

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

Издание второе

Москва — 2016

УДК 378.162.33, 004.942, 53.083.8

ББК 22.3

Практикум по радиоэлектронике: аналоговые схемы

Издание второе, переработанное и дополненное.

Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета МГУ и преподавателей практикума по радиоэлектронике. М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016. — 84 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 формы отчёта по результатам. Программа состоит из шести задач. Каждая задача сопровождается списком контрольных вопросов и заданий, знание которых необходимо для успешного выполнения упражнений практикума.

Пособие ориентировано на тестирование 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.

Второе издание дополнено теоретическим материалом и задачами по изучению мультивибраторов на логических элементах.

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

Объем 4,8 п.л.

Электронная версия.

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

ISBN 978-5-8279-0102-0

© Волков О.Ю., 2012-2016

Содержание

Предисловие	5
1. Линейные RC-цепи	7
1.1. Основные понятия	7
1.2. Прохождение гармонического сигнала	9
1.3. Простейшие RC-цепи	11
1.4. Спектральный и временной методы анализа	13
1.5. Практическая часть	15
1.6. Контрольные вопросы	16
2. Усилитель низкой частоты на биполярном транзисторе . . .	17
2.1. Основные понятия	17
2.2. Биполярный транзистор	21
2.3. Расчет схемы усилителя низкой частоты	25
2.4. Практическая часть	29
2.5. Контрольные вопросы.	30
3. Операционный усилитель	31
3.1. Основные понятия	31
3.2. Расчет схемы усилителя низкой частоты на ОУ	37
3.3. Практическая часть	39
3.4. Контрольные вопросы	39
4. Гармонические RC-генераторы	41
4.1. Основные понятия	41
4.2. Генератор с цепью Вина	45
4.3. Расчет схемы RC-генератора с цепью Вина	47
4.4. Практическая часть	49
4.5. Контрольные вопросы	49

5. Мультивибраторы на логических элементах	51
5.1. Основные понятия	51
5.2. Элементы микросхемы К155ЛА3	54
5.3. Триггер Шмитта	55
5.4. Ждущий мультивибратор	56
5.5. Автоколебательный мультивибратор	57
5.6. Практическая часть	58
5.7. Контрольные вопросы	60
6. Симуляция электронных схем	61
6.1. Симулятор электронных схем SPICE	61
6.2. Создание и редактирование принципиальной схемы . .	62
6.3. Симуляция работы электронной схемы	66
6.4. Построение и анализ графика	69
6.5. Практическая часть	71
Справочная информация	73
Мaketная плата (задачи 1 и 5)	73
Монтажная схема (задачи 2-4)	74
Маркировка резисторов и конденсаторов	75
Корпуса и нумерация выводов микросхем	77
Шаблоны для построение графиков	78
Предметный указатель	81
Литература	83

Предисловие

На отделении радиофизики физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова в конце 40-х годов прошлого века в дополнение к общему физическому практикуму был создан общефакультетский радиопрактикум. Его отличительной особенностью было изучение радиотехнических схем не на готовых макетах, а в процессе прохождения всех этапов создания простейших радиотехнических устройств: расчет, подготовка шасси или платы, монтаж и наладка схемы, снятие характеристик.

В дальнейшем по мере разработки новых электронных приборов (транзисторов и интегральных схем) практикум модернизировался, пополнялся новыми лабораторными работами, однако принцип индивидуальности задания и самостоятельности в монтаже схемы сохранялся.

В конце 80-х годов прошлого века радиопрактикум был преобразован в практикум по радиоэлектронике с элементами автоматизации и цифровой обработки результатов эксперимента на персональных компьютерах.

Примерно в то же время в мировой промышленности получила широкое распространение технология поверхностного монтажа компонент, что привело к миниатюризации размеров элементной базы (SMD компоненты) и стали активно развиваться программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

В начале 2000-х годов появилась возможность использовать ПЛИС и SMD компоненты в разработке и создании собственных устройств не только в заводских, но и в лабораторных условиях. Это послужило стимулом для очередной модернизации радиопрактикума.

Учебное пособие содержит 12 задач. Первые 4 задачи (линейные

РС-цепи, усилитель на транзисторе, операционный усилитель, РС-генератор) — схемы аналоговой радиотехники. Пятая задача (мультивибраторы) — находится на стыке аналоговой и цифровой электроники. Шестая задача знакомит студентов со средой симуляции электронных схем, позволяющей проводить разработку и моделирование работы аппаратуры на ЭВМ. Четыре следующие (комбинационные логические схемы, триггеры, регистры и формирователи кода, сумматоры и счетчики) предназначены для знакомства с основными элементами цифровой схемотехники. Одинадцатая задача посвящена знакомству с различными системами счисления и целочисленной арифметикой. Последняя задача — цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи является очень важной для физиков-экспериментаторов, так как дает понимание условий, необходимых для стыковки аналоговых измерительных и исполнительных устройств с ЭВМ.

Первая часть пособия охватывает аналоговый раздел (задачи 1-6).

Задача 1.

Линейные RC-цепи

Изучаются частотные и импульсные характеристики цепочек, составленных из резисторов и конденсаторов.

1.1. Основные понятия

Напряжение между двумя точками — это энергия (работа), затрачиваемая на перемещение единичного положительного заряда из точки с низким потенциалом в точку с высоким потенциалом. Напряжение называют также разностью потенциалов или электродвижущей силой (э.д.с.). Напряжение всегда измеряется между точками схемы. Когда говорят о напряжении в какой-либо точке схемы — подразумевают напряжение между этой точкой и «землей», т.е. такой точкой схемы, потенциал которой всем известен и обычно считается нулевым.

Источник напряжения или *генератор напряжения* — двухполюсник, напряжение на зажимах которого постоянно (не зависит от тока в цепи).

Ток — это скорость перемещения электрического заряда в точке. Считается, что ток протекает от точки с более положительным потенциалом к точке с более отрицательным потенциалом, хотя электрон перемещается в противоположном направлении. Ток всегда протекает в точке схемы (через сечение проводника), или через какой-нибудь элемент схемы. Ток получается путем прикладывания напряжения между точками схемы.

Источник тока или *генератор тока* — двухполюсник, который создает ток, не зависящий от сопротивления нагрузки, к которой он присоединен.

Мгновенная (электрическая) мощность — произведение мгновенных значений напряжения и силы тока на каком-либо участке электрической цепи.

Различные элементы схемы могут обеспечивать взаимосвязь тока и напряжения. Для *резистора* — ток прямо пропорционален напряжению. Для *конденсатора* — ток пропорционален скорости изменения напряжения. *Катушка индуктивности* — обладает обратными свойствами, по сравнению с конденсатором. Напряжение на катушке индуктивности пропорционально скорости изменения тока в ней.

Линейные цепи — это цепи, для которых справедлив принцип суперпозиции: если на цепь действует несколько сигналов, то результат воздействия равен сумме воздействия отдельных сигналов.

Пассивные цепи — это цепи, пассивно откликающиеся на внешний сигнал, то есть не содержащие источников э.д.с. Энергия сигнала, проходящего через такую цепь не может увеличиваться.

Линейные пассивные цепи состоят из идеальных элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей) с постоянными сосредоточенными параметрами. Резисторы называют *активными сопротивлениями*, а конденсаторы и индуктивности — *реактивными сопротивлениями*.

Фильтр нижних частот — является схемой, которая без изменений передает сигналы низких частот, а на высоких частотах обеспечивает затухание сигналов и запаздывание их по фазе относительно входных сигналов.

Фильтр верхних частот — передает без изменения сигналы высоких частот, а на низких частотах обеспечивает затухание сигналов и опережение их по фазе относительно входных сигналов.

Полосовой фильтр или *полосно-пропускающий фильтр* — фильтр, который пропускает колебания, находящиеся в некоторой полосе частот. Он может быть представлен в виде последовательно включенных фильтра нижних частот и фильтра верхних частот.

Режекторный фильтр или *полосно-заграждающий фильтр* — фильтр, не пропускающий колебания некоторой определенной полосы частот, и пропускающий колебания с частотами, выходящими за пределы этой полосы. Заграждающий фильтр, предназначенный для подавления одной определенной частоты, называется *узкополосным заграждающим фильтром* или *фильтром-пробкой*.

Активный фильтр — вид аналоговых электронных фильтров, в котором присутствует один или несколько активных компонентов, к примеру транзистор или операционный усилитель.

Пассивный фильтр — фильтр, состоящий только из пассивных компонентов, таких как, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности. Пассивные фильтры не требуют никакого источника энергии для своего функционирования. В отличие от активных фильтров в пассивных фильтрах не происходит усиления сигнала по мощности. Практически всегда пассивные фильтры являются линейными.

Простейшими фильтрами первого порядка называются цепочки, содержащие активное сопротивление и один реактивный элемент (емкость или индуктивность), включенные последовательно или параллельно.

Простейшие фильтры второго порядка — это цепочки, содержащие две реактивности разного знака: индуктивность и емкость.

1.2. Прохождение гармонического сигнала

Импеданс или *комплексное сопротивление* — отношение комплексной амплитуды напряжения гармонического сигнала, прикладываемого к двухполюснику, к комплексной амплитуде тока, протекающего через двухполюсник.

Метод комплексных амплитуд — метод расчета линейных электрических цепей в установившемся режиме при гармонических входных сигналах. Все токи и напряжения рассматриваются в виде комплексных амплитуд, а для реактивных элементов определяется их комплексный импеданс. Токи и напряжения могут быть записаны

следующим образом:

$$I(t) = I_0 e^{j\omega t + \varphi_I} = I(\omega) e^{j\omega t}, \quad U(t) = U_0 e^{j\omega t + \varphi_U} = U(\omega) e^{j\omega t}, \quad (1.1)$$

где I_0 , U_0 — амплитуды, φ_I , φ_U — начальные фазы, $I(\omega)$, $U(\omega)$ — комплексные амплитуды токов и напряжений; ω — круговая частота, j — мнимая единица.

Для активного сопротивления R связь между током и напряжением выражается законом Ома:

$$U(t) = R I(t), \quad U(\omega) = R I(\omega). \quad (1.2)$$

Для конденсатора емкостью C :

$$U(t) = \frac{1}{C} \int I(t) dt, \quad U(\omega) = \frac{1}{j\omega C} I(\omega). \quad (1.3)$$

Для индуктивности L :

$$U(t) = L \frac{dI(t)}{dt}, \quad U(\omega) = j\omega L I(\omega). \quad (1.4)$$

Здесь величины R , $\frac{1}{j\omega C}$ и $j\omega L$ являются импедансом (или комплексным сопротивлением) и обозначаются $Z(\omega)$.

Для любой линейной цепи:

$$U(\omega) = Z(\omega) I(\omega). \quad (1.5)$$

Правила сложения импедансов аналогичны правилам для омических сопротивлений. При последовательном включении $Z = Z_1 + Z_2$, при параллельном — $1/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$.

При подаче гармонического сигнала на линейную пассивную цепь (четырёхполюсник), напряжение на ее выходе будет гармоническим, но может отличаться от входного по амплитуде и фазе. Связь между напряжениями на выходе и входе цепи описывается *коэффициентом передачи* или *передаточной функцией*:

$$K(\omega) = |K(\omega)| e^{j\varphi(\omega)} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(\omega)}{U_{\text{ВХ}}(\omega)}, \quad (1.6)$$

где $|K(\omega)|$ и $\varphi(\omega) = \arg(K(\omega))$ показывают как меняется амплитуда и фаза сигнала при прохождении через цепь, $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ — комплексные амплитуды напряжений на входе и выходе цепи.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — зависимость амплитуды гармонического сигнала на выходе по сравнению с амплитудой на входе от частоты, определяется модулем коэффициента передачи $|K(\omega)|$.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) — зависимость разности фаз между выходным и входным сигналами от частоты сигнала, определяется фазовой составляющей коэффициента передачи $\arg K(\omega)$.

Крутизна частотной характеристики фильтра показывает, насколько резко происходит уменьшение амплитуды выходного сигнала фильтра при изменении частоты входного сигнала (вне полосы пропускания). Для фильтра первого порядка крутизна составляет -6 децибел на октаву (-20 децибел на декаду). Фильтр нижних (верхних) частот второго порядка имеет крутизну -12 децибел на октаву, третьего — крутизну -18 децибел на октаву, и т.д.

Переход к частотному представлению позволяет упростить задачу анализа цепи на выбранной частоте. Комплексные амплитуды трактуются как «постоянные» токи и напряжения, а импедансы реактивных сопротивлений — как обычные сопротивления.

1.3. Простейшие RC-цепи

Простейшими RC-цепями являются дифференцирующая и интегрирующая цепочки.

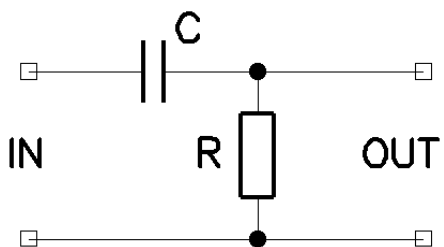


Рис. 1.1. Фильтр верхних частот

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 аудио сигналов. Еще одно важное применение фильтра верхних частот — устранение лишь постоянной составляющей сигнала.

ла, для чего частоту среза выбирают достаточно низкой, значительно ниже минимальной частоты полезного сигнала.

АЧХ и ФЧХ фильтра верхних частот приведены на рис. 1.2. Комплексный коэффициент передачи по напряжению равен:

$$K(\omega) = \frac{R}{R + 1/(j\omega C)}. \quad (1.7)$$

Частота среза находится по уровню -3 дБ от максимального коэффициента передачи и рассчитывается по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (1.8)$$

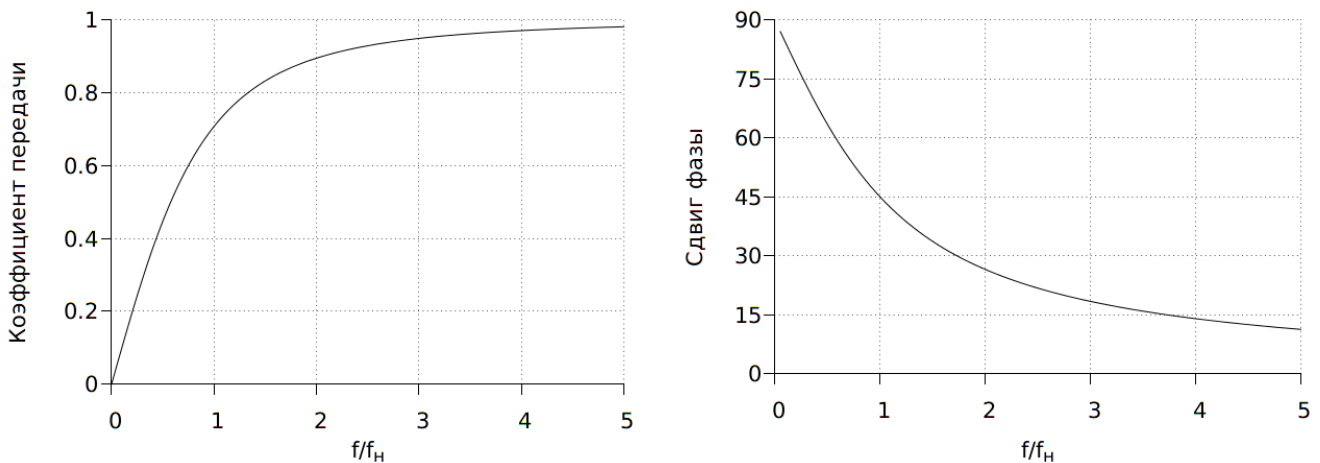


Рис. 1.2. АЧХ и ФЧХ фильтра верхних частот

Формула (1.8) 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:

$$R_{\text{ген}} \ll R \ll R_{\text{осц}}, \quad C \gg C_{\text{осц}}, \quad (1.9)$$

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. 1.3. 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 (1.8). Требования по выбору R аналогичны предыдущему случаю (1.9).

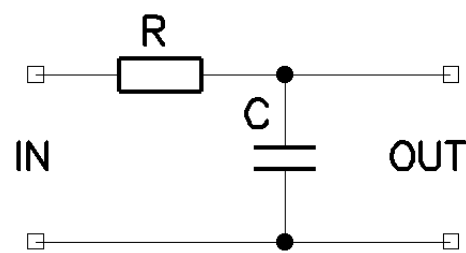


Рис. 1.3. Фильтр нижних частот

АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот приведены на рис. 1.4. Комплексный коэффициент передачи по напряжению равен:

$$K(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}. \quad (1.10)$$

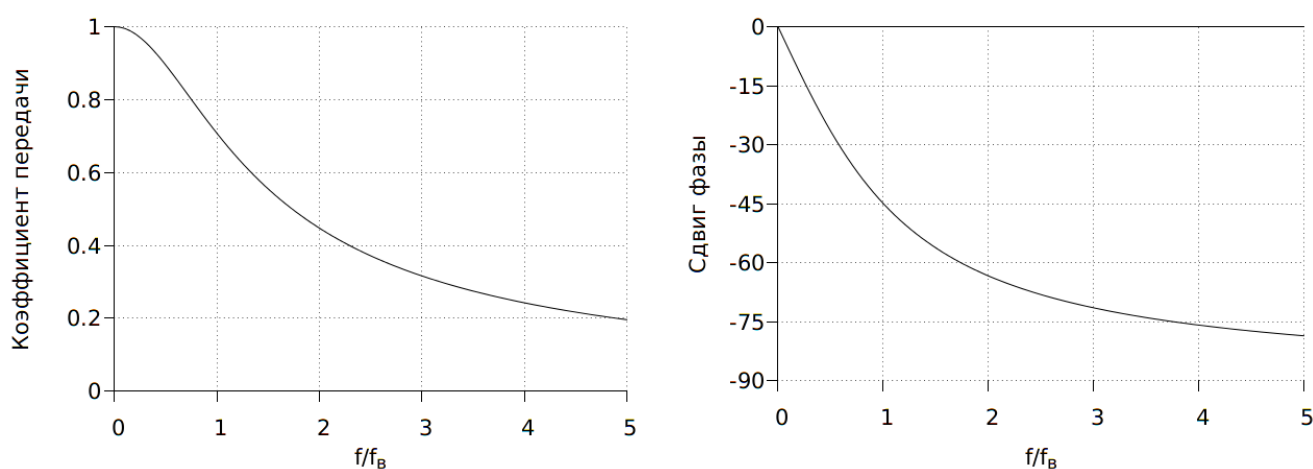


Рис. 1.4. АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот

1.4. Спектральный и временной методы анализа

Спектральный метод предполагает, что практически любая периодическая функция $F(t)$, описывающая радиосигналы, может быть представлена с помощью преобразования Фурье в виде гармониче-

ских составляющих:

$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n(n\Omega)e^{jn\Omega t}, \quad (1.11)$$

где $\Omega = 2\pi f = 2\pi/T$ — частота повторения функции F , а C_n — спектральные составляющие сигнала:

$$C_n(n\Omega) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t)e^{-jn\Omega t} dt. \quad (1.12)$$

Спектр периодической функции дискретен, причем расстояние между гармониками по частоте равно $f = 1/T$, а амплитуды гармоник уменьшаются при $|n| \rightarrow \infty$ быстрее, чем $1/n^2$.

Величина

$$S_n(n\Omega) = \frac{C_n(n\Omega)}{\Omega} = \frac{1}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} F(t)e^{-jn\Omega t} dt \quad (1.13)$$

(с точностью до коэффициента 2π в зависимости от определения) называется спектральной характеристикой или спектральной функцией сигнала.

В случае непериодической функции, удовлетворяющей условию

$$\int_{-\infty}^{\infty} |F(t)| dt < \infty, \quad (1.14)$$

можно использовать прямое интегральное преобразование Фурье:

$$S_n(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (1.15)$$

Спектр непериодического сигнала непрерывен.

Обратное преобразование Фурье позволяет решить задачу нахождения формы сигнала по известному спектру:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (1.16)$$

Для выяснения воздействия периодической функции на линейную электрическую цепь можно найти набор ее спектральных составляющих, ограничившись конечным набором гармоник (игнорируя

гармоники, вклад которых стремиться к нулю), для каждой гармоники найти коэффициент передачи схемы, затем выполнить обратное преобразование.

Для анализа воздействия на линейные электрические цепи ряда непериодических функций, а так же отдельных импульсных сигналов, значительно проще может оказаться временной подход. Он заключается в составлении и решении дифференциального уравнения, на основе формул (1.2), (1.3) и (1.4).

Рассмотрим воздействие прямоугольного импульса на RC-цепь, состоящую из последовательно включенных резистора и конденсатора (рис. 1.3). Форма напряжения на конденсаторе определяется тем, насколько он успевает зарядиться за время действия входного импульса и насколько разрядиться после его окончания. Напряжение на конденсаторе может быть получено из решения дифференциального уравнения, составленного из формул (1.2) и (1.3):

$$U_{\text{вх}} = U_C + RC \frac{dU_C}{dt}, \quad (1.17)$$

где $U_{\text{вх}}$ — входное напряжение, а U_C — напряжение на конденсаторе. Если в момент времени $t = 0$ на цепочку будет подан импульс напряжением U_0 , то форма напряжения на конденсаторе будет описываться выражением

$$U_C = U_0(1 - e^{-t/RC}), \quad (1.18)$$

а на сопротивлении

$$U_R = U_0 e^{-t/RC}. \quad (1.19)$$

За время $t = RC$ напряжение на конденсаторе составит около 63% значения U_0 , за время $t = 3RC$ — примерно 95%.

1.5. Практическая часть

Задача выполняется на макетной плате, страница 73.

Параметры: частота среза RC цепочки f .

Упражнения:

1. Рассчитать и 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 по экрану осциллографа.
2. Посмотреть работу схемы при подаче на вход импульсного сигнала прямоугольной и треугольной формы разной длительности, зарисовать форму сигнала на выходе.
3. Собрать фильтр нижних частот, повторить измерения, аналогично пп. 1 и 2.
4. Построить графики зависимости АЧХ обоих фильтров в одних и тех же координатных осях, в логарифмическом масштабе, с учетом ошибок измерений. Нанести теоретические кривые. Сравнить экспериментальные и теоретические кривые.
5. То же для ФЧХ обоих фильтров.

1.6. Контрольные вопросы

1. Что такое источник тока, источник напряжения? Как измеряется ток и напряжение?
2. Что такое резистор, конденсатор, катушка индуктивности, активное и реактивное сопротивление?
3. Как изменяется сопротивление, емкость и индуктивность при последовательном или параллельном включении?
4. Как устроены и работают простейшие фильтры нижних и верхних частот первого порядка?
5. Как ведут себя АЧХ и ФЧХ фильтров нижних и верхних частот?
6. Как устроены и какие бывают фильтры второго и более порядков, полосовые фильтры?

Задача 2.

Усилитель низкой частоты на биполярном транзисторе

Изучается работа усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе.

2.1. Основные понятия

Усилители являются важными составными частями многих радиоэлектронных устройств. Усиление мощности полезного сигнала осуществляется за счет энергии сторонних источников — в большинстве случаев источника питания. Именно способность увеличивать мощность сигнала отличает усилители от других устройств, например трансформаторов, в которых повышение тока или напряжения происходит без увеличения мощности.

Усилители низкой (звуковой) частоты широко используются в радиопередающих и радиоприемных устройствах, звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре, в измерительных приборах.

Коэффициентом передачи усилителя называется отношение величины сигнала на выходе к величине сигнала на входе усилителя. Различают коэффициенты передачи по напряжению K , току K_I и мощности K_P . Если фаза выходного сигнала не совпадает с фазой входного, то коэффициенты передачи по току и напряжению становятся комплексными.

Ширина полосы пропускания усилителя определяется границами диапазона:

$$\Delta\omega = \omega_{\text{в}} - \omega_{\text{н}}, \quad (2.1)$$

где $\omega_{\text{в}}$ и $\omega_{\text{н}}$ — верхняя и нижняя частоты, на которых коэффициент усиления на 3 дБ (в 2 раза по мощности или в $\sqrt{2}$ раз по напряжению или току) отличается относительно коэффициента усиления на квазирезонансной частоте $\omega_0 = \sqrt{\omega_{\text{в}}\omega_{\text{н}}}$. Могут использоваться и другие критерии.

Входное и выходное сопротивление — комплексные величины, определяемые как отношение напряжения к току на входе и выходе усилителя. Для усилителя на транзисторе из-за его внутренних связей может наблюдаться небольшая зависимость входного сопротивления усилителя от нагрузки, подключенной к его выходу, а также выходного сопротивления усилителя от внутреннего сопротивления источника сигнала, подключенного ко входу.

Согласование внутренних сопротивлений источника и приемника сигнала является очень важным для оптимальной передачи сигнала:

- $Z_{\text{источника}} = Z_{\text{приемника}}^*$ — согласование по мощности,
- $|Z_{\text{источника}}| \gg |Z_{\text{приемника}}|$ — по току,
- $|Z_{\text{источника}}| \ll |Z_{\text{приемника}}|$ — по напряжению.

(Символ * означает комплексное сопряжение.)

Максимальное выходное напряжение (ток, мощность) — параметры, определяемые конструкцией схемы усилителя, используемыми элементами и источником питания.

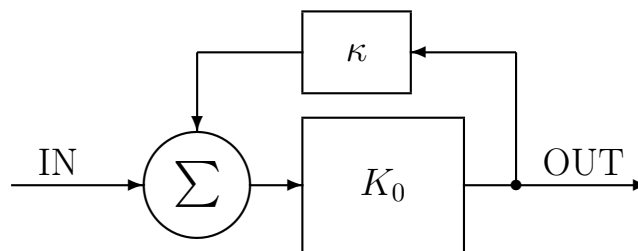


Рис. 2.1. Структурная схема усилителя с обратной связью (K_0 — коэффициент передачи усилителя без обратной связи, κ — коэффициент передачи цепи обратной связи)

Обратная связь — подача части напряжения или тока с выхода усилителя на его вход, где происходит сложение с входным сигналом (рис. 2.1). Если цепь обратной связи не содержит активных элементов или трансформаторов, то коэффициент передачи петли обратной связи κ (комплексная величина) по модулю меньше 1.

Напряжение на выходе и на входе связаны между собой следующим образом:

$$U_{OUT} = K_0(U_{IN} + \kappa U_{OUT}).$$

Коэффициент передачи усилителя с обратной связью рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{K_0}{1 - \kappa K_0}, \quad (2.2)$$

где K_0 — коэффициент усиления без обратной связи.

В случае, когда цепь обратной связи подключается к инвертирующему входу усилителя формула (2.2) для общего коэффициента усиления запишется в виде:

$$K = \frac{K_0}{1 + \kappa' K_0}. \quad (2.3)$$

Обе формы записи могут встречаться в различной литературе.

Положительная обратная связь (ПОС) — образуется в том случае, когда сигналы источника и обратной связи отличаются по фазе не более чем на 90° или $|\arg(\kappa K_0)| < \pi/2$. При этом реальная часть произведения κK_0 положительна.

Отрицательная обратная связь (ООС) — возникает, когда сигналы источника и обратной связи отличаются по фазе более чем на 90° , то есть $|\arg(\kappa K_0)| > \pi/2$, а реальная часть произведения κK_0 отрицательна.

На собственный коэффициент передачи усилителя K_0 могут влиять множество факторов, связанных с изменениями параметров радиодеталей (в основном транзисторов) из-за старения с течением времени, внешних факторов (например температуры, стабильности питающего схему напряжения). Влияние этих и других негативных факторов может быть уменьшено путем введения ООС. Так как ООС обычно состоит из пассивных элементов, величина κ достаточно стабильна. В этом случае из (2.2) следует, что относительные изменения коэффициента усиления будут меньше в $1 - \kappa K_0 = K_0/K$ раз:

$$\frac{dK}{K} = \frac{dK_0}{K_0} \frac{1}{1 - \kappa K_0} = \frac{dK_0}{K_0} \frac{K}{K_0}. \quad (2.4)$$

Особо следует отметить, что ООС может приводить к увеличению широкополосности усилителя в случае, когда K_0 сильно зависит от частоты.

Для случая глубокой ООС, когда $|\kappa K_0| \gg 1$ усиление мало зависит от собственного коэффициента усилителя K_0 , то есть целиком определяется отрицательной обратной связью и формула (2.2) переходит в приближенное выражение:

$$K \approx -\frac{1}{\kappa}. \quad (2.5)$$

Различаются четыре типа ООС (рис. 2.2) — последовательное или параллельное включение относительно сопротивления нагрузки и последовательное или параллельное включение с источником сигнала (генератором).

Связью по току или *связью по напряжению* — называется последовательное или параллельное включение цепи обратной связи с нагрузкой. Включение по току приводит к росту, а по напряжению — к уменьшению выходного сопротивления в K_0/K раз:

$$Z_{\text{вых, по току}} = Z_{\text{вых,0}} \frac{K_0}{K}, \quad Z_{\text{вых, по напр.}} = Z_{\text{вых,0}} \frac{K}{K_0}, \quad (2.6)$$

где $Z_{\text{вых,0}}$ — выходное сопротивление усилителя без ООС.

Последовательной или *параллельной обратной связью* — называется последовательное (параллельное) включение цепи обратной связи с источником сигнала. Последовательная ООС применяется в тех случаях, когда сопротивление источника сигнала значительно меньше входного сопротивления усилителя — источник сигнала является генератором напряжения, а выходное сопротивление цепи ООС много меньше входного сопротивления усилителя. Если же источник сигнала является генератором тока с сопротивлением много большим входного сопротивления усилителя — применяется параллельная ООС, выходное сопротивление которой много больше входного сопротивления усилителя.

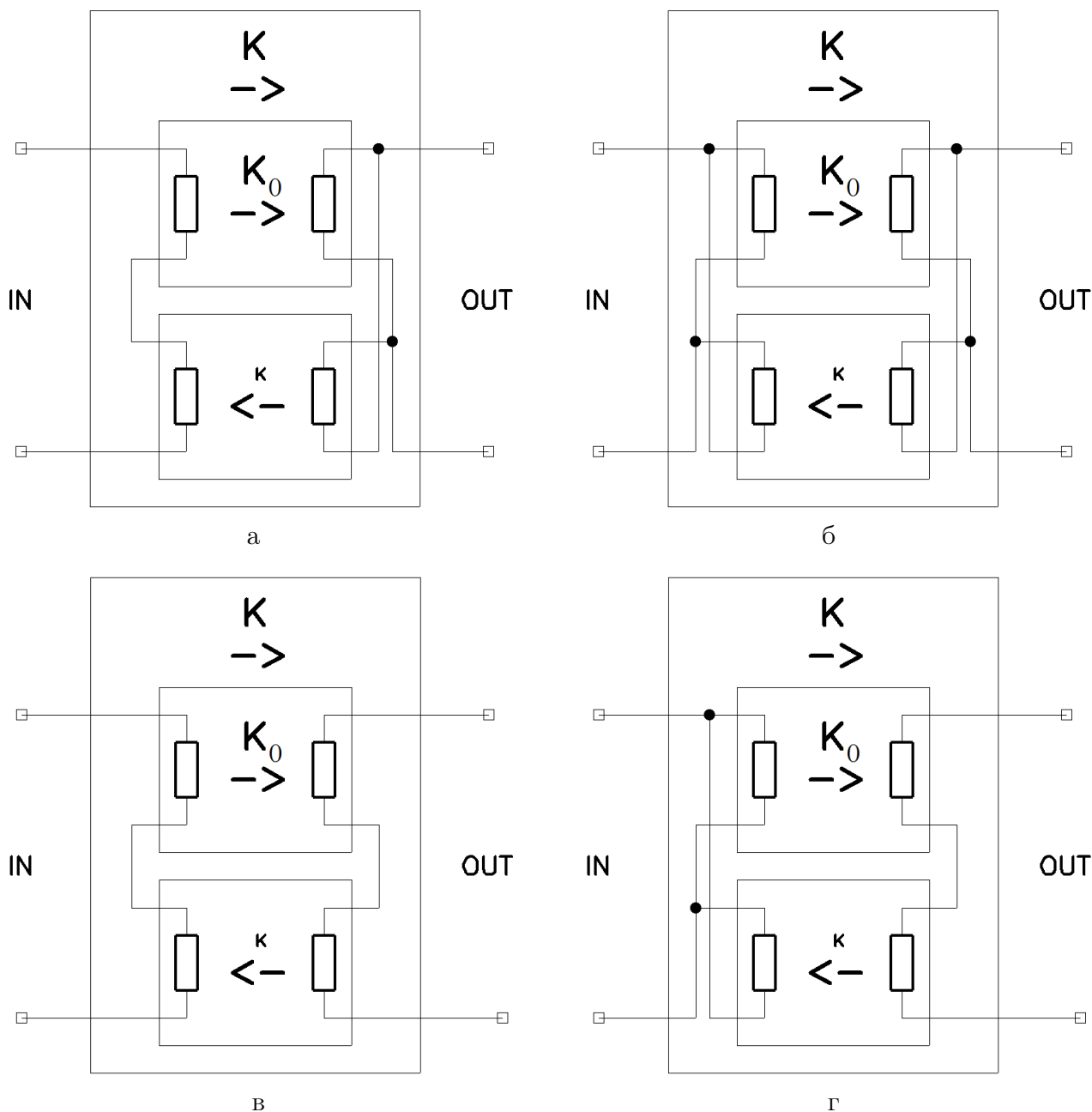


Рис. 2.2. Типы включения цепей обратной связи в усилителях (а — последовательная обратная связь по напряжению, б — параллельная по напряжению, в — последовательная по току, г — параллельная по току)

2.2. Биполярный транзистор

Биполярный транзистор — полупроводниковый прибор, состоящий из трех слоев (эмиттер, база, коллектор) с чередующимися типами проводимости. На границах слоев образуются два р-п перехода: эмиттерный и коллекторный, между которыми существует взаимодействие через базу. Благодаря этому ток одного из переходов может управлять током другого. Принцип работы основан на инжек-

ции неосновных носителей заряда в базу, которая сопровождается компенсацией их заряда основными носителями.

Рассмотрим работу транзистора структуры n-p-n.

Активный режим — эмиттерный переход смещен в прямом, а коллекторный в обратном направлении, выходной ток пропорционален входному:

$$U_{к-э} > U_{б-э} > 0. \quad (2.7)$$

Этот режим является рабочим для аналоговых схем.

Режим насыщения — оба p-n перехода смещены в прямом направлении, эмиттерный и коллекторный токи независимы друг от друга:

$$U_{б-э} > 0, \quad U_{к-б} < 0. \quad (2.8)$$

Режим отсечки — оба p-n перехода смещены в обратном направлении, транзистор заперт:

$$U_{б-э} \leq 0, \quad U_{к-б} > 0. \quad (2.9)$$

Инверсный режим — коллекторный переход смещен в прямом, а эмиттерный в обратном направлении:

$$U_{б-э} < 0, \quad U_{к-б} < 0. \quad (2.10)$$

Инверсный режим нельзя считать полностью эквивалентным активному режиму, так как эмиттер и коллектор не идентичны по параметрам. При изготовлении слой эмиттера сильно легируют для создания высокой эффективности инжекции носителей. Коллекторный слой обычно легирован слабее, зато имеет большую площадь в области p-n перехода, что повышает способность коллектора вытягивать неосновные носители, поступившие в базу.

Статические коэффициенты передачи тока — одни из основных параметров транзистора:

$$\alpha_0 = I_{к}/I_{э}, \quad B = I_{к}/I_{б}. \quad (2.11)$$

Дифференциальные параметры транзистора определяют усиление транзистора по переменному току

$$\alpha = \Delta I_{к}/\Delta I_{э}, \quad \beta = \Delta I_{к}/\Delta I_{б}, \quad (2.12)$$

объемное сопротивление базы r_b и дифференциальные сопротивления переходов r_{ε} , r_k .

Барьерная емкость — емкость запертого р-п перехода. Она связана с неподвижными зарядами на границах обедненных слоев. Барьерная емкость составляет основную часть емкости коллекторного перехода C_k , смещенного в обратном направлении при активном режиме транзистора.

Диффузная емкость — связана с зарядами носителей тока. Величина этой емкости пропорциональна току, проходящему через р-п переход и преобладает в емкости эмиттерного перехода C_{ε} .

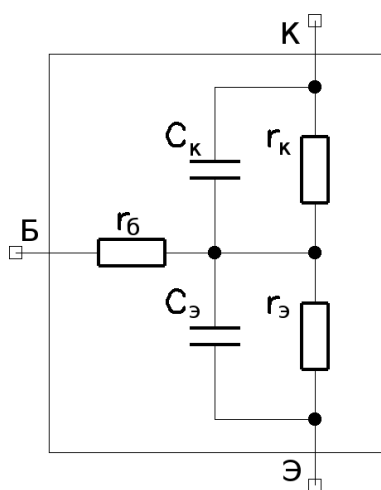


Рис. 2.3. Эквивалентная схема транзистора

Эквивалентная схема транзистора изображена на рис. 2.3. Примерные значения параметров транзистора:

- коэффициенты усиления

$$\alpha_0 \approx \alpha \sim 0,99, \quad B \approx \beta \sim 100 \div 1000;$$

- внутренние сопротивления

$$r_{\varepsilon} \sim 10 \text{ Ом}, \quad r_b \sim 100 \text{ Ом}, \quad r_k \sim 1 \text{ МОм};$$

- значения паразитных емкостей эмиттера (C_{ε}) — сотни пФ, коллектора (C_k) — единицы или десятки пФ.

Метод линейных четырехполюсников позволяет описать работу транзистора в электронной схеме при прохождении малых сигналов низкой частоты. Четырехполюсник характеризуется связью четырех величин — входных и выходных напряжений (U_1 , U_2) и токов (I_1 , I_2), из которых только две являются независимыми. Распространены три формы записи уравнений:

1. Z -параметры сопротивления. Входное и выходное напряжение выражается через токи.
2. Y -параметры проводимости. Входной и выходной токи выражаются через напряжения.

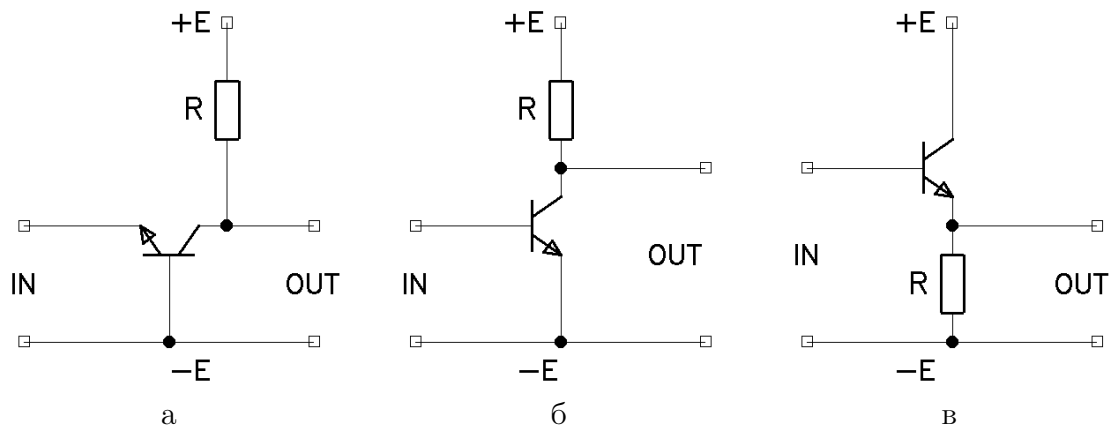


Рис. 2.4. Три схемы включения транзистора (а — с общей базой, б — с общим эмиттером, в — с общим коллектором)

3. h -параметры. Входное напряжение и выходной ток выражаются через входной ток и выходное напряжение.

Чаще всего используется система h -параметров по причине простоты их экспериментального определения. Эта система находит широкое применение для анализа электронных схем на низких частотах, когда влиянием внутренних реактивных параметров транзистора можно пренебречь. Для малых изменений тока и напряжения уравнения четырехполюсника записываются в виде:

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2, \quad I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2, \quad (2.13)$$

где h_{11} и h_{21} — входное сопротивление и коэффициент передачи тока при закороченном выходе ($U_2 = 0$), h_{12} и h_{22} — коэффициент обратной связи по напряжению и выходная проводимость при разомкнутом входе ($I_1 = 0$).

Различают три основные схемы включения транзистора (рис. 2.4).

1. Схема с *общей базой* позволяет получить большое усиление по напряжению, но не усиливает ток. По сравнению с другими схемами она имеет наименьшее входное и сравнительно большое выходное сопротивление, что соответствует *источнику тока, управляемому током*. Фазы входного и выходного сигнала совпадают. Уравнения четырехполюсника записываются следующим образом:

$$U_{\text{э}} = h_{11\text{б}}I_{\text{э}} + h_{12\text{б}}U_{\text{к}},$$

$$I_K = h_{216}I_{\text{э}} + h_{226}U_K,$$

где $h_{116} = r_{\text{э}} + r_{\text{б}}(1 - \alpha)$, $h_{126} \approx r_{\text{б}}/r_K$, $h_{216} \approx -\alpha$, $h_{226} = 1/r_K$.

2. Схема с *общим эмиттером* обладает большим усилением как по току, так и по напряжению. Входное и выходное сопротивления сравнительно велики, а транзистор можно рассматривать как *источник тока, управляемый напряжением*. Выходной сигнал находится в противофазе с входным. Уравнения четырехполюсника:

$$U_{\text{б}} = h_{11\text{э}}I_{\text{б}} + h_{12\text{э}}U_K,$$

$$I_K = h_{21\text{э}}I_{\text{б}} + h_{22\text{э}}U_K,$$

где $h_{11\text{э}} = r_{\text{б}} + r_{\text{э}}/(1 - \alpha)$, $h_{12\text{э}} = (1 + \beta)r_{\text{э}}/r_K$, $h_{21\text{э}} = \beta$, $h_{22\text{э}} = (1 + \beta)/r_K$.

3. Схема с *общим коллектором* усиливает ток, но не усиливает напряжение. Усиление по току почти такое же, как в схеме с общим эмиттером. В этом включении транзистор обладает наибольшим входным и наименьшим выходным сопротивлением и его можно рассматривать как *источник напряжения, управляемый напряжением*. Выходное напряжение повторяет входное по форме, амплитуде и фазе, поэтому такую схему называют эмиттерным повторителем. Схема часто используется для согласования высокоомного источника с низкоомной нагрузкой. Уравнения четырехполюсника:

$$U_{\text{б}} = h_{11\text{к}}I_{\text{б}} + h_{12\text{к}}U_{\text{э}},$$

$$I_{\text{э}} = h_{21\text{к}}I_{\text{б}} + h_{22\text{к}}U_{\text{э}},$$

где $h_{11\text{к}} = r_{\text{б}} + r_{\text{э}}/(1 - \alpha)$, $h_{12\text{к}} \approx 1$, $h_{21\text{к}} \approx -\beta$, $h_{22\text{к}} = (1 + \beta)/r_K$.

2.3. Расчет схемы усилителя низкой частоты

На рисунке 2.5 изображена схема усилителя на pnp-транзисторе, включенного по схеме с общим эмиттером. Сопротивления R1 и R2 задают напряжение смещения на базе транзистора. Сопротивление

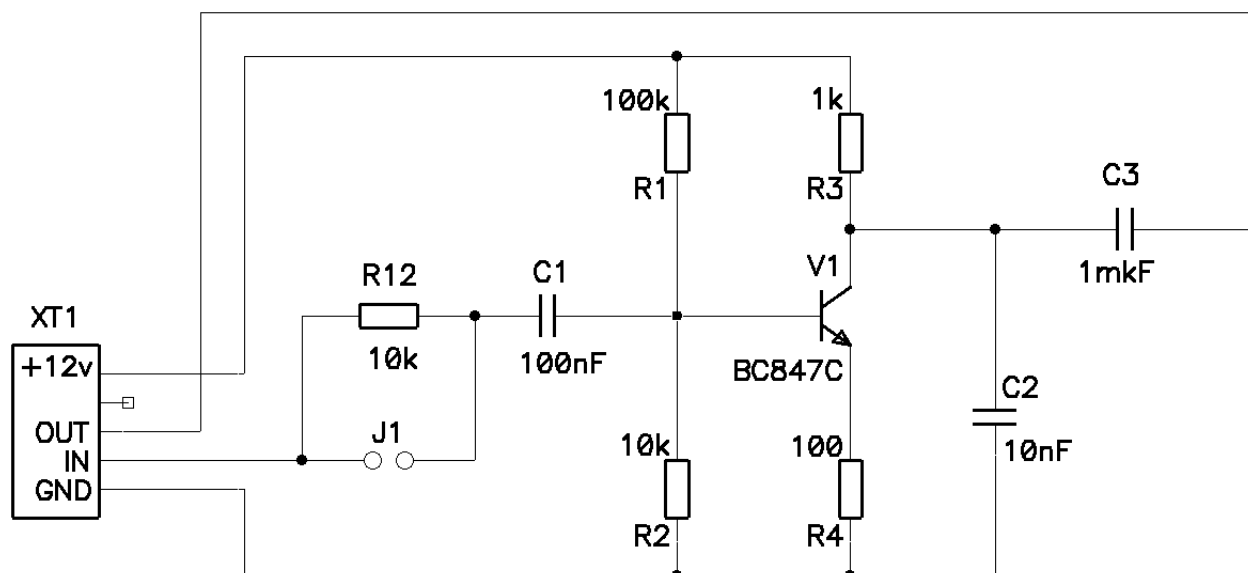


Рис. 2.5. Усилитель низкой частоты на биполярном pnp транзисторе. Контакты разъема XT1: GND — общий провод, IN и OUT — вход и выход усилителя, +12v — напряжение питания. Переключатель J1 позволяет отключать дополнительное сопротивление R12

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 переключатель 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_{Π} . 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 быть равен току, протекающему через резистор R3:

$$I_K = E_{\Pi} / (2 R_3).$$

У идеального транзистора ток базы бесконечно мал, а ток эмиттера равен току коллектора, поэтому:

$$U_э = E_п R4/(2 R3).$$

Напряжение на переходе база-эмиттер кремниевого маломощного транзистора, находящегося в активном режиме, составляет приблизительно 0,66 В. Следовательно напряжение на базе должно быть:

$$U_б = 0,66 + E_п R4/(2 R3). \quad (2.14)$$

Это напряжение должно задаваться делителем из сопротивлений R1 и R2:

$$U_б = E_п R2/(R1 + R2). \quad (2.15)$$

Сравнивая (2.14) и (2.15) получим значение R1:

$$R1 = \frac{E_п R2}{0,66 + (E_п R4/2 R3)} - R2 = R2 \left(\frac{1}{(0,66/E_п) + (R4/2 R3)} - 1 \right). \quad (2.16)$$

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):

$$K = R3/R4. \quad (2.17)$$

Выходное сопротивление усилителя полностью определяется значением сопротивления R3. Входное сопротивление приблизительно равно $R_{вх} = R1 R2/(R1 + R2) \approx R2$, так как R1 обычно в несколько раз больше R2, а транзистор считается идеальным. Таким образом:

$$R2 = \frac{1}{1/R_{вх} - 1/R1}, \quad R3 = R_{вых}. \quad (2.18)$$

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:

$$C1 = \frac{1}{2\pi f_н R2}, \quad C2 = \frac{1}{2\pi f_в R3}, \quad (2.19)$$

где f_n и f_v — 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:

$$C3 \gg \frac{1}{2\pi f_n R3}. \quad (2.20)$$

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 β 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 β раз меньше токов эмиттера и коллектора:

$$\frac{E_{\pi}}{R1 + R2} \gg \frac{E_{\pi}}{2\beta R3}.$$

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

$$R1 \ll 1000 R3. \quad (2.21)$$

3. Входное сопротивление транзистора должно быть много больше $R2$, иначе его придется учитывать при расчете входного сопротивления усилителя. Поскольку $R_{тр} = r_6 + (1 + \beta)(r_э + R4)$, где r_6 и $r_э$ — внутренние сопротивления базы и эмиттерного перехода транзистора, имеем $R2 \ll \beta R4$ или

$$R2 \ll 500 R4. \quad (2.22)$$

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

$$R2 \gg 50 \text{ Ом.} \quad (2.23)$$

2.4. Практическая часть

Задача выполняется на печатной плате (стр. 74). Используется часть платы, помечанная цифрой 2.

Параметры: коэффициент усиления K , входное сопротивление $R_{\text{вх}}$, выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$, частоты среза $f_{\text{н}}$, $f_{\text{в}}$. Напряжение питания для схемы $E_{\text{п}} = 12 \text{ В}$.

Упражнения:

1. Вывести формулы для расчета сопротивлений $R1$ и $R2$, если условия (2.21) и/или (2.21) не выполняется. Оценить напряжение на коллекторе транзистора, если установить в схему сопротивление $R1$, рассчитанное по формуле (2.16).
2. Рассчитать значения всех элементов схемы.
3. Смонтировать детали (кроме резистора $R12$). Подключить схему к источнику питания, установив на последнем напряжение 12 В. Проверить работу схемы по постоянному току, для чего измерить напряжение на коллекторе транзистора и убедиться, что оно близко к половине напряжения питания, то есть к 6 В.
4. Установить на генераторе напряжение 100 мВ. Смонтировать сопротивление $R12$ (равное по значению сопротивлению $R2$) и измерить амплитуду и фазу напряжения в точке соединения резистора $R12$ и конденсатора $C1$ для частот $f_{\text{н}}$, $f_{\text{в}}$ и $f_0 = \sqrt{f_{\text{н}} f_{\text{в}}}$. Рассчитать значение внутреннего сопротивления усилителя по входу на каждой частоте (активное и реактивное).
5. Замкнуть перемычку $J1$ и измерить АЧХ и ФЧХ усилителя по логарифмической шкале в диапазоне от 20 Гц до 5 МГц.

Построить графики для АЧХ и ФЧХ. По графикам определить нижнюю и верхнюю частоты среза, а так же усиление на частоте f_0 . Сравнить с заданными значениями f_n , f_v и K .

6. Установить на генераторе частоту f_0 . Увеличивая напряжение сигнала на генераторе от начального значения 50 мВ измерить зависимость напряжения на выходе усилителя от входного. Зафиксировать форму сигнала при появлении видимых на глаз искажений. Построить графики зависимости выходного напряжения от напряжения на входе усилителя (на графике с общей осью входного напряжения).

2.5. Контрольные вопросы.

1. Каково устройство биполярного транзистора и принцип работы? Какова зависимость токов базы, коллектора, эмиттера от параметров транзистора?
2. Чем отличаются различные режимы работы биполярного транзистора?
3. Каковы три основные схемы включения биполярного транзистора?
4. Как меняются входное и выходное сопротивление в зависимости от схемы включения транзистора?
5. Каковы особенности схемы включения транзистора с общим эмиттером?
6. Каковы приблизительные значения внутренних сопротивлений и паразитных емкостей транзистора?

Задача 3.

Операционный усилитель

Изучаются основные характеристики микросхемы операционного усилителя (ОУ), а так же усилителя низкой частоты, собранного на основе ОУ.

3.1. Основные понятия

Операционный усилитель — микросхема, состоящая из нескольких транзисторов, имеющая два входа (инвертирующий и неинвертирующий) и один выход. Представляет собой усилитель постоянного тока, обладающий высоким коэффициентом усиления, высоким входным и низким выходным сопротивлением.

Операционный усилитель состоит из входного дифференциального каскада, имеющего высокое входное сопротивление, нескольких промежуточных каскадов, обеспечивающих общий высокий коэффициент усиления, и выходного каскада с низким выходным сопротивлением. Кроме того, как правило в схему ОУ входят специальные цепи, защищающие выход операционного усилителя от короткого замыкания.

Дифференциальный каскад (рис. 3.1) — основа операционного усилителя, 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:

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

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 в дифференциальном каскаде.

Операционный усилитель предназначен для работы с входными сигналами, значения которых относительно общего провода могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Для этого питание операционного усилителя производят от двуполярного (относительно общего провода) источника постоянного напряжения.

Большинство микросхем ОУ рассчитаны на работу с источни-

ком питания, напряжением ± 12 или ± 15 В. Есть операционные усилители и на другое напряжение питания, в том числе и однополярное.

Старые микросхемы ОУ имели небольшой разброс параметров — транзисторов V1 и V2, резисторов R1 и R3. В этом случае, в схему дифференциального каскада вводились внешние схемы балансировки. Современные микросхемы ОУ, как правило, балансировки не требуют.

Собственный коэффициент усиления операционного усилителя K_0 по постоянному току в большинстве случаев лежит в диапазоне от 10^3 до 10^5 . На переменном токе с ростом частоты наблюдается снижение K_0 . Это обусловлено влиянием «паразитных» емкостей переходов коллектор-база транзисторов, входящих в состав микросхемы. Кроме

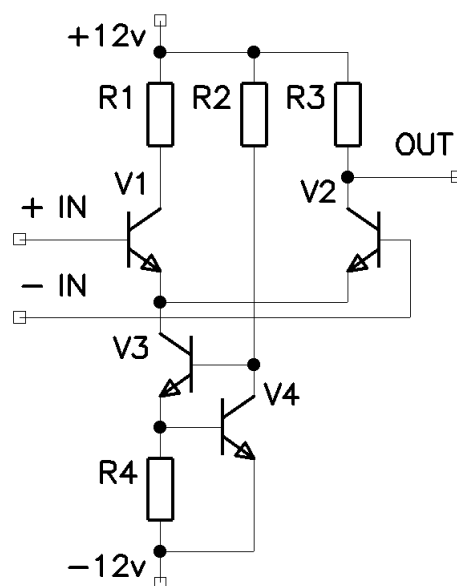


Рис. 3.1. Пример дифференциального каскада на биполярных транзисторах.

того, влияние паразитных емкостей приводит к дополнительному фазовому сдвигу выходного сигнала относительно входного. Для устранения этого эффекта собственную частотную характеристику корректируют, вводя в его схему шунтирующие конденсаторы. К сожалению, это еще больше снижает собственный коэффициент усиления микросхемы на высоких частотах. Обычно частотный ход K_0 подобен интегрирующей RC-цепочке первого порядка:

$$K_0(\omega) = \frac{K_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_B}}, \quad (3.1)$$

где ω_B имеет тот же смысл, что и для RC-цепочки.

Частота единичного усиления f_1 — частота, на которой собственный коэффициент усиления ОУ становится практически равным 1. Перейдя в формуле (3.1) от круговых к обычным частотам и введя обозначение $f_1 = K_0 f_B$, получим:

$$|K_0(f)| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \left(K_0 \frac{f}{f_1}\right)^2}}. \quad (3.2)$$

Типичные значения частоты единичного усиления для операционного усилителя лежат в диапазоне от одного до нескольких МГц, а f_B — десятки Гц.

Максимальная скорость нарастания выходного напряжения определяется по отношению приращения выходного напряжения ко времени при реакции ОУ на воздействие скачка напряжения на входе. Для измерения берут наклон линейного участка отклика, в интервале от 0,1 до 0,9 максимального значения.

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 собственного коэффициента усиления ОУ), используют схему с обратной связью, когда инвертирующий вход усилителя соединяется с его выходом через делитель напряжения. Такая связь называется

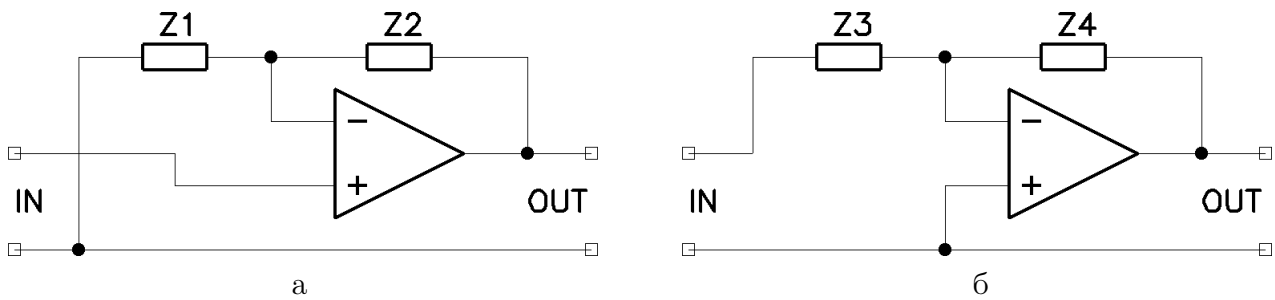


Рис. 3.2. Схема включения операционного усилителя с отрицательной обратной связью (а — неинвертирующий, б — инвертирующий усилитель)

отрицательной обратной связью. Если с выходом операционного усилителя через делитель соединен неинвертирующий вход, получается положительная обратная связь.

Коэффициент усиления схемы операционного усилителя с цепью глубокой ООС $K(f)$ может быть рассчитан по формуле (2.5). Он не зависит от частоты до тех пор, пока ООС можно считать глубокой, то есть $|K_0(f)| \gg |K(f)|$. В противном случае усиление начнет снижаться. Если коэффициент ООС на высоких частотах постоянен, то снижение усиления будет наблюдаться при $|K_0(f)| \sim |K(f)|$, то есть на частоте порядка $f_1/|K|$.

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.

На рис. 3.2 приведены схемы неинвертирующего и инвертирующего усилителя на ОУ с ООС. Коэффициент усиления схем записывается через комплексные сопротивления цепи обратной связи (при условии глубокой ООС) следующим образом:

$$K_{\text{не инв.}}(\omega) = \frac{Z2(\omega)}{Z1(\omega)} + 1, \quad (3.3)$$

$$K_{\text{инв.}}(\omega) = -\frac{Z4(\omega)}{Z3(\omega)}. \quad (3.4)$$

Поскольку напряжения на обоих входах ОУ приблизительно одинаковы, то для неинвертирующего усилителя можно считать, что сигнал ООС поступает на вход схемы — реализуется последовательная ООС по напряжению. В инвертирующем усилителе (рис. 3.2,б) напряжение источника входного сигнала и выходное напряжение цепи ООС подается на инвертирующий вход ОУ, где образуется узел токов. В этом случае реализуется параллельная ООС по напряжению — инвертирующий усилитель является преобразователем входного тока в результирующее напряжение.

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя велико:

$$R_{\text{вх,не инв.}} = R_{\text{вх,ОУ}} \frac{K_0}{K}, \quad (3.5)$$

где $R_{\text{вх,ОУ}}$ — входное сопротивление микросхемы ОУ. ООС приводит к его дополнительному увеличению.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя невелико:

$$R_{\text{вх,инв.}} = Z_3 + \frac{Z_4}{K_0} \approx Z_3. \quad (3.6)$$

Выходное сопротивление неинвертирующего и инвертирующего усилителя дополнительно снижается за счет ООС:

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вых,ОУ}} \frac{K}{K_0}, \quad (3.7)$$

где $R_{\text{вых,ОУ}}$ — выходное сопротивление микросхемы ОУ.

Микросхема ОУ одинаково усиливает и по переменному и по постоянному току. Если во входном сигнале наблюдается смещение сигнала по постоянному току, то на выходе схемы оно будет усилено. Чтобы избежать этого, элементы Z_1 и Z_3 не должны пропускать постоянный ток. Это легко получается при последовательном включении с конденсатором. Емкость конденсатора подбирается таким образом, чтобы не изменять коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот. В этом случае по формулам (3.3) и (3.4) получается, что коэффициент усиления схемы неинвертирующего усилителя по постоянному току будет равен 1, а инвертирующего — 0.

Если применение конденсатора в цепи обратной связи нежелательно, то можно уменьшить разбалансировку усилителя обеспечив одинаковое сопротивление по постоянному току в плечах неинвертирующего и инвертирующего входов микросхемы. В неинвертирующей схеме это достигается путем равенства выходного сопротивления источника сигнала и выражения $Z1 Z2 / (Z1 + Z2)$ на нулевой частоте. В инвертирующей схеме между положительным входом и общим проводом ставится сопротивление, значение которого вычисляется из выражения $(R_{\text{вых,ист}} + Z3) Z4 / (R_{\text{вых,ист}} + Z3 + Z4)$ также для нулевой частоты.

Операционные усилители разрабатывались для использования с двуполярным источником питания. Однако их можно использовать и в схемах с однополярным питанием. Пример такой схемы показан на рис. 3.3 (реальные схемы немного сложнее). Сопротивления $R1$ и $R2$ выбираются одинаковыми и задают постоянное смещение напряжения, равным половине напряжения источника питания, $R3$ и $R4$ образуют обратную связь. Конденсаторы служат для развязки по постоянному току и выбираются достаточно большого значения.

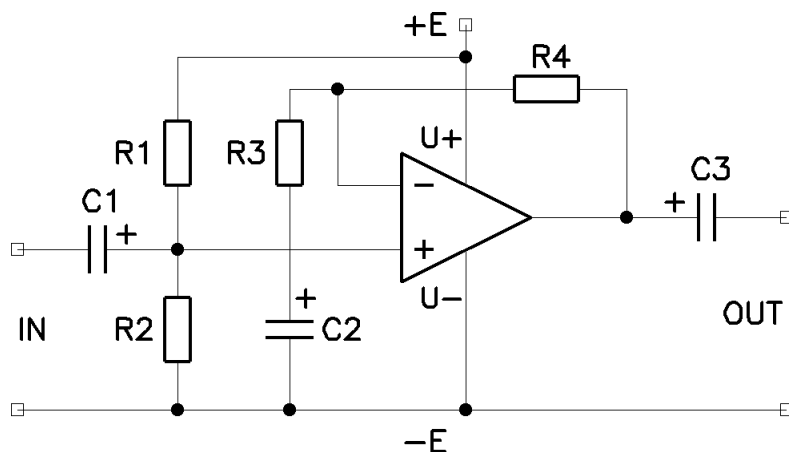


Рис. 3.3. Неинвертирующий усилитель с однополярным источником питания

Дифференциальный усилитель на ОУ можно получить, совместив схему обратной связи с наличием дифференциального входа. Пример такой схемы приведен на рис. 3.4. Схема с дифференциальным входом может работать как инвертирующий и как неинвертирующий усилитель — в зависимости от полярности подключения источника сигнала.

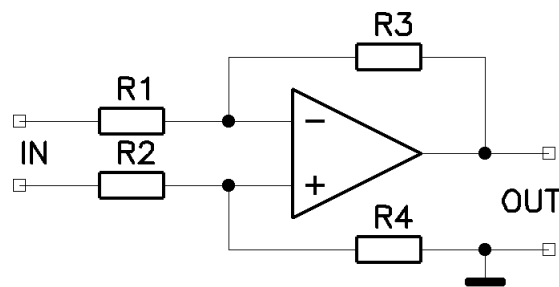


Рис. 3.4. Усилитель с дифференциальным входом

Если выбрать значения резисторов $R2 = R1$, $R4 = R3$, то коэффициент усиления схемы будет равен $K = R3/R1$, а относительное ослабление синфазного сигнала может быть достаточно большим — как у самой микросхемы ОУ. Однако на практике оно ограничивается разбросом значений резисторов, используемых в схеме. Кроме того, входные сопротивления обоих входов относительно земли будут неодинаковыми (как у схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей).

Чтобы исправить этот недостаток, можно пожертвовать условием оптимального согласования по постоянному току и выбрать сопротивления в следующем образом $R2 + R4 = R1$ и $R2/R4 = R1/R3$. При этом входные сопротивления выравниваются, а относительное ослабление синфазного сигнала все же остается большим.

3.2. Расчет схемы усилителя низкой частоты на ОУ

Рассмотрим работу неинвертирующего усилителя с отрицательной обратной связью, работающего в диапазоне частот от f_n до f_v (рис. 3.5, DA1:1). Нижняя частота задается за счет цепочки последовательно соединенных $C4$ и $R5$, верхняя — за счет $C5$ и $R6$, включенных параллельно:

$$C4 = \frac{1}{2\pi f_n R5}, \quad C5 = \frac{1}{2\pi f_v R6}. \quad (3.8)$$

Коэффициент усиления определяется на частоте $f_0 = \sqrt{f_n f_v}$ как

$$K = \frac{R6}{R5} + 1, \quad (3.9)$$

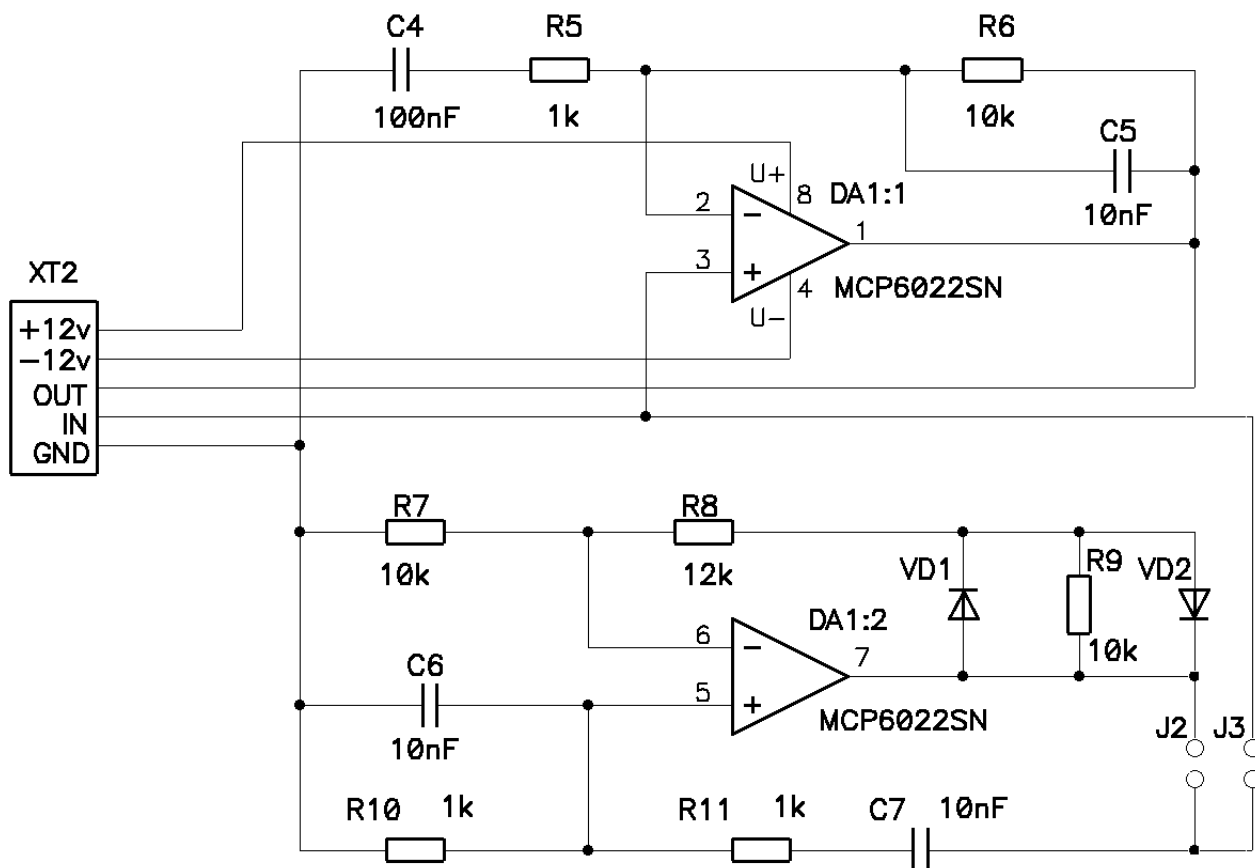


Рис. 3.5. Усилитель низкой частоты на ОУ (DA1:1) и RC-генератор с цепью Вина (DA1:2). Контакты разъема XT2: GND — общий провод, IN и OUT — вход и выход усилителя низкой частоты на ОУ, +12v и -12v — двуполярное питание схемы. Выход RC-генератора с цепью Вина имеет отдельную площадку на плате. Перемычки J2 и J3 подключает вход цепи Вина к выходу генератора или к входу IN

при условии, что $f_n \ll f_0 \ll f_v$. Если это условие не выполняется, то для расчета надо использовать общую формулу (3.3), где Z_1 и Z_2 комплексные сопротивления цепей между землей и входом (Z_1), входом и выходом (Z_2). Для нашей схемы:

$$K(f) = \frac{1}{(R5 + \frac{1}{j2\pi f C4})(\frac{1}{R6} + j2\pi f C5)} + 1. \quad (3.10)$$

Неоднозначность расчета значений конденсаторов и резисторов по формулам (3.8) и (3.9) разрешается из условий, чтобы сопротивления были много меньше входного сопротивления микросхемы операционного усилителя и много больше ее выходного сопротивления. Типичные значения входного сопротивления от 1 до 10 МОм, выходного — от 20 до 2000 Ом.

3.3. Практическая часть

Задача выполняется на печатной плате (стр. 74). Используется часть платы, помечанная цифрой 3.

Параметры: коэффициент усиления K , частоты среза f_n , f_v . Напряжение питания для схемы $E_{\pi} = \pm 12$ В.

Упражнения:

1. Рассчитать значения элементов схемы.
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 $\frac{20\text{ В}}{K}$, где K — заданный коэффициент усиления схемы. Измерить АЧХ и ФЧХ в диапазоне от 20 Гц до 5 МГц по логарифмической шкале. Уменьшить напряжение на выходе генератора в 10 раз. Повторно измерить АЧХ и ФЧХ. Определить частоту единичного усиления.
3. Подать на вход усилителя прямоугольный сигнал с частотами 0,2, 0,5, 1, 2, 5 МГц. Зафиксировать форму выходного напряжения. Определить максимальную скорость нарастания выходного напряжения.
4. Установить конденсатор C5. Повторно измерить АЧХ и ФЧХ.
5. Построить графики в общих координатных осях для АЧХ, измеренных в пп. 2 и 4. Определить нижнюю и верхнюю частоты среза, а так же усиление на частоте f_0 .
6. Построить графики в общих координатных осях для ФЧХ, измеренных в пп. 2 и 4.

3.4. Контрольные вопросы

1. Как работает дифференциальный каскад? Какова роль источника тока?

2. Каковы приблизительные значения параметров ОУ: входного и выходного сопротивления, максимальной скорости нарастания выходного напряжения, собственного коэффициента усиления, частоты единичного усиления?
3. Что такое положительная и отрицательная обратная связь, инвертирующая и неинвертирующая схемы включения ОУ?
4. Как рассчитывается коэффициент усиления для схемы с отрицательной обратной связью (инвертирующая и неинвертирующая)?
5. Каково влияние обратной связи на входное и выходное сопротивление ОУ (инвертирующая и неинвертирующая схемы)?
6. Что такое частота единичного усиления ОУ и какова методика ее определения?

Задача 4.

Гармонические RC-генераторы

Изучается работа RC-генератора на операционном усилителе с фазочувствительной цепью Вина в цепи положительной обратной связи и широкополосной цепью отрицательной обратной связи, а также генераторов на тройных RC-цепочках и схеме двойного Т-моста.

4.1. Основные понятия

Генератор электрических колебаний — устройство, создающее электрические колебания той или иной частоты и формы за счет механической энергии или энергии источников постоянного тока.

Релаксационные генераторы производят треугольные, пилообразные и другие несинусоидальные сигналы.

Гармонические генераторы формируют синусоидальный сигнал, обычно состоя из усилителей с внешними компонентами.

Индивидуальный коэффициент гармоник или *коэффициент гармоник h -порядка* — процентное содержание гармоники h -порядка, приведенное к основной частоте: U_h/U_1 .

Общее гармоническое искажение (Total Harmonic Distorsion) — величина, выражающая степень нелинейных искажений сигнала, равная отношению среднеквадратичного напряжения суммы высших гармоник сигнала, кроме первой, к напряжению первой гармоники. (Это понятие соответствует определению, данному в стандарте МЭК

61000-2-2.) THD по напряжению и по току записывается как:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}, \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}. \quad (4.1)$$

Отклонение формы сигнала от синусоидальной в 5% становится заметно на глаз по осциллограмме.

Общий коэффициент гармоник — похожее понятие, отличающееся от THD тем, что основное значение напряжения U_1 или тока I_1 заменяется на действующее значение (сумму всех гармоник). Общий коэффициент гармоник (по напряжению и по току) всегда меньше 100%. Это понятие, хотя и допускает более удобное аналоговое измерение сигналов, тем не менее, применяется все реже. При незначительном искажении сигнала эта величина мало отличается от выше определенного общего гармонического искажения.

Автоколебательные системы — преобразуют энергию источника постоянного тока в энергию колебаний. Колебания непрерывно возникают в любой системе (под действием шумов или помех), но быстро затухают. Особенностью автоколебательной системы является то, что поступление в нее энергии от источника питания регулируется таким образом, чтобы поддерживать колебания определенной частоты, обеспечивая им приток энергии покрывающий потери.

Мягкое возбуждение автоколебательной системы — когда система выходит на стационарный режим самостоятельно, то есть при любой величине начального отклонения (например, вызванного тепловым шумом элементов схемы).

Жесткое возбуждение автоколебательной системы — переход на стационарный режим возможен тогда, когда начальное отклонение превышает некоторый пороговый уровень (например скачок питания при включении схемы). Жесткий режим используют в мощных генераторах, где с целью повышения КПД транзисторы (или радиолампы) работают в режиме отсечки. В этом случае для запуска генератора на него могут подавать сигнал на частоте генерации с другого, менее мощного источника.

Характерным признаком автоколебательной системы является

независимость установившейся амплитуды колебаний от начальных условий (амплитуда определяется только свойствами генератора).

Критерий Баркгаузена — для того чтобы превратить усилитель в генератор, нужно чтобы в петле обратной связи был сдвиг фазы на 0° (180° для цепи обратной связи, подключенной к инвертирующему входу усилителя) и общий коэффициент усиления в петле был не меньше единицы.

Для работе генератора синусоидального сигнала на заданной частоте критерий Баркгаузена должен выполняться на ней и не выполняться на других частотах. В случае генерации несинусоидального сигнала критерий должен выполняться на всех гармониках.

Для определения *амплитуды колебаний генератора* необходимо учитывать нелинейность амплитудной характеристики усилителя.

RC-генератор можно построить на основе инвертирующего усилителя, сдвиг фаз которого равен 180° в широком диапазоне частот и фазосдвигающей цепочки, дающий сдвиг 180° на частоте ω_0 . Примеры таких фазосдвигающих цепочек приведены на рис. 4.1.

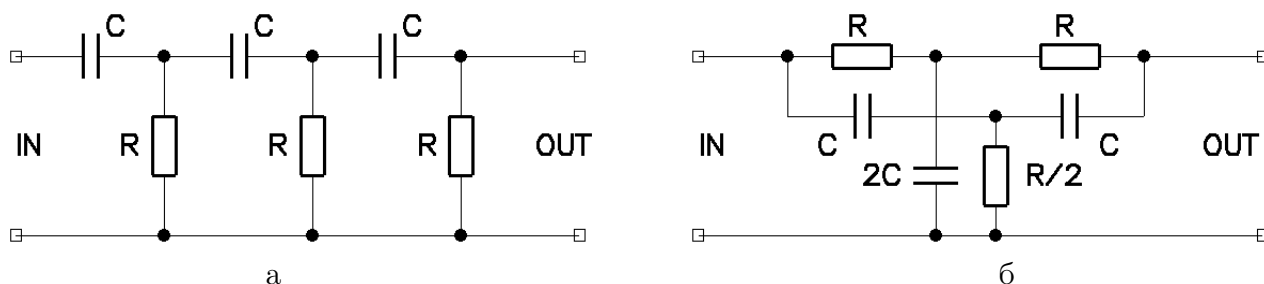


Рис. 4.1. Схемы обратной связи для построения RC-генератора на основе инвертирующего усилителя, обеспечивающие сдвиг фаз на 180° (а — фильтр верхних частот 3-го порядка, б — двойной Т-мост)

Для трехзвенной фазосдвигающей RC-цепочки — фильтра верхних частот 3-го порядка — фазовый сдвиг приблизительно в 3 раза больше, чем для однозвенной. Однако при расчете следует учитывать взаимное влияние звеньев между собой. Комплексный коэффициент передачи такой цепочки может быть записан в виде:

$$\kappa(\omega) = \frac{1}{1 - \frac{5}{(\omega RC)^2} + j \left(\frac{1}{(\omega RC)^3} - \frac{6}{\omega RC} \right)}, \quad (4.2)$$

откуда могут быть получены частота генерации и коэффициент передачи при сдвиге фаз, равным 180° :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6} RC}, \quad \kappa(\omega_0) = -\frac{1}{29}. \quad (4.3)$$

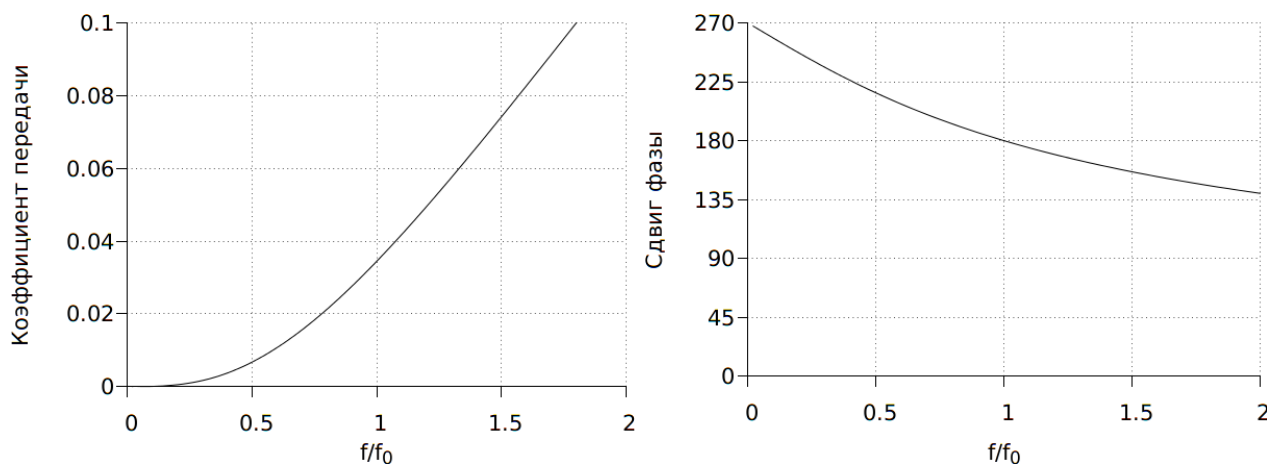


Рис. 4.2. АЧХ и ФЧХ тройного фильтра верхних частот вблизи перехода фазы через 180°

Зависимость АЧХ и ФЧХ фильтра верхних частот третьего порядка вблизи частоты генерации изображена на рис. 4.2. Для построения RC-генератора усилитель должен иметь собственный коэффициент усиления немного больший 29.

Фазосдвигающую цепочку, изображенную на рис. 4.1,а называют *R-параллель*. Если поменять местами резисторы и конденсаторы — получим фильтр нижних частот третьего порядка, называемый *C-параллель*. Он обладает похожими свойствами и также может использоваться для построения генератора:

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{6}}{RC}, \quad \kappa(\omega_0) = -\frac{1}{29}. \quad (4.4)$$

Двойной Т-мост на резонансной частоте является *заграждающим фильтром* — его коэффициент пропускания стремится к нулю на частоте

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}. \quad (4.5)$$

Для построения генератора на основе двойного Т-моста в усилитель необходимо ввести положительную обратную связь.

Примеры АЧХ и ФЧХ двойного Т-моста приведены на рис. 4.3.

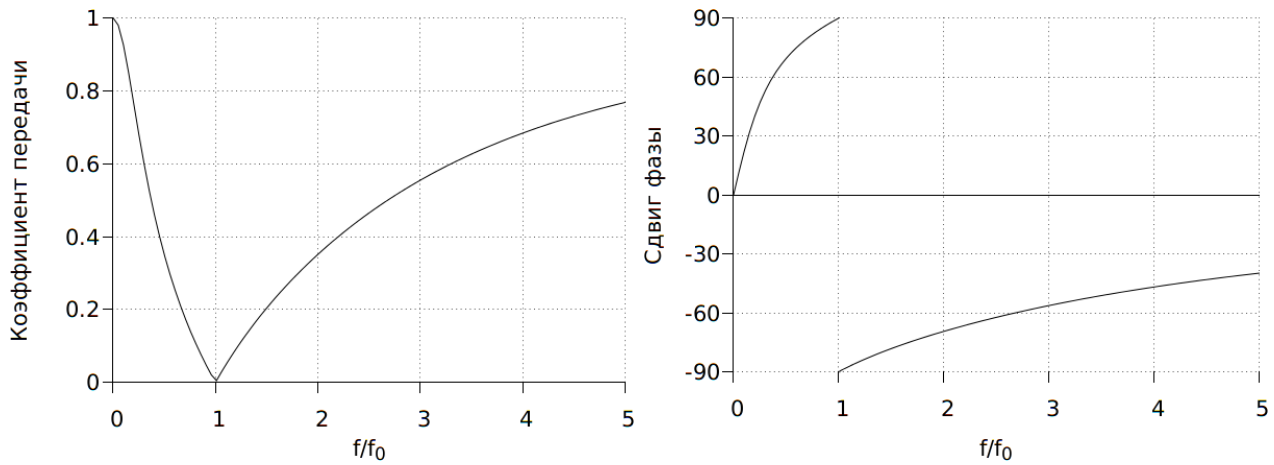


Рис. 4.3. АЧХ и ФЧХ двойного Т-моста

4.2. 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.

Чтобы обеспечить генерацию на определенной частоте — в цепи положительной обратной связи должны быть времязадающие цепочки, обеспечивающие максимальный коэффициент усиления только на заданной частоте.

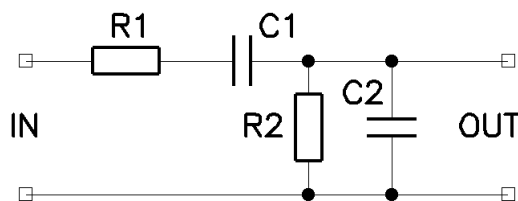


Рис. 4.4. Схема цепи Вина.

Цепь Вина (рис. 4.4) — объединяет свойства фильтра низких и фильтра высоких частот, включенных последовательно. Она используется при конструировании полосовых фильтров, генераторов, фазовращателей.

На низких частотах цепь Вина ведет себя как фильтр верхних частот первого порядка, а на высоких — как фильтр нижних частот

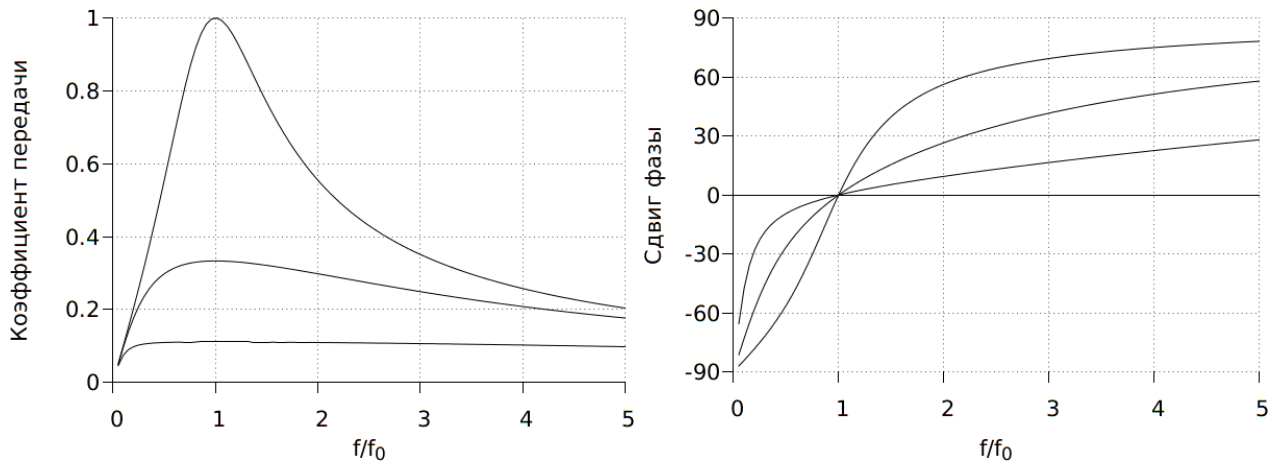


Рис. 4.5. АЧХ и ФЧХ цепи Вина при различных параметрах

первого порядка. Эта цепь эквивалентна RLC контуру с добротностью, меньшей 0,5.

Коэффициент передачи цепи Вина зависит от частоты:

$$K(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} + j \frac{\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 - 1}{\omega C_1 R_2}}. \quad (4.6)$$

Квазирезонансная частота ω_0 , на которой коэффициент передачи цепи максимален определяется как:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (4.7)$$

Коэффициент передачи на квазирезонансной частоте

$$K(\omega_0) = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}} \quad (4.8)$$

принимает действительное значение, то есть фазовый сдвиг на ней равен нулю.

Примеры АЧХ и ФЧХ цепи Вина при различных параметрах приведены на рис. 4.5.

Генератор с мостом Вина обладает очень хорошей стабильностью частоты и может давать очень малые искажения. Он может легко перестраиваться по частоте путем согласованного изменения значения двух сопротивлений цепи Вина.

Если полученный коэффициент усиления всей системы на резонансной частоте будет сильно больше 1 — получится генератор не

синусоидального, а 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. Это достигается путем введения нелинейных элементов в цепь обратной связи усилителя.

Для примера, в генераторе с цепью Вина (рис. 4.6) можно заменить сопротивление R на нелинейный элемент, увеличивающий свое сопротивление по мере роста средней мощности, рассеиваемой на нем — лампочку накаливания или терморезистор. Схема рассчитывается таким образом, чтобы

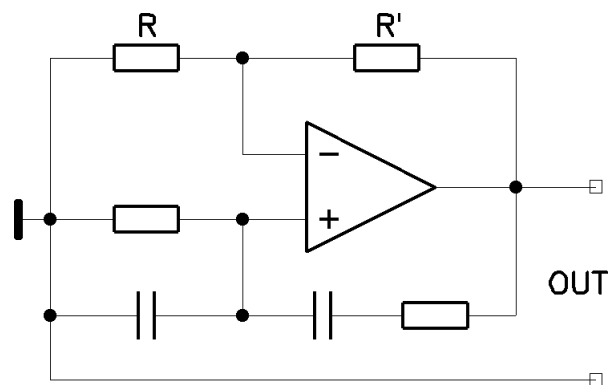


Рис. 4.6. Схема генератора с цепью Вина.

при заданной амплитуде колебаний нелинейный элемент имел сопротивление, приводящее к общему усилению схемы равному 1. В холодном состоянии сопротивление лампочки сильно меньше, поэтому усиление схемы будет больше 1, что обеспечит возникновение колебаний, а после прогрева — снижение до заданного уровня. Любая тенденция увеличения выходного напряжения выше заданного значения будет приводить к еще большему увеличению сопротивления лампы и снижению коэффициента усиления меньше 1, а это вызовет уменьшение амплитуды колебаний, то есть возврат к рассчитанному значению.

Можно использовать нелинейный элемент, уменьшающий свое сопротивление с увеличением амплитуды колебаний. В этом случае, на него следует заменить сопротивление R' .

4.3. Расчет схемы RC-генератора с цепью Вина

Схема генератора с цепью Вина представлена на рисунке 3.5 (DA1:2), страница 38. 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

$$f_0 = 1/(2\pi RC), \quad (4.9)$$

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 R_9 , 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 R_7 – R_9 должны удовлетворять условиям:

$$2R_7 > R_8, \quad 2R_7 < R_8 + R_9. \quad (4.10)$$

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 R_7 – R_9 удобнее подобрать экспериментально, моделируя работу схемы и наблюдая параметры сигнала на выходе схемы, а также форму и величину напряжения на диодах.

Напряжение на резисторе R_9 и диодах можно выразить через напряжение на выходе генератора A_0 следующим образом:

$$A_{R_9} = \frac{R_9}{R_7 + R_8 + R_9} A_0. \quad (4.11)$$

Приближенно можно считать, что диоды активно шунтирует сопротивление R_9 при напряжении на них около полувольта.

4.4. Практическая часть

Задача выполняется на печатной плате (стр. 74). Используется часть платы, помечанная цифрой 4. Выход генератора не выводится на краевой разъем, а подключен к отдельной контактной площадке.

Параметры: частота генерации f_0 , амплитуда выходного сигнала A_0 . Напряжение питания для схемы $E_{\text{п}} = \pm 12 \text{ В}$.

Упражнения:

1. Рассчитать значения элементов схемы.
2. Смонтировать детали R7–R11, C6, C7, VD1, VD2, замкнуть перемычку J2, подключить схему к двухканальному источнику питания с напряжением в каждом канале 12 В. Измерить частоту и размах генерации, зафиксировать форму сигнала (и по возможности коэффициент гармоник сигнала). Выход RC-генератора имеет отдельную контактную площадку на печатной плате, не входящую в краевой разъем.
3. Разомкнуть перемычку 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 , $2f_0$, $5f_0$, $10f_0$. Построить АЧХ и ФЧХ цепи Вина.
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). Построить в одних осях график зависимости выходного напряжения (на операционном усилителе) и коэффициента гармоник от напряжения, подаваемого с внешнего генератора.

4.5. Контрольные вопросы

1. Как ведут себя АЧХ и ФЧХ цепи Вина?

2. Как рассчитать цепь Вина при неодинаковых сопротивлениях и конденсаторах?
3. Каковы условия генерации синусоидального сигнала? Нелинейные искажения формы сигнала.
4. Что такое коэффициент гармоник? Как он измеряется?
5. Каковы варианты построения RC-генераторов гармонических колебаний?
6. Как рассчитывается RC-генератор с цепью Вина?

Задача 5.

Мультивибраторы на логических элементах

Изучаются свойства простейших логических элементов и принципы построения на их основе различных мультивибраторов.

5.1. Основные понятия

Логическими элементами называются электронные схемы, реализующие элементарные функции алгебры логики. Основой простейших логических элементов является инвертирующий или неинвертирующий усилитель постоянного тока. В случае, если элемент имеет более одного входа — они объединяются определенным образом, образуя логическую функцию.

Передаточная характеристика — зависимость напряжения на выходе логического элемента от входного напряжения. Для инвертирующего логического элемента наклон передаточной характеристики отрицательный, для неинвертирующего — положительный. Наибольшая крутизна передаточной характеристики определяется коэффициентом усиления элемента. По передаточной характеристике можно определить низкий и высокий логические уровни.

Типичная передаточная характеристика для инвертирующего элемента семейства ТТЛ приведена на рис. 5.1. Номинальное напряжение питания микросхемы +5 В. Для семейства ТТЛ низкий уровень должен лежать в диапазоне от 0 до 0,8 В, а высокий — от 2 до 5 В.

Компаратор — электронная схема, принимающая на свои входы два аналоговых сигнала и выдающая высокий уровень, если сигнал

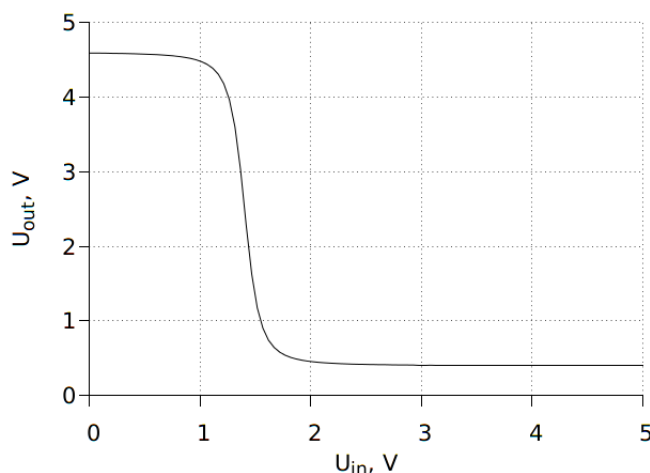


Рис. 5.1. Типичная передаточная характеристика для инвертирующего элемента семейства ТТЛ

на прямом входе («+») больше, чем на инверсном входе («−»), и низкий уровень, если сигнал на прямом входе меньше, чем на инверсном входе. Простейшие логические элементы могут быть использованы как компараторы, сравнивающие входной сигнал с фиксированным значением напряжения.

Пороговое напряжение — напряжение переключения логического элемента. Входной сигнал ниже порогового напряжения воспринимается логическим элементом как низкий, а выше — как высокий логический уровень. Передаточная характеристика имеет максимальную крутизну при подаче на вход элемента напряжения, совпадающего с напряжением переключения логического элемента.

В *положительной логике* низкий и высокий логические уровни соответствуют логическому нулю и логической единице. В *отрицательной логике* соответствие обратное. Если специально не оговорено применяется положительная логика.

Время нарастания сигнала t_{TLH} — характеризует время, необходимое для возрастания выходного напряжения с 10% до 90% разницы между низким и высоким логическими уровнями.

Время нарастания сигнала t_{THL} — характеризует время, необходимое для уменьшения выходного напряжения с 90% до 10% разницы между низким и высоким логическими уровнями.

Быстродействие — характеризует время задержки выходного сигнала по отношению к входному. Среднее быстродействие опре-

деляется следующим образом:

$$t_P = \frac{t_{PLH} + t_{PHL}}{2}, \quad (5.1)$$

где t_{PLH} соответствует времени задержки при изменении состояния выхода с низкого логического уровня на высокий, а t_{PHL} — с высокого на низкий.

Скважность — отношение периода следования прямоугольного импульса к длительности импульса.

Коэффициент заполнения — величина обратная скважности.

Меандр — периодический сигнал прямоугольной формы, у которого длительность импульса равна длительности паузы. Скважность такого сигнала равна 2.

Мультивибраторами называют электронные устройства, генерирующие электрические колебания, близкие по форме к прямоугольным. Спектр колебаний, генерируемых мультивибратором, содержит множество гармоник — тоже электрических колебаний, но кратных колебаниям основной частоты.

Триггер или *бистабильный мультивибратор* имеет два устойчивых состояния, переходит из одного в другое под воздействием внешних сигналов.

Одновибратор или *ждущий, моностабильный мультивибратор* является генератором импульса заданной длительности. Схема имеет одно устойчивое, и одно квазиустойчивое состояние. Переход из устойчивого состояния происходит при подаче внешнего сигнала, обратный переход выполняется самопроизвольно.

Автоколебательный или *нестабильным мультивибратор* переходит из одного состояния в другое самопроизвольно, бывает с *жестким* или *мягким самовозбуждением*.

Симметричный мультивибратор — автоколебательный мультивибратор, построенный по симметричной схеме, генерирует прямоугольные колебания со скважностью 2.

5.2. Элементы микросхемы К155ЛА3

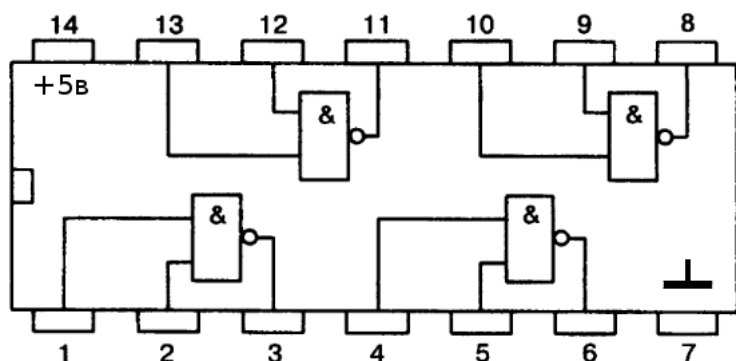


Рис. 5.2. Корпус микросхемы К155ЛА3

Напряжение питания $+5\text{ В}$ подается на вывод 14. Уровни логических сигналов соответствуют стандарту ТТЛ логики.

Принципиальная схема одного элемента 2И-НЕ микросхемы К155ЛА3 приведена на рис. 5.4. Многоэмиттерный транзистор МЭТ и резистор R_1 выполняют функцию И. Диоды D_1 и D_2 отсекают импульсы отрицательной полярности. Транзисторы T_1 – T_4 , резисторы R_2 – R_5 и диод D выполняют функцию НЕ и основное усиление.

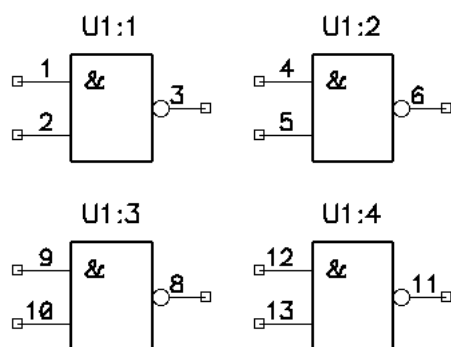


Рис. 5.3. Условные обозначения элементов микросхемы К155ЛА3

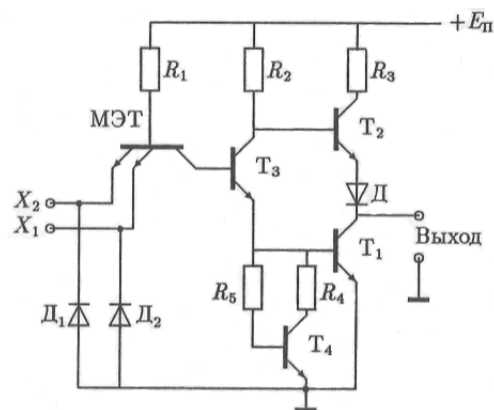


Рис. 5.4. Схема внутреннего устройства элемента микросхемы К155ЛА3

Для микросхемы К155ЛА3 логическому 0 соответствует напряжение $\leq 0,4\text{ В}$, логической 1 — напряжение $\geq 2,4\text{ В}$. Для подачи на вход ТТЛ микросхемы логического 0 указанный вход соединяют с общим проводом, логической 1 — вход подключают к сопротивлению 1 кОм , второй конец которого соединен с источником питания ($+5\text{ В}$).

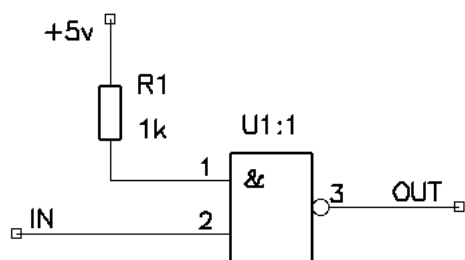


Рис. 5.5. Схема для тестирования свойств элемента микросхемы К155ЛА3

В некоторых случаях допускается оставлять входы ТТЛ микросхем не подключенными. При этом, на входе устанавливается положительный потенциал, соответствующий уровню логической 1. Однако такой способ обеспечения логической 1 приводит к изменению чувствительности других

входов, а также импульсных характеристик логического элемента, поэтому снятие передаточной характеристики элемента 2И-НЕ следует осуществлять при подаче на свободный вход тестируемого элемента уровня логической 1, как показано на рис. 5.5.

При определении среднего времени переключения элемента, а также времени нарастания сигнала следует использовать схему, приведенную на рис. 5.6, чтобы избежать влияние параметров источника сигнала на результаты измерения.

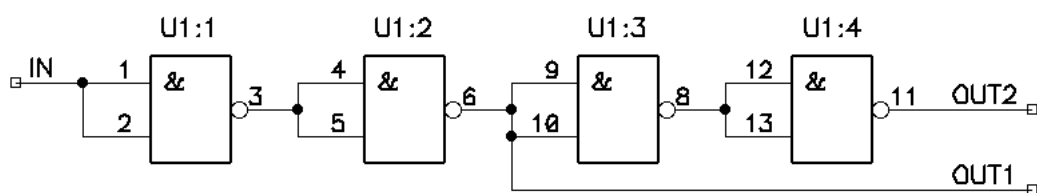


Рис. 5.6. Схема для тестирования времени переключения элемента микросхемы К155ЛА3

5.3. Триггер Шмитта

Триггер Шмитта — схема с двумя устойчивыми состояниями, управляемая уровнем напряжения на входе. На рис. 5.7 приведена схема триггера Шмитта, собранного на элементах 2И-НЕ.

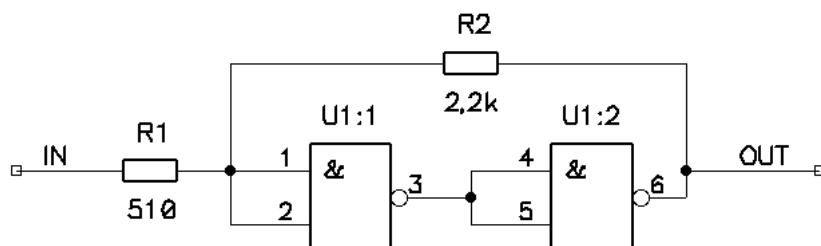


Рис. 5.7. Схема триггера Шмитта на элементах 2И-НЕ микросхемы К155ЛА3

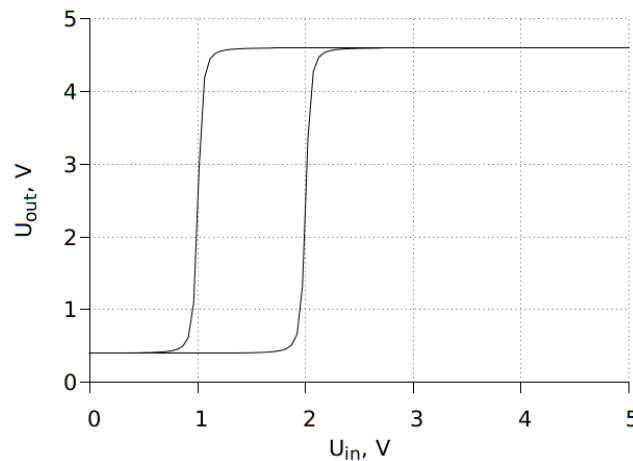


Рис. 5.8. Передаточная характеристика триггера Шмитта

Триггер Шмитта функционально является компаратором, уровни включения и выключения которого не совпадают, как у обычного компаратора, а различаются на величину, называемую гистерезисом переключения (рис. 5.8). Триггер Шмитта используется для восстановления цифрового сигнала, искаженного в линиях связи, фильтрах дребезга, преобразования синусоидального сигнала в прямоугольный и многих других случаях.

5.4. Ждущий мультивибратор

Ждущий мультивибратор при воздействии внешнего (запускающего) импульса генерирует один импульс заданной длительности, а затем возвращается в исходное состояние. Один из вариантов ждущего мультивибратора приведен на рис. 5.9.

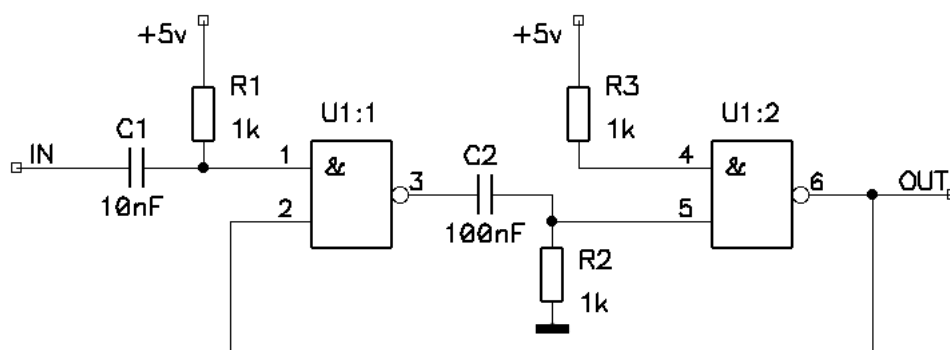


Рис. 5.9. Ждущий мультивибратор.

В устойчивом состоянии на выходе ждущего мультивибратора

присутствует логическая 1. Запуск ждущего мультивибратора осуществляется фронтом отрицательного импульса, то есть приходом логического 0 на вход схемы. При этом на выходе формируется логический 0 длительностью τ , которая задается цепочкой R2C2. Цепочка R1C1 необходима для ограничения длительности запускающего импульса временем $\tau_1 \ll \tau$, чтобы исключить повторный запуск мультивибратора, если запускающий импульс длиннее τ . Время τ_1 должно превышать удвоенное время задержки распространения сигнала через один элемент микросхемы $\tau_{\text{задержки}}$, что необходимо для надежной работы схемы. Таким образом, при расчете можно использовать выражение

$$\tau_{\text{задержки}} \ll R1C1 \ll \tau. \quad (5.2)$$

Устройство будет работать корректно, если входной импульс повторяется с периодом $T \gg \tau$, что необходимо для восстановления начального состояния у RC-цепочек, присутствующих в схеме.

5.5. Автоколебательный мультивибратор

Простейший автоколебательный мультивибратор изображен на рис. 5.10. Временязадающая цепочка мультивибратора R1C1 рассчитывается по формуле

$$R1C1 \simeq \frac{T_0}{3} \equiv \frac{1}{3f_0}. \quad (5.3)$$

При расчете следует учитывать входное и выходное сопротивление логических элементов. При слишком большом значении R1 генерация не возникнет, при слишком малом — будет наблюдаться повышенное энергопотребление схемы.

Автоколебательный мультивибратор с заданной скважностью изображен на рис. 5.11. Элементы U1:3 и U1:4 обеспечивают мягкое самовозбуждение мультивибратора. Длительность импульса τ_1 задается элементами R1 и C1, а временной интервал между ними τ_2 — элементами R2 и C2. Период генерации равен:

$$T_0 = \tau_1 + \tau_2 \simeq R1C1 + R2C2. \quad (5.4)$$

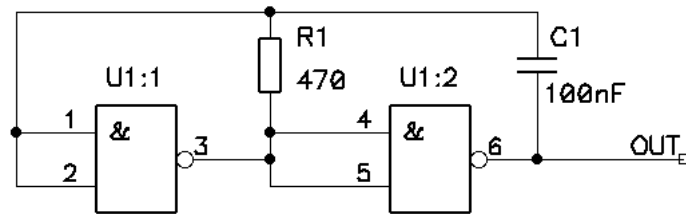


Рис. 5.10. Простейший автоколебательный мультивибратор.

Скважность оценивается соотношением:

$$s = \frac{T_0}{\tau_1} \simeq 1 + \frac{R2 C2}{R1 C1}. \quad (5.5)$$

При равенстве номиналов резисторов $R1$, $R2$ и конденсаторов $C1$, $C2$ мультивибратор становится симметричным (не считая схемы запуска). Если элементы $U1:3$ и $U1:4$ исключить, а левый конец резистора $R1$ присоединить к общему проводу — получится мультивибратор с жестким самовозбуждением.

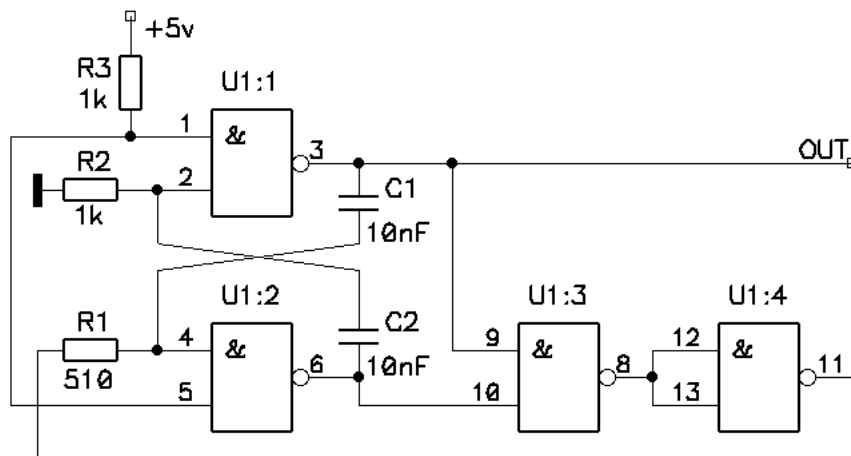


Рис. 5.11. Мультивибратор с заданной скажностью.

5.6. Практическая часть

Задача выполняется на макетной плате, страница 73.

Параметры: длительность импульса ждущего мультивибратора τ , частота генерации автоколебательного генератора f_0 , скважность s .

Упражнения:

1. Определить быстродействие элемента 2И-НЕ (рис. 5.6). Подать с генератора импульсов на вход IN схемы меандр ТТЛ уровня, к

выходам OUT1 и OUT2 подключить двухлучевой осциллограф. Измерить время задержки переднего фронта сигнала между выходами 2-го и 4-го элементов по уровню порогового напряжения. Определить среднее время переключения одного элемента микросхемы.

2. Определить пороговую величину сопротивления ТТЛ входа (рис. 5.5). Между входом IN схемы и общим проводом подключается потенциометр (сопротивлением 3–5 кОм), к точкам IN и OUT — двухлучевой осциллограф. Вращением потенциометра на входе и выходе логического элемента устанавливается пороговое напряжение. Потенциометр отсоединяется и с помощью омметра измеряется значение сопротивления.
3. Снять передаточную характеристику элемента 2И-НЕ (рис. 5.5). На вход схемы (точка IN) подать сигнал с генератора треугольного напряжения, размахом 5 В и смещением 2,5 В. К входу и выходу (точки IN и OUT) подключить двухлучевой осциллограф. Зарисовать форму напряжений в этих точках — когда оба сигнала поданы на два луча осциллографа. Зарисовать передаточную характеристику — когда развертка осциллографа выключена, а точки IN и OUT подключены к усилителям X и Y каналов. На основе полученных графиков определить пороговую величину входного напряжения (при которой происходит переключение) и максимальный коэффициент усиления логического элемента.
4. Снять передаточную характеристику триггера Шмитта (рис. 5.7). Определить значение величины гистерезиса. Схема подключается к генератору и осциллографу аналогично упражнению 3.
5. Собрать ждущий мультивибратор (рис. 5.9). На вход схемы подать сигнал с внешнего генератора импульсов, с периодом $T \gg \tau$. Убедиться, что при изменении скважности входного сигнала длительность формируемого схемой импульса остается неизменной.
6. Собрать простейший автоколебательный мультивибратор (рис.

5.10). Рассчитать времязадающую цепочку мультивибратора R1C1 по формуле (5.3) для значений R1 из ряда 150, 220, 330, 470 и 680 Ом. Для каждого R1 выполнить измерение полученной частоты генерации и скважности. Построить таблицу зависимости частоты и скважности генератора от значения R1.

7. Собрать автоколебательный мультивибратор с заданной скважностью (рис. 5.11). Измерить частоту, период и скважность генерируемого сигнала, зарисовать форму сигнала.

5.7. Контрольные вопросы

1. Что такое логические уровни, положительная и отрицательная логика?
2. Что понимают под передаточной характеристикой?
3. Что означают понятия "быстродействие" и "время нарастания сигнала"?
4. Как устроена микросхема 155ЛА3?
5. Что такое мягкое и жесткое возбуждение, автоколебательный и ждущий мультивибратор?
6. Каковы параметры прямоугольного сигнала?

Задача 6.

Симуляция электронных схем

Знакомство с симулятором SPICE, освоение трех режимов работы: по постоянному току, частотный анализ и временной анализ поведения схемы при подаче определенных импульсных или синусоидальных сигналов.

6.1. Симулятор электронных схем SPICE

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом, разработанный в 1973 г.

NGSPICE — симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом, обеспечивающий моделирование в режиме смешанных сигналов (mixed-signal) и на смешанном уровне (mixed-level), является расширением SPICE3 — мощной программой, используемой в разработке как интегральных схем, так и печатных плат для проверки целостности схемы и для анализа ее поведения.

По сравнению с исходным проектом, NGSPICE получил возможность моделирования критических устройств в схеме, моделирования пользовательских узлов, отличных от тока, напряжения и логических уровней, а также симулирования аналоговых и цифровых цепей. Появилась возможность в дополнение к классическому интерфейсу командной строки использования графического интерфейса через язык TCL. Кроме того, были добавлены новые модели устройств, а также облегчена возможность добавления пользовательских аналоговых и цифровых моделей.

gEDA (Electronic Design Automation) — набор программного обеспечения для проектирования электронных устройств (САПР). Проект включает в себя: `gschem` — редактор электрических схем, `gnetlist` — генератор списка соединений, `gsymcheck` — утилита проверки синтаксиса библиотечных символов (компонентов), `gattrib` — редактор атрибутов символов в схеме в виде таблицы, `libgeda` — библиотека, предоставляющая API для gEDA/gaf, `gsch2pcb` — утилита создания списка соединения для топологического редактора PCB, наборы вспомогательных утилит. Самостоятельные программы, которые были включены в состав проекта: PCB — редактор топологии печатных плат, `Gerbv` — утилита просмотра файлов Gerber (фотошаблонов), `ngspice` — симулятор смешанных электрических цепей, `GnuCap` — современный симулятор электрических цепей, `gspiceui` — графический интерфейс (GUI) для `ngspice`/`GnuCap`, `gwave` — просмотрщик формы сигналов, `Icarus Verilog` — компилятор и симулятор языка Verilog уровня RTL, `GTKWave` — просмотрщик временных диаграмм цифровых сигналов, `wcalc` — средство расчета линий передачи.

`Gnuplot` — программа для создания двух- и трехмерных графиков, имеет собственную систему команд, поддерживает файлы различных графических форматов (командный режим работы), таких как PNG, EPS, SVG, JPEG и множество других. Программа также может генерировать код на LaTeX, позволяя использовать шрифты и формулы LaTeX.

Для моделирования электронных схем аналогового раздела практикума используются следующие компоненты gEDA: `gEDA Attribute Editor` (gEDA редактор атрибутов) и `gEDA Schematic Editor` (gEDA редактор схем), входящие в основной пакет программ `geda`, а также `GNU Spice GUI` (пакет `gspiceui`), `Gwave`, `ngspice`, а также пакет `gnuplot` — для создания графиков, включаемых в отчет по задаче.

6.2. Создание и редактирование принципиальной схемы

Создание и редактирование принципиальной схемы осуществляется в редакторе *gEDA Schematic Editor*. Программа работает с

файлами *.sch (файл схемы) и *.sym (файлы символов, дающих представление конкретного компонента в принципиальной схеме).

В основном окне колесом мыши меняется масштаб, левой кнопкой выбирается элемент схемы, ей же можно перетянуть его на новое место, средней кнопкой можно перемещать всю схему, а правой — вызывается контекстное меню.

В процессе работы с программой удобно пользоваться горячими клавишами, которые можно увидеть в основном меню рядом с названиями функций. Например, сохранение файла — fs (то есть надо сначала нажать f, а потом s). Общий список всех горячих клавиш можно посмотреть в меню *Help — Hotkeys...*

Принципиальные схемы состоят из элементов (компонентов, символов) и связей (проводников, шин). Компоненты отсортированы по библиотекам (*Add — Component...*). Для поиска компонент можно использовать фильтр (*Filter*). При выборе конкретного компонента в окне справа показывается его изображение и атрибуты. Вставляется компонент на схему нажатием левой кнопки мыши, при этом окно библиотеки закрывать не обязательно. Нажатием средней кнопки мыши компонент поворачивается на 90 градусов.

В библиотеку Power rails включены специальные символы общего провода и питания. Одинаковые символы, расположенные в разных частях схемы, считаются соединенными между собой.

Модели также являются библиотечными элементами. Они необходимы для сопоставления сложных элементов схемы с файлами описаний. Файлы моделей для SPICE составляют все производители современных электронных компонент.

Атрибуты — это пара «параметр-значение». У каждого элемента и проводника в gEDA есть несколько атрибутов. Редактор атрибутов вызывается двойным кликом по элементу или из контекстного меню (*Edit—Edit...*). Основные атрибуты перечислены в таблице 6.1.

Атрибут можно сделать видимым или невидимым, причем можно выводить только имя, только значение, или и то, и другое (в редакторе атрибутов колонки *Vis?*, *N* для имени, *V* для значения). У только что вставленных компонент атрибут *refdes* может содержать

Таблица 6.1. Основные атрибуты

Атрибут	Описание
device	имя компонента (устройства)
refdes	обозначение элемента в схеме
netname	имя проводника
slot	номер элемента в сборке элементов, микросхеме
value	значение элемента, используется для моделирования
model-name	имя модели, совпадающее со значением моделируемого элемента
file	путь к файлу модели

Таблица 6.2. Наименование элементов схемы

Обозначение	Элемент схемы
B	полевой транзистор с каналом n-типа
C	конденсатор (емкость)
D	диод
I	источник (генератор) тока
J	полевой транзистор с управляющим p-n-переходом
L	индуктивность
M	МДП транзистор
Q	биполярный транзистор
R	резистор (сопротивление)
V	источник (генератор) напряжениями

знаки вопроса, эти знаки необходимо заменить на порядковый номер элемента данного типа в схеме. Типы элементов приведены в таблице 6.2.

По умолчанию все величины в схеме предполагаются в единицах СИ: А - ампер, V - вольт, Ohm - ом, F - Фарада, sec - секунда, m - метр, и т.д. В программе используются символы для указания кратности, приведенные в таблице 6.3. При трансляции единиц измерений SPICE отдает предпочтение символам указания кратности перед названиями единиц, поэтому, например, в значении емкости 10f номинал ее будет интерпретироваться как 10 фемтофарад, а не 10 фарад. Большие и малые буквы программой SPICE не различаются.

Примеры обозначения емкости: 10pF — 10 пикофарад, 1UF — 1 микрофарад; сопротивления: 100 — 100 Ом, 10k — 10 кОм. Аналогично обозначаются индуктивности, токи и напряжения.

Связи между элементами осуществляются проводниками (*Add—*

Таблица 6.3. Множители

Обозначение	Множитель	Название единицы
T	10^{12}	тера
G	10^9	гига
Meg	10^6	мега
K	10^3	кило
m	10^{-3}	мили, символ "М" означает также милли, не мега!
u	10^{-6}	микро, похоже на маленькую букву "мю"
n	10^{-9}	нано
p	10^{-12}	пико
f	10^{-15}	фемто

Net). Используя атрибут *netname* можно задавать имя проводнику. Непроименованные проводники автоматически нумеруются, причем общий провод (*gnd*) всегда имеет номер 0. Проводники с одинаковыми именами, расположенные в разных частях схемы, считаются соединенными между собой.

Порядок создания новой схемы следующий:

1. Запустить программу (*Main Menu—Electronics—gEDA Schematic Editor*).
2. В режиме добавления компонент (*Add—Component...*) выбрать необходимые элементы схемы, используя фильтр по имени: резисторы — *resistor*; конденсаторы — *capacitor*; источники питания — *battary*; символы общего провода и шин питания — *Gnd*, *Vcc*, *Vss*; источники входного сигнала — *vdc*, *vac*, *idc*; диоды — *diode*; транзисторы — *spice-npn*, *spice-pnp*; модели элементов — *spice-model*.
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 проводникам (цепям) — атрибут *netname* (при выделенной цепи *Add—Attribute...*).
8. Сохранить файл схемы с нужным именем. Закрыть программу.

Изменение значений номиналов радиодеталей в готовой схеме удобно производить при помощи программы *gEDA Attribute Editor*. После запуска программы выбирается файл схемы. Значения заносятся в колонку *value*. По окончании редактирования окно программы закрывается.

6.3. Симуляция работы электронной схемы

Симуляция работы схемы в SPICE осуществляется при помощи программы *GNU Spice GUI*. Программа рассчитана на работу со списком цепей (*netlist*) формата *.ckt, *.cir или *.net, а также с электронной схемой формата *.sch, созданной при помощи *gEDA Schematic Editor*. Файлы списка цепей открываются стандартным образом (*File—Open*), а файлы схемы необходимо импортировать (*File—Import*).

В программе реализованы три основных режима работы: *DC*, *AC* и *Transient sweep*.

Режим *DC* служит для симуляции схемы по постоянному току — получения зависимости значений напряжений в различных цепях схемы (и/или на ее элементах) в зависимости от изменения входного сигнала, параметров элементов схемы или температуры окружающей среды. Переключатель *Sweep Type* задает тип изменяемого значения:

- *Source* — элемент, выбранный переключателем *Signal Source*;
- *Temp.C* — температура окружающей среды.

Режим *AC* позволяет получить АЧХ и ФЧХ схемы — измерить амплитуду и фазу напряжения в любой части схемы при подаче на ее вход синусоидального сигнала с определенной амплитудой,

частота которого меняется в заданном диапазоне с линейным или логарифмическим шагом, в зависимости от переключателя *Step Scale*:

- *Lin* — общее число отсчетов, линейная шкала;
- *Dec* — число отсчетов на декаду, логарифмическая шкала;
- *Oct* — число отсчетов на октаву, логарифмическая шкала.

Параметры источника сигнала задаются при помощи переключателя *Signal Source*.

Режим *Transient sweep* позволяет получать "осциллограммы" в любых точках схемы, подавая (при необходимости) на ее вход импульсный или синусоидальный сигнал. Выбор источника осуществляется при помощи переключателя *Signal Source*, а параметры сигнала задаются в дополнительном окне, вызываемом по кнопке *Setup ...*.

Задание синусоидального сигнала осуществляется в соответствии со следующими параметрами:

- *DC Offset* — постоянная составляющая напряжения;
- *Amplitude* — амплитуда сигнала;
- *Frequency* — частота сигнала;
- *Initial Delay* — задержка включения сигнала;
- *Damping Factor* — затухание сигнала.

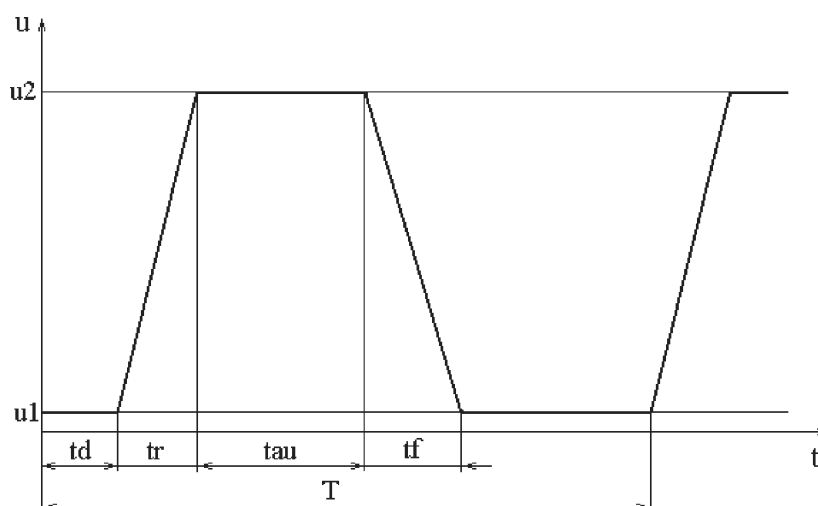


Рис. 6.1. Параметры импульсного сигнала

Задание импульсного сигнала осуществляется в соответствии со следующими параметрами (рис. 6.1):

- *Initial Value* — начальное значение (u_1);
- *Pulsed Value* — максимальное значение (u_2);
- *Initial Delay* — начало переднего фронта (td);
- *Rise Time* — длительность переднего фронта (tr);
- *Pulse Width* — длительность плоской части импульса (τ);
- *Fail Time* — длительность заднего фронта (tf);
- *Period* — период повторения (T).

Результатом симуляции схемы являются таблицы значений измеряемых величин, сохраняемые в рабочем каталоге под именем "*НазваниеСхемы.ngspice.(dc/ac/tr)*". Первая строка в файле содержит имена столбцов, последующие — значения величин в формате с плавающей точкой. Первый столбец соответствует изменяемой величине, второй и последующие — измеренным значениям.

Порядок симуляции электронной схемы, созданной в *gEDA Schematic Editor* 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 режима *Transient* указать метод старта *Initial Conditions*; для анализа работы автогенераторов рекомендуется выбирать холодный старт (*Cold*) — тогда колебания в схеме возникнут быстрее.
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*).

6.4. Построение и анализ графика

Построение и анализ графика осуществляется в программе *Gwave*. Запустить программу можно из главного меню (*Main Menu—Electronics—GNU Spice GUI*), после чего выбрать файл для построения графика (*File—ReadFile...*).

Значительно удобнее вызывать программу построения графиков непосредственно из *GNU Spice GUI*, при этом нужный файл будет открыт автоматически и на экране сразу появятся два окна — основное, в котором рисуются графики и дополнительное, со списком измеренных величин.

Основное окно по умолчанию содержит две области рисования. Через меню *View* и *Options* осуществляются операции со всеми областями рисования, а через контекстное меню панели, вызываемое

по клику правой кнопки мыши на области рисования — с выбранной областью. Добавить новую панель можно через меню *View—Add Panel*. Удалить ненужную панель можно через контекстное меню — *Delete this Panel*.

Для получения графиков необходимо сопоставить области рисования и измеренные величины. Для этого, выбранная во втором окне величина перетаскивается в нужную область рисования. Вторым способом — выбрать область рисования щелчком левой кнопки мыши, а затем двойным щелчком по названию величины отправить ее в текущую область рисования.

Слева от области рисования будут перечислены отображенные графики.левой кнопкой мыши можно выделить нужный график, правой — получить контекстное меню графика.

Порядок измерения значений величин:

1. Запустить программу, открыть файлы данных, сопоставить измеряемые величины и области рисования.
2. В меню *Options* выбрать необходимый режим по горизонтали (*X Axis scale*).
3. Используя контекстное меню — выбрать необходимый масштаб отображения графиков по вертикали для каждой области рисования.
- 4.левой кнопкой мыши установить курсор белого цвета в интересующее место графика. Положения курсора будут отображены слева и сверху (белые значения).
5. При необходимости, средней кнопкой мыши установить курсор желтого цвета в интересующее место графика. Положения курсора будут отображены желтыми значениями. Два зеленых значения вверху соответствуют разнице положений курсоров на горизонтальной оси и обратной величине этой разницы.

Порядок построения графиков следующий:

1. Запустить программу, открыть файлы данных, сопоставить измеряемые величины и области рисования.
2. В меню *Options* выбрать необходимый режим по горизонтали (*X Axis scale*).
3. Используя контекстное меню — выбрать необходимый масштаб отображения графиков по вертикали для каждой области рисования.
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. Заккрыть программу.
6. Открыть полученный файл в программе *Document Viewer*. Убедиться в правильности графика. Заккрыть 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. 78). 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*).

6.5. Практическая часть

Параметры: частота среза РС цепочки f .

Упражнения:

1. Создать схему для измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода. Провести симуляцию схемы в режиме *DC*, получив

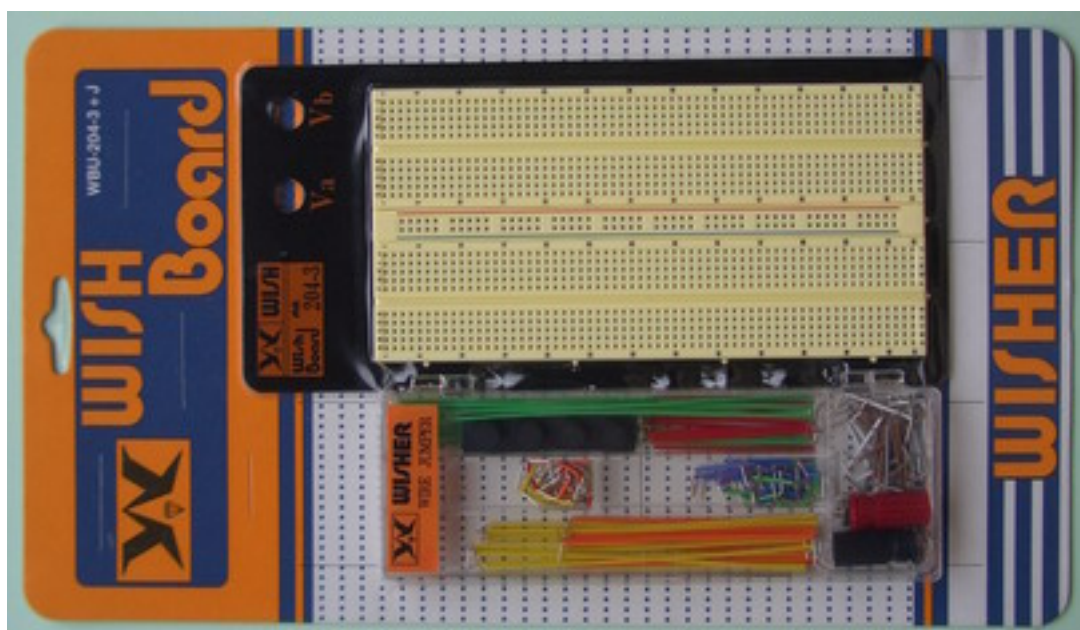
ВАХ диода при температуре 27°C . Выбрать на ВАХ 3 точки, соответствующие закрытому, полупроводящему и открытому состоянию диода и получить зависимость падения напряжения на диоде при постоянном токе от температуры ($0\text{--}50^{\circ}\text{C}$).

2. Создать модели схем RC-фильтров верхних и нижних частот (рис. 1.1, 1.3). Получить графики зависимости АЧХ и ФЧХ RC-фильтров в логарифмическом и линейном масштабе на основе созданных моделей (симуляция в режиме *AC*). Получить форму сигнала на выходе RC-фильтров, при подаче на вход прямоугольных и треугольных импульсов (симуляция в режиме *Transient*).
3. Провести компьютерное моделирование работы схемы усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе (рис. 2.5), подставив значения, рассчитанные при выполнении задачи 2. Убедиться, что напряжение на коллекторе транзистора близко к половине напряжения питания, а коэффициент усиления K , частоты f_{H} и f_{B} совпадают с заданными.
4. Провести симуляцию работы схемы усилителя на ОУ DA1:1 (рис. 3.5), подставив значения, рассчитанные при выполнении задачи 3. Убедиться, что коэффициент усиления K , частоты f_{H} и f_{B} совпадают с заданными.
5. Провести симуляцию работы схемы гармонического RC-генератора на ОУ DA1:2 (рис. 3.5), подставив значения, рассчитанные при выполнении задачи 4. Убедиться, что частота и амплитуда генерируемого сигнала близка к заданной.
6. Разработать, рассчитать и собрать в симуляторе SPICE схему RC-генератора на ОУ с цепью фильтра верхних частот 3-го порядка, фильтра нижних частот 3-го порядка или двойного Т-моста в цепи обратной связи. Ввести в схему нелинейные элементы для ограничения амплитуды колебаний. Продемонстрировать работу схемы в симуляторе SPICE. Получить АЧХ и ФЧХ схемы при разрыве ПОС в точке неинвертирующего входа ОУ.

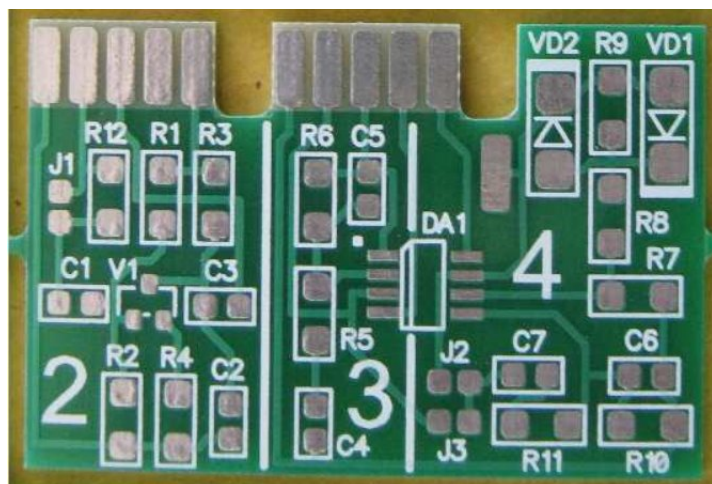
Справочная информация

Макетная плата (задачи 1 и 5)

В задачах 1 и 5 используются макетные платы, позволяющие без пайки многократно собирать различные схемы. Элемент А используется в качестве шины питания, элемент В — для монтажа комплектующих. Контакты рассчитаны на толщину ножек радиодеталей от 0,3 до 0,8 мм. В комплекте имеется набор перемычек (проводников) для соединения групп контактов между собой.

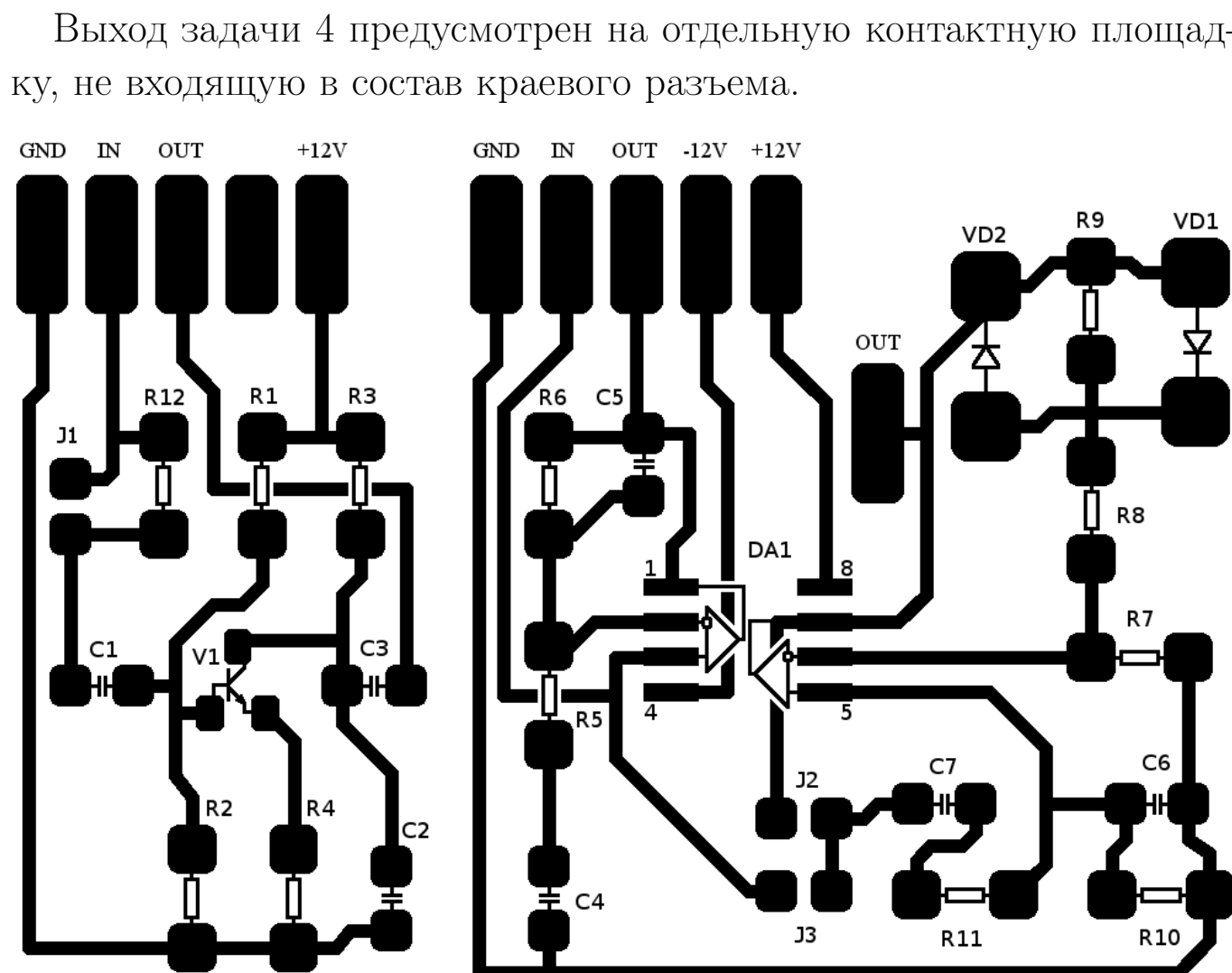


Монтажная схема (задачи 2-4)



Задачи 2-4 выполняются на индивидуальной печатной плате из одностороннего стеклотекстолита. Входы и выходы схем выведены на контакты вблизи края печатной платы, что позволяет использовать краевой разъем для подачи питания и сигнала от внешнего генератора, а также для подключения осциллографа.

Выход задачи 4 предусмотрен на отдельную контактную площадку, не входящую в состав краевого разъема.



Маркировка резисторов и конденсаторов

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
1,0	1,0	1,0	1,0
			1,1
		1,2	1,2
			1,3
	1,5	1,5	1,5
			1,6
		1,8	1,8
			2,0

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

E3	E6	E12	E24
4,7	4,7	4,7	4,7
			5,1
		5,6	5,6
			6,2
	6,8	6,8	6,8
			7,5
		8,2	8,2
			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 М51 = 0,51 МОм, 4к7 = 4,7 кОм.

Цветовая маркировка резисторов с 3-мя полосами: цвет первых двух полос означает первые цифры сопротивления, третья полоса означает множитель в виде степени десяти, на который надо умножить число, состоящее из первых двух цифр. Точность резисторов с 3-мя полосами - 20%.

Цветовая маркировка резисторов с 4-мя полосами отличается от маркировки с 3-мя полосами тем, что 4-я полоса определяет точность резистора в процентах (она может быть серебряного или золотого цвета, что значит допуск в 10% или 5% соответственно).

Цветовая маркировка резисторов с 5-ю и 6-ю полосами (повышенной точности): цвет первых трех полос означает цифры сопротивления, четвертая полоса означает множитель в виде степени десяти, на который надо умножить число, состоящее из первых трех цифр,

а пятая полоса означает точность резистора в процентах. Шестая полоса означает температурный коэффициент сопротивления (для выполнения задач практикума знание ТКС не требуется).

Цвет полосы	Значение	Порядок	Допуск	ТКС, ppm/°C
Белый	9			1
Серый	8		0,05%	
Фиолетовый	7	10^7	0,1%	5
Голубой	6	10^6	0,25%	10
Зеленый	5	10^5	0,5%	
Желтый	4	10^4		25
Оранжевый	3	10^3		15
Красный	2	10^2	2%	50
Коричневый	1	10^1	1%	100
Черный	0	10^0		
Золотистый		10^{-1}	5%	
Серебристый		10^{-2}	10%	

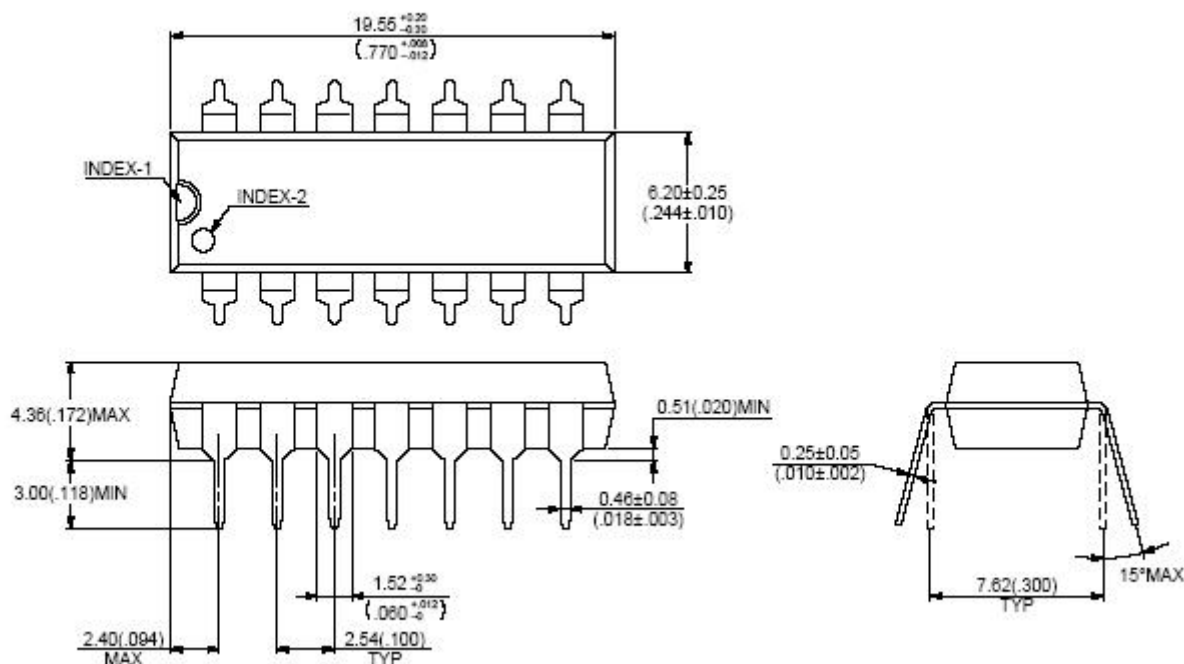
Резисторы поверхностного монтажа маркируют трехзначным числом, по аналогии с цветовой маркировкой. Например, маркировка 123 означает $12 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 12 \text{ кОм}$. Точность резисторов поверхностного монтажа на самих деталях не обозначают, ее можно узнать по маркировке на упаковке.

Конденсаторы выпускаются по ряду E12 или E6, обозначаются в микрофарадах, нанофарадах и пикофарадах. Микрофарады обозначают буквой " μ " или дробным числом без буквы, нанофарады — "n", пикофарады — целым числом без буквы. Буквы могут ставить на место запятой. На конденсаторах также обозначают другие параметры, например температурный коэффициент емкости, рабочее напряжение, допустимое отклонение емкости. При этом, группа ТКЕ обозначается буквами "П", "М" и "Н" плюс число.

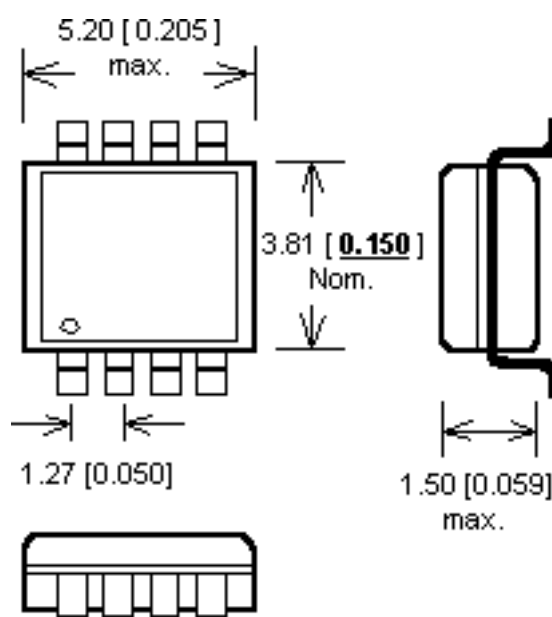
Конденсаторы поверхностного монтажа не маркируют, их значения необходимо определять по надписям на упаковке, а если ее не сохранилось — при помощи измерителя емкости.

Корпуса и нумерация выводов микросхем

14-pin plastic DIP
(DIP-14P-M02)



Корпус стандарта DIP14. Нумерация выводов осуществляется против часовой стрелки от ключа (INDEX-1 или INDEX-2). Данный корпус имеет микросхема К155ЛА3.



Корпус стандарта SOIC8. Нумерация выводов осуществляется против часовой стрелки от ключа. Данный корпус имеет микросхема ОУ MCP6022-E/SN.

Шаблоны для построения графиков

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 *graph.gnuplot* — шаблон для построения нескольких графиков в общих координатных осях. Данные берутся из файла *data*.

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*.

Содержимое graph.gnuplot:

```
#!/usr/local/bin/gnuplot
set terminal postscript
set output "~/Desktop/graph.ps"
set bmargin 4
set style line 1 lt 1 pt 1
set style line 2 lt 3 pt 2
set style line 3 lt 2 pt 0
set style line 4 lt 4 pt 0
set style line 5 lt 1 pt 0
# Сетка
set grid xtics ytics mxtics mytics
# Надписи
set title "The amplitud frequency response, Ivanov, a group of 201. - edit this"
set xlabel "Frequency, Hz" font "Helvetica,18"
set ylabel "Amplitude - edit this" font "Helvetica,18"
# Ручной диапазон по X, по Y (убрать символ # перед set ...)
#set xrange [10:1000000]
#set yrange [0:90]
# Логарифм по осям X и Y
set log xy
# Где расположена легенда (верх, слева)
set key top left
# Задание аналитических функций
F1(f) = 5*(1+1000/f)
F2(f) = 4*(1+1000/f)
# Рисование графика:
# using - номера столбцов файла данных (X:Y:Yerr)
# smooth - аппроксимация кривой
plot \
  "~/Desktop/data" using 1:2 title "Amplitude 1 - edit this" \
    smooth unique with lines linestyle 1,\
  "~/Desktop/data" using 1:2:3 notitle with yerrorbar linestyle 5,\
  "~/Desktop/data" using 1:4 title "Amplitude 2 - edit this" \
    smooth sbezier with lines linestyle 2,\
  "~/Desktop/data" using 1:4:5 notitle with yerrorbar linestyle 5,\
  F1(x) title "Teoretic line 1 - edit this" with lines linestyle 3,\
  F2(x) title "Teoretic line 2 - edit this" with lines linestyle 4
```

Содержимое graph2.gnuplot:

```
#!/usr/local/bin/gnuplot
set terminal postscript
set output "~/Desktop/graph.ps"
set multiplot
set size 1,0.5
set logscale x
set origin 0,0.5
set nologscale y
set bmargin 4
```

```

set style line 1 lt 1 pt 1
set style line 2 lt 3 pt 2
set style line 3 lt 2 pt 0
set style line 4 lt 4 pt 0
set style line 5 lt 1 pt 0
# Серка
set grid xtics ytics mxtics mytics
# Надписи
set title "The amplitude/phase frequency response, Petrov, a group of 201. - edit"
set xlabel "Frequency, Hz" font "Helvetica,18"
set ylabel "Amplitude - edit this" font "Helvetica,18"
# Ручной диапазон по X, по Y (убрать символ # перед set ...)
#set xrange [10:1000000]
#set yrange [0:90]
# Логарифм по осям X и Y
set log xy
# Где расположена легенда (верх, слева)
set key top left
# Задание аналитических функций
F1(f) = 5*(1+1000/f)
F2(f) = 4*(1+1000/f)
# Рисование графика:
# using - номера столбцов файла данных (X:Y:Yerr)
# smooth - аппроксимация кривой
plot \
"/Desktop/data" using 1:2 title "Amplitude 1 - edit this" \
smooth unique with lines linestyle 1,\
"/Desktop/data" using 1:2:3 notitle with yerrorbar linestyle 5,\
"/Desktop/data" using 1:4 title "Amplitude 2 - edit this" \
smooth sbezier with lines linestyle 2,\
"/Desktop/data" using 1:4:5 notitle with yerrorbar linestyle 5,\
F1(x) title "Teoretic line 1 - edit this" with lines linestyle 3,\
F2(x) title "Teoretic line 2 - edit this" with lines linestyle 4
set origin 0,0.0
set nologscale y
set title ""
set xlabel "Frequency, Hz" font "Helvetica,18"
set ylabel "Phase - edit this" font "Helvetica,18"
set log x
set key top left
F1(f) = 5*(1+1000/f)
F2(f) = 4*(1+1000/f)
plot \
"/Desktop/data2" using 1:2 title "Phase 1 - edit this" \
smooth unique with lines linestyle 1,\
"/Desktop/data2" using 1:2:3 notitle with yerrorbar linestyle 5,\
"/Desktop/data2" using 1:4 title "Phase 2 - edit this" \
smooth sbezier with lines linestyle 2,\
"/Desktop/data2" using 1:4:5 notitle with yerrorbar linestyle 5,\
F1(x) title "Teoretic line 1 - edit this" with lines linestyle 3,\
F2(x) title "Teoretic line 2 - edit this" with lines linestyle 4

```


Предметный указатель

- С-параллель, 44
- Р-параллель, 44
- Total Harmonic Distorsion, 41
- Автоколебательная система, 42
- Автоколебательный мультивибратор, 53, 57
- Активное сопротивление, 8
- Активный режим, 22
- Активный фильтр, 9
- Амплитуда колебаний генератора, 43
- Амплитудная характеристика, 43
- Амплитудно-частотная характеристика, 10
- Барьерная емкость, 23
- Биполярный транзистор, 21
- Быстродействие, 52
- Время задержки, 52
- Время нарастания сигнала, 52
- Входное сопротивление, 18
- Выходное сопротивление, 18
- Гармонические генераторы, 41
- Генератор напряжения, 7
- Генератор тока, 7
- Генератор электрических колебаний, 41
- Дифференциальные параметры транзистора, 22
- Дифференциальный каскад, 31
- Диффузная емкость, 23
- Ждущий мультивибратор, 56
- Жесткое возбуждение, 42, 53
- Заграждающий фильтр, 8, 44
- Импеданс, 9, 10
- Инверсный режим, 22
- Инвертирующий усилитель, 34
- Индуктивность, 8
- Источник напряжения, 7
 - управляемый напряжением, 25
- Источник тока, 7
 - управляемый напряжением, 25
 - управляемый током, 24
- Катушка индуктивности, 8
- Квазирезонансная частота, 46
- Компаратор, 51
- Комплексное сопротивление, 9, 10
- Конденсатор, 8
- Коэффициент гармоник, 41, 42
- Коэффициент заполнения, 53
- Коэффициент передачи, 10
 - усилителя, 17
 - усилителя с глубокой ООС, 20, 34
 - усилителя с обратной связью, 19
 - цепи Вина, 46
- Критерий Баркгаузена, 43
- Крутизна частотной характеристики, 11
- Линейная цепь, 8
- Логический элемент, 51
- Мягкое возбуждение, 57

- Максимальная выходная мощность, 18
- Максимальная скорость нарастания выходного напряжения, 33
- Максимальное выходное напряжение, 18
- Максимальный выходной ток, 18
- Мгновенная мощность, 8
- Меандр, 53
- Метод комплексных амплитуд, 9
- Метод линейных четырехполосников, 23
- Мультивибратор, 53
- автоколебательный, 53, 57
 - бистабильный, 53
 - ждущий, 53, 56
 - моностабильный, 53
 - нестабильный, 53
 - симметричный, 53, 58
- Мягкое возбуждение, 42, 53
- Напряжение, 7
- Неинвертирующий усилитель, 34
- Обратная связь, 18–20
- Общее гармоническое искажение, 41
- Одновибратор, 53
- Операционный усилитель, 31
- Отрицательная логика, 52
- Отрицательная обратная связь, 19
- Пассивная цепь, 8
- Пассивный фильтр, 9
- Передаточная функция, 10
- Передаточная характеристика, 51
- Положительная логика, 52
- Положительная обратная связь, 19
- Полосно-заграждающий фильтр, 8
- Полосно-пропускающий фильтр, 8
- Полосовой фильтр, 8
- Пороговое напряжение, 52
- Реактивное сопротивление, 8
- Режекторный фильтр, 8
- Режим насыщения, 22
- Режим отсечки, 22
- Резистор, 8
- Релаксационные генераторы, 41
- Симметричный мультивибратор, 53, 58
- Скважность, 53
- Собственный коэффициент усиления, 32
- Статические коэффициенты передачи тока, 22
- Схема включения транзистора
- с общей базой, 24
 - с общим коллектором, 25
 - с общим эмиттером, 25
- Ток, 7
- Триггер, 53
- Триггер Шмитта, 55
- Узкополосный заграждающий фильтр, 8
- Фазо-частотная характеристика, 11
- Фильтр верхних частот, 8
- Фильтр второго порядка, 9
- Фильтр нижних частот, 8
- Фильтр первого порядка, 9
- Фильтр-пробка, 8
- Цепь Вина, 45
- Частота единичного усиления, 33
- Ширина полосы пропускания, 17

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.
3. М.Х. Джонс. Электроника - практический курс (2-е издание, 2006)
4. К. Бойт. Цифровая электроника. 2007 г.
5. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники. Пер. с англ. — М. БИНОМ, 2014 г.

ISBN 978-5-8279-0102-0

