Микрофарады обозначают буквой " $\mu$ " или дробным числом без буквы, нанофарады — "н", пикофарады — целым числом без буквы. Буквы могут ставить на место запятой. На конденсаторах также обозначают другие параметры, например группу ТКЕ, рабочее напряжение, допустимое отклонение емкости. При этом, группа ТКЕ обозначается буквами "П", "М" и "Н" плюс число. Конденсаторы поверхностного монтажа не маркируют, их значения необходимо определять по надписям на упаковке, а если ее не сохранилось — при помощи измерителя емкости.



# Монтажная схема



# Литература

1. И.Т. Трофименко, Е.В. Лебедева, Н.С. Седлецкая. Практикум по радиоэлектронике. Учеб. пособие. — М. Изд-во МГУ, 1997.
2. У. Титце, К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника. Пер. с нем. В двух томах. — М. Додека-XXI, 2008.

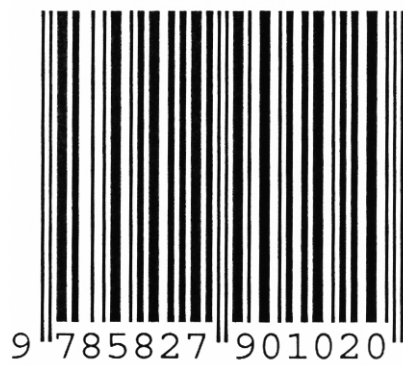
Пособие составлено для студентов физического факультета МГУ, изучающих основы работы аналоговых схем в практикуме по радиоэлектронике. Программа состоит из 4 задач. Выполнение каждой задачи начинается с допуска. Список вопросов приводится в конце описания каждой задачи. Для ответа на контрольные вопросы необходимо чтение дополнительной литературы.

Первая задача выполняется на макетной плате и предназначена для знакомства с радиодеталями, маркировкой резисторов и конденсаторов, получения навыков работы с мультиметром, генератором, осциллографом, построения графиков в программе gnuplot, а также знакомству с средой моделирования gEDA.

Вторая и последующая задачи выполняются на печатной плате с использованием элементов поверхностного монтажа. Задачи написаны таким образом, что не требуют в процессе наладки подбора значений радиодеталей. Перед сборкой схемы проводится ее моделирование в gEDA. Монтаж радиодеталей осуществляется студентами самостоятельно, поэтому на плате применяются максимально крупные элементы: резисторы в корпусе 1206, конденсаторы — 0805. Установка сложных радиодеталей (транзисторы, микросхемы) по просьбе студента может быть выполнена лаборантом. Между занятиями, печатная плата остается в помещении практикума. После получения зачета, студент забирает свою плату на память.

Автор выражает благодарность техническому директору ООО "ЛОИС" А.Л. Ампелонову, сотрудникам физического факультета МГУ В.М. Гурьеву, Е.Р. Канунову, В.Ф. Марченко, А.А. Руденко, И.В. Румянцеву, Н.А. Сухаревой, А.П. Сухорукову, С.Н. Цысарю, В.М. Шахпаронову, Д.А. Яковлеву и студентам 2-го курса, принявшим участие в тестировании новой методики проведения занятий в практикуме по радиоэлектронике.

ISBN 978-5-8279-0102-0



9 785827 901020