

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. Большаков, Т.В. Векшина, Е.М. Коринец

ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»

Направления подготовки
05.03.05 «Прикладная гидрометеорология»
05.03.04 «Гидрометеорология»

Курс II

Санкт-Петербург
РГГМУ
2020

УДК 621.3
ББК 32.85я73
Б79

*Утверждено на заседании кафедры морских информационных систем.
Протокол № 9-20\I от 1.09.2020 г.*

*Рекомендовано к печати учебно-методической комиссией Института
информационных систем и геотехнологий. Протокол № 3 от 10.09.2020 г.*

Большаков В.А., Векшина Т.В., Коринец Е.М.

Практикум по дисциплине «Электротехника и электроника». Направления
Б79 подготовки: 05.03.05 «Прикладная гидрометеорология»; 05.03.04 «Гидрометеоро-
логия». Курс II. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 112 с.

Практикум содержит описания лабораторных работ и инструкции по их
выполнению, задачи и задания к разделам дисциплины «Электротехника и
электроника». Предназначен для студентов очной и заочной форм обучения.

УДК 621.3
ББК 32.85я73

© Большаков В.А., 2020
© Векшина Т.В., 2020
© Коринец Е.М., 2020
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2020

Введение

В практикум по дисциплине «Электротехника и электроника» включены цикл лабораторных работ, задания и задачи по разделам дисциплины.

Лабораторные работы ориентированы на приобретение студентами практических навыков экспериментального исследования характеристик электрических цепей электронных приборов и устройств, и работы с измерительной техникой.

Описания лабораторных установок позволяют выполнить все операции, необходимые для достижения поставленной в каждой работе цели.

Порядок выполнения лабораторных работ предписывает соблюдение правил техники безопасности, изложенных в «Инструкции по технике безопасности» в лаборатории электротехники и электроники.

В журнале регистрации факт проведения инструктажа по технике безопасности подтверждается записью фамилии, имени, отчества (полностью), личными подписями студента и преподавателя, проводившего инструктаж.

При возникновении непонятных или опасных ситуаций следует немедленно предупреждать преподавателя или дежурного инженера.

Рекомендуется перед выполнением работы заранее прочесть ее описание, сформулировать ответы на вопросы, помещенные в конце текста, и получить конкретное задание преподавателя.

Отчет по работе выполняется каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- титульную страницу, выполненную по форме, указанной преподавателем (см. образец в приложении) с фамилией и инициалами студента, номером группы и названием лабораторной работы;

- цель работы;

- исследованные схемы;

- таблицы экспериментальных данных;

- графики и расчеты, выполненные по заданиям работы.

- в некоторых работах изложены дополнительные требования.

Материал отчета должен быть оформлен аккуратно, с соблюдением ГОСТ на условные графические и буквенные обозначения.

Задачи и задания обеспечивают закрепление знаний, получаемых при изучении разделов дисциплины.

Перед описанием решения задачи должны приводиться ее условие и исходные данные. Необходимо также приводить принципиальные схемы электрических цепей и электронных устройств, содержащиеся в условиях задач.

Все расчетные соотношения следует сначала записывать в общем виде и только после этого подставлять в них значения величин. Точность результатов вычислений достаточно ограничить тремя значащими цифрами. Конечные результаты задач должны выделяться в общем тексте решения, например, подчеркиванием, и приводиться в ответе. Для исходных данных и результатов вычислений следует указывать единицы измерения.

При оформлении материалов теоретических заданий необходимо приводить условие задания. Ответы на вопросы заданий должны быть краткими и конкретными.

Во всех лабораторных работах, задачах и заданиях приводятся ссылки на перечень рекомендованной литературы с указанием страниц.

1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1.1. Лабораторная работа № 1. Исследование полупроводниковых приборов

Цель работы: изучение устройства и принципа действия полупроводникового диода, биполярного и полевого транзисторов, экспериментальное исследование основных характеристик и определение параметров исследуемых полупроводниковых приборов.

Теоретические сведения

Типовой полупроводниковый диод

Типовой выпрямительный полупроводниковый диод — это прибор с двумя электродами на базе p - n -перехода, обладающий односторонней проводимостью электрического тока (вентильным свойством).

Электроды-выводы от p -области и от n -области полупроводника называют, соответственно, анодом (А) и катодом (К) диода. Условное графическое обозначение (УГО) и буквенное (позиционное) обозначение (VD) типового полупроводникового диода показаны на рис. 1.1.

Основными материалами для изготовления полупроводниковых диодов служат германий и кремний. Используются также арсенид галлия, карбид кремния, антимонид индия и др. Существует большое разнообразие полупроводниковых диодов, которые классифицируют по назначению, принципу работы, типу p - n -перехода, конструктивным особенностям и другим признакам. К типовым полупроводниковым диодам относят обычно широко используемые выпрямительные диоды. Главные электрические свойства таких диодов определяются вольтамперной характеристикой (ВАХ) p - n -перехода, т. е. зависимостью электрического тока через диод I_d от напряжения на диоде U_d : $I_d = f(U_d)$. Как известно, такая ВАХ имеет две резко отличающиеся ветви: прямую и обратную.

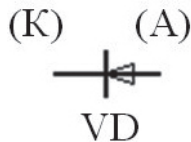


Рис. 1.1. УГО и позиционное обозначение типового полупроводникового диода

Прямая ветвь имеет место при напряжениях на диоде $U_d > U_{\text{пор}}$ (на аноде +, на катоде –), а обратная — при $U_d \leq 0$ (на аноде –, на катоде +), где значение $U_{\text{пор}}$ — некоторая пороговая величина, обычно близкая к нулю. Прямое падение напряжения $U_{\text{пр}}$ для германиевых диодов обычно имеет значение $U_{\text{пр}} \approx 0,2\text{--}0,4$ В, для кремниевых $0,5\text{--}0,7$ В.

Характерным и важным является то, что токи диода, соответствующие прямой и обратной ветвям ВАХ, резко различны по величине: ток обратной ветви, т. е. обратный ток диода $I_{\text{добр}}$ обычно на несколько порядков меньше тока диода $I_{\text{дпр}}$ в прямом направлении. Поэтому можно считать, что полупроводниковый диод пропускает электрический ток («открыт») только в одном («прямом») направлении и практически не пропускает ток («закрыт») в другом («обратном») направлении. Это главное свойство диода называют вентиляционным свойством.

Различные проводящие свойства диода в прямом и обратном направлениях характеризуют также прямым и обратным сопротивлениями диода: $R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{обр}}$. Эти сопротивления для диода сильно отличаются: $R_{\text{пр}} \ll R_{\text{обр}}$. На практике значения $R_{\text{пр}}$ составляют единицы–десятки Ом, в то время как значения $R_{\text{обр}}$ — сотни тысяч и даже миллионы Ом.

Ввиду нелинейности ветвей ВАХ параметры $R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{обр}}$ являются дифференциальными, т. е. эти сопротивления можно определять только в отдельных точках прямой ветви ВАХ:

$$R_{\text{пр}} = \frac{dU_d}{dI_d}.$$

При графоаналитическом расчете схем с диодами используют малые приращения ΔU_d и ΔI_d , взятые в окрестностях этих точек:

$$R_{\text{пр}} \approx \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d}.$$

Аналогично можно определять и обратное сопротивление с учетом той особенности, что наклон обратной ветви ВАХ обычно очень мал, и приращение ΔU_d приходится принимать значительным по величине.

Биполярный транзистор

Биполярные транзисторы — это полупроводниковые усилительные приборы на основе двух электрически взаимодействующих

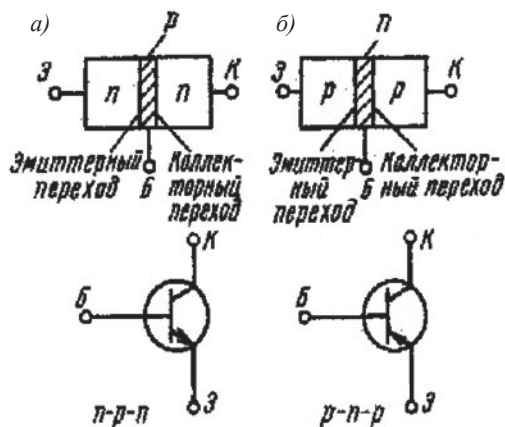


Рис. 1.2. Структура и УГО биполярных транзисторов: а) $n-p-n$; б) $p-n-p$

$p-n$ -переходов. В биполярных транзисторах электрический ток обусловлен движением носителей заряда обоих типов — электронов и дырок; это и определяет название «биполярный».

Два $p-n$ -перехода в биполярном транзисторе образуются в результате чередования трех слоев полупроводника разной проводимости, т. е. в результате создания структур типа $n-p-n$ или $p-n-p$. В зависимости от этого различают биполярные транзисторы вида $n-p-n$ и $p-n-p$. Структуры (сверху) и условные графические обозначения (УГО) этих транзисторов (снизу) показаны на рис. 1.2. На схемах транзистор обозначают буквами VT.

Как видно из обозначения, биполярные транзисторы являются трехэлектродными электронными приборами, т. е. у них три электрода-вывода для подключения в схемах. Эти выводы имеют следующие названия: эмиттер (Э), база (Б), коллектор (К). Направление стрелки на выводе эмиттера (от p к n) указывает на направление тока в $p-n-p$ - или $n-p-n$ -транзисторах. Переход $p-n$ между базой и эмиттером называют эмиттерным, а между базой и коллектором — коллекторным. Эмиттер является источником носителей заряда (электронов или дырок), которые создают основной ток прибора.

Коллектор собирает носители, прошедшие от эмиттера через базу (базовые слои), и направляет их во внешнюю цепь (в нагрузку). База служит для управления током транзистора.

В $p-n-p$ -транзисторах через базу проходят инжектируемые эмиттером дырки, а в $n-p-n$ — электроны. В целом, работа этих

транзисторов идентична за исключением того, что источники их питания включаются в разной полярности.

Нормальное включение транзистора предполагает, что p - n -переход «база–эмиттер» включен в прямом направлении, а коллектор–база — в обратном. Для p - n -транзистора, исследуемого в данной работе, это значит, что база должна быть отрицательной относительно эмиттера, а коллектор — отрицательным относительно базы (и эмиттера).

Чаще всего используют включение транзистора по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Это значит, что вывод эмиттера подключается к общему проводу («земле») и поэтому является общим для электрических цепей базы и коллектора, каждая из которых имеет соединение с общим проводом. При этом электрическая цепь базы называется входной цепью транзистора, на которую поступает входной электрический сигнал от источника, а коллекторная цепь называется выходной цепью транзистора, из которой усиленный сигнал передается в нагрузку.

Электрические свойства транзистора характеризуют его вольт-амперные характеристики. При этом наибольший интерес представляет семейство статических входных и выходных ВАХ.

Для исследуемого в лабораторной работе транзистора, включенного по схеме с ОЭ, входной характеристикой называется зависимость величины тока базы I_6 транзистора (входного тока) от величины напряжения между базой и эмиттером $|U_{63}|$ (напряжение на входе), т. е. функция $I_6 = f(|U_{63}|)$. При этом напряжение на коллекторе (относительно эмиттера) $|U_{к3}|$ должно оставаться неизменным $|U_{к3}| = \text{const}$. Оно выступает как параметр, и его различные значения порождают семейство входных характеристик. Следует заметить, что входные характеристики слабо зависят от величины параметра $|U_{к3}|$.

По входным характеристикам транзистора определяют его дифференциальное входное сопротивление $R_{\text{вх}}$:

$$R_{\text{вх}} = \frac{|\partial U_{63}|}{|\partial I_6|} \quad \text{при } |U_{к3}| = \text{const},$$

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{|\Delta U_{63}|}{|\Delta I_6|} \quad \text{при } |U_{к3}| = \text{const}.$$

Величину этого сопротивления важно знать при анализе и расчете электрических схем. Значение $R_{\text{вх}}$ для биполярного транзистора

невелико и составляет обычно 100–500 Ом. Это означает, что биполярный транзистор заметно нагружает источник сигнала.

Выходной характеристикой транзистора в схеме с ОЭ называется зависимость коллекторного тока I_k от напряжения на коллекторе (относительно эмиттера) $|U_{кэ}|$ при фиксированном значении тока базы I_b , т. е. функция $I_k = f(|U_{кэ}|)$ при $I_b = \text{const}$. Характеристики, снятые при различных значениях параметра I_b , образуют семейство выходных характеристик; их называют также семейством коллекторных характеристик.

Коллекторные характеристики показаны на рис. 1.3; они все исходят из начала координат, т. к. при значении $|U_{кэ}| = 0$ коллекторный ток $I_k = 0$.

Самая «нижняя» характеристика соответствует параметру $I_b = |I_{к0}|$, где $I_{к0}$ — тепловой ток коллекторного перехода.

Эмиттерный переход транзистора при этом закрыт, и основной ток прибора отсутствует, поэтому коллекторный ток $I_k = |I_{к0}|$. Ввиду малости тока $I_{к0}$ «нижняя» коллекторная характеристика располагается очень близко к горизонтальной оси $|U_{кэ}|$. Прибор, измеряющий ток I_k , может «не почувствовать» малые значения $I_{к0}$, и тогда эта характеристика проходит по оси $|U_{кэ}|$.

Выходные характеристики показывают, что коллекторный ток I_k существенно зависит от значения входного тока базы I_b , причём сравнительно малым приращением тока I_b соответствуют

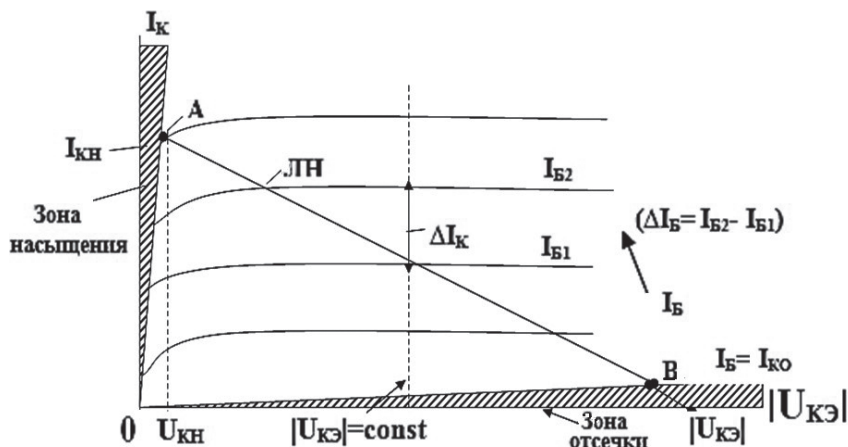


Рис. 1.3. Коллекторные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и линия нагрузки ЛН

значительно большие (усиленные в β раз) приращения тока I_k . Это как раз и свидетельствует об усилительных свойствах транзистора.

Семейство выходных характеристик позволяет определить статический коэффициент усиления тока в транзисторе:

$$\beta \approx \frac{\Delta I_k}{\Delta I_0} \quad \text{при } |U_{кз}| = \text{const.}$$

В этой формуле производная заменена приращениями ΔI_k и ΔI_0 при неизменном напряжении на коллекторе $|U_{кз}|$. Область выходных характеристик, в которой они имеют малый наклон (почти горизонтальны), является одной из основных рабочих зон транзистора и называется зоной усиления или активной зоной. В этой зоне коэффициент $\beta \gg 1$ и составляет десятки или даже сотни раз.

Коллекторные характеристики имеют слабый положительный наклон в основной рабочей зоне, т. е. при значительных изменениях напряжения $|U_{кз}|$ изменение тока I_k невелико (для каждой отдельной характеристики в семействе). Это значит, что выходное сопротивление транзистора, определяемое как

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{\Delta U_{кз}}{\Delta I_k}$$

при $I_0 = \text{const}$, составляет сотни тысяч Ом. По этой причине транзистор является источником тока.

На практике в импульсных и цифровых устройствах также широко используется так называемый ключевой режим работы транзистора. В этом режиме транзистор-ключ имеет два состояния: «закрыт» или «открыт».

В закрытом состоянии основной ток прибора отсутствует (на переходе «база–эмиттер» — обратное напряжение); коллекторный ток определяется только тепловым током I_{k0} и должен быть весьма малым для нормальной работы. Напряжение на коллекторе в этом состоянии транзистора почти не отличается от напряжения источника питания $|U_{кз}| \approx |U_{\text{ип}}|$. На коллекторных характеристиках закрытое состояние транзистора отвечает области между осью $|U_{кз}|$ и самой нижней, коллекторной характеристикой при токе $I_0 = 0$, (рис. 1.3). Эту область называют зоной «отсечки» тока в транзисторе.

В открытом состоянии переход «база–эмиттер» транзистора полностью открыт, и коллекторный ток I_k имеет максимально возможное для схемы значение. Это наибольшее значение тока I_k называют током насыщения коллектора $I_{\text{кн}}$. Величина $I_{\text{кн}}$ для данного

транзистора и данного напряжения источника питания $|U_{ин}|$ определяется резистором R_k , включенным в коллекторную цепь транзистора.

Режим работы, при котором в транзисторе протекает ток $I_k = I_{кн}$, называют режимом «насыщения» транзистора. В этом режиме напряжение на коллекторе $|U_{кэ}| = U_{кн}$ и близко к нулю. На коллекторных характеристиках данный режим отвечает зоне, примыкающей к вертикальной оси I_k (рис. 1.3).

Для более полной характеристики работы транзистора в различных режимах и выполнения расчетов на графике коллекторных характеристик размещают также линию нагрузки (ЛН) транзистора. Уравнение ЛН в координатах $(|U_{кэ}|; I_k)$ имеет вид:

$$I_k = \frac{|U_{ин}| - |U_{кэ}|}{R_k}.$$

Это уравнение прямой линии с отрицательным наклоном. Она легко строится по двум точкам на осях $|U_{ин}|$ и I_k . При $I_k = 0$ получаем точку на оси $|U_{кэ}|$: $|U_{кэ}| = |U_{ин}|$. Аналогично, при $|U_{кэ}| = 0$, получаем точку на оси I_k : $I_{кн} = |U_{ин}|/R_k$. Сама линия нагрузки АВ (рис. 1.3) располагается между зонами насыщения и отсечки транзистора.

При работе транзистора его ток I_k и напряжение $|U_{кэ}|$ соответствуют как коллекторным характеристикам, так и уравнению ЛН. Поэтому смещения с одной характеристики на другую происходят только вдоль ЛН.

С учетом этого определяют динамические усилительные свойства транзистора и параметры схемы с данным транзистором. В ключевом режиме транзистор переходит из точки А в точку В и обратно (через зону усиления) также вдоль ЛН.

Полевой транзистор

Полевым (униполярным, канальным) называется транзистор, в котором управление величиной тока в канале обеспечивается за счёт электрического поля, создаваемого входным напряжением, приложенным перпендикулярно каналу. Ток канала создается напряжением источника питания. Структура и схема включения с общим истоком исследуемого в работе полевого транзистора с управлением p - n -переходом приведены на рис. 1.4.

Транзистор имеет один p - n -переход затвор-исток, который включён в непроводящем направлении. При этом в области

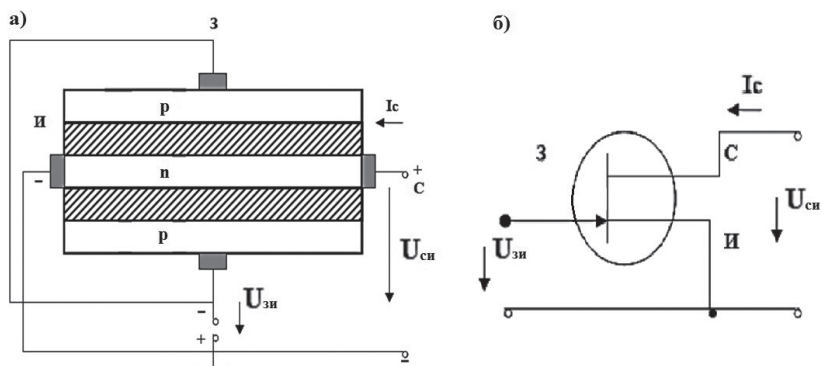


Рис. 1.4. Структура (а) и схема (б) включения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом: буквами И, С, З обозначены электроды транзистора — исток, сток и затвор соответственно

p - n -перехода обедненная свободными носителями зона, заштрихованная на рис. 1.4-а, перекрывает токопроводящий канал « n » от истока к стоку. Изменения напряжения $U_{зи}$ приводят к изменению размеров этой обедненной зоны и соответствующему изменению тока через транзистор.

Разность потенциалов между затвором (типа p) и каналом (типа n) увеличивается в направлении от истока к стоку, и наименьшее сечение канала расположено вблизи стока.

Семейства выходных и передаточных (стоко-затворных) вольт-амперных характеристик полевого транзистора для схемы включения с общим истоком (рис. 1.4-б) приведены соответственно на рис. 1.5-а и 1.5-б.

Выходные характеристики полевого транзистора похожи на выходные характеристики биполярного транзистора. Отличие состоит в том, что величина выходного тока определяется входным напряжением $U_{зи}$, а не током, как у биполярного транзистора.

Стоко-затворные характеристики (рис. 1.5-б) лежат в области отрицательных напряжений $U_{зи}$. Входное сопротивление полевого транзистора, т. е. сопротивление закрытого p - n -перехода, велико в отличие от биполярного транзистора, имеющего в активном режиме низкое входное сопротивление, так как управляющий p - n -переход в нем открыт. Напряжение $U_{зи}$, при котором токопроводящий канал полностью перекрывается ($I_c = 0$), называется напряжением отсечки.

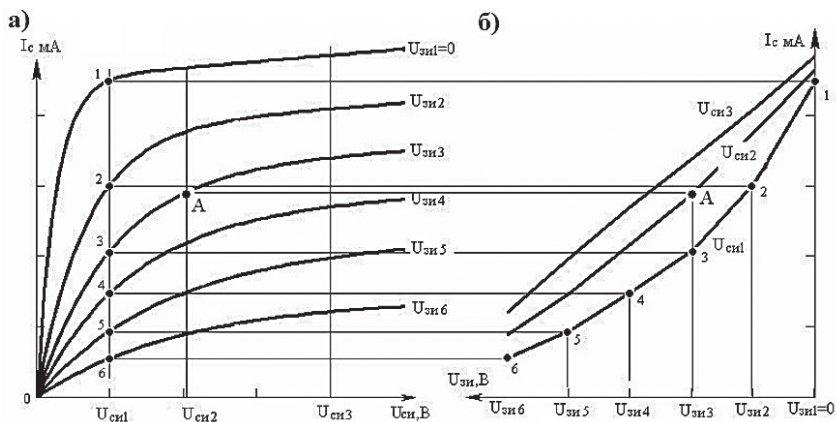


Рис. 1.5. Семейства выходных (а) и передаточных (б) вольтамперных характеристик полевого транзистора для схемы включения с общим истоком

Статические параметры полевого транзистора

Статическая крутизна передаточной характеристики:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const.}$$

Выходное (внутреннее) сопротивление транзистора:

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

Статический коэффициент усиления:

$$\mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}} \text{ при } I_c = \text{const.}$$

Статические параметры полевого транзистора можно определить, как и для биполярного транзистора, по вольтамперным характеристикам через приращения в зоне активного режима.

Динамическая характеристика (нагрузочная прямая) для полевого транзистора строится, как и для биполярного, по двум точкам с координатами $U_{си}$ при $I_c = 0$ и I_c при $U_{си} = 0$.

Описание лабораторной установки

Установка включает в себя лабораторный макет, содержащий исследуемые схемы с источниками питания, органами регулировки и необходимые измерительные приборы. При переключениях в процессе работы коммутируются как сами измерительные приборы, так и пределы их шкал. Пределы шкал указываются соответствующими светодиодными индикаторами, что позволяет определять цену деления шкалы прибора в каждом конкретном случае.

В работе исследуются типовой выпрямительный полупроводниковый диод, биполярный транзистор $p-n-p$ типа и полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом и n -каналом.

Порядок выполнения работы

Исследование полупроводникового диода

Включить на макете тумблер «Сеть» Переключатель «Исследуемая схема» установить в положение «1». Зарисовать схему № 1, изображенную на макете.

1. Экспериментально определить значение порогового напряжения диода $U_{пр}$. Для этого с помощью потенциометра « R_1 » медленно увеличивать напряжение на диоде U_d до момента появления прямого тока диода I_d . Повторить данную процедуру 2–3 раза и записать полученное значение $U_{пр}$.

2. Снять прямую ветвь ВАХ диода. Для этого, начиная со значения $U_{пр}$, устанавливать поочередно значения напряжения на диоде U_d (с шагом $\sim 0,1$ В) и фиксировать соответствующие значения прямого тока I_d . Получить 5–6 точек характеристики. Результаты измерений записать в табл. 1.1.

Табл. 1.1. Результаты измерения прямой ветви ВАХ

U_d , В	$U_{пр} = \dots$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
I_d , мА	0					

Снятую прямую ветвь ВАХ диода $I_d = f(U_d)$ следует потом построить на графике и для средней области ВАХ найти прямое сопротивление диода $R_{пр} \approx \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d}$.

3. Определить обратное сопротивление диода. Для этого переключатель «Исследуемая схема» перевести в положение «2». Обратить внимание на изменение полярности напряжений на диоде по сравнению с п. 2 (зарисовать схему № 2). Поочередно установить напряжение $U_{\text{д}} = -2$ В и $U_{\text{д}} = -10$ В; записать соответствующие значения тока диода. По результатам этого эксперимента найти значение:

$$R_{\text{обр}} \approx \frac{|\Delta U_{\text{д}}|}{|\Delta I_{\text{обр}}|}.$$

Сопоставить между собой величины $R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{обр}}$ и сделать вывод об основном свойстве диода.

Исследование биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ)

1. Снять семейство входных характеристик транзистора.

Переключатель «Исследуемая схема» перевести в положение «3»; переключатель «Сопротивление нагрузки» — в положение «0».

Установить потенциометром R_2 и контролировать в процессе измерения в каждой точке значение параметра $|U_{\text{кз}}| = 0$ В. Изменяя напряжение на базе $U_{\text{бз}}$ от 0 до $-0,2$ В с шагом $0,05$ В, фиксировать в табл. 1.2 ток базы $I_{\text{б}}$. Повторить измерения для параметра $U_{\text{кз}} = -8$ В.

Табл. 1.2. Семейство входных характеристик. Результаты измерений

$ U_{\text{бз}} $, В		0	-0,05	-0,10	-0,15	-0,20
$I_{\text{б}}$, мкА	$U_{\text{кз}} = 0$ В					
	$U_{\text{кз}} = -8$ В					

По данным измерений следует построить входные характеристики транзистора (в первом квадранте) и определить входное сопротивление транзистора (в средней части ВАХ):

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{|\Delta U_{\text{бз}}|}{|\Delta I_{\text{бз}}|} \quad \text{при } U_{\text{кз}} = \text{const.}$$

2. Снять семейство выходных характеристик транзистора.

Положения переключателей на макете не менять. Установить (и контролировать в процессе измерений в каждой точке!) значение

тока базы I_6 , указанное в табл. 1.3. Изменяя напряжение на коллекторе $U_{кз}$ согласно табл. 1.3, фиксировать и заносить в таблицу соответствующие значения тока коллектора $I_к$.

Табл. 1.3. Семейство выходных характеристик. Результаты измерений

$U_{кз}, \text{В}$		-8	-6	-4	-2	-1	-0,5	0
$I_к, \text{мА}$	$I_6 = 0 \text{ мкА}$							0
	$I_6 = 50 \text{ мкА}$							0
	$I_6 = 100 \text{ мкА}$							0
	$I_6 = 200 \text{ мкА}$							0

Построить (в первом квадранте) полученные коллекторные характеристики и определить коэффициент усиления тока:

$$\beta \approx \frac{\Delta I_к}{\Delta I_6} \quad \text{при } |U_{кз}| = \text{const.}$$

Достаточно найти одно значение β для зоны усиления транзистора.

3. Исследовать транзистор в ключевом режиме.

Переключатель «Спротивление нагрузки» перевести в положение «1 кОм»; установить напряжение источника $|U_{кз}|$ (тумблер B_2 перевести для этого в положение « $E_{пит}$ »). Вернуть этот тумблер в положение « $U_{кз}$ » после установки.

Установить ток $I_6 = 0$, зафиксировать значения тока $I_к$ и напряжения $|U_{кз}|$; убедиться, что $I_к \approx 0$, а $|U_{кз}| \approx |U_{ин}| = 6 \text{ В}$. Дать характеристику данному состоянию транзистора-ключа («Закрыт», режим отсечки).

Медленно увеличивать ток I_6 и наблюдать за изменением тока $I_к$ и напряжения $|U_{кз}|$; прекратить изменение тока I_6 в тот момент, когда ток $I_к$ перестанет возрастать, а напряжение $|U_{кз}|$ окажется минимальным (близким к 0); записать эти значения $I_к = I_{кн}$, $|U_{кз}| = |U_{кн}|$ и охарактеризовать данное состояние транзистора («Открыт», режим насыщения).

Две полученные в эксперименте точки координат ($|U_{кз}|$, $I_к$) позволяют провести линию нагрузки на графике коллекторных характеристик; выполнить это построение.

Перевести переключатель «Спротивление нагрузки» в положение «4,3 кОм», проверить значение $|U_{ин}| = 6 \text{ В}$ и повторить измерения аналогично предыдущему. Полученную линию нагрузки также нанести на график коллекторных характеристик.

Исследование полевого транзистора в схеме с общим истоком (ОИ)

1. Снять семейство выходных статических характеристик полевого транзистора, включенного по схеме с общим истоком.

$$I_c = f(U_{си}) \text{ при } U_{зи} = \text{const},$$

где I_c — ток стока; $U_{си}$ — напряжение между стоком и истоком; $U_{зи}$ — напряжение между затвором и истоком.

Для этого переключатель «Исследуемая схема» перевести в положение 5, переключатель «Сопротивление нагрузки» в положение 0. Установить $U_{зи} = 0$ В. Изменяя напряжение $U_{си}$ от 0 до 8 В наблюдать за изменением I_c . Повторить измерение характеристик $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи}$, равных 0,5; 1; 1,5 и 2 В. Результаты измерений записать в табл. 1.4.

Табл. 1.4. Семейство выходных характеристик. Результаты измерений

$U_{си}$ (В)		0	1	2	4	6	8
I_c (мА)	$U_{зи} = 0$ В						
	$U_{зи} = 0,5$ В						
	$U_{зи} = 1$ В						
	$U_{зи} = 1,5$ В						
	$U_{зи} = 2$ В						

Построить график семейства выходных характеристик транзистора. Определить по выходным характеристикам статические параметры полевого транзистора:

$$S; R_i; \mu = SR_i.$$

2. Исследовать полевой транзистор в ключевом режиме.

Переключатель «Сопротивление нагрузки» перевести в положение 1 кОм. Увеличивая отрицательное напряжение $U_{зи}$, определить и записать значение напряжения $U_{зи}$, при котором ток $I_c = 0$. Изменяя напряжение $U_{зи}$ к $U_{зи} = 0$, измерить I_c и $U_{си}$. Переключатель «Сопротивление нагрузки» перевести в положение 4,3 кОм. Повторить эти измерения для сопротивления нагрузки $R_n = 4,3$ кОм. На графике выходных характеристик транзистора построить по измеренным токам нагрузочные прямые.

Содержание отчета

Отчет по работе должен быть оформлен в соответствии с общими требованиями (см. Введение).

Дополнительные требования:

- точно изобразить исследованные схемы;
- заполнить таблицы экспериментальных данных, построить соответствующие им графики и выполнить расчеты параметров по снятым характеристикам, подготовить ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы и задания

1. Дать определение полупроводникового диода.
2. Пояснить ВАХ диода.
3. Сформулировать основное свойство диода.
4. Указать основные электрические параметры полупроводникового диода.
5. Дать определение биполярного транзистора.
6. Пояснить включение биполярного транзистора по схеме с ОЭ.
7. Дать определение входных и выходных характеристик биполярного транзистора при включении по схеме с ОЭ.
8. Указать основные параметры биполярного транзистора, которые можно найти по его ВАХ.
9. Перечислить режимы работы биполярного транзистора.
10. Как построить нагрузочную прямую биполярного транзистора?
11. Пояснить устройство и принцип работы полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.
12. Как определить статические параметры полевого транзистора по его характеристикам?
13. Как строится динамическая характеристика (нагрузочная прямая) полевого транзистора?

Литература

[1] — с. 117–158; [2] — с. 289–304; [4] — с. 4–19; [6] — с. 21–38; [7] — с. 159–181.

1.2. Лабораторная работа № 2.

Исследование логических элементов и интегральных триггеров

Цель работы: изучение схем и принципов работы логических элементов (ЛЭ) и интегральных триггеров (ТГ).

Ознакомление с основными логическими элементами (ЛЭ) транзисторно-транзисторной логики, их функционированием и условными графическими обозначениями.

Экспериментальное исследование работы ЛЭ типа НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ и «Исключающее ИЛИ», а также логических схем на их основе.

Ознакомление с принципами работы интегральных триггеров типа RS, D, T и JK.

Теоретические сведения

Логические элементы

В цифровых устройствах входной и выходной сигналы являются двоичными сигналами, т. е. принимают только два значения, одно из которых соответствует логическому нулю (0), а другое — логической единице (1). Такие сигналы называют также логическими переменными, причём выходная переменная Y есть та или иная логическая функция входных переменных $X_1, X_2, \dots, X_M$:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_M).$$

Эту функцию задают в виде таблицы, включающей все возможные комбинации значений входных переменных X_i при $i = (1, M)$ и соответствующие этим комбинациям значения выходной переменной Y . Такую таблицу называют таблицей истинности. Существуют три базовые логические функции, на основе которых могут создаваться любые более сложные комбинированные.

1) Логическое отрицание или инверсия.

Эта функция устанавливает логическую связь между выходной переменной Y и единственной входной переменной X . Если переменная X есть логический 0, т. е. $X = 0$, то переменная $Y = 1$ и, наоборот, при $X = 1$ выходная переменная $Y = 0$. Другими словами,

выход Y является инверсным по отношению ко входу X . Инверсия записывается в виде $Y = \overline{X}$ и читается как « Y равно не X ». Она имеет простейшую таблицу истинности, приведенную ниже. Инверсию называю также операцией «НЕ».

X	Y
0	1
1	0

2) Логическое умножение (конъюнкция).

Эта функция устанавливает логическую связь между выходным сигналом Y и несколькими входными переменными $X_i, i = 1, M, M \geq 2$. Таблица истинности для случая $M = 2$ имеет вид:

$X1$	$X2$	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Из последней видно, что значение $Y = 1$ равно единице, когда оба значения $X1$ и $X2$ равны единице:

$$X1 = X2 = 1.$$

В остальных случаях выход $Y = 0$. Поэтому логическое умножение (конъюнкцию) называют операцией «И» (совпадением).

Для случая двух переменных логическое умножение записывается в виде $Y = X1 \cap X2$ (со знаком пересечения из теории множеств); используется также обычная запись в арифметической форме $Y = X1X2$.

Для произвольного значения числа переменных, т. е. $M > 2$, логическое умножение определяется и записывается аналогично случаю $M = 2$. Так, функция $Y = X1 \cap X2 \cap \dots \cap XM$ принимает значение $Y = 1$ только тогда, когда все переменные $X_i = 1$, где $i = (1, M)$; в остальных случаях (когда хотя бы одно из значений $X_i = 0$, где $i = (1, M)$) переменная $Y = 0$.

3) Логическое сложение (дизъюнкция)

Эта функция устанавливает логическую связь также между состояниями выхода Y и несколькими входными переменными X_i при $i = (1, M); M \geq 2$. Таблица истинности данной функции для случая двух входных переменных ($M = 2$) имеет вид:

$X1$	$X2$	Y
0	0	0

X_1	X_2	Y
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Видно, что значение $Y = 1$, если хотя бы одно из значений X_1 или X_2 (или оба) равны 1; при $X_1 = X_2 = 0$ функция $Y = 0$.

Поэтому логическое сложение называется также операцией «ИЛИ».

Логическая дизъюнкция записывается в любой из двух следующих форм:

$$Y = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_M = X_1 + X_2 + \dots + X_M.$$

Первая форма использует знак «объединения» из теории множеств, вторая имеет арифметическую форму – «сложение» (плюс).

В общем случае при $M \geq 2$ функция $Y = 1$, если хотя бы одно из значений $X_i = 1$, где $i = 1, M$; значение $Y = 0$, если все переменные $X_i = 0$, где $i = 1, M$.

Логические функции могут быть реализованы с помощью электронных ключей, имеющих два различных состояния. Этим состояниям отвечают два различных уровня выходного напряжения ключей; высокий уровень можно считать логической единицей, а низкий — логическим нулем («положительная логика»).

Условные графические обозначения инвертора (НЕ), конъюнктора (И) и дизъюнктора (ИЛИ) показаны на рис. 1.6.

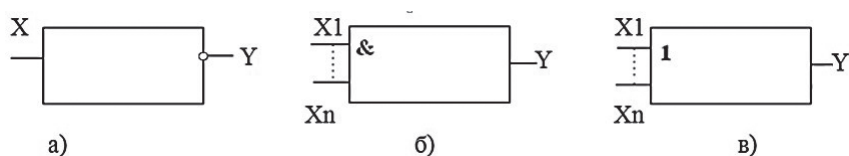


Рис. 1.6. Условные графические обозначения:
а) инвертора (НЕ); б) конъюнктора (И); в) дизъюнктора (ИЛИ)

В цифровой технике эти устройства называются базовыми логическими элементами (ЛЭ) типа НЕ, И, ИЛИ. На их основе может быть реализована любая сложная логическая функция, например, составные ЛЭ типа И-НЕ, либо ИЛИ-НЕ.

При $M = 2$: $Y = \overline{X_1 X_2}$ — функция И-НЕ, а $Y = \overline{X_1 + X_2}$ — функция ИЛИ-НЕ.

x_1	x_2	И-НЕ $Y = \overline{X_1 X_2}$	ИЛИ-НЕ $Y = \overline{X_1 + X_2}$
0	0	1	1
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	0

В современной микросхемотехнике каждая из функций И-НЕ и ИЛИ-НЕ реализуется технологически как единый ЛЭ. В цифровой аппаратуре используются ЛЭ на основе разных схем и типов транзисторов: транзисторно-транзисторные ЛЭ (ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика), эмиттерно-связанные ЛЭ (ЭСЛ), ЛЭ на комплементарных МДП-транзисторах (КМДП-логика, КМОП-логика); И2Л — интегрально-инжекционная логика; ТТЛШ — транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки, и другие.

В данной лабораторной работе исследуются транзисторно-транзисторные логические элементы. Базовый И-НЕ — элемент этого типа содержит два каскада:

- входной — на многоэмиттерном транзисторе (МЭТ), реализующий функцию И;

- выходной — так называемый сложный инвертор, реализующий функцию НЕ и обеспечивающий высокую нагрузочную способность и быстродействие микросхемы. Аналогично устроен ЛЭ, выполняющий функцию ИЛИ-НЕ.

Микросхемы с ТТЛ-элементами при напряжении источника питания $U_{\text{нп}} = 5$ В имеют уровень напряжения логического нуля не выше 0,4 В и уровень напряжения логической единицы не ниже 2,4 В. Они имеют достаточно высокое быстродействие, обеспечивая частоту переключения f десятки МГц.

Интегральные триггеры

В цифровой аппаратуре широко используется триггер (ТГ) — электронное устройство с двумя устойчивыми состояниями: логического нуля (0) и логической единицы (1).

Переброс из одного состояния в другое совершается в ТГ под действием внешнего сигнала; в отсутствие внешнего сигнала ТГ сохраняет свое состояние неизменным.

Интегральные ТГ входят в состав интегральных микросхем (ИМС) как в качестве самостоятельных функциональных узлов,

так и как важная составная часть различных более сложных цифровых устройств: регистров, электронных счётчиков, запоминающих устройств и др.

Схемы ТГ различаются по функциональным возможностям и по способам управления их работой: прямой и инверсный. По информационным входам осуществляется управление работой ТГ. Сигналы на вспомогательных входах служат для предварительной установки ТГ в нужное исходное состояние и для синхронизации его работы.

По функциональным возможностям различают следующие ТГ:

- RS-триггер (ТГ с установочным запуском);
- D-триггер (ТГ задержки);
- Т-триггер (ТГ со счетным входом);
- JK-триггер (универсальный ТГ).

Используются и другие типы триггеров (TV-, DV-, E-триггеры и др.).

По способу управления (приёма информации) различают асинхронные (неактивируемые) и синхронные (активируемые).

Синхронные триггеры реагируют на информационные сигналы при наличии разрешающего сигнала синхронизации на специальном входе синхронизации С.

Простейший асинхронный RS-триггер используется и самостоятельно и для построения ТГ других типов; он имеет два информационных входа:

- вход S («Set» — «установка») — для установки ТГ в единичное состояние;
- вход R («Reset» — «Сброс») — для сброса ТГ в нулевое состояние.

Говорят, что триггер находится в состоянии логической единицы, если его прямой выход $Q = 1$, а инверсный выход $Q = 0$, и триггер находится в нулевом состоянии (сброшен), если его прямой выход $Q = 0$, а инверсный выход $Q = 1$.

Интегральные RS-триггеры могут быть построены на логических элементах типа И-НЕ, либо ИЛИ-НЕ. Триггер на элементах И-НЕ, применяемый чаще, называют RS-триггером с инверсным управлением. Функциональная схема данного триггера и его условное обозначение приведены на рис. 1.7.

Из схемы видно, что сигнал $S = 0$ при сигнале $R = 1$ устанавливает ТГ в единичное состояние $Q = 1$; сигнал $R = 0$ при сигнале $S = 1$ сбрасывает триггер в нулевое состояние $Q = 0$. Поскольку установка

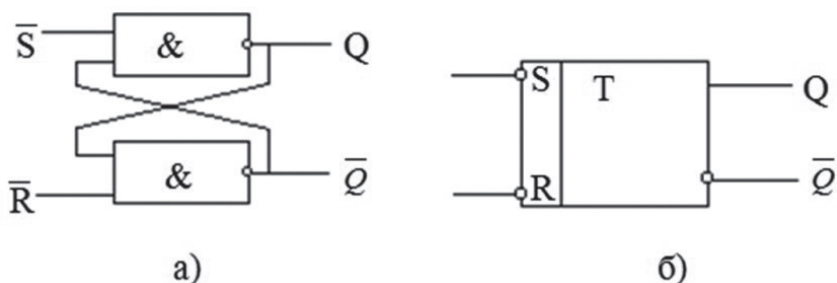


Рис. 1.7. Функциональная схема RS-триггера: а) схема на ЛЭ; б) УГО

ТГ осуществляется сигналом низкого уровня (логическим нулем), этот ТГ и называют ТГ с инверсным управлением. Инверсный характер управления подчеркивается в обозначениях сигналов S и R (с чертой), а также в указателях входов (кружки).

Комбинация входных сигналов $S = R = 1$ не меняет состояния ТГ и соответствует режиму «хранения» информации в ТГ.

Комбинация сигналов $S = R = 0$ — запрещенная для данного ТГ, так как она приводит к неопределенности состояния выходов; такая комбинация входных сигналов должна быть исключена при работе ТГ.

Описанный алгоритм функционирования RS-триггера отображается таблицей:

S	R	Q	Режим
1	1	Предыдущее состояние	Хранение
0	1	1	Установка
1	0	0	Сброс
0	0	Запрещено	

Счетный Т-триггер — это ТГ с одним информационным входом Т («Toggle» — «Релаксатор»), изменяющий свое состояние с приходом каждого очередного импульса по данному входу. На рис. 1.8 приведены общее обозначение и временные диаграммы, поясняющие функционирование счетного Т-триггера. Частота $f_{\text{вых}}$ следования выходных импульсов в два раза ниже частоты $f_{\text{вх}}$ входных импульсов:

$$f_{\text{вых}} = \frac{f_{\text{вх}}}{2}.$$

Вспомогательные входы R и S служат для исходной установки ТГ. Для построения Т-триггеров обычно используются ТГ других типов, в которых устанавливаются соответствующие связи.

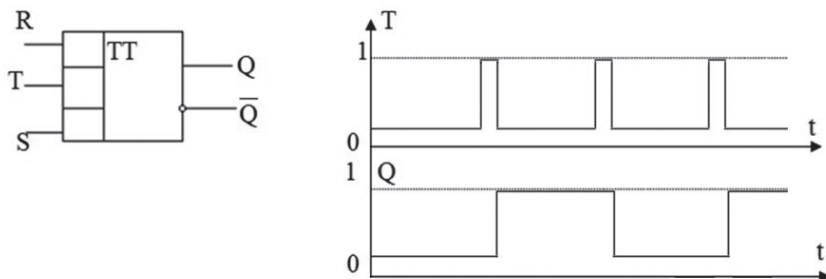


Рис. 1.8. Общее обозначение и временные диаграммы счетного Т-триггера

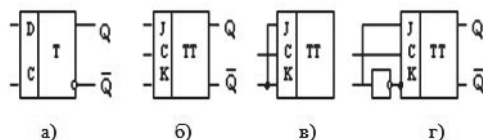


Рис. 1.9. Схемы ТТ: а) D; б) JK; в) Т-триггер с входом Т на выводе С; г) D-триггер с входом D на общем JK-входе (на входе К инвертор)

D-триггер (от англ. «delay» — «задержка»), приведенный на рис. 1.9-а, имеет два входа: информационный «D» и синхронизации «C». D-триггер запоминает на выходе Q состояние входа D при наличии на входе C синхронизирующего сигнала $C = 1$ до следующего синхросигнала.

JK-триггер (от англ. «jump» — «переход», «кеер» — «сохранение»), изображенный на рис. 1.9-б, называется универсальным. По входам J и K он ведет себя как RS-триггер, который при комбинации $S = R = 1$, запрещенной для обычного RS-триггера, переключается на каждый синхросигнал $C = 1$. Соединив входы J и K и подав на них 1 (рис. 1.9-в), можно получить Т-триггер с входом Т на выводе С. Если добавить на вход К инвертор (рис. 1.9-г), то получится D-триггер с входом D на общем JK-входе.

Описание лабораторных макетов

Логические элементы

Исследуемые в лабораторной работе ЛЭ НЕ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ расположены в верхней части макета. Там также находится ЛЭ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» (сумматор по модулю 2), реализующий

так называемую функцию неравнозначности $Y = X1\overline{X2} + \overline{X1}X2$. Эта функция принимает значение $Y = 1$ при $X1 \neq X2$. При $X1 = X2 = 0$ или при $X1 = X2 = 1$ функция $Y = 0$. Функцию неравнозначности (суммирование по модулю 2) кратко записывают в виде:

$$Y = X1 \oplus X2.$$

В правой верхней части макета находится цифровой индикатор уровня, который служит для индикации логических уровней. Если на выходе ЛЭ уровень напряжения будет соответствовать логической единице (высокий уровень), то на индикаторе уровня будет светиться единица.

В левой части макета находятся гнезда ХТ1, с которых можно снять напряжение логической единицы. Потенциал же гнезд ХТ соответствует логическому нулю.

Внимание! Нельзя соединять выход логического элемента (т. е. вывод, расположенный с правой стороны ЛЭ) с общим проводом.

Интегральные триггеры

В состав лабораторной установки входит лабораторный макет, содержащий исследуемые триггеры, и вольтметр, позволяющий измерить напряжение высокого и низкого уровней в триггерах (уровни логической 1 и логического 0).

Асинхронный RS-триггер с инверсным управлением собран на микросхемах DD1.3 и DD1.4 в корпусе ИМС типа К155ЛА3 (в этом корпусе содержатся четыре двухвходовых логических элемента 2И-НЕ).

Резисторы R1, R2, подключенные к источнику питания $U_{\text{ип}}$ (+5 В), и кнопка SB1 позволяют на базе RS-триггера DD1.3 и DD1.4 получить так называемый «ключ бездребезга» в результате соединения гнезда ХТ9 с гнездом ХТ5 и гнезда ХТ10 с гнездом ХТ6. При этом в исходном состоянии (кнопка опущена) RS-триггер сброшен: гнездо ХТ7 имеет низкий уровень напряжения, т. е. выход $Q = 0$. При нажатии кнопки SB1 сигнал низкого уровня устанавливается на гнезде ХТ5, поэтому RS-триггер переходит в единичное состояние $Q = 1$. При опускании кнопки он возвращается в нулевое состояние. Четкая установка RS-триггера в одно и другое состояние с помощью кнопки SB1 оправдывает название «ключ бездребезга».

Индикатор высокого логического уровня (ИВ) представляет собой последовательное соединение светодиода HL1 и резистора R1, ограничивающего ток через светодиод. При подключении этого индикатора к какому-либо гнезду схемы можно фиксировать наличие или отсутствие уровня логической единицы на этом гнезде: светодиод загорается при наличии высокого уровня.

Схема Т-триггера реализуется на ИМС DD1 типа K155TM2, содержащей в одном корпусе два отдельных D-триггера.

Порядок выполнения работы

Подготовка лабораторных макетов к работе

Включить лабораторный макет в сеть тумблером, расположенным на правой боковой стенке макета. Убедиться в наличии напряжения питания, подключив гнездо светодиодного индикатора перемычкой к выходному гнезду источника питания. Индикатор должен гореть.

Исследование работы основных ЛЭ

Экспериментально получить таблицы истинности ЛЭ типа НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

Для этого:

- соединить перемычкой выход исследуемого ЛЭ с гнездом ИВ (индикатора выхода);
- подавая последовательно на вход исследуемого ЛЭ все комбинации входных логических уровней, заполнить таблицу истинности согласно показаниям индикатора выхода (напряжения логических уровней на входы ЛЭ подаются перемычками от соответствующих гнезд ХТ11, ХТ9 — «1»; ХТ0, ХТ10 — «0»);
- сравнить полученные результаты с теоретическими, приведенными выше.

Исследование логических схем на базе основных ЛЭ

Собрать на макете с помощью перемычек те из схем, приведенных на рис. 1.10, на которые укажет преподаватель, и снять их таблицы истинности.

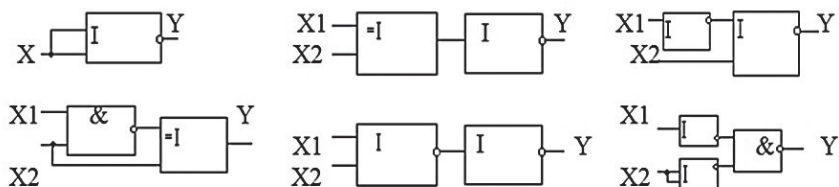


Рис. 1.10. Исследование схем на ЛЭ

Исследование схемы контроля четности

Собрать схему на основе двух ЛЭ «Исключающее ИЛИ», как показано на рис. 1.11. Испытать данную схему аналогично предыдущему и заполнить таблицу истинности. В графе «Примечания» таблицы указать, четному или нечетному числу единиц в каждой строке ($X1$, $X2$, $X3$) таблицы соответствуют единичные значения функции Y .

$X1$	$X2$	$X3$	Y	Прим.
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

Как видно, испытанная схема играет роль детектора условия четности или нечетности трехразрядных двоичных слов; она называется схемой контроля четности и используется (при большем, чем 3, числе разрядов) в кодировании для обнаружения ошибок при передаче информации двоичными словами.

Исследование схемы сравнения цифровых слов на основе ЛЭ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»

Собрать схему согласно рис. 1.12; испытать данную схему и заполнить таблицу истинности. Анализируя таблицу, определить в каком случае выходная функция Y равна 1 — при одинаковых или различных цифровых словах $A = (a1, a2)$ и $B = (b1, b2)$. Сравнения цифровых слов необходимы, например, в тех случаях, когда требуется «просмотреть» большое количество двоичных слов и подсчитать частоту появления определённого слова.

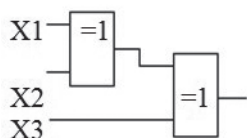


Рис. 1.11. Схема контроля четности на основе ЛЭ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»

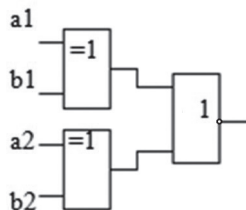


Рис. 1.12. Схема сравнения цифровых слов на основе ЛЭ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»

Слово <i>A</i>		Слово <i>B</i>		<i>Y</i>
a1	a2	b1	b2	
0	0	0	0	
1	0	1	0	
0	1	0	1	
1	1	1	1	
0	0	1	1	
1	0	0	1	
0	1	1	0	
1	1	0	0	
1	0	0	0	

Исследование RS-триггера

Экспериментально ознакомиться с работой асинхронного RS-триггера с инверсным управлением на элементах И-НЕ (DD1.3 и DD1.4).

Для этого выполнить следующие действия.

- Поочередно подключая ИВ к прямому Q и инверсному Q выходам ТГ (гнезда ХТ7, ХТ8 соответственно), определить и записать в виде таблицы его исходное состояние (оба входа ТГ высокие $S = R = 1$).

- Подключить ИВ к прямому выходу Q (гнездо ХТ7); соединить вход S (гнездо ХТ5) с 0 (гнездо ХТ0), а R с 1 и убедиться, что при этом ТГ устанавливается в единичное состояние $Q = 1$ (если предыдущее исходное состояние уже было единичным, то оно сохраняется; если оно было нулевым, то становится единичным); результат опыта занести в таблицу состояний RS-триггера.

S (XT5)	R (XT6)	Q (XT7)	Q (XT8)	Режим	Примечания
1	1				Исходное состояние $U_{\text{вых}} = B$ $U_{\text{вых}} = B$
0	1				
1	1				
1	0				
1	1				

– Отключить гнездо XT5 от 0 (на оба входа ТГ подать единицы $S = R = 1$); убедиться, что состояние ТГ не меняется — режим «хранение»; отметить это в очередной строке таблицы состояний.

– Подключить ИВ к выходу ТГ и соединить вход R (гнездо XT6) с 0, а вход S (гнездо XT5) с 1; убедиться, что ТГ сбрасывается в нулевое состояние: $Q = 0$; результат опыта занести в следующую строку таблицы.

– Отключить гнездо XT6 от 0 (подать на входы $S = R = 1$) и убедиться, что при этом ТГ не меняет своего состояния — режим «хранение»; отметить это в очередной строке таблицы.

– С помощью вольтметра измерить напряжение высокого $U_{\text{вых}}$ и низкого $U_{\text{вых}}$ уровней на выходах ТГ; результаты измерений записать в графу «Примечание» таблицы.

На базе исследованного RS-триггера собрать и испытать «ключ бездребезга». Для этого выполнить следующее:

– соединить гнезда XT5 и XT9, а также гнезда XT6 и XT10; с помощью ИВ убедиться, что триггер находится в сброшенном состоянии $Q = 0$;

– поочередно нажимая и отпуская кнопку SA1, наблюдать за изменением состояния ТГ в зависимости от положения кнопки: «Кнопка нажата», «Кнопка отпущена».

Этот «ключ бездребезга» (в дальнейшем просто «ключ») используется при выполнении следующей части работы.

Исследование счётного Т-триггера

Экспериментально ознакомиться с работой Т-триггера на микросхеме DD1.1. Для этого в данной микросхеме соединить между собой гнезда XT1 и XT6 и выполнить следующие действия.

Убедиться, что Т-триггер устанавливается и сбрасывается сигналами низкого уровня на входах S и R; данные занести в таблицу.

S (XT4)	R (XT3)	Q (XT5)	Режим
0	1		

S (XT4)	R (XT3)	Q (XT5)	Режим
1	1		
1	0		
1	1		

Соединить счетный вход Т-триггера DD1.2 (гнездо XT7) с выходом ключа (гнезда XT7 в схеме RS-триггера); периодически нажимая и отпуская кнопку SB1, наблюдать за изменением состояний Т-триггера при поступлении каждого очередного сигнала $C = 1$ (ИВ подключен к выходу ТГ — гнезду XT8); результаты занести в таблицу.

№ п/п	C	Q	Примечания
1	0		
2	1		
3	0		
4	1		
5	0		
6	1		
7	0		
8	1		

В графе «Примечания» сделать вывод о соотношении частоты $f_{\text{вх}}$ поступления импульсов $C = 1$ на вход ТГ (гнездо XT7) и частоты $f_{\text{вых}}$ выходных импульсов ТГ (гнездо XT8).

Требования к оформлению отчета

Отчет по работе должен быть оформлен в соответствии с общими требованиями (см. Введение).

Дополнительные требования

Отчёт должен содержать:

- исследуемые схемы;
- таблицы истинности;
- формулы логических выражений для логических схем;
- временные диаграммы для произвольной последовательности входных символов.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие вы знаете основные логические функции?
2. Как обозначаются на схемах логические элементы?

3. Поясните работу базовых логических элементов И, ИЛИ, НЕ.
4. Поясните работу составных логических элементов И-НЕ, ИЛИ-НЕ и элемента «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ».
5. Какие технологические типы ЛЭ вы знаете и чем они отличаются?
6. Какие логические уровни напряжений имеют ЛЭ транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ)?
7. Что представляют собой таблицы истинности и для чего они составляются?
8. Изобразить функциональную схему RS-триггера на логических элементах типа И-НЕ; пояснить работу триггера.
9. Что значит «установка» триггера и его «сброс»?
10. Что значит «хранение» в триггере?
11. Сколько информационных выходов имеет триггер?
12. Как соотносятся частоты следования импульсов на входе и выходе Т-триггера?

Литература

[2] — с. 367–369, 381–383; [4] — с. 20–34; [5] — с. 420–434; [6] — с. 185–195.

1.3. Лабораторная работа № 3. Исследование выпрямителей и стабилизаторов

Цель работы: экспериментальное ознакомление с принципом действия полупроводникового выпрямителя и стабилизатора выпрямленного напряжения.

Теоретические сведения

Полупроводниковые выпрямители

В большинстве случаев для питания электронной аппаратуры нужен постоянный ток, поэтому необходимо преобразование переменного напряжения и тока исходной питающей сети в постоянное напряжение и ток требуемого уровня. Такое преобразование

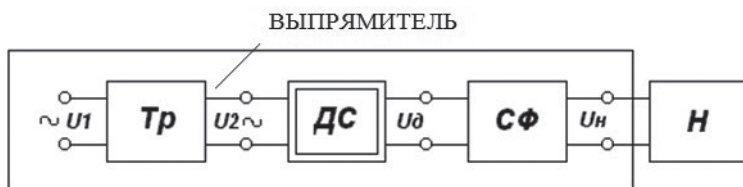


Рис. 1.13. Структура полупроводникового выпрямителя с нагрузкой

осуществляется выпрямителями переменного тока. Для электронной аппаратуры чаще всего используют маломощные (и средней мощности) выпрямители, работающие от однофазной сети переменного тока с частотой обычно 50 Гц.

Структура однофазного полупроводникового выпрямителя с нагрузкой приведена на рис. 1.13.

Главным узлом такого выпрямителя является диодная схема (ДС) на одном или нескольких полупроводниковых диодах. Эта схема также называется вентилем, вентильной группой, диодным мостом. Переменное напряжение сети U_1 поступает к диодам через силовой (сетевой) трансформатор Тр, который трансформирует это напряжение в переменное напряжение U_2 необходимого уровня, а также осуществляет электрическую развязку сети и всей последующей схемы. Развязка необходима по условиям техники безопасности.

Диодная схема (ДС) обеспечивает одностороннее протекание тока, т. е. преобразует переменный синусоидальный ток в пульсирующий ток, состоящий на выходе ДС из однополярных полувольт $U_d(t)$ (рис. 1.14-б). На рисунке показан случай однополупериодного выпрямителя. Не пропускаемые диодной схемой полувольты входного напряжения (рис. 1.14-а) отмечены на временной диаграмме выходного напряжения (рис. 1.14-б) пунктиром.

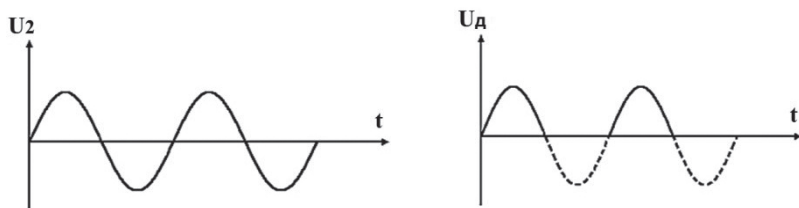


Рис. 1.14. Временные диаграммы напряжения: на входе (а) и на выходе (б) диодной схемы. На рисунке показан случай однополупериодного выпрямления

Полярность полуволн $U_d(t)$ определяется соответствующей полярностью включения диодов (диода) в ДС. Пульсирующее напряжение $U_d(t)$ содержит нужную («полезную») постоянную составляющую, но содержит также и нежелательную переменную компоненту, основная гармоника которой имеет в случае однополупериодного выпрямителя частоту сети. В простейших выпрямителях допускается наличие подобных пульсаций. Нагрузка подключается непосредственно к выходу ДС.

Обычно же для снижения уровня пульсации используются различные сглаживающие фильтры (СФ). На выходе СФ напряжение имеет низкий уровень пульсаций и является уже практически постоянным напряжением на нагрузке U_n .

К основным электрическим параметрам выпрямителя относят: средние значения выпрямленного напряжения и тока в нагрузке U_n , I_n и коэффициент пульсаций. Одной из важнейших характеристик выпрямительного устройства является внешняя характеристика, которая представляет собой зависимость выпрямленного напряжения на нагрузке U_n от тока нагрузки I_n :

$$U_n = \varphi(I_n).$$

Обычно напряжение U_n нелинейно снижается с ростом тока I_n .

Коэффициентом пульсации K_n называют отношение амплитуды переменной составляющей на выходе выпрямителя (основной гармоники пульсации) U к среднему значению выпрямленного напряжения U_n :

$$K_n = \frac{U}{U_n}.$$

Схема простейшего однополупериодного выпрямителя без СФ приведена на рис. 1.15-а.

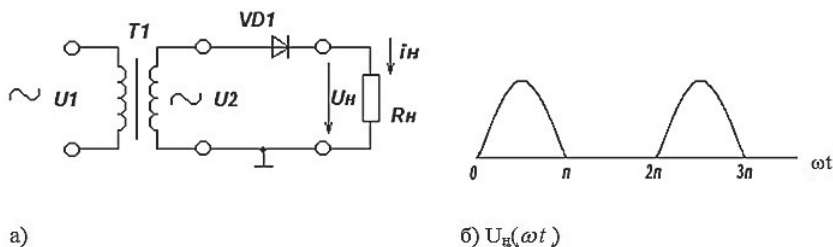


Рис. 1.15. Схема простейшего однополупериодного выпрямителя без СФ (а) и форма напряжения на выходе (б)

В данном случае ДС включает только диод VD1. Он пропускает в нагрузку R_n лишь положительную половину тока i_n , так как оказывается открытым (прямо смещенным) только при положительной полуволне напряжения. Видно, что частота повторений тока i_n равна частоте тока сети (рис. 1.15-б). Для простейшего выпрямителя, представленного на схеме рис. 1.15-а, его внешняя характеристика имеет простой вид:

$$U_n = U_{нх} - (R_{тр} + R_{пр}) I_n,$$

где $U_{нх}$ — среднее выпрямленное напряжение на нагрузке при холостом ходе ($I_n = 0$); $R_{тр}$ и $R_{пр}$ — соответственно сопротивление вторичной обмотки трансформатора Т1 и прямое сопротивление диода VD1 току I_n .

Для нахождения коэффициента пульсации K_n полуволновое напряжение $U_n(t)$ представляют рядом Фурье. Расчеты показывают, что амплитуда пульсаций U и среднее выпрямленное напряжение U_n равны:

$$U = 0,5\pi U_n; \quad U_n = \frac{U_m}{\pi},$$

где U_m — амплитуда синусоидального напряжения $U_2(t)$. Таким образом, коэффициент пульсации в простейшем однополупериодном выпрямителе без СФ равен:

$$K_n = \frac{U}{U_n} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57.$$

Как уже отмечалось, для изменения полярности выпрямленного напряжения (полярности полуволн U_n , I_n) следует изменить в схеме (рис. 1.15) только полярность включения диода VD1. Преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота. Однако он обладает большим коэффициентом пульсаций, пониженными значениями выпрямленного напряжения и тока, низким КПД. Такие выпрямители применяют для питания высокоомных нагрузочных устройств, например, электронно-лучевых трубок, газоразрядных индикаторов и других устройств мощностью не более 10...15 Вт. Чаще применяют двухполупериодные выпрямители, которые используют оба полупериода напряжения сети. На рис. 1.16-а приведена упрощенная (без СФ) схема двухполупериодного выпрямителя мостового типа.

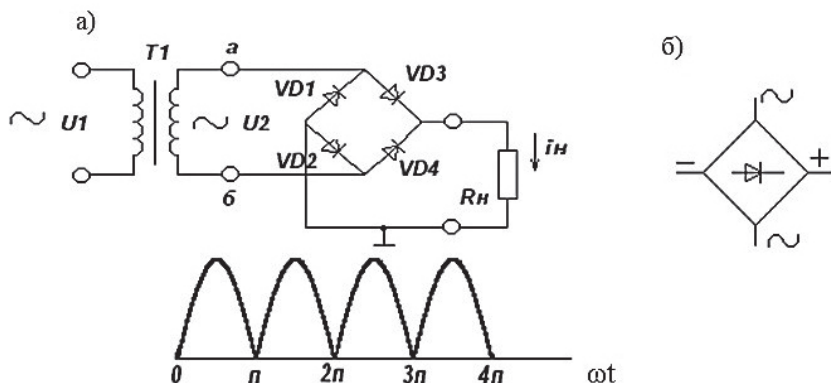


Рис. 1.16. Двухполупериодный выпрямитель мостового типа (без СФ):

а) схема и временная диаграмма; б) УГО

Диодная схема ДС (рис. 1.16-а) образована здесь четырехплечевым мостом из диодов $VD1 \dots VD4$; к одной диагонали этого моста подключена вторичная обмотка трансформатора $T1$, а к другой — нагрузка R_n ; на схемах диодный мост можно изображать упрощенно (рис. 1.16-б).

Из схемы видно, что при положительной полуволне напряжения u_2 («+» в точке «а», «-» в точке «б») прямосмещенными и открытыми являются диоды $VD3$ и $VD2$; через них и протекает полуволна тока нагрузки I_n от точки «а» к точке «б»; диоды $VD1$, $VD4$ в это время закрыты.

В следующий полупериод (когда «+» в точке «б» и «-» в точке «а») прямо смещены диоды $VD4$ и $VD1$, а диоды $VD2$, $VD3$ закрыты. Поэтому вторая полуволна тока I_n протекает от точки «б» к точке «а» через диод $VD4$, нагрузку R_n и диод $VD1$. Как видно, обе полуволны тока I_n протекают через нагрузку R_n в одном и том же направлении. Изменение полярности выпрямленного напряжения и тока и в данной схеме достигается изменением полярности включения всех диодов в мостовой схеме.

Из временной диаграммы тока на рисунке видно, что частота пульсаций в данном выпрямителе равна удвоенной частоте сети. Это заметно снижает коэффициент пульсаций и облегчает сглаживание выпрямленного напряжения. Разложение в ряд Фурье для напряжения u_n показывает, что в данном случае амплитуда пульсации и среднее выпрямленное напряжение равны соответственно:

$$U = (2/3)U_n; U_n = (2/\pi)U_m,$$

где U_m — амплитуда синусоидального напряжения $u_2(t)$. Поэтому коэффициент пульсации в двухполупериодном выпрямителе без СФ равен:

$$K_n = 2/3 \approx 0,67.$$

На практике значения K_n обычно должны быть гораздо меньше, чем указанные выше. В частности, питание усилительных каскадов требует значений $K_n \approx 10^{-3} - 10^{-4}$, а в электронных измерительных устройствах коэффициент K_n достигает значений $10^{-6} - 10^{-7}$. Снижение коэффициента пульсации обеспечивается включением сглаживающего фильтра СФ на выходе ДС. Пассивные СФ весьма разнообразны; обычно они содержат конденсаторы и катушки индуктивности с сердечниками (дрессели). Конденсаторы оказывают соответственно малое сопротивление пульсациям, а дроссели — большое. Для постоянного же тока (выпрямленного) конденсатор эквивалентен разрыву, а дроссель — короткому замыканию.

По этим причинам дроссель в СФ включается последовательно с нагрузкой; при этом выпрямленный ток проходит через него беспрепятственно, а пульсации задерживаются. Конденсаторы в СФ включают параллельно нагрузке; при этом выпрямленный ток не ответвляется в конденсаторы, а пульсации, наоборот, замыкаются через них на корпус, минуя нагрузку.

Полупроводниковый параметрический стабилизатор напряжения

Выпрямленное (и сглаженное) напряжение на нагрузке может претерпевать сравнительно медленные изменения своего уровня. Это происходит при изменении напряжения питающей сети, при колебаниях частоты тока в ней, при изменении нагрузки, температуры среды и при других дестабилизирующих факторах. Возникает неустойчивость питающих напряжений. Обычно допускаемая относительная неустойчивость питания составляет $\sim 0,1 \dots 0,3 \%$, но для некоторых измерительных приборов она должна быть $\sim 10^{-4} \%$.

Стабилизация напряжения питания осуществляется стабилизаторами (Ст) постоянного напряжения, которые включаются после выпрямителя (содержащего СФ) и поддерживают напряжение на нагрузке с заданной степенью точности.

Простейшими из таких Ст являются параметрические. Их работа основана на том, что напряжение на некоторых электронных

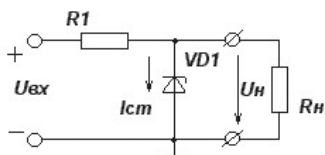


Рис. 1.17. Схема параметрического стабилизатора напряжения

приборах, например, стабилитронах остается неизменным при изменениях тока через них в широких пределах. Схема такого Ст приведена на рис. 1.17. Она содержит стабилитрон VD1, включаемый обратно смещенным, и резистор R1, ограничивающий обратный ток стабилитрона. Как известно, ста-

билитрон обладает в области электрического пробоя очень крутой (почти вертикальной) обратной ветвью своей вольтамперной характеристики, т. е. в рабочей зоне прибора при значительных изменениях тока через стабилитрон на нем $U_{ст}$ остается практически неизменным: $U_{ст} = \text{const}$.

Поэтому в схеме на рис. 1.17 при изменениях уровня входного напряжения $U_{вх}$ меняется ток $I_{ст}$, соответственно меняется падение напряжения на резисторе R1, компенсируя изменение входного напряжения. Выходное же напряжение $U_{н} = U_{ст}$ почти не меняется.

Достоинства параметрических стабилизаторов напряжения являются простота схемы и надежность работы. К недостаткам относят не слишком высокую степень стабилизации, небольшой КПД, высокое внутреннее сопротивление стабилизатора и узкий диапазон стабилизируемого напряжения.

Полупроводниковый компенсационный стабилизатор напряжения

Компенсационный стабилизатор напряжения (рис. 1.18) представляет собой систему автоматического регулирования.

Такое усложнение схемы позволяет устранить недостатки, свойственные параметрическим стабилизаторам.

Принцип работы компенсационного стабилизатора с непрерывным регулированием заключается в следующем: схема сравнения (СС) сравнивает напряжение на выходе стабилизатора, подаваемое на нагрузку, с постоянным опорным напряжением. Разность этих напряжений (сигнал рассогласования) подается через усилитель (У) на регулируемый элемент, сопротивление

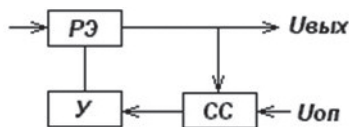


Рис. 1.18. Компенсационный стабилизатор напряжения

Порядок выполнения работы

Подготовка лабораторной установки к работе

Включить общее питание установки — тумблер на стойке лабораторного стола справа; включить осциллограф. На лабораторном макете установить:

- тумблер «Сеть» — «Вкл.»;
- переключатель «Исследуемая схема» — в положение «1» (выпрямитель);
- переключатель «Регулятор выходного напряжения — “ГРУ-БО”» — в положение «10».

Ознакомиться со схемой выпрямителя на макете, с измерительными приборами и их шкалами на входе и выходе выпрямителя, с органами управления (переключатели, ручки).

Исследование однополупериодного выпрямителя

1. Исследование однополупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра.

Выключить диодный мостик и СФ; для этого переключатели установить в следующее положения:

- «Q1» — «Выкл.»;
- «Q2» — «2» (дроссель фильтра Др закорочен);
- «Q3» и «Q4» — «Выкл.» (конденсаторы фильтра С1 и С2 отключены).

Наблюдать и зарисовать осциллограмму выходного напряжения однополупериодного выпрямителя.

Снять внешнюю характеристику выпрямителя, т. е. зависимость $U_n = \varphi(I_n)$. Для этого нагрузочным потенциометром R_n изменять ток нагрузки I_n (по «нагрузочному» миллиамперметру) с шагом 10 (десять) мА и фиксировать напряжение на нагрузке U_n (по «нагрузочному» вольтметру V2); результаты записывать в таблицу в столбец U_n для выпрямителя без фильтра.

Однополупериодный выпрямитель без фильтра			Однополупериодный выпрямитель с фильтром	
I_n , мА	U_n , В	Примечания	I_n , мА	U_n , В
0			0	
10			10	
...		$U_m = \dots$	...	

Однополупериодный выпрямитель без фильтра			Однополупериодный выпрямитель с фильтром	
I_n , мА	U_n , В	Примечания	I_n , мА	U_n , В
40		$U = \dots$	40	
...		$K_n = \dots$	...	
80		$K_{n \text{ расч}} = \dots$	80	

При токе нагрузки $I_n = 40$ мА измерить с помощью осциллографа и записать в таблицу (в графе «Примечания») амплитуду U_m пульсов выходного напряжения. Рассчитать затем амплитуду пульсации $U = 0,5 U_m$ и коэффициент пульсаций выпрямителя $K_n = U/U_n$, где значение U_n соответствует току $I_n = 40$ мА. В таблице сравнить результат с расчетной величиной $K_{n \text{ расч}} = 0,5 \pi$.

2. Исследование однополупериодного выпрямителя со сглаживающим фильтром.

Включить фильтр, т. е. дроссель Др и конденсаторы С1 и С2. Для этого переключатели установить в положения: «Q2» — в «1», «Q3» и «Q4» — «Вкл.». Наблюдать и зарисовать (резко изменившуюся) осциллограмму выходного напряжения выпрямителя; следует совместить ее на рисунке с уже имеющейся осциллограммой по предыдущему пункту.

Аналогично предыдущему пункту снять внешнюю характеристику выпрямителя с СФ; данные занести в таблицу в столбец U_n для выпрямителя с фильтром.

Исследование двухполупериодного выпрямителя

Переключатель «Q1» перевести в положение «Вкл.» и включить диодный мостик VD1...VD4. Данный двухполупериодный выпрямитель исследовать аналогично однополупериодному по п.п. 1 и 2; наблюдать и зарисовать осциллограммы выходного напряжения, результаты измерений занести в таблицу. При оформлении отчета все снятые внешние характеристики выпрямителей следует отобразить на одном графике.

Исследование параметрического стабилизатора напряжения

На лабораторном макете включить схему 2 стабилизатора: переключатель «Исследуемая схема» — в «2»; переключатель « $R_{\text{доб}}$ » — в положение «330 Ом». Проверить, что в схеме двухполупериодного

выпрямителя СФ ВКЛЮЧЕН. Нагрузочный потенциометр установить в среднее положение. Снять стабилизационную характеристику исследуемого стабилизатора напряжения, т. е. зависимость $U_n = f(U_{вх})$, где U_n — напряжение на нагрузке стабилизатора; $U_{вх}$ — напряжение на его входе. Напряжение $U_{вх}$ рекомендуется менять от 0 до 25 В с шагом 2,5 В (по вольтметру на входе), пользуясь регуляторами входного напряжения «ГРУБО» и «ПЛАВНО» на макете.

Результаты измерений занести в таблицу в столбец U_n при $R_{доб} = 330 \text{ Ом}$

$R_{доб} = 330 \text{ Ом}$		$R_{доб} = 620 \text{ Ом}$	
$U_{вх}, \text{В}$	$U_n, \text{В}$	$U_{вх}, \text{В}$	$U_n, \text{В}$
0	0	0	0
2,5		2,5	
...	...	...	...

Повторить измерения, переведя переключатель « $R_{доб}$ » в положение «620 Ом». Данные занести в таблицу в столбец U_n при $R_{доб} = 620 \text{ Ом}$.

Полученные характеристики отобразить при оформлении отчета на одном графике.

Исследование компенсационного стабилизатора напряжения

Переключатель «Исследуемая схема» перевести в положение «3».

Установить регулятор R_n в среднее положение и снять зависимость $U_n = f(U_{вх})$, меняя $U_{вх}$ от 0 до 22,5 В с шагом 2,5 В.

Установить величину входного напряжения 10 В и снять зависимость $U_{вых} = f(I_n)$, меняя I_n регулятором R_n с шагом 10 мА.

Результаты измерений представить в виде таблиц и графиков.

Содержание отчета

Отчет по работе должен быть оформлен в соответствии с общими требованиями (см. Введение).

Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить принцип действия выпрямителя переменного тока.
2. Объяснить назначение элементов схемы выпрямителя.

3. Объяснить назначение и принцип работы сглаживающего фильтра в выпрямителе.
4. Указать путь прохождения тока в выпрямителе мостового типа.
5. Объяснить отличие внешних характеристик выпрямителя с фильтром и без фильтра.
6. Указать назначение стабилизатора выпрямленного напряжения.
7. Объяснить принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.
8. Объяснить принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения.

Литература

[2] — с. 313–334; [4] — с. 35–46; [6] — с. 224–254; [7] — с. 313–319.

1.4. Лабораторная работа № 4. Исследование электронного усилителя

Цель работы: экспериментально исследовать основные параметры и характеристики апериодического транзисторного усилителя и влияние на них элементов схемы усилителя.

Теоретические сведения

Во многих инженерно-технических задачах, решаемых с помощью электронной техники, возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Такое усиление осуществляется электронными усилителями — устройствами, которые увеличивают мощность электрических сигналов посредством усиления либо напряжения сигнала, либо тока, либо того и другого вместе.

Электронный усилитель содержит усилительный прибор — активный элемент (АЭ) с источником питания и совокупность пассивных элементов, обеспечивающих требуемый режим его работы. В качестве АЭ используют биполярные и полевые транзисторы. Активный элемент АЭ под действием входного усиливаемого сигнала преобразует энергию источника питания в энергию выходного

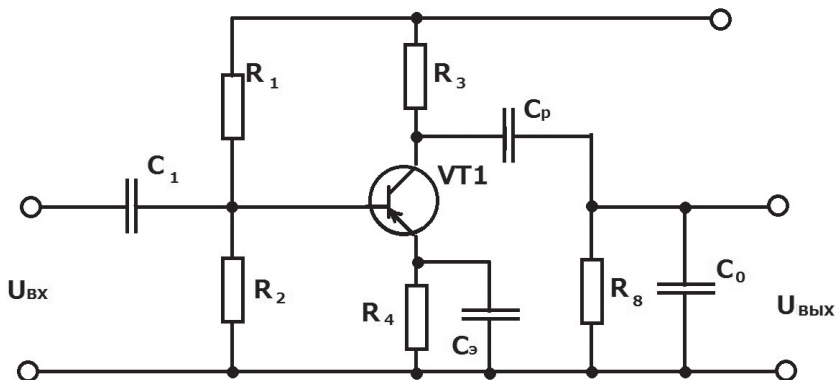


Рис. 1.20. Схема усилителя низких частот

усиленного сигнала. Пассивные элементы усилителя (резисторы, конденсаторы и др.) служат для обеспечения режима работы АЭ, температурной стабилизации этого режима и других целей. Один АЭ (с источником питания) и относящиеся к нему пассивные элементы образуют отдельный усилительный каскад.

Главным параметром электронного усилителя является его коэффициент усиления. При усилении по напряжению этот коэффициент равен:

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$ — соответственно напряжения на выходе и на входе усилителя. Коэффициент усиления измеряют чаще в логарифмических единицах — в децибелах. Коэффициент усиления по напряжению, выраженный в децибелах, равен:

$$K_u [\text{дБ}] = 20 \lg K_u,$$

где K_u — исходный коэффициент усиления в раз.

Среди других параметров, определяющих технические характеристики усилителя, наиболее важными являются:

- рабочий диапазон частот или полоса пропускания усилителя;
- входное и выходное сопротивления;
- уровень искажений сигнала в усилителе;
- динамический диапазон работы усилителя.

Рабочий диапазон частот или полоса пропускания усилителя Δf — это такой интервал частот, в пределах которого коэффициент

усиления усилителя изменяется лишь в сравнительно небольших допустимых пределах. Стандартными являются пределы 3 дБ, т. е. изменение усиления в $\sqrt{2}$ раз от максимального значения. Параметр Δf определяют по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) усилителя — зависимости коэффициента усиления K_u от частоты сигнала

Обычно полоса пропускания усилителя Δf достаточно протяженная, поэтому при построении АЧХ по горизонтальной оси частот используется логарифмический масштаб. По вертикальной оси откладывается относительное усиление (K_u/K_0), выраженное в децибелах, т. е. величина $20 \lg (K_u/K_0)$, где K_0 — наибольший коэффициент усиления усилителя, имеющий место на средних частотах рабочего диапазона.

Типичная АЧХ усилителя низких частот приведена на рис. 1.21, отмечены средние частоты, на которых усилитель имеет практически неизменное и наибольшее усиление $K_u = K_0$; отмечена также полоса пропускания $\Delta f_{0,7}$, взятая по уровню -3 дБ, т. е. по допустимому спаду усиления в $\sqrt{2}$ раз по отношению к наибольшему значению коэффициента усиления K_0 (до уровня $0,707 K_0$).

Усилительный каскад на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ), является одним из наиболее распространенных транзисторных каскадов на биполярных транзисторах.

В этом каскаде (схема 1 на макете) резистор R_3 включен в схему для термостабилизации рабочей точки транзистора (обеспечивает отрицательную обратную связь по напряжению, компенсирующую действие температуры на ток транзистора). Эмиттер транзистора



Рис. 1.21. АЧХ усилителя низких частот

VT1 «заземлен» (подключен к общему проводу) по переменному току сигнала через конденсатор C_3 в эмиттерной цепочке R_3, C_3 , чтобы отрицательной обратной связи по сигналу не было. Такое «заземление» имеет место при емкостном сопротивлении $X_c = \frac{1}{(\omega C_3)}$

конденсатора C_3 , пренебрежимо малом по сравнению с величиной R_3 во всем рабочем диапазоне частот. Отсюда следует, что значение C_3 должно быть выбрано из соотношения $1/(\omega_n C_3) \ll R_3$, где ω_n — нижняя граница рабочего диапазона частот.

Влияние величины C_3 на усиление каскада наиболее заметно может проявляться именно в районе частоты ω_n . Коллекторный резистор R_k ограничивает ток каскада и определяет наклон линии нагрузки. Делитель $R1, R2$ определяет рабочую точку на ВАХ транзистора (точку покоя при отсутствии сигнала на входе).

Конденсаторы $C1$ и $C2$ называются разделительными, т. к. разделяют цепи прохождения постоянного тока от источника питания и переменного тока сигнала. Они не пропускают постоянный ток как из цепи базы транзистора к источнику входного сигнала ($C1$), так и с коллектора транзистора к нагрузке усилителя ($C2$), сохраняя положение рабочей точки.

В то же время, значения емкостей $C1$ и $C2$ выбираются так, чтобы конденсаторы мало влияли (или влияли допустимым образом) на прохождение через них переменного тока сигнала во всем рабочем диапазоне частот. Для этого необходимо обеспечить низкие значения емкостных сопротивлений этих конденсаторов на нижней граничной частоте диапазона.

Влияние конденсаторов $C1$ и $C2$ на спад усиления каскада наиболее заметно проявляется в области нижних частот, т. к. их емкостные сопротивления при снижении частоты сигнала возрастают и препятствуют его прохождению. Этим определяется «завал» АЧХ в области нижних частот рабочего диапазона усилителя.

«Завал» АЧХ в области верхних частот диапазона вызывается снижением усилительных свойств транзистора и шунтирующим действием так называемой «паразитной» емкости C_0 в выходной цепи каскада. Название этой емкости связано с тем, что, во-первых, будучи включенной параллельно нагрузке усилителя, она снижает усиление каскада на высоких частотах, так как шунтирует (закорачивает) нагрузку, во-вторых, такую емкость, обычно, не включают специально, но она присутствует из-за физически неустранимых

емкостей монтажных проводов, паек, выходной цепи транзистора, входной цепи нагрузки и т.п.

Чем больше значение паразитной емкости C_0 и чем выше частота сигнала ω_v тем меньше шунтирующее нагрузку усилителя емкостное сопротивление $1/(\omega_v C_0)$ и тем сильнее снижается усиление каскада.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка содержит:

- лабораторный макет с исследуемым усилительным каскадом с ОЭ, содержащий переключатели, с помощью которых можно менять параметры элементов схемы усилителя: разделительного конденсатора C_p ; конденсатора C_0 , моделирующего паразитную емкость на выходе каскада и эмиттерного конденсатора C_3 ;

- источник входного сигнала усилителя — низкочастотный генератор сигналов ГЗ-102, работающий в диапазоне частот 20 Гц ... 200 кГц и позволяющий подавать на вход усилителя синусоидальный сигнал с любой частотой из этого диапазона;

- мультиметр, позволяющий измерять выходное напряжение исследуемого усилителя.

Порядок выполнения работы

Подготовка лабораторной установки к работе

Зарисовать схему исследуемого усилителя с макета, ознакомиться с переключателями в данном усилительном каскаде (« C_p »; « C_3 »; « C_0 »). Ознакомиться с сигнальным генератором и мультиметром (органы управления, шкалы).

Включить общее питание установки — тумблер на стойке справа; включить лабораторный макет («Сеть»), переключатель «Исследуемая схема» на макете установить в положение «I». Убедиться, что включены также сигнальный генератор, мультиметр и что они подключены соответственно к входу и выходу усилителя.

Снятие амплитудно-частотной характеристики усилителя

Подготовить таблицу для занесения данных эксперимента

F		Гц			кГц									
		30	100	300	1	2	3	5	7	10	30	50	100	200
Вар.1 Cp=10 Co=0 Cз=100	U _{вых} , В													
	K _u													
	K _u / K ₀													
	20 lg $\frac{K_u}{K_0}$													

Варианты задания получить у преподавателя.

На лабораторном макете установить переключатели в положения, соответствующие варианту 1.

На сигнальном генераторе установить фиксированный уровень входного сигнала усилителя $U_{\text{вх}} = 0,01$ В. Для этого на генераторе должна быть нажата клавиша «0,03» (предел шкалы «V» — на время всей работы), ручкой плавной регулировки напряжения генератора «Рег. вых.» установить уровень 0,01 В по прибору генератора. Установить на генераторе также первую частотную точку F «30 Гц»: при этом переключатель «Множитель частоты» должен находиться в положении «1», ручкой плавной регулировки частоты следует по лимбу установить значение «30 Гц».

На мультиметре должны быть нажаты: клавиша, отвечающая измерению переменного напряжения «V», клавиша «2» («Пределы шкалы»). Иметь в виду, что на мультиметре высвечивается точка после 0 целых и далее — доли вольты). Снимать с мультиметра отсчеты выходного напряжения усилителя и записывать их в соответствующее место таблицы.

Последовательно устанавливая на генераторе частоту сигнала, согласно таблицы (ручкой лимба плавной регулировки и переключателем «Множитель частоты»); записывать соответствующие значения выходного напряжения усилителя; следить за постоянством уровня входного сигнала $U_{\text{вх}} = 0,01$ В. Результаты измерений по варианту 1 предъявить преподавателю на контроль. Повторить измерения по вариантам 2 и 3, указываемым преподавателем. По результатам измерений при оформлении отчета вычислить коэффициент

усиления каскада $K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ в каждой частотной точке; эти данные занести в таблицу.

Для каждого варианта определить наибольшее усиление $\max K_u = K_0$. Далее вычислить и записать все значения относительного усиления K_u/K_0 а также выразить их в децибелах, т. е. рассчитать соответствующие величины $20 \lg (K_u/K_0)$. Отобразить все три варианта АЧХ на одном графике, используя логарифмический масштаб по обеим осям. По оси ординат откладывать относительное усиление в децибелах, т. е. величину $20 \lg (K_u/K_0)$. Точки с ординатами ниже -10 дБ не отображать.

Снятие амплитудной характеристики усилителя

Для записи экспериментальных данных подготовить таблицу:

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$					
K_u					

Установить переключатели параметров конденсаторов на макете и фиксированное значение частоты сигнала на генераторе по рекомендации преподавателя. Последовательно устанавливать на генераторе уровень входного сигнала усилителя $U_{\text{вх}}$ согласно таблице, снимать с мультиметра соответствующие значения выходного напряжения усилителя $U_{\text{вых}}$ и записывать их в таблицу, данные предъявить преподавателю. Полученную амплитудную характеристику, т. е. зависимость $U_{\text{вых}} = \varphi(U_{\text{вх}})$ отобразить графически (в отчете). Величину K_u вычислить для линейного участка графика.

Требования к оформлению отчета

В отчете нужно привести схему исследованного усилительного каскада, указать в таблицах заданные значения емкостей при которых снимались характеристики и провести необходимые расчеты, начертить графики полученных зависимостей. На частотных характеристиках указать границы полосы пропускания и вычислить ее значения.

Контрольные задания

1. Объяснить принцип усиления сигнала в электронном усилителе.
2. Объяснить назначение элементов схемы усилителя.

3. Пояснить, как определится полоса пропускания усилителя.
4. Объяснять влияние конденсаторов в схеме усилителя на его АЧХ, полосу пропускания.
5. Пояснить амплитудную характеристику усилителя. Определить динамический диапазон работы усилителя по амплитудной характеристике.

Литература

[2] — с. 335–344; [4] — с. 47–53; [5] — с. 360–379; [6] — с. 91–111.

1.5. Лабораторная работа № 5. Исследование дифференцирующих и интегрирующих цепей

Цели работы

1. Ознакомиться с методикой измерения основных параметров импульсных сигналов с помощью осциллографа.
2. Экспериментально исследовать дифференцирующие и интегрирующие свойства RC-цепей, влияние значений параметров их элементов на форму и основные параметры выходных импульсов.

Теоретические сведения

Дифференцирующая цепь (ДЦ)

Пассивные линейные электрические цепи, содержащие линейные резисторы (R) и конденсаторы (C), могут применяться для укорочения или расширения импульсов, что соответствует приближенному дифференцированию или интегрированию импульсов (по времени). Такие RC-цепочки называются дифференцирующими и интегрирующими. Дифференцирующая RC-цепь показана на рис. 1.22. Характер преобразования входного импульса $U_{\text{вх}}(t)$ в данной цепи определяется соотношением между длительностью этого импульса $\tau_{\text{и}}$ и постоянной времени цепи $\tau_{\text{ц}} = RC$.

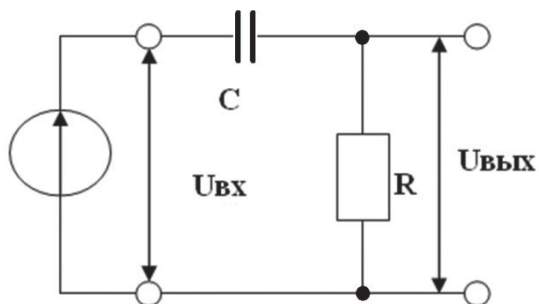


Рис. 1.22. Дифференцирующая RC-цепь

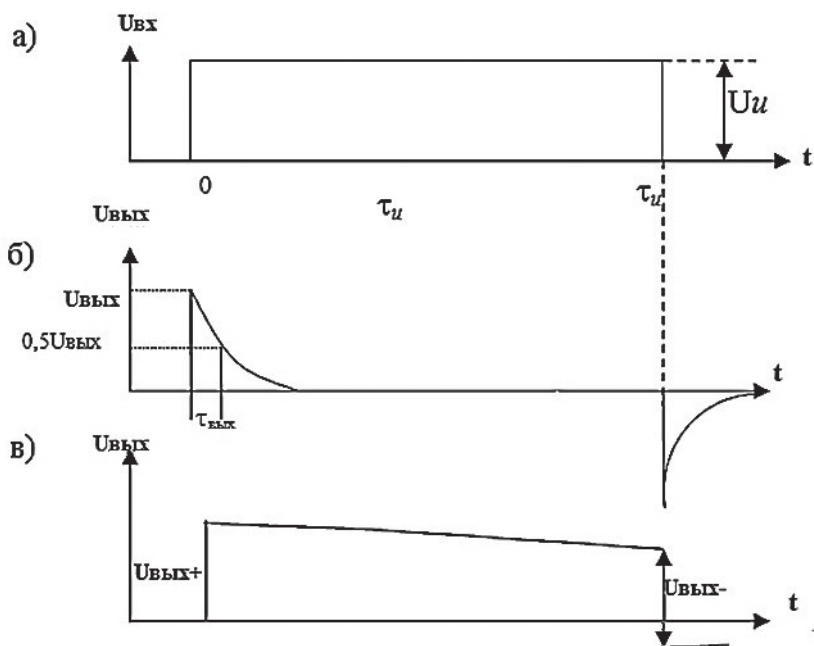


Рис. 1.23. Временные диаграммы, иллюстрирующие прохождение идеального прямоугольного импульса (а) через ДЦ с малой (б) и большой (в) постоянной времени

Если на вход цепи подан идеальный прямоугольный импульс высотой $U_{и}$ и длительностью $\tau_{и}$ (рис. 1.23-а), то сигнал на выходе цепи имеет вид:

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{и}} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad 0 \leq t \leq \tau.$$

В начальные моменты времени $t = 0$ выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t = 0) = U_{\text{и}}$. Скачок входного сигнала полностью передается через конденсатор C на выход цепи. При $t > 0$ выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ спадает по экспоненте; скорость этого спада определяется постоянной времени $\tau_{\text{и}}$. Физически спад выходного напряжения объясняется зарядом конденсатора C от источника сигнала. По мере заряда конденсатора напряжение на нем нарастает, стремясь к значению $U_{\text{и}}$. Соответственно этому снижается выходное напряжение, которое согласно второму закону Кирхгофа равно $U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{и}}(t) - U_{\text{с}}(t)$.

Если $\tau_{\text{и}}$ существенно меньше, чем $\tau_{\text{и}}$, то конденсатор C очень быстро заряжается до значения примерно равного $U_{\text{и}}$, а выходное напряжение также быстро спадает от значения $U_{\text{и}}$ до нуля (рис. 1.23-б). В результате, в момент $t = 0$ формируется положительный остроконечный импульс.

В момент $t = \tau_{\text{и}}$ входной сигнал скачком спадает от значения $U_{\text{и}}$ до нуля. Этот отрицательный перепад величиной $U_{\text{и}}$ также полностью передается конденсатором на выход цепи в виде отрицательного скачка. Физически это объясняется тем, что заряженный (к моменту $t = \tau_{\text{и}}$) до напряжения примерно равного $U_{\text{и}}$ конденсатор C в момент $t = \tau_{\text{и}}$ начинает разряжаться через источник и резистор R . Ток разряда противоположен току заряда, что и определяет отрицательную полярность выходного импульса на резисторе R в этот момент. При $t > \tau_{\text{и}}$ конденсатор разряжается также очень быстро, так как постоянная времени цепи остается прежней. В результате, на выходе цепи формируется отрицательный остроконечный импульс.

Два разнополярных остроконечных импульса (рис. 1.23-б), формируемые данной цепью при условии $\tau_{\text{и}} \ll \tau_{\text{и}}$, соответствуют приближенному дифференцированию входного прямоугольного импульса. Поэтому такую цепь называют дифференцирующей, хотя фактически она осуществляет укорочение входного импульса. Дифференцирующие (укорачивающие) цепи широко применяются для формирования коротких запускающих и синхроимпульсов в различных электронных узлах и устройствах.

Анализ показывает, что в идеальной дифференцирующей цепи длительность укороченного выходного импульса, взятая по уровню 0,5 его высоты, равна:

$$\tau_{\text{выхода}} \cong 0,7\tau_{\text{и}} = 0,7RC.$$

Если $\tau_{\text{ц}} \gg \tau_{\text{и}}$, то процесс заряда конденсатора протекает очень медленно, за время действия входного импульса конденсатор не успевает сколько-нибудь заметно зарядиться. Поэтому выходной импульс практически повторяет входной (рис. 1.23-в). Подобная цепь называется разделительной; она передает на выход импульсный сигнал, почти не изменяя его форму, но при этом разделяет вход и выход по постоянному току.

Интегрирующая цепь (ИЦ)

Если в рассмотренной выше цепи поменять местами элементы R и C , то цепь становится интегрирующей (расширяющей), рис. 1.24.

При подаче на вход этой цепи прямоугольного импульса (рис. 1.25-а), выходной сигнал изменяется по экспоненте вида

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{и}} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{\text{ц}}}\right) \right), \text{ при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{и}}, \text{ где по-прежнему постоянная}$$

времени цепи $\tau_{\text{ц}} = RC$.

Форма выходного сигнала в данной цепи также определяется соотношением между длительностями $\tau_{\text{и}}$ входного импульса и постоянной времени цепи $\tau_{\text{ц}}$. Если $\tau_{\text{ц}} \ll \tau_{\text{и}}$, то выходное напряжение мало отличается по форме от входного (рис. 1.25-б). Действительно, в этом случае при поступлении входного импульса конденсатор C , с которого снимается выходное напряжение, очень быстро заряжается до значения, примерно равного $U_{\text{и}}$.

По окончании входного сигнала конденсатор столь же быстро разряжается через источник и резистор.

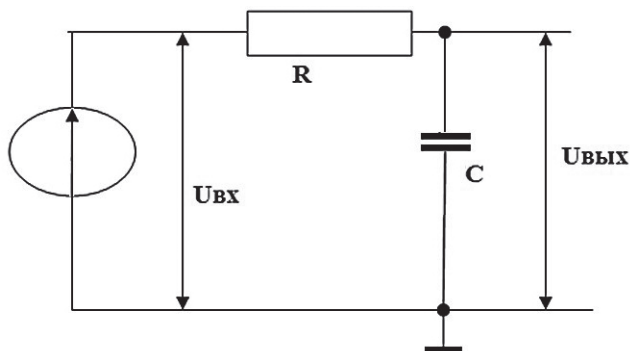


Рис. 1.24. Интегрирующая RC-цепь

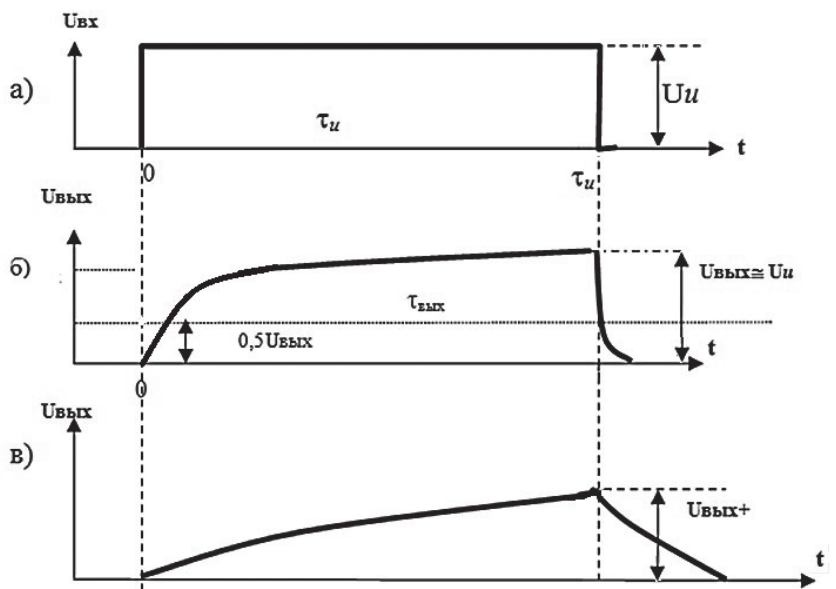


Рис. 1.25. Временные диаграммы, иллюстрирующие прохождение идеального прямоугольного импульса (а) через ИЦ с малой (б) и большой (в) постоянной времени

При $\tau_{и} \gg \tau_{и}$ заряд конденсатора C идет очень медленно, поэтому к моменту $t = \tau_{и}$ (окончания входного импульса) конденсатор не успевает зарядиться, рис. 1.25-в. Участок экспоненты при заряде между моментами $t = 0$ и $t = \tau_{и}$ можно аппроксимировать линейной функцией. Эта функция пропорциональна интегралу от входного прямоугольного импульса, поэтому рассматриваемая цепь и называется интегрирующей. Интегрирование осуществляется тем точнее, чем сильнее выполняется неравенство $\tau_{и} \gg \tau_{и}$. Правда, при этом сильно снижается высота выходного сигнала по сравнению с входным. По окончании входного импульса конденсатор C начинает медленно разряжаться, и выходной сигнал медленно спадает, стремясь к исходному нулевому уровню. В результате выходной импульс оказывается расширенным (растянутым) во времени по отношению к входному.

Интегрирующая цепь применяется на практике для расширения импульсов, для формирования напряжения пилообразной формы, для фильтрации и сглаживания пульсаций в цепях электропитания и других случаях.

Описание лабораторной установки.

В состав лабораторной установки входят:

- лабораторный макет, содержащий элементы R и C исследуемых цепей и встроенный генератор импульсных сигналов, обеспечивающий входные импульсы прямоугольной формы;
- осциллограф для наблюдения импульсов, а также для измерения их основных параметров.

Элементы R и C макета для составления дифференцирующей и интегрирующей цепей показаны на рис. 1.26.

Наличие гнезд XT0...XT10 позволяет с помощью перемычек реализовать дифференцирующую или интегрирующую цепочку с той или иной постоянной времени, а также подать входной сигнал от генератора и наблюдать выходной сигнал с помощью осциллографа.

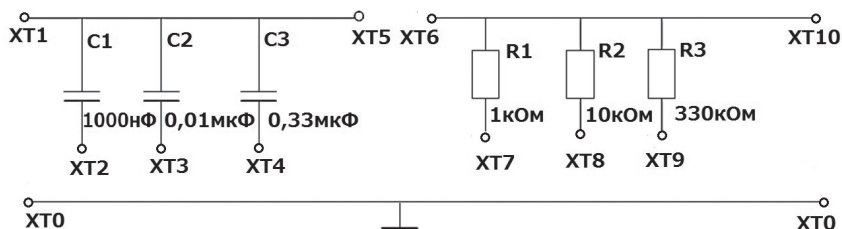


Рис. 1.26. Элементы макета

Порядок выполнения работы

Подготовка лабораторной установки к работе

Включить тумблером питание лабораторного макета. Включить осциллограф

Измерение параметров входных импульсов

Выход импульсного генератора подключить к гнездам XT0, XT1 макета, а осциллограф — к гнездам XT0, XT5; при этом следить за тем, чтобы общие выводы генератора и осциллографа подключались к общей шине макета («Земля» — гнезда XT0).

На экране осциллографа получить неподвижное, удобное для наблюдения изображение отдельного импульса — это и есть входной прямоугольный импульс для исследуемой далее цепи. Зарисовать осциллограмму данного импульса; под ней оставить место еще

для 3-х аналогичных осциллограмм (они будут наблюдаться далее при исследовании цепи).

Измерить с помощью осциллографа и записать высоту входного прямоугольного импульса $U_{\text{и}}$, также его длительность $\tau_{\text{и}}$. При измерении высоты определить цену деления на шкале осциллографа по вертикали (ручка «Вольт/Деление»), а при измерении длительности — по горизонтали (ручка «Время/Деление»).

Получить на экране осциллографа устойчивое изображение 2-х импульсов (для этого воспользоваться ручками «Стабильность» и «Уровень»). Измерить и записать период следования импульсов T ; это позволит рассчитать затем частоту повторения входных импульсов $F = 1/T$.

Ручку «Время/Деление» вернуть в первоначальное положение, т. е. вернуться к наблюдению отдельного импульса.

Исследование дифференцирующей цепи

1. Собрать дифференцирующую цепь (ДЦ) с постоянной времени $\tau_{\text{ц}} = 10$ мкс.

Зарисовать схему ДЦ (см. рис. 1.22); выбрать (рассчитать) и записать значения элементов R и C (на макете), которые обеспечивают значение $\tau_{\text{ц}} = 10$ мкс.

С помощью перемычек собрать схему ДЦ. Сигнальный вывод осциллографа подключить к выходу ДЦ (гнездо ХТ10). Наблюдать и зарисовать выходные укороченные импульсы (положительный и отрицательный), располагая их осциллограмму под осциллограммой входного импульса с необходимым соответствием по оси времени (см. рис. 1.23).

С помощью осциллографа измерить и записать высоту положительного $U_{+\text{вых}}$ и отрицательного $U_{-\text{вых}}$ выходных импульсов; сопоставить эти значения с высотой $U_{\text{и}}$ входного прямоугольного импульса.

Измерить по уровню $0,5 U_{\text{вых}}$ и записать длительности положительного и отрицательного выходных импульсов $\tau_{+\text{вых}}$ и $\tau_{-\text{вых}}$. Для повышения точности измерений здесь «растянуть» наблюдаемые импульсы, переключая на осциллографе ручку «Время/деление» по часовой стрелке (следить за изменением цены деления по горизонтали!) Сопоставить измеренное значение с расчетной величиной:

$$\tau_{\text{расч}} \cong 0,7 \left(\frac{U_{\text{и}}}{U_{\text{вых}}} \right) \tau_{\text{ц}}.$$

Множитель ($U_{\text{и}}/U_{\text{вых}}$) здесь учитывает неидеальность исследуемой ДЦ.

2. Собрать ДЦ с постоянными по времени $\tau_{\text{ц}} = 100 \text{ мкс}$ и $\tau_{\text{ц}} = 3300 \text{ мкс}$.

Выбрать и записать значения элементов R и C, обеспечивающие значение $\tau_{\text{ц}} = 100 \text{ мкс}$. Собрать схему ДЦ с данными элементами. Наблюдать и зарисовать осциллограмму выходного сигнала, располагая ее под уже имеющимися двумя также с требуемым соответствием по оси времени

Измерить и записать величину положительного перепада по фронту выходного импульса $U_{+\text{вых}}$.

Сделать то же самое для отрицательного перепада по срезу выходного импульса $U_{-\text{вых}}$. Сопоставить эти значения между собой и с высотой $U_{\text{и}}$ входного импульса.

Выполнить все аналогичным образом для ДЦ с постоянной времени $\tau_{\text{ц}} = 3300 \text{ мкс}$.

Исследование интегрирующей цепи

1. Собрать интегрирующую цепь (ИЦ) с постоянной времени $\tau_{\text{ц}} = 10 \text{ мкс}$.

Сигнальный вывод генератора подключить к гнезду ХТ10, а сигнальный вывод осциллографа — к гнезду ХТ1. Зарисовать схему ИЦ (см. рис. 1.24); зарисовать осциллограмму входного прямоугольного импульса и оставить под ней место для еще трех аналогичных осциллограмм (выходных сигналов ИЦ).

Наблюдать и зарисовать осциллограмму выходного импульса, располагая её под осциллограммой входного импульса с необходимым временным соответствием (см. рис. 1.25).

Измерить и записать высоту выходного импульса $U_{\text{вых}}$; это значение сопоставить с высотой входного сигнала $U_{\text{и}}$.

Измерить и записать длительность выходного импульса $\tau_{\text{вых}}$ по уровню $0,5 U_{\text{вых}}$ сопоставить это значение с величиной $\tau_{\text{и}}$ для входного сигнала.

2. Собрать ИЦ с постоянными по времени $\tau_{\text{ц}} = 100 \text{ мкс}$ и $\tau_{\text{ц}} = 330 \text{ мкс}$.

Наблюдать и зарисовать осциллограммы выходного сигнала, располагая их под уже имеющимися двумя с правильным временным соответствием.

Измерить и записать только высоту выходного импульса; сопоставить её с высотой входного импульса $U_{\text{и}}$.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: схемы и заданные величины емкостей в соответствии с вариантами, осциллограммы (временные диаграммы) выходных процессов, изображенные в одном масштабе с входным сигналом.

Контрольные задания

1. Изобразить схему ДЦ и определить ее постоянную времени.
2. Пояснить работу ДЦ с помощью временных диаграмм.
3. Объяснить влияние постоянной времени ДЦ на форму выходного импульса.
4. Изобразить схему ИЦ и временные диаграммы, поясняющие её работу.
5. Объяснить влияние постоянной времени ИЦ на форму выходного сигнала.

Литература

[1] — с. 42–44; [4] — с. 54–62; [5] — с. 114–117; [7] — с. 62–66.

1.6. Лабораторная работа № 6.

Исследование операционного усилителя

Цель работы: ознакомление с типовыми схемами на базе операционных усилителей и экспериментальное исследование их технических характеристик.

Теоретические сведения

Понятие операционного усилителя (ОУ)

Под операционным усилителем понимают дифференциальное усилительное устройство с высоким коэффициентом усиления, имеющее два входа инвертирующий и не инвертирующий, предназначенное для работы в схемах с глубокой отрицательной обратной связью.

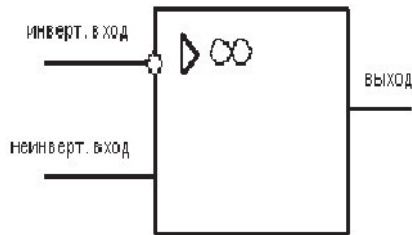


Рис. 1.27. Условное графическое обозначение операционного усилителя

Условное графическое обозначение операционного усилителя приведено на рис. 1.27.

Для питания операционного усилителя обычно используются два разнополярных напряжения, что позволяет получить на его выходе нулевой потенциал относительно общего провода (земли).

Основные параметры операционного усилителя

– *Коэффициент усиления*, равный отношению приращения выходного напряжения к вызвавшему его приращению входного напряжения:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}.$$

– *Входное сопротивление по дифференциальному сигналу*, равное отношению приращения напряжения на входе к приращению входного тока на заданной частоте при заземленном другом входе:

$$R_{\text{вхд}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}}.$$

– *Входное сопротивление по синфазному сигналу*.

$R_{\text{вхс}}$ — сопротивление между входами операционного усилителя.

$R_{\text{вхс}}$ на низких частотах имеет значение порядка 100 МОм, что значительно больше входного сопротивления по дифференциальному сигналу $R_{\text{вхд}}$.

Синфазными называются сигналы на входах операционного усилителя, амплитуды и фазы которых совпадают. При соединенных друг с другом входах операционного усилителя дифференциальное (разностное) входное напряжение равно нулю, а синфазное — напряжению между входами операционного усилителя и землей.

– *Выходное сопротивление*, равное отношению приращения выходного напряжения к соответствующему приращению выходного тока на заданной частоте:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}}.$$

– Частота единичного усиления:

f_1 , на которой коэффициент усиления равен единице.

– Скорость нарастания выходного напряжения:

$V_{U_{\text{вых}}}$ при воздействии входного импульса прямоугольной формы.

– Коэффициент ослабления синфазного сигнала, выраженный в децибелах, который равен отношению коэффициентов усиления по напряжению дифференциального и синфазного сигналов:

$$K_{\text{ос}} = \frac{K}{K_{\text{с}}}, \text{ где } K_{\text{с}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}.$$

– Напряжение смещения:

$U_{\text{см}}$, равное постоянному входному напряжению, при котором выходное напряжение равно нулю.

– Входной ток:

$I_{\text{вх}}$, равный среднему арифметическому значению входных токов при выходном напряжении равном нулю.

– Разность входных токов:

$\Delta I_{\text{вх}}$, протекающих через входы операционного усилителя при выходном напряжении, равном нулю.

– Напряжение питания:

$E_{\text{пит}}$ (для большинства операционных усилителей ± 15 В).

– Средний потребляемый ток по цепи питания:

$I_{\text{пит}}$ (десятки мА).

Параметры операционного усилителя зависят от температуры. Эта зависимость проявляется в изменениях напряжения смещения, входного тока, разности входных токов и коэффициента усиления.

Качество операционного усилителя определяется тем, насколько его свойства приближаются к предельно достижимым. Идеальный операционный усилитель имеет бесконечно большое входное и бесконечно малое выходное сопротивления, бесконечный коэффициент усиления при бесконечно большой полосе частот, напряжение смещения, равное нулю, и выходное напряжение, постоянное во всей полосе частот усилителя.

Основное уравнение идеального операционного усилителя в схеме с отрицательной обратной связью, приведенной на рис. 1.28, имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_2 U_{\text{и}}}{R_1} + \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) U_{\text{н}},$$

где $U_{\text{и}}$ — напряжение, подаваемое на инвертирующий вход; $U_{\text{н}}$ — напряжение, подаваемое на неинвертирующий вход; $U_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе операционного усилителя.

Усилительные каскады на базе операционных усилителей

Инвертирующий усилитель (рис. 1.29)

Входной сигнал подается через резистор R1 на инвертирующий вход. На тот же вход через резистор R2 подается сигнал обратной связи, которая будет отрицательной, так как входной и выходной сигналы находятся в противофазе. Цепи обратной связи и входного

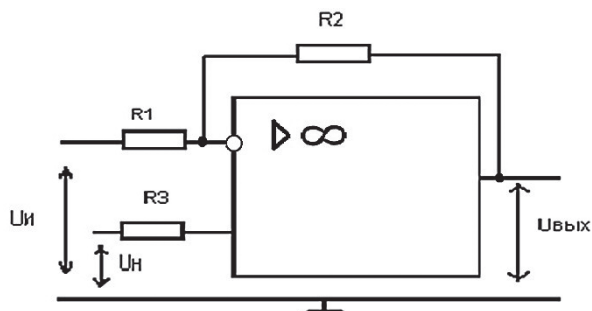


Рис. 1.28. Схема ОУ

с параллельной отрицательной обратной связью по напряжению

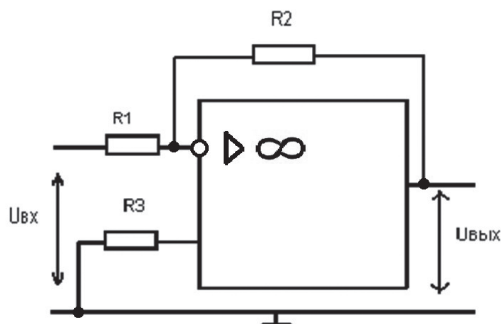


Рис. 1.29. Инвертирующий операционный усилитель

сигнала соединены параллельно. Поэтому в схеме действует параллельная обратная связь по напряжению.

Так как напряжение на неинвертирующем входе $U_{\text{н}} = 0$, из основного уравнения следует, что

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R2U_{\text{вх}}}{R1},$$

т. е. коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K_{\text{и}} = -\frac{R2}{R1}.$$

Входное сопротивление такого усилителя:

$$R_{\text{вхи}} \approx R1.$$

Выходное сопротивление инвертирующего усилителя с обратной связью:

$$R_{\text{выхи}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + \frac{K}{K_{\text{н}}}}.$$

Усилитель имеет сравнительно низкие входное и выходное сопротивления.

Неинвертирующий усилитель (рис. 1.30)

Цепи входного сигнала и обратной связи соединены последовательно. В схеме действует последовательная обратная связь по напряжению.

Поскольку входное напряжение на инвертирующем входе равно нулю, уравнение идеального операционного усилителя для этой схемы имеет вид:

$$U_{\text{вых}} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) U_{\text{вх}}.$$

Следовательно, коэффициент усиления равен:

$$K_{\text{н}} = 1 + \frac{R2}{R1}.$$

Входное сопротивление неинвертирующего операционного усилителя с отрицательной обратной связью:

$$R_{\text{вхи}} \approx R3 + \frac{KR_{\text{вх}}}{K_{\text{н}}}.$$

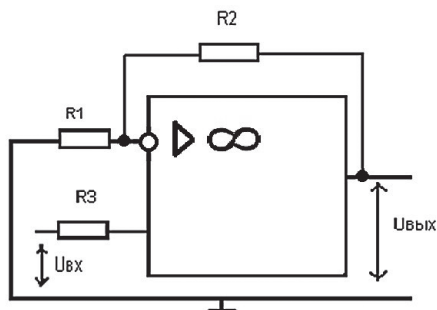


Рис. 1.30. Неинвертирующий операционный усилитель

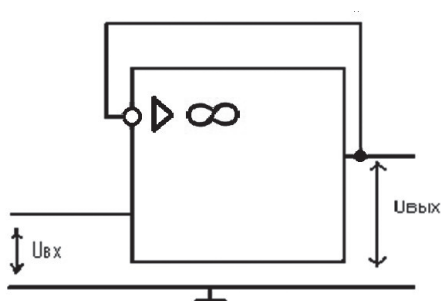


Рис. 1.31. Повторитель напряжения на ОУ

Выходное сопротивление:

$$R_{\text{выхн}} \approx \frac{R_{\text{вых}}}{1 + \frac{K}{K_{\text{н}}}}.$$

Этот усилитель отличается тем, что имеет высокое входное и низкое выходное сопротивления.

Повторитель (рис. 1.31)

Повторитель напряжения используется в тех случаях, когда требуется согласовать высокое внутреннее сопротивление источника сигнала с низким сопротивлением нагрузки. Он представляет собой не инвертирующий усилитель, в котором отсутствует резистор R1, а резистор R2 заменен проводником.

Коэффициент передачи повторителя:

$$K_{\text{п}} = 1.$$

Входное сопротивление:

$$R_{\text{вхп}} = \frac{1}{\frac{1}{KR_{\text{вх}}} + \frac{1}{R_{\text{вхс}}}}.$$

Выходное сопротивление:

$$R_{\text{выхп}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + K}.$$

Частотные и амплитудная характеристики операционных усилителей

Частотные характеристики относятся к динамическим характеристикам. Как всякий четырехполюсник операционный усилитель имеет комплексный коэффициент передачи:

$$K(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ — соответственно амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики усилителя.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) показывает в каком диапазоне частот должен лежать спектр входного сигнала, чтобы он передавался на выход без амплитудных искажений формы, т. е. все спектральные составляющие сигнала увеличивались в одинаковое число раз.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) позволяет судить о наличии фазовых искажений формы сигналов, связанных с неодинаковыми фазовыми сдвигами спектральных составляющих и об устойчивости работы операционного усилителя.

На высоких частотах фазовый сдвиг внутри операционного усилителя может достигать 180° . При этом отрицательная обратная связь превращается в положительную, и усилитель становится автогенератором незатухающих колебаний. Чтобы предотвратить это, производят коррекцию частотной характеристики с помощью внешних RC-цепей. Для устойчивой работы усилителя необходимо, чтобы наклон АЧХ в области высоких частот не превышал 6 дБ на октаву (20 дБ на декаду). Пример АЧХ в логарифмическом масштабе приведен на рис. 1.32.

Амплитудная характеристика относится к статическим характеристикам, т. е. снимается на одной частоте. Она представляет

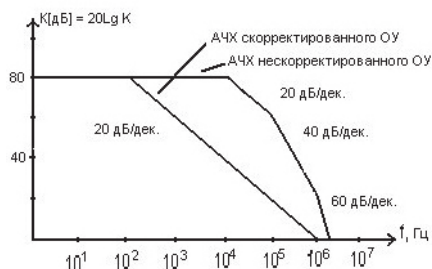


Рис. 1.32. АЧХ
в логарифмическом масштабе

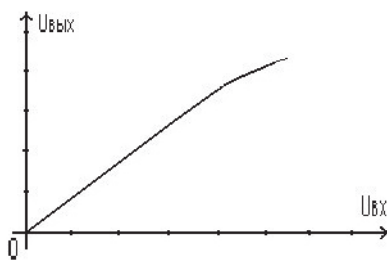


Рис. 1.33. Амплитудная
характеристика ОУ

собой зависимость выходного напряжения от входного, представленную на рис. 1.33.

Амплитудная характеристика показывает в каком диапазоне входных напряжений функция $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, т. е. отсутствуют нелинейные искажения формы сигнала из-за его ограничения по амплитуде.

Функциональные устройства на операционных усилителях

1. Применение ОУ в схемах гираторов (рис. 1.34).

Гиратор — четырехполюсник, преобразующий импеданс нагрузки гиратора в его обратную величину на входе. Принципиальная возможность изменить фазовый сдвиг входного тока относительно входного напряжения воздействием с выхода ОУ обеспечивается наличием дифференциального входа. При идеальной балансировке ОУ разность напряжений между не инвертирующим **А** и инвертирующим **В** входами равна нулю, на входы **А** и **В** токи не затекают. Подача переменного выходного напряжения на вход через резисторы R обратной связи приводит к образованию двух петель обратной

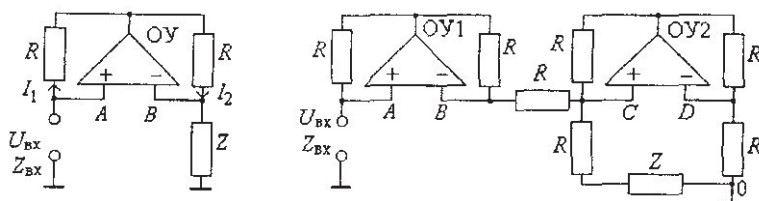


Рис. 1.34. Схема ПОИ. Преобразователь $Z_{\text{сн}}$ в импеданс $Z_{\text{вх}}$

связи: положительной по цепи **A** входного сигнала и отрицательной по цепи **B** нагрузки Z . Коэффициенты передачи и фазовые сдвиги в цепях можно менять за счет соотношений R , Z и сопротивления на входе **A**.

Описание принципа действия гиратора как преобразователя положительного сопротивления R в отрицательное R (изменяется направление тока на обратное) можно привести на примере известной схемы преобразователя отрицательного импеданса (ПОИ). Схема ПОИ на основе ОУ, преобразующего импеданс нагрузки Z в его отрицательное значение на входе $Z = -Z$, показана на рис. 1.34.

По определению $Z_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$, по свойствам ОУ $U_{\text{АБ}} = 0$ и сумма **A** и **B** токов $I_{\text{АБ}} = 0$, тогда $I_1 R + I_2 R = 0$. Отсюда $I_1 = -I_2$ и $I_{\text{вх}} = I_1 = -I_2$, а напряжение $U_{\text{вх}} = U_{\text{А}} = U_{\text{Б}} = I_2 Z$.

Найдем $Z_{\text{вх}} = \frac{I_2 Z}{(-I_2)} = -Z$. Если $Z = R$, то $Z_{\text{вх}} = -R$.

Принцип действия гиратора как преобразователя емкостной нагрузки $Z_{\text{сн}}$ в индуктивный входной импеданс $Z_{\text{вхL}}$ можно описать с помощью схемы последовательного соединения двух ПОИ на ОУ1 и ОУ2, которая показана на рис. 1.35. В этой схеме нагрузкой ОУ1 является последовательное соединение R с параллельным соединением отрицательного входного сопротивления ОУ2 и внешних элементов R и Z :

$$Z_{\text{БО}} = \frac{-R^2}{Z}.$$

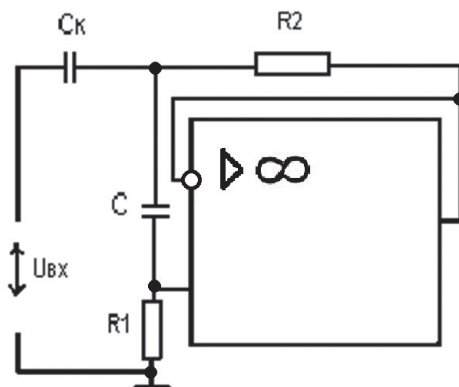


Рис. 1.35. Схема гиратора на одном ОУ

Тогда $Z_{\text{вх}} = -\left(\frac{-R^2}{Z}\right) = \frac{R^2}{Z}$.

Если $Z = \frac{1}{(j\omega C)}$, то $Z_{\text{вх}} = j\omega CR^2 = j\omega L_{\text{экв}}$.

Если $Z = j\omega L$, то $Z_{\text{вх}} = \frac{R^2}{(j\omega L)} = \frac{1}{(j\omega C_{\text{экв}})}$.

Если $Z = R$, то $Z_{\text{вх}} = -R$.

Схему гиратора как преобразователя емкостной нагрузки $Z_{\text{сн}}$ в индуктивный входной импеданс $Z_{\text{вх}L}$ можно реализовать и на одном операционном усилителе (рис. 1.35).

При индуктивном входном импедансе входной ток гиратора будет отставать по фазе от входного напряжения на 90 градусов, что свойственно катушкам индуктивности.

Изобретение гиратора позволило реализовать индуктивные компоненты многослойного печатного монтажа современной микроэлектроники без применения объемных катушек индуктивности.

2. Триггер Шмитта.

Триггером Шмитта называют устройство сравнения (компаратор), уровни включения и выключения которого не совпадают. Разница этих уровней называется гистерезисом переключения. Схема инвертирующего триггера Шмитта на ОУ приведена на рис. 1.36.

Триггер переключается при увеличении отрицательного входного напряжения до порогового значения $U = \frac{U_{\text{вых max}} R1}{(R1 + R2)}$ и при уменьшении положительного напряжения на входе триггера до порогового

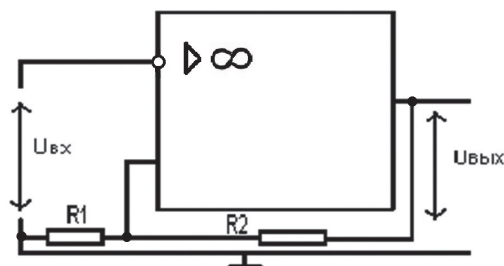


Рис. 1.36. Схема инвертирующего триггера Шмитта на ОУ

значения $U = \frac{-U_{\text{вых max}} R1}{(R1 + R2)}$. Вид передаточной

характеристики триггера Шмитта показан на рис. 1.37.

3. Мультивибратор.

На рис. 1.38 приведена схема мультивибратора на основе инвертирующего триггера Шмитта.

Обратная связь осуществляется через RC-цепь. Конденсатор попеременно перезаряжается до значений напряжения:

$$U = \frac{R1}{R1 + R2} U_{\text{вых max}} \text{ и } U = -\frac{R1}{R1 + R2} U_{\text{вых max}}$$

При этих значениях напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах становятся равными и, благодаря положительной обратной связи, происходит скачкообразное изменение выходного напряжения от $-U_{\text{вых max}}$ до $+U_{\text{вых max}}$ и наоборот.

Длительность импульса мультивибратора:

$$\tau_{\text{и}} = RC \ln \left[1 + \left(\frac{2R1}{R2} \right) \right].$$

Период повторения импульсов:

$$T = 2\tau_{\text{и}} = 2RC \ln \left[1 + \left(\frac{2R1}{R2} \right) \right].$$

При $R1 = R2$ $T \approx 2,2RC$ на выходе мультивибратора формирует-ся симметричное прямоугольное напряжение.

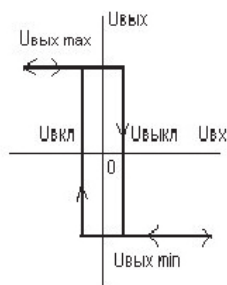


Рис. 1.37. Передаточная характеристика триггера Шмитта

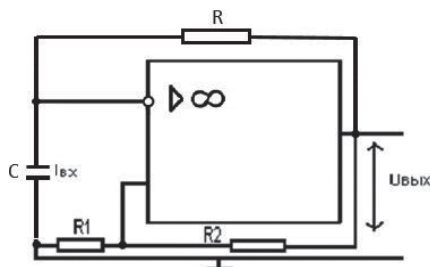


Рис. 1.38. Схема мультивибратора на основе триггера Шмитта

Описание лабораторной установки

Лабораторный макет позволяет с помощью проводников собирать разные варианты схем на ОУ.

Макет имеет гнезда для подключения внешнего генератора, вольтметра и осциллографа. С гнезда ХТ1 можно снимать переменное напряжение внешнего генератора или постоянное внутреннего источника, выбирая источник тумблером SA. Тумблером SA1 можно менять полярность постоянного напряжения, снимаемого с гнезда ХТ1, а потенциометром «Уровень» регулировать его величину. Тумблер SA3 подключает вольтметр и осциллограф к выходу ОУ или к его входу — гнезду ХТ1.

Макет содержит также внутренний генератор синусоидального напряжения, амплитуда которого тоже регулируется потенциометром «Уровень».

Электропитание включается тумблером, который находится сбоку, на правой стороне макета.

Порядок выполнения работы

Исследование схем усиления на базе ОУ

Собрать схему инвертирующего усилителя (рис. 1.29).

Значения сопротивлений резисторов установить: $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_3 = 10 \text{ кОм}$, R_1 — по указанию преподавателя.

Вход схемы соединить с гнездом ХТ1. Переключатели в положение: SA1 «+»; SA2 «=»; SA3 «К входу» — вольтметр подключается к входу.

Установить равное 0,1 В значение входного напряжения потенциометром «Уровень» и включить макет.

Переключить тумблер SA3 в положение «К выходу» и замерить вольтметром напряжение на выходе ОУ. Определить полярности напряжения на входе и выходе ОУ и коэффициент усиления ОУ с обратной связью K_{oc} . Сравнить полученное значение с расчетным.

Собрать схему неинвертирующего усилителя (рис. 1.30).

При выключенном макете. Выполнить те же исследования, что и для схемы инвертирующего усилителя.

Выключить макет.

Собрать схему повторителя (рис. 1.31) и определить коэффициент передачи и полярности напряжения на входе и выходе, как

в предыдущих схемах инвертирующего и неинвертирующего усилителей, при уровне входного напряжения 0,5 В. Повторить измерения при отрицательном входном напряжении, установив тумблер SA1 в положение «-».

Исследование амплитудных характеристик ОУ

Снять зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ для инвертирующего и неинвертирующего усилителей при $R1 = R3 = 10 \text{ кОм}$ и $R2 = 560 \text{ кОм}$. Для этого при выключенном макете собрать усилитель и подключить его вход к гнезду XT1. На макете тумблеры: SA1 «+», SA2 «-», SA3 «К входу». Ручка потенциометра «Уровень» в крайнем левом положении.

Включить макет. Переключатель SA3 перевести в положение «К выходу» и, измеряя значения напряжения на входе и выходе усилителя, снять 8–10 отсчетов до насыщения усилителя и еще 2–3 отсчета. После этого переключить тумблер SA1 в положение «-» и произвести измерения амплитудной характеристики при отрицательном входном напряжении.

Выключить макет, собрать вторую схему и провести измерения для нее.

Результаты измерений занести в таблицу.

Построить АЧХ для обеих схем усилителей на одном графике.

Исследование амплитудно-частотных характеристик ОУ

Снять амплитудно-частотные характеристики инвертирующего и неинвертирующего усилителей при $R1 = 10 \text{ кОм}$, $R2 = 100 \text{ кОм}$, $R3 = 10 \text{ кОм}$.

Для этого:

- 1) собрать исследуемую схему;
- 2) подключить вход усилителя к гнезду XT1;
- 3) переключатели на макете установить в положение: SA2 «~», SA3 «К входу»;
- 4) включить вольтметр в режим измерения переменного напряжения;
- 5) включить генератор и установить напряжение 0,1 В;
- 6) включить макет;
- 7) тумблер SA3 установить в положение «К выходу»;
- 8) изменяя частоту генератора, снять АЧХ;
- 9) выключить макет;
- 10) собрать вторую схему и снять ее АЧХ.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

Построить снятые амплитудно-частотные характеристики на одном графике в логарифмическом масштабе, определить граничные частоты и полосы пропускания усилителей.

Исследование функциональных устройств на ОУ

Гиратор

При выключенном макете собрать схему колебательного контура с гиратором на операционном усилителе, приведенную на рис. 1.35. Значения параметров элементов схемы: $R1 = 100 \text{ кОм}$, $R2 = 1 \text{ кОм}$, $C = 0,01 \text{ мкФ}$, $C_k = 1 \text{ мкФ}$.

Необходимо следующее:

- 1) подключить вход усилителя к гнезду XT1;
- 2) переключатели на макете установить в положение: SA2 «~», SA3 «К входу»;
- 3) включить вольтметр в режим измерения переменного напряжения;
- 4) включить генератор и установить напряжение $0,1 \text{ В}$;
- 5) включить макет;
- 6) вольтметр подключить к точке соединения конденсаторов C_k и C и общему проводу;
- 7) изменяя частоту генератора, снять АЧХ контура;
- 8) выключить макет.

Результаты измерений занести в таблицу. Построить частотную характеристику контура в логарифмическом масштабе.

Триггер Шмитта

При выключенном макете собрать схему триггера Шмитта (рис. 1.36). Вход триггера Шмитта подключить к гнезду XT1. Переключатели установить в положение: SA2 «=», SA1 «-», SA3 «К выходу». К выходу триггера подключить осциллограф. Параметры элементов выбрать по указанию преподавателя.

Включить макет и снять передаточную характеристику триггера. Для этого увеличивать напряжение на входе триггера регулятором «Уровень» до скачка напряжения на выходе и замерить вольтметром пороговое значение входного напряжения $U_{\text{вкл}}$. Переключив SA3 в положение «К выходу», измерить максимальное значение выходного напряжения $U_{\text{вых max}}$.

Установить переключатель SA1 в положение «+» и провести аналогичные измерения для отрицательного участка передаточной характеристики. Снять значения $U_{\text{выкл}}$ и $U_{\text{вых min}}$.

Построить передаточную характеристику триггера Шмитта.

Мультивибратор

При выключенном макете собрать схему мультивибратора (рис. 1.38). Параметры элементов схемы выбрать по указанию преподавателя. Положение переключателей: SA1 «=», SA2 «+», SA3 «К выходу». К выходу ОУ подключить осциллограф.

Включить макет.

Измерить период следования импульсов и их длительность и сравнить полученные значения с рассчитанными.

Выключить макет и снять установленные перемычки.

Содержание отчета

Отчет по работе должен быть оформлен в соответствии с общими требованиями (см. Введение).

Контрольные вопросы и задания

1. Для чего в схемах усилителей применяется отрицательная обратная связь?
2. Чем отличаются схемы инвертирующего и не инвертирующего усилителей?
3. Как обеспечивается устойчивая работа операционного усилителя во всем диапазоне усиливаемых частот?
4. Как зависит вид амплитудно-частотной характеристики усилителя от параметров цепи обратной связи?
5. Как влияют параметры цепи обратной связи на амплитудную характеристику усилителя?
6. Какие устройства называют гираторами?
7. Объясните принцип работы гиратора.
8. Что представляет собой триггер Шмитта?
9. Почему передаточная характеристика триггера Шмитта имеет гистерезис?
10. Поясните принцип работы мультивибратора на триггере Шмитта.

Литература

[2] — с. 350–360; [4] — с. 63–78; [6] — с. 137–139, 203–207.

1.7. Лабораторная работа № 7.

Исследование счетчика импульсов и числового регистра

Цель работы: экспериментальное ознакомление с устройством и принципами работы цифровых счетчиков импульсов и регистров памяти чисел.

Теоретические сведения

Цифровой счетчик импульсов

Цифровой счетчик считает количество импульсов, поступающих на его вход, и хранит результат счета.

По назначению счетчики делятся на простые и реверсивные. Простые счетчики бывают суммирующие и вычитающие. Содержимое суммирующего счетчика при поступлении очередного импульса на его вход увеличивается на единицу, а вычитающего уменьшается на единицу. Реверсивные счетчики могут работать и в режиме сложения, и в режиме вычитания.

Главный показатель счетчика — коэффициент (модуль) счета, равный максимальному количеству импульсов, сосчитанному счетчиком до переполнения $K_{\text{сч}} = 2^N$ в суммирующем счетчике или антипереполнения в вычитающем.

Счетчики строятся на основе триггеров и изготавливаются в виде интегральных микросхем. Счет импульсов производится в двоичной системе счисления, количество двоичных разрядов счетчика равно числу триггеров N .

При поступлении $2^N - 1$ импульсов на вход суммирующего счетчика, имеющего исходное нулевое состояние, он полностью заполняется единицами, и очередной импульс опять устанавливает (сбрасывает) все разряды счетчика в «0». В вычитающем счетчике наоборот, если сначала во всех разрядах «1», то при поступлении на вход $2^N - 1$ импульсов во всех разрядах устанавливаются нули, а следующий импульс возвращает разряды счетчика в исходное единичное состояние.

После сброса счет импульсов начинается сначала. Такая операция называется пересчетом с коэффициентом деления (пересчета), равным $K_{\text{сч}} = 2^N$.

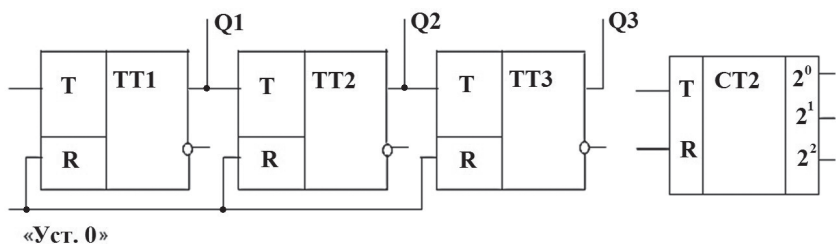


Рис. 1.39. Функциональная схема трехразрядного ($N = 3$) суммирующего счетчика (а) и его условное графическое обозначение (б)

На рис. 1.39-а представлена функциональная схема трехразрядного ($N = 3$) суммирующего счетчика, а на рис. 1.39-б — его условное графическое обозначение.

Входные импульсы подаются на счетный вход Т первого триггера ТТ1, прямой выход Q1 которого соединен со счетным входом Т второго триггера ТТ2, а прямой выход Q2 второго триггера соединен со счетным входом Т третьего триггера ТТ3. Счетчик имеет шину установки триггеров в нулевое состояние, к которой подключены входы сброса триггеров. Обозначение СТ2 на рис. 1.39-б указывает на то, что счетчик двоичный. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу счетчика, представлены на рис. 1.40.

Как следует из этих диаграмм, период повторения импульсов после каждого триггера увеличивается в 2 раза. Перед началом

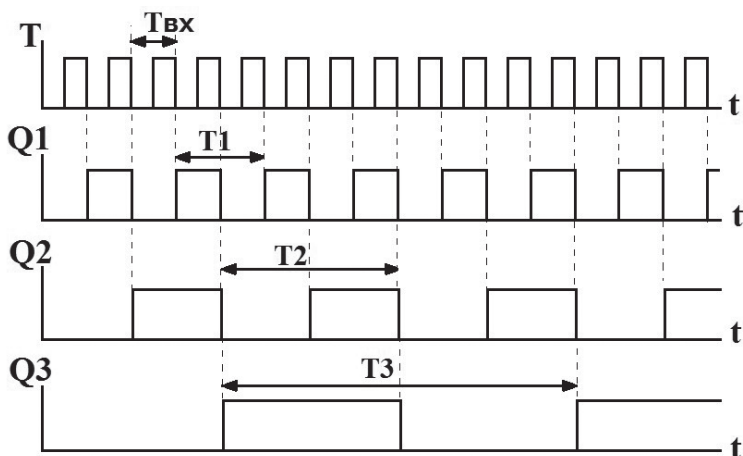


Рис. 1.40. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу счетчика

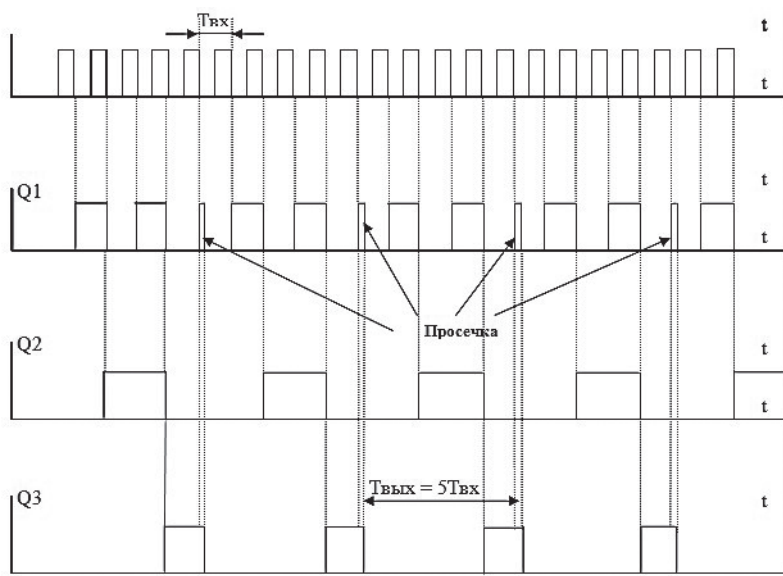


Рис. 1.42. Временные диаграммы работы счетчика с $K_{сч} = 5$

В устройствах отображения цифровой информации на индикаторах широко применяются десятичные (декадные) счетчики с коэффициентом счета $K_{сч} = 10$. Такой счетчик можно, например, реализовать, если подключить последовательно к входу рассмотренного счетчика с коэффициентом счета $K_{сч} = 5$ еще один триггер.

Регистры

Регистром называется цифровое устройство, предназначенное для хранения информации. Основные элементы регистра — двоичные ячейки, количество которых определяется разрядностью регистра. В лабораторной работе исследуется четырехразрядный сдвиговый регистр (рис. 1.43) с третьим состоянием выхода на RS-триггерах.

Режимы загрузки данных и сдвига содержимого регистра переключаются с помощью входа разрешения $\overline{PE}$ (черта сверху означает, что активным является низкий уровень сигнала на входе). Если на входе

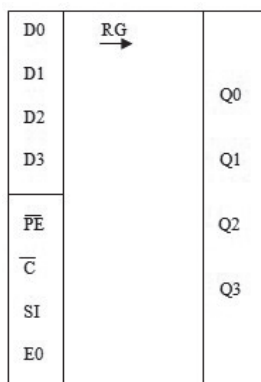


Рис. 1.43. Четырехразрядный сдвиговый регистр

высокий уровень напряжения, то данные загружаются в регистр с параллельных входов D0–D3 синхронно с отрицательным перепадом на входе синхронизации $\bar{C}$. Напряжение низкого уровня на входе $\overline{PE}$ вызывает загрузку данных от последовательного входа SI. Хранимое в регистре цифровое слово сдвигается вправо от Q0 к Q1, затем к Q2 и Q3 синхронно с отрицательным перепадом на тактовом входе $\bar{C}$. Если на вывод разрешения выхода E0 подать напряжение низкого уровня, то выходы Q0–Q3 переходят в третье Z-состояние (размыкаются).

Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят лабораторный макет и осциллограф. На макете располагаются: двоичный счетчик ST2, регистр сдвига RG, электронный коммутатор SW для одновременного наблюдения на экране осциллографа состояния выходов счетчика, формирователь перепадов напряжения F с кнопкой SB1 и генератор импульсов G1 с переключателем SA1 частоты их следования (3 Гц или 300 кГц), гнезда выходов логической единицы и логического нуля. Формирователь F позволяет управлять работой счетчика и регистра в ручном режиме, а выход генератора импульсов с частотой 300 кГц используется для исследования работы счетчика с помощью осциллографа.

На рис. 1.44. приведена схема исследуемого счетчика.

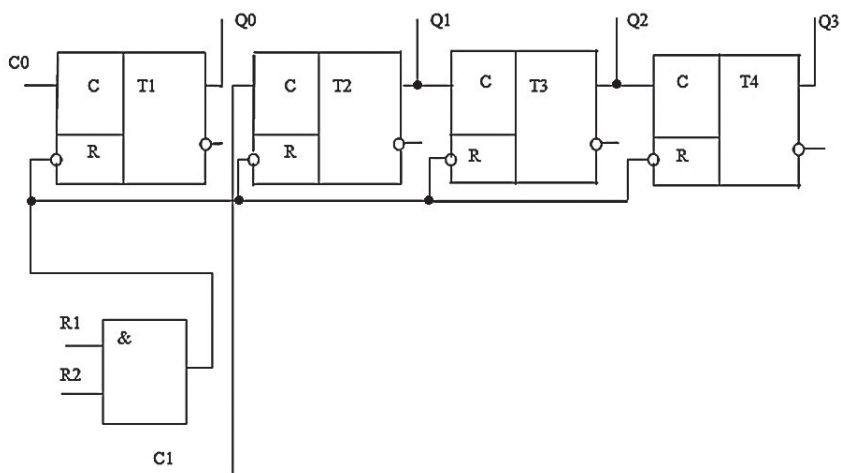


Рис. 1.44. Схема исследуемого счетчика

Микросхема содержит два счетчика: одноразрядный (на триггере Т1 с коэффициентом счета 2, входом С0 и выходом Q0) и трехразрядный (на триггерах Т2–Т4 с коэффициентом счета $2^3 = 8$, входом С1 и выходами Q1, Q2, Q3). Если соединить последовательно все четыре триггера, установив перемычку между выводами Q0 и С1, то реализуется схема четырехразрядного двоичного счетчика с коэффициентом счета $2^4 = 16$.

Соединяя входы схемы совпадения R1 и R2 с выходами счетчика, можно получить коэффициенты счета, не кратные степени числа 2, например, реализовать декадный счетчик.

Все выходы счетчика и регистра на макете имеют парные гнезда, для контроля их состояния предусмотрены светодиоды.

Порядок выполнения работы

Исследование цифрового счетчика импульсов

Включить лабораторный макет тумблером с правой стороны макета и осциллограф. Установить счетчик в исходное нулевое состояние. Для этого входы схемы совпадения R1 и R2 должны быть отключенными (свободными). Затем на один или на оба входа схемы совпадения (R1, R2) подать логический ноль.

Исследовать работу трехразрядного счетчика в режиме ручного управления.

Для этого соединить вход С1 трехразрядного счетчика с выходом отрицательного перепада формирователя F. Подавать на счетный вход С1 сигналы перепада напряжения, нажимая кнопку SB1 и наблюдать по светодиодам за изменением состояния выходов Q1, Q2, Q3 счетчика. Когда светодиод горит — на выходе логическая единица. Результаты наблюдений занести в таблицу.

№№ счетных импульсов	Состояние выхода			Примечание
	Q1	Q2	Q3	
0	0	0	0	Исходное состояние счетчика
1				$K_{\text{сч}} =$
2				$T1 =$
3				$T2 =$
4				$T3 =$
5				$T_{\text{вх}} =$
6				

№№ счетных импульсов	Состояние выхода			Примечание
	Q1	Q2	Q3	
7				
8				

Исследовать трехразрядный счетчик с помощью осциллографа.

Для этого подать на вход С1 счетчика с выхода генератора импульсов Г импульсную последовательность с частотой 300 кГц. Используя переключатели калибровки экрана «Вольт/Дел» и «Время/Дел», измерить период следования Т1, Т2, Т3 и амплитуду импульсов $U_{\text{вых}}$ на выходах Q1, Q2 и Q3 счетчика. Неподвижное изображение импульсов на экране осциллографа устанавливается ручками «Уровень» и «Синхронизация». Измерить период следования входных импульсов на выходе генератора Г.

Зарисовать осциллограммы последовательностей входных и выходных импульсов друг под другом, соблюдая временное соответствие.

Подключить выходы Q1, Q2, Q3 счетчика к входам 1, 2, 3 коммутатора SWb и подать на вход счетчика С1 последовательность импульсов с частотой 300 кГц от генератора Г. Добиться устойчивого изображения на экране осциллографа и сравнить полученные временные диаграммы с диаграммами, построенными по результатам предыдущих наблюдений.

Собрать и исследовать декадный счетчик импульсов.

Для этого собрать четырехразрядный счетчик, соединив выход Q0 одноразрядного счетчика с входом С1 трехразрядного. На входы R1 и R2 схемы совпадения подать сигналы обратной связи с выходов Q1 и Q3, так как число 10 в четырехразрядном двоичном коде имеет вид 1010. При необходимости предварительно установить счетчик в исходное нулевое состояние, освободив одновременно гнезда R1 и R2 и подав затем на один или на оба входа схемы совпадения (R1, R2) логический ноль.

Исследовать декадный счетчик в режиме ручного управления, используя сигналы формирователя перепадов напряжения F на входе С0 и в автоматическом режиме, подавая на вход С0 сигнал с частотой 300 кГц от генератора импульсов Г и наблюдая на выходных счетчика осциллограммы. По результатам наблюдений и измерений заполнить таблицу, аналогичную таблице, приведенной выше. Построить временные диаграммы, как для трехразрядного счетчика.

Получить одновременное изображение временных диаграмм на выходах счетчика на экране осциллографа с помощью коммутатора и сравнить его с построенными ранее временными диаграммами.

Исследование регистра

Исследовать работу регистра в режиме параллельной загрузки.

Для этого собрать четырехразрядный счетчик и соединить выходы Q0–Q3 счетчика с входами D0–D3 регистра, имеющими одинаковые с ними номера. На входы $\overline{PE}$ и E0 подать напряжение высокого уровня с любого из выходов логической единицы. Вход $\overline{C}$ регистра соединить с выходом отрицательного перепада формирователя F. Подать отрицательный перепад напряжения на вход $\overline{C}$, нажав кнопку SB1. На выходах регистра должно появиться число, отображаемое светодиодами на выходах счетчика.

Исследовать работу регистра в режиме загрузки данных с последовательного входа.

Для этого на вход $\overline{PE}$ подать напряжение низкого уровня (логического нуля). Подавая кнопкой SB1 перепады напряжения с выхода формирователя F на вход последовательной загрузки данных в регистр SI, наблюдать сдвиг числа на выходе регистра по показаниям светодиодных индикаторов.

Содержание отчета

Отчет обязательно должен содержать: таблицы с результатами измерений, исследованные схемы, согласованное изображение временных диаграмм, выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит цифровой счетчик?
2. Что такое модуль или коэффициент счета?
3. Что такое счетчик-делитель (пересчетное устройство)?
4. Чем определяется количество разрядов цифрового счетчика?
5. Как реализовать на базе двоичного счетчика счетчик с коэффициентом счета, отличным от степени числа 2?

6. Какие значения коэффициента счета можно реализовать на базе исследованной в лабораторной работе микросхемы?
7. Какой регистр называется регистром сдвига?
8. Как осуществить параллельную запись в регистре сдвига?
9. Как реализуется последовательная запись в регистре сдвига?

Литература

[2] — с. 400–405; [4] — с. 79–88; [5] — с. 434–438; [6] — с. 195–200.

2. Задачи и задания

Варианты задач и заданий выбираются по таблице, в соответствии с фамилией учащегося. Например, вариант 1 выполняется студентами, фамилии которых начинаются с букв А, Л, Х, вариант 2 — студентами, фамилии которых начинаются с букв Б, М, Ц и т.д.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Первая буква фамилии	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т	У	Ф
	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Э	Ю	Я	Ы	Й

2.1. Электрические цепи

Задача 1. Анализ линейной электрической цепи постоянного тока

Мостовая измерительная схема, приведенная на рис. 2.1, состоит из резисторов с постоянными сопротивлениями R и чувствительных элементов, сопротивления которых равны $R + \Delta R$ или $R - \Delta R$, где ΔR — приращение сопротивления, вызываемое изменением измеряемой величины. На зажимы питания моста подается постоянное напряжение U_0 .

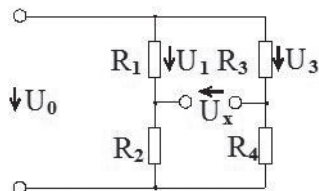


Рис. 2.1. Мост сопротивлений

Вывести зависимость напряжения U_x на зажимах измерительной диагонали моста от отношения $\Delta R/R$ для условий, указанных в таблице вариантов задачи. Построить график функции U_x ($\Delta R/R$) при изменении отношения $\Delta R/R$ от 0 до 1.

Пояснения

Выходное напряжение моста равно разности падений напряжения на резисторах R_1 и R_3 :

$$U_x = U_1 - U_3 = \frac{U_0}{R_1 + R_2} R_1 - \frac{U_0}{R_3 + R_4} R_3.$$

Таблица вариантов задачи 1

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	$R + \Delta R$	$R + \Delta R$	R	$R + \Delta R$	$R + \Delta R$	R	$R + \Delta R$	$R + \Delta R$	R	R
R_2	R	$R - \Delta R$	$R - \Delta R$	R	R	$R + \Delta R$	$R - \Delta R$	$R + \Delta R$	$R - \Delta R$	R
R_3	R	R	R	R	$R - \Delta R$	$R - \Delta R$	$R - \Delta R$	$R + \Delta R$	$R - \Delta R$	$R - \Delta R$
R_4	R	R	R	$R + \Delta R$	R	R	$R + \Delta R$	$R - \Delta R$	R	$R + \Delta R$

Чтобы получить искомую зависимость, надо подставить в это выражение значения сопротивлений из таблицы вариантов задачи и произвести необходимые для его упрощения преобразования.

Литература

[1] — с. 18–27; [2] — с. 32–36; [3] — с.14; [5] — с. 22–25.

Задача 2. Анализ линейной электрической цепи переменного синусоидального тока

На вход линейной электрической цепи (рис. 2.2) подается переменное напряжение:

$$u = U_m \sin(2\pi ft + \alpha_u) = 10 \sin\left(2\pi 10^4 t + \frac{\pi}{3}\right).$$

В таблице вариантов задачи заданы параметры элементов этой цепи.

Преобразуя цепь, вычислить комплексные амплитуды токов в ветвях и падений напряжения на элементах. При этом комплексные амплитуды всех токов и напряжений должны быть определены в алгебраической и показательной форме. Составить систему уравнений Кирхгофа и, подставив в них найденные комплексные амплитуды токов и напряжений, проверить правильность полученных результатов. Вычислить полную, активную и реактивную мощности цепи и коэффициент

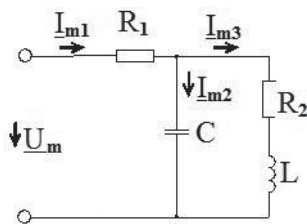


Рис. 2.2. Анализируемая электрическая цепь

мощности. Построить векторную диаграмму токов и напряжений цепи.

В дальнейшем комплексные величины отмечаются подчеркиванием. Отсутствие подчеркивания означает модуль комплексной величины. Сопряженная комплексная величина отмечается подчеркиванием и звездочкой справа от ее обозначения.

Таблица вариантов задачи 2

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1 , Ом	8	11	12	9	10	14	8	10	7	9
R_2 , Ом	10	12	18	15	11	12	10	18	15	11
L , мГн	0,12	0,20	0,25	0,15	0,14	0,21	0,18	0,11	0,10	0,17
C , мкФ	0,8	1,0	0,7	1,6	2,0	1,2	1,3	1,4	0,9	1,5

Пояснения

Для определения токов в ветвях цепи нужно сначала привести цепь к одноконтурной, объединяя сопротивления элементов. Обозначим комплексные сопротивления элементов:

$$\underline{Z}_1 = R_1; \underline{Z}_2 = -jX_c = \frac{-j}{2\pi fC}; \underline{Z}_3 = R_2; \underline{Z}_4 = jX_L = j2\pi fL.$$

f — заданная частота входного напряжения. $\underline{Z}_3$ и $\underline{Z}_4$ включены последовательно, поэтому их общее сопротивление:

$$\underline{Z}_{34} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4.$$

Сопротивления $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_{34}$ параллельны, следовательно, их общее сопротивление:

$$\underline{Z}_{234} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_{34}}{(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{34})}.$$

Полное сопротивление цепи:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{234}.$$

По закону Ома:

$$\underline{I}_{m1} = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}_0},$$

где $\underline{U}_m$ и $\underline{I}_{m1}$ — соответственно комплексные амплитуды входного напряжения и входного тока. Определив падение напряжения на разветвленном участке

$$\underline{U}_{m234} = \underline{I}_{m1} \underline{Z}_{234},$$

можно найти токи в ветвях

$$\underline{I}_{m2} = \frac{\underline{U}_{m234}}{\underline{Z}_2}, \quad \underline{I}_{m3} = \frac{\underline{U}_{m234}}{\underline{Z}_{34}}.$$

Падение напряжения на отдельных элементах определяется по закону Ома.

Система уравнений Кирхгофа для проверки решения должна содержать три уравнения (по числу ветвей цепи): одно по первому закону (число узлов минус единица) и два по второму.

Действующие значения токов и напряжений равны амплитудным значениям, деленным на $\sqrt{2}$.

Полная мощность цепи равна:

$$\underline{S} = \frac{\underline{U}_m \underline{I}_{m1}^*}{2} = S \times e^{j\varphi} = P + jQ,$$

где $\underline{I}_{m1}^*$ — комплексно-сопряженная амплитуда тока $\underline{I}_{m1}$; P (Вт) — активная мощность; Q (Вар) — реактивная мощность; S (В·А) — полная мощность:

$$\left(S = \sqrt{P^2 + Q^2} \right).$$

Коэффициентом мощности называется величина:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}.$$

На векторной диаграмме должны быть представлены и сложены, в соответствии с уравнениями Кирхгофа с учетом пропорций, все напряжения и токи. При этом следует учитывать, что напряжение на резисторе совпадает по фазе с током, на катушке индуктивности опережает ток на 90° , а на конденсаторе отстает от тока на 90° .

Литература

[1] — с. 12–25; [2] — с. 67–79; [3] — с. 14–16; [5] — с. 45–58; [7] — с. 27–44.

Задача 3. Расчет последовательного колебательного контура

На последовательный колебательный контур (рис. 2.3) подается синусоидальное напряжение.

Вычислить неизвестные значения величин, указанные в таблице вариантов задачи знаком вопроса, по заданным известным значениям. Прочерками отмечены величины, которые при решении задачи не используются.

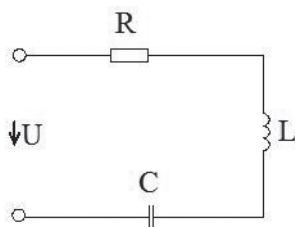


Рис. 2.3. Последовательный колебательный контур

Таблица вариантов задачи 3

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L , мкГн	100	—	—	50	50	?	?	100	25	?
C , пФ	—	—	100	50	?	80	?	?	16	?
R , Ом	5	2	?	10	10	?	5	4	?	?
f_0 , МГц	?	1	2	?	—	?	3	?	?	1
F , МГц	—	1.5	—	?	2	?	—	?	?	2
U_{L0} U_{C0} , В	?	—	?	?	?	—	?	—	?	?
ρ , Ом	400	?	?	?	500	?	?	500	?	600
Q	?	100	?	?	?	100	80	?	100	120
Δf , кГц	?	—	20	?	?	10	?	?	?	?
U , В	10	5	?	8	?	—	10	—	?	6
U_C , В	—	?	—	5	—	?	—	20	4	?
U_L , В	—	?	—	10	—	5	—	?	1	?
I_0 , А	?	?	1	?	?	—	—	—	0.5	?
I , мА	—	?	—	—	10	5	—	100	—	?

Пояснения

В графе таблицы вариантов задачи «Исходные данные» перечислены параметры схемы колебательного контура.

R — сопротивление резистора.

L — индуктивность катушки индуктивности.

C — емкость конденсатора.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ — резонансная частота контура.}$$

U — напряжение, подаваемое на контур.

f — частота напряжения, подаваемого на контур.

$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ — характеристическое сопротивление контура.

$Q = \frac{\rho}{R}$ — добротность контура.

$\Delta f = \frac{f_0}{Q}$ — полоса пропускания.

$I_0 = \frac{U}{R}$ — ток в контуре при резонансе.

$U_{L0} = U_{C0} = I_0 \rho = \frac{U \rho}{R} = UQ$ — напряжения на катушке индук-

тивности и на конденсаторе при резонансе.

$I = \frac{U}{Z} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + \xi^2}}$ — ток в контуре на частоте f ,

где $Z = R\sqrt{1 + \xi^2}$ — сопротивление контура на частоте f .

$\xi = \frac{X_L - X_C}{R}$ — обобщенная расстройка.

$X_L = 2\pi fL = \frac{\rho f}{f_0}$ и $X_C = \frac{1}{2}\pi fC = \frac{\rho f_0}{f}$ — индуктивное и емкост-

ное сопротивление).

$U_L = IX_L$, $U_C = IX_C$ — напряжения на катушке индуктивности

и конденсаторе на частоте f . $\left(\frac{U_L}{U_C} = \frac{f^2}{f_0^2}\right)$.

Для всех напряжений и токов, заданных в таблице вариантов, при решении задачи вычисляются их действующие значения.

Литература

[1] — с. 35–37; [2] — с. 79–82; [3] — с. 16–17; [5] — с. 58–61; [7] — с. 88–90.

Задача 4. Расчет параллельного колебательного контура

Найти неизвестные значения величин, указанные знаком вопроса в таблице вариантов задачи для параллельного колебательного контура, приведенного на рис. 2.4, по заданным известным значениям. Прочерками отмечены величины, не используемые при решении задачи.

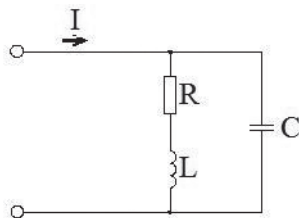


Рис. 2.4. Параллельный колебательный контур

Таблица вариантов задачи 4

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R , Ом	5	?	?	?	?	4	10	?	20	?
L , мкГн	50	?	?	100	—	200	?	—	100	—
C , пФ	200	?	100	400	—	?	?	—	?	—
f_0 , МГц	?	2	?	?	4	?	2	?	?	5
I , мА	1	2	?	?	?	4	—	2	?	?
f , МГц	—	3	—	0.5	2	—	4	?	—	10
ρ , Ом	?	400	1000	?	1000	?	?	500	?	?
Q	?	100	?	70	?	80	?	100	?	50
Δf , кГц	?	—	80	—	?	?	?	100	?	?
Z_0 , кОм	?	?	?	?	50	?	40	?	50	?
$I_{L0} I_{C0}$, мА	?	—	250	—	?	?	—	—	?	100
U_0 , В	?	—	?	40	50	?	—	?	—	100
Z , кОм	—	?	—	?	—	—	?	?	2	?
U , В	—	?	—	2	?	—	—	5	4	?

Пояснения

Характеристическое сопротивление ρ , добротность Q , резонансная частота f_0 , полоса пропускания Δf определяются для параллельного контура так же, как и для последовательного (см. пояснения к Задаче 3). Кроме них графа «Исходные данные» содержит:

- ток I питающий контур;
- частоту f этого тока;

- сопротивление контура при резонансе $Z_0 = \frac{L}{CR} = \frac{\rho^2}{R}$;

– токи в ветвях катушки индуктивности и конденсатора при резонансе $I_{L0} = I_{C0} \approx I_0$;

– падение напряжения на контуре при резонансе $U_0 = IZ_0$;

– сопротивление контура на частоте f : $Z = \frac{Z_0}{\sqrt{1+\xi^2}}$ (ξ , X_L , X_C

определяются так же, как и в последовательном контуре); напряжение на контуре при частоте f : $U = \frac{U_0}{\sqrt{1+\xi^2}}$.

Для всех напряжений и токов, заданных в таблице вариантов, при решении задачи вычисляются их действующие значения.

Литература

[1] — с. 37–39; [2] — с. 82–85; [3] — с. 17–18; [5] — с. 64–66; [7] — с. 90–93.

Задача 5. Анализ пассивного линейного четырехполюсника

На рис. 2.5 приведены две схемы линейных четырехполюсников, нагруженных на активное сопротивление $Z_H = 1000$ Ом. Напряжение входного синусоидального сигнала $\underline{U}_1 = U_1 = 10$ В. Частота входного сигнала $f = 1$ МГц. В таблице вариантов заданы варианты схемы и комплексные сопротивления элементов Z_1 , Z_2 .

Вычислить: комплексный коэффициент передачи напряжения K , его модуль K и фазовый сдвиг φ ; входное сопротивление четырехполюсника $Z_{вх}$; действующие значения входного тока I_1 , тока

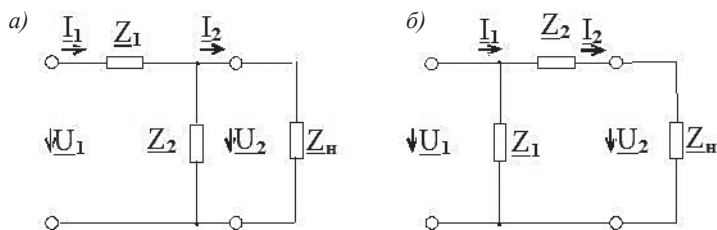


Рис. 2.5. Схемы нагруженных четырехполюсников:
а) первый вариант; б) второй вариант

нагрузки I_2 и напряжения U_2 на нагрузочном сопротивлении Z_n ; параметры элементов четырехполосника: сопротивление R , индуктивность L , емкость C .

Таблица вариантов задачи 5

Исходные данные	Варианты				
	1	2	3	4	5
Схема	Рис. 2.5-а				
Z_1 , Ом	-j47	-j230	50	j1000	1000
Z_2 , Ом	100	j2000	j125	-j2500	-j1600
Исходные данные	Варианты				
	6	7	8	9	10
Схема	Рис. 2.5-б				
Z_1 , Ом	100	-j1600	500	j1000	-j160
Z_2 , Ом	j628	1500	-j1000	200	j50

Пояснения

Параметры элементов четырехполосника вычисляются из соотношений:

$$\underline{Z}_R = R; \underline{Z}_C = -jX_C = \frac{-j}{2\pi fC}; \underline{Z}_L = jX_L = j2\pi fL.$$

Остальные искомые величины определяются через А-параметры четырехполосника.

Для схемы 2.5-а:

$$\underline{A}_{11} = \frac{1 + \underline{Z}_1}{\underline{Z}_2}; \underline{A}_{12} = \underline{Z}_1; \underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_2}; \underline{A}_{22} = 1.$$

Для схемы 2.5-б:

$$\underline{A}_{11} = 1; \underline{A}_{12} = \underline{Z}_2; \underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_1}; \underline{A}_{22} = \frac{1 + \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}.$$

Комплексный коэффициент передачи четырехполосника по напряжению:

$$\underline{K} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{\underline{Z}_n}{(\underline{A}_{11}\underline{Z}_n + \underline{A}_{12})} = Ke^{j\varphi},$$

где K — модуль коэффициента передачи, φ — фазовый сдвиг.

Входное сопротивление четырехполюсника:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{(\underline{A}_{11}\underline{Z}_2 + \underline{A}_{12})}{(\underline{A}_{21}\underline{Z}_2 + \underline{A}_{22})}.$$

Входной ток:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{вх}}}.$$

Напряжение на нагрузке:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 \underline{K}.$$

Ток в нагрузке:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_\text{н}}.$$

Действующие значения I_1 , U_2 , I_2 равны модулям соответствующих комплексных чисел.

Литература

[1] — с. 50–53; [3] — с. 18–19; [5] — с. 68–77; [7] — с. 55–58.

2.2. Электронные приборы

Задание 1. Описание устройства и принципа работы электронного прибора

Опишите устройство и принцип работы электронного прибора, указанного в таблице вариантов задания. Приведите его стандартное условное обозначение, технические характеристики и параметры.

Таблица вариантов задания 1

Номер варианта	Тип электронного прибора
1	Выпрямительный диод
2	Полупроводниковый стабилитрон
3	Туннельный диод
4	Фотодиод
5	Светодиод

Номер варианта	Тип электронного прибора
6	Тиристор
7	Биполярный транзистор
8	Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом
9	Полевой транзистор с изолированным затвором
10	Жидкокристаллический индикатор

Литература

[1] — с. 117–162, 182–185.

Задача 6. Анализ схемы с полупроводниковым выпрямительным диодом

На рис. 2.6 приведены схема включения выпрямительного полупроводникового диода (VD) и его вольтамперная характеристика.

На схеме: U_n — напряжение питания; I — ток, протекающий через диод; R — сопротивление нагрузки. На графике вольтамперной характеристики: $I_{пр}$ и $I_{обр}$, $U_{пр}$ и $U_{обр}$ — ток через диод и напряжение на нем при прямом и обратном включении p - n -перехода.

Вычислить величины, указанные в таблице заданий знаком «?».

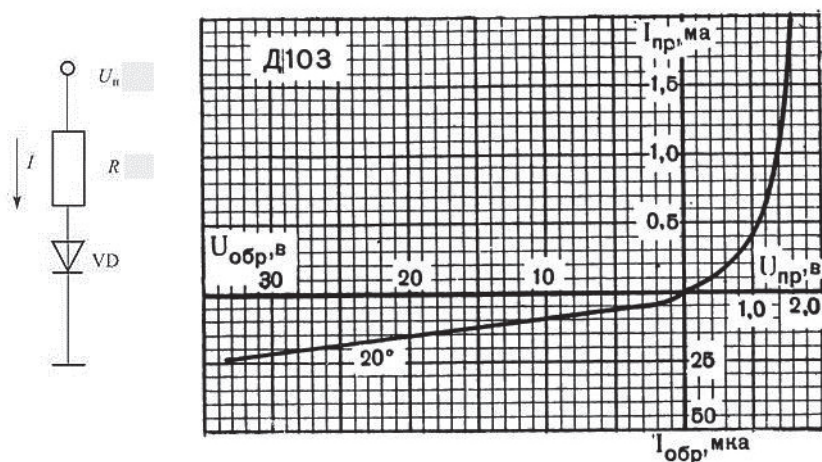


Рис. 2.6. Схема включения и вольтамперная характеристика диода

Таблица вариантов задачи 6

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{пр}, \text{мА}$	0,5	?	1,0	?	?	1,5	?	?	?	0,4
$U_{пр}, \text{В}$	?	?	?	?	?	?	1,2	?	?	?
$U_R, \text{В}$	?	?	0,6	?	1,6	?	?	?	?	1,0
$R, \text{кОм}$	?	1,5	?	?	?	?	1,0	1,0	?	?
$U_{п}, \text{В}$	2	3	?	2	?	3,0	?	?	2,0	?
$R_c, \text{кОм}$	?	?	?	0,25	?	?	?	1,4	?	?
$R_d, \text{кОм}$	?	?	?	?	0,5	?	?	?	1,0	?
$R_{обр}, \text{кОм}$	?	?	?	?	?	?	?	?		?

Пояснения

Согласно второму закону Кирхгофа:

$$U_{п} = IR + U_d,$$

где U_d — падение напряжения на диоде.

Это уравнение прямой линии, которую называют нагрузочной прямой. Ток I , протекающий через диод, соответствует точке пересечения этой прямой с вольтамперной характеристикой диода, называемой рабочей точкой.

На участке вольтамперной характеристики диода, соответствующем прямому его включению (рис. 2.7), статическое сопротивление R_c определяется, как котангенс угла наклона α секущей, проведенной из начала координат в рабочую точку, а дифференциальное сопротивление R_d , как котангенс угла наклона β касательной к характеристике в рабочей точке.

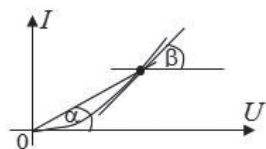


Рис. 2.7. Определение статического и дифференциального сопротивлений диода

Сопротивления вычисляются, как отношения $\Delta U / \Delta I$ приращений напряжения и тока вдоль этих линий.

Аналогично можно рассчитать обратное сопротивление диода $R_{обр}$, определяемое углом наклона обратной ветви характеристики.

Литература

[1] — с. 94–96; [2] — с. 291–292; [5] — с. 310–313.

Задача 7. Расчет h -параметров биполярного транзистора

Транзистор в Т-образной эквивалентной линейной схеме замещения (рис. 2.8) с общей базой имеет физические параметры: α — коэффициент передачи тока эмиттера, r_k — сопротивление коллектора, Ом, r_b — сопротивление базы, Ом и r_e — сопротивление эмиттера, Ом, значения которых указаны в таблице вариантов задачи.

Определить h -параметры для эквивалентных линейных схем замещения с параметрами четырехполюсника при включении транзистора в них с общей базой, общим эмиттером и общим коллектором и начертить эти схемы.

Таблица вариантов задачи 7

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	00,99	00,98	00,91	00,95	00,94	00,93	00,97	00,96	00,98	00,95
r_k , МОм	11,5	11,9	11,8	11,1	11,3	11,2	11,4	11,5	11,6	11,7
r_b , Ом	2200	2220	2240	1150	1180	2270	3300	3390	2200	2240
r_e , Ом	220	222	113	115	118	224	227	330	339	243

Пояснения

h -параметры можно вычислить по формулам:

$$h_{11Б} = r_e + r_b(1 - \alpha); \quad h_{12Б} = \frac{r_b}{(r_b + r_k)}; \quad h_{21Б} = \alpha; \quad h_{22Б} = \frac{1}{r_k};$$

$$h_{11Э} = \frac{h_{11Б}}{1 - h_{21Б}}; \quad h_{12Э} = \frac{h_{11Б}h_{22Б}}{1 - h_{21Б}} - h_{12Б}; \quad h_{21Э} = \frac{h_{21Б}}{1 - h_{21Б}}; \quad h_{22Э} = \frac{h_{22Б}}{1 - h_{21Б}};$$

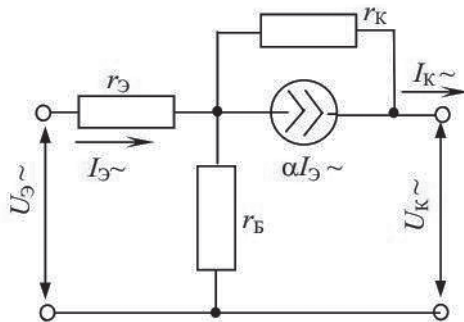


Рис. 2.8. Эквивалентная линейная схема замещения транзистора

$$h_{11K} = h_{11Э} = \frac{h_{11Б}}{1 - h_{21Б}}; \quad h_{12K} = 1; \quad h_{21K} = h_{21Э} + 1 = \frac{1}{1 - h_{21Б}};$$

$$h_{22K} = h_{22Э} = \frac{h_{22Б}}{1 - h_{21Б}}.$$

Литература

[1] — с. 146–148; [5] — с. 333–337; [6] — с. 28–32; [7] — с. 174–176.

2.3. Аналоговые электронные устройства

Задача 8. Анализ активного режима работы биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером

Для усилителя на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (рис. 2.9), используя входную и выходные вольтамперные характеристики транзистора (рис. 2.10), определить коэффициент усиления $h_{21Э}$, выходное напряжение на коллекторе $U_{кэ}$, ток коллектора I_k и мощность, на коллекторе P_k , если дано напряжение на базе $U_{бэ}$ (В), значение сопротивления нагрузки R_k (кОм) и напряжение источника питания E_k (В). Исходные данные указаны в таблице вариантов задачи.

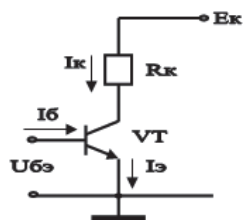


Рис. 2.9. Усилитель на биполярном транзисторе

Таблица вариантов задачи 8

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{бэ}$, В	00,2	00,15	00,15	00,10	00,30	00,25	00,15	00,30	00,25	00,20
R_k , Ом	020	010	010	05	110	110	010	57,5	110	110
E_k , В	420	20	415	410	420	20	10	15	415	10

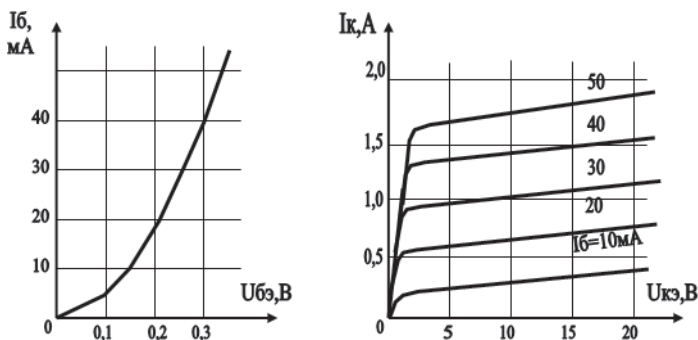


Рис. 2.10. Вольтамперные характеристики транзистора

Пояснения

На входной характеристике по известному напряжению между базой и эмиттером транзистора определяется ток базы. Затем, построив нагрузочную прямую

$$E_k = U_{кэ} + I_k R_k$$

на графике выходных характеристик, в точке пересечения ее с характеристикой (рабочей точке) для найденного тока базы определяется ток коллектора и напряжение на коллекторе. Мощность на коллекторе транзистора равна произведению тока коллектора на напряжение между коллектором и эмиттером.

Коэффициент усиления тока равен отношению малых приращений тока коллектора и тока базы в области рабочей точки.

Литература

[1] — с. 142–145; [2] — с. 297–298.

Задача 9. Анализ схемы усилителя с отрицательной обратной связью

Электронный усилитель, состоящий из трех каскадов с коэффициентами усиления по напряжению K_1, K_2, K_3 , охвачен цепью отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи β (рис. 2.11).

Напряжение входного сигнала U_1 . Напряжение сигнала на выходе усилителя U_2 .

Найти значения неизвестных величин, отмеченных знаком вопроса в таблице вариантов задачи.

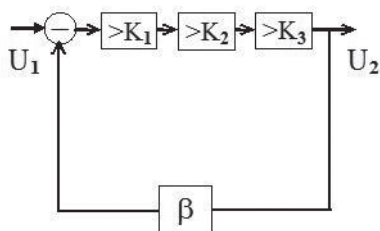


Рис. 2.11. Усилитель с отрицательной обратной связью

Таблица вариантов задачи 9

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_1 , дБ	20	20	10	10	?	20	10	15	20	40
K_2 , дБ	40	20	20	15	10	10	30	30	?	40
K_3 , дБ	?	20	20	15	20	10	20	15	20	20
U_1 , мВ	10	5	100	?	80	50	30	?	20	60
U_2 , В	5	?	1	10	8	?	6	2	4	3
β	0,0019	0,001	?	0,01	0,005	0,04	?	0,0015	0,004	?

Пояснения

Суммарный коэффициент усиления трехкаскадного усилителя при разомкнутой цепи обратной связи:

$$K = K_1 K_2 K_3,$$

или в децибелах:

$$K_{\text{дБ}} = K_{1\text{дБ}} + K_{2\text{дБ}} + K_{3\text{дБ}},$$

где $K_{i\text{дБ}} = 20 \lg K_i$.

Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью:

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K}{(1 + \beta K)}.$$

Литература

[2] — с. 351–354; [3] — с. 20–21; [5] — с. 366–369; [6] — с. 118–119; [7] — с. 225–226.

Задание 2. Описание схемы усилительного каскада

Привести принципиальную электрическую схему усилительного каскада, тип которого указан в таблице вариантов задания. Пояснить назначение элементов схемы, принцип работы и назначение усилителя.

Таблица вариантов задания 2

Номер варианта	Тип усилителя
1	Апериодический усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером
2	Резонансный усилитель на транзисторе по схеме с общим эмиттером
3	Апериодический усилитель на полевом транзисторе по схеме с общим истоком
4	Симметричный дифференциальный усилительный каскад на транзисторах
5	Резонансный усилитель на полевом транзисторе по схеме с общим истоком
6	Усилительный каскад с отрицательной обратной связью на операционном усилителе
7	Избирательный каскад на операционном усилителе с RC -фильтром в цепи обратной связи
8	Двухтактный трансформаторный усилительный каскад на транзисторах
9	Двухтактный усилительный каскад на транзисторах без трансформатора
10	Апериодический усилитель на транзисторе по схеме с общим коллектором (эмиттерный повторитель)

Литература

[2] — с. 338–356; [7] — с. 91–156.

Задание 3. Описание схемы автогенератора гармонических колебаний

Привести принципиальную электрическую схему автогенератора гармонических колебаний, тип которого указан в таблице вариантов задания. Описать назначение элементов схемы и принцип ее работы.

Таблица вариантов задания 3

Номер варианта	Тип автогенератора
1	<i>LC</i> -автогенератор на биполярном транзисторе с индуктивной обратной связью и последовательным питанием
2	<i>LC</i> -автогенератор на полевом транзисторе с индуктивной обратной связью и параллельным питанием
3	<i>LC</i> -автогенератор на полевом транзисторе с автотрансформаторной обратной связью и параллельным питанием
4	<i>LC</i> -автогенератор на полевом транзисторе с емкостной обратной связью и параллельным питанием
5	<i>LC</i> -автогенератор на туннельном диоде
6	<i>RC</i> -автогенератор на транзисторах с фазосдвигающей Г-образной <i>RC</i> -цепью обратной связи
7	<i>RC</i> -автогенератор с мостом Вина на операционном усилителе
8	<i>RC</i> -автогенератор с двойным Т-мостом на операционном усилителе
9	<i>LC</i> -автогенератор на операционном усилителе
10	Автогенератор с кварцевой стабилизацией частоты на транзисторе

Литература

[6] — с. 157–174.

2.4. Дискретные и аналого-дискретные устройства

Задача 10. Построение цифровых схем по заданным логическим функциям

В таблице вариантов задачи даны логические функции $Y(X_1, X_2)$.

Приведите схему, реализующую заданную функцию и таблицу состояний (таблицу истинности) этой схемы.

Пояснения

Схема может состоять из одного или нескольких логических элементов с использованием стандартных условных обозначений логических функций отрицания, сложения и умножения. Таблицей истинности логической схемы называется таблица ее состояний, в которой приводятся все возможные комбинации двоичных сигналов 0 и 1 на входах X_1 , X_2 схемы и соответствующие им двоичные состояния выхода Y .

Таблица вариантов задачи 10

Исходные данные	Варианты				
	1	2	3	4	5
Y	$X_1 + X_2$	$\overline{X_1} \overline{X_2}$	$\overline{X_1} + X_2$	$\overline{X_1} \overline{X_2}$	$\overline{X_1 + X_2}$
Исходные данные	Варианты				
	6	7	8	9	10
Y	$\overline{X_1 + X_2}$	$\overline{X_1} + \overline{X_2}$	$\overline{X_1} + \overline{X_2}$	$X_1 X_2$	$X_1 + \overline{X_2}$

Литература

[2] — с. 381–383; [3] — с. 23; [5] — с. 420–422.

Задача 11. Разработка схемы двоично-кодированного счетчика

Разработать схему двоично-кодированного счётчика на Т-триггерах с обратными связями, обеспечивающего заданный модуль (коэффициент) счета.

Построить связанные (одну под другой) временные диаграммы последовательностей импульсов на входе счетчика и на его выходах и таблицу истинности. На диаграммах отметить импульс просечки.

Требуемый модуль счета указан в таблице вариантов задачи.

Таблица вариантов задачи 11

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Модуль счета	12	13	14	17	18	19	20	21	22	24

Пояснения

Двоично-кодированными называются счетчики модуль (коэффициент) счета которых не равен целой степени числа 2. Один из простых способов реализации таких счетчиков состоит в сбросе их с помощью схемы «И» (совпадения) при достижении заданного числа.

Например, чтобы счетчик считал до $35_{10} = 100011_2$ нужно входы схемы совпадения соединить с выходами 6-го, 5-го и 1-го триггеров счетчика, а выход схемы совпадения со входами сброса триггеров счетчика. В лабораторной работе № 7 приведен пример двоично-кодированного счетчика с модулем счета 5.

Недостаток такого способа — наличие при сбросе короткого импульса просечки из-за временной задержки в схеме «И».

Литература

[2] — с. 404–405; [6] — с. 197.

Задание 4. Описание схемы импульсного устройства

Привести принципиальную электрическую схему импульсного устройства, тип которого указан в таблице вариантов задания. Пояснить назначение элементов схемы и принцип работы устройства.

Таблица вариантов задания 4

Номер варианта	Тип импульсного устройства
1	Триггер Шмитта на операционном усилителе
2	Симметричный мультивибратор на транзисторах с коллекторно-базовыми связями
3	Мультивибратор на операционном усилителе с использованием триггера Шмитта
4	Одновибратор (ждущий мультивибратор) на операционном усилителе
5	Мультивибратор на логических элементах
6	Генератор линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения на транзисторе
7	Генератор линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения на операционном усилителе
8	Блокинг-генератор на транзисторе
9	Ждущий мультивибратор на транзисторах с коллекторно-базовыми связями
10	Ждущий мультивибратор на логических элементах

Литература

[2] — с. 369–372; [5] — с. 397–399, 407–413; [6] — с. 202–213.

Задание 5. Описание схемы цифрового устройства

Привести электрическую схему устройства, тип которого указан в таблице вариантов задания, пояснить его назначение и принцип работы.

Таблица вариантов задания 5

Номер варианта	Тип устройства
1	Асинхронный RS-триггер на логических элементах И-НЕ и ИЛИ-НЕ
2	D-триггер на элементах И-НЕ
3	Двухступенчатый T-триггер (MS)
4	JK-триггер и триггеры T и D на его основе
5	Двоичный счетчик импульсов и декадный счётчик на его основе
6	Аналого-цифровой преобразователь поразрядного уравнивания
7	Сдвигающий регистр с последовательным вводом информации
8	Шифратор, дешифратор
9	Мультиплексор, демультиплексор
10	Цифро-аналоговый преобразователь с матрицей R-2R

Литература

[2] — с. 383–405, 410–414; [5] — с. 431–440; [6] — с. 191–202, 215–218.

2.5. Электротехнические устройства и элементы автоматики

Задание 6. Описание электротехнического устройства

Приведите электрическую схему и опишите принцип работы устройства, указанного в таблице вариантов задания. Перечислите его основные технические характеристики и параметры, отличительные свойства по сравнению с другими устройствами, выполняющими аналогичные функции.

Таблица вариантов задания 6

Номер варианта	Тип устройства
1	Однополупериодный и двухполупериодный выпрямители
2	Электродвигатель постоянного тока
3	Асинхронный электродвигатель переменного тока
4	Сглаживающие LC- и RC-фильтры

Номер варианта	Тип устройства
5	Параметрический стабилизатор постоянного напряжения
6	Компенсационный стабилизатор постоянного напряжения
7	Параметрический стабилизатор тока
8	Электромагнитное реле
9	Автономный инвертор напряжения
10	Конвертор

Литература

[2] — с. 195–201, 230–236; [5] — с. 217–222, 275–282; [6] — с. 224–271; [7] — с. 312–321, 339–343.

2.6. Электронные системы

Задача 12. Анализ характеристик амплитудно-модулированного колебания

Несущее колебание $U_{mo} \sin 2\pi f_0 t$ модулировано по амплитуде одним тоном низкой частоты $U_{mn} \sin 2\pi Ft$. Вычислить значения величин, отмеченных в таблице вариантов задачи знаком вопроса по заданным исходным данным. Написать математическое выражение амплитудно-модулированного колебания с учетом исходных данных и результатов расчета и построить его спектр в виде (рис. 2.12).

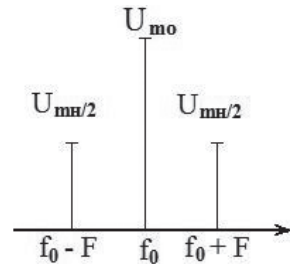


Рис. 2.12. Спектр гармонического колебания, модулированного по амплитуде одним тоном низкой частоты

Таблица вариантов задачи 8

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\max}$, В	12	?	14	?	?	10	?	?	?	15
$U_{\min}$, В	4	?	?	8	?	?	10	?	8	?

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{mo}, \text{В}$	?	10	?	?	12	?	15	?	?	10
$f_0, \text{МГц}$	10	100	1	0,1	100	1	0,1	10	100	1
$F, \text{кГц}$	10	50	1	5	1000	5	0,1	100	10	10
$U_{mn}, \text{В}$	?	?	8	?	6	?	?	4	8	?
m	?	0,5	?	0,4	?	0,25	?	0,5	?	?

Пояснения

Амплитудно-модулированное колебание имеет вид:

$$u_{AM} = U_{mo} \cos \omega_0 t + 0,5mU_{mo} \cos(\omega_0 - \Omega)t + 0,5mU_{mo} \cos(\omega_0 + \Omega)t,$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ — частота несущего гармонического колебания;
 $\Omega = 2\pi F$ — частота модулирующего гармонического колебания;

$m = \frac{U_{mn}}{U_{mo}}$ — коэффициент модуляции; U_{mo} — амплитуда несущего

гармонического колебания; U_{mn} — амплитуда модулирующего гармонического колебания.

Максимальное и минимальное значения колебания, модулированного по амплитуде:

$$U_{\max} = U_{mo} + U_{mn} = U_{mo}(1 + m);$$

$$U_{\min} = U_{mo} - U_{mn} = U_{mo}(1 - m);$$

$$\frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{(1 + m)}{(1 - m)};$$

$$m = \frac{(U_{\max} - U_{\min})}{(U_{\max} + U_{\min})};$$

$$U_{mo} = \frac{(U_{\max} + U_{\min})}{2}.$$

Вид частотного спектра амплитудно-модулированного колебания показан на рис. 2.12.

Литература

[3] — с. 25–26; [7] — с. 73–74.

Задача 13. Анализ характеристик радиолокационной станции

Импульсная радиолокационная станция измеряет полярные координаты объекта в пространстве.

Определите величины, отмеченные в таблице вариантов задачи знаком вопроса.

Таблица вариантов задачи 9

Исходные данные	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , кГц	?	1	?	?	1	?	?	2	?	?
T , мкс	?	?	500	?	?	800	?	?	1000	?
D_m , км	?	?	?	150	?	?	75	?	?	180
t_0 , мкс	600	?	?	300	?	400	?	150	?	90
D , км	?	50	?	?	75	?	45	?	60	?
τ , мкс	1	?	?	0,5	?	1	?	?	?	1
Q	1000	?	500	?	?	?	1000	500	?	?
ΔD , м	?	150	?	?	120	?	?	?	120	?
ε , рад	?	0,01	0,01	0,02	?	0,01	?	0,01	0,02	?
h , м	1000	?	600	?	1500	?	600	?	?	1000

Пояснения

В перечень исходных данных таблицы вариантов задачи входят:

- частота f зондирующих импульсов, излучаемых станцией;
- период $T = 1/f$ следования зондирующих импульсов;

– максимальная измеряемая дальность $D_m = \frac{cT}{2}$ ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме); дальность D до объекта;

- время $t_0 = \frac{2D}{c}$ от момента излучения зондирующего импульса до получения импульса, отраженного от объекта;
- длительность τ зондирующего импульса;
- скважность зондирующих импульсов $Q = T / \tau$;
- разрешающая способность по дальности $\Delta D = 0,5c\tau$;
- угол места ε ; высота объекта $h = D \sin \varepsilon$.

Литература

[7] — с. 359–363.

Приложение. Образец титульной страницы отчета по лабораторной работе

Российский государственный гидрометеорологический университет

КАФЕДРА МОРСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«Исследование полупроводниковых приборов»

Выполнил студент (ка) _____
Фамилия И.О., группа №

Проверил преподаватель _____

\

Санкт-Петербург
20__ г.

Список литературы

1. *Большаков В.А., Векшина Т.В.* Электротехника и электроника в гидрометеорологии. Часть 1. Цепи и приборы: учебное пособие. — СПб.: РГГМУ, 2019. — 210 с.
2. *Комиссаров Ю.А.* Общая электротехника и электроника: учебник / под ред. П.Д. Саркисова. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 479 с. — Электронный ресурс. — URL: <http://znanium.com/bookread2.php?book=739609>.
3. *Большаков В.А., Векшина Т.В., Коринец Е.М.* Методические указания по дисциплине «Электротехника и электроника» для высших учебных заведений. — СПб.: РГГМУ, 2018. — 30 с.
4. *Большаков В.А., Шапаренко Ю.М.* Лабораторный практикум по дисциплине «Электротехника и электроника». — СПб.: РГГМУ, 2006. — 78 с.
5. *Морозов А.Г.* Электротехника, электроника и импульсная техника: учебник. — М.: Высшая школа, 1987. — 448 с.
6. Основы промышленной электроники: учеб. для неэлектротехн. спец. вузов / В.Г. Герасимов, О.М. Князьков, А.Е. Краснопольский, В.В. Сухоруков; под ред. В.Г. Герасимова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. Шк., 1986. — 336 с.
7. *Мерзеевский А.И., Фокин А.А.* Электроника и автоматика в гидрометеорологии: Учебное пособие для студентов гидрометеорологических вузов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 384 с.

Содержание

Введение	3
1. Лабораторные работы.	5
1.1. Лабораторная работа № 1. Исследование полупроводниковых приборов.	5
Теоретические сведения.	5
Описание лабораторной установки.	14
Порядок выполнения работы.	14
Содержание отчета	18
Контрольные вопросы и задания.	18
Литература.	18
1.2. Лабораторная работа № 2. Исследование логических элементов и интегральных триггеров.	19
Теоретические сведения.	19
Описание лабораторных макетов	25
Порядок выполнения работы.	27
Требования к оформлению отчета	31
Контрольные вопросы и задания.	31
Литература	32
1.3. Лабораторная работа № 3. Исследование выпрямителей и стабилизаторов.	32
Теоретические сведения.	32
Описание лабораторной установки.	39
Порядок выполнения работы.	40
Содержание отчета	42
Контрольные вопросы и задания.	42
Литература.	43
1.4. Лабораторная работа № 4. Исследование электронного усилителя.	43
Теоретические сведения.	43
Описание лабораторной установки.	47
Порядок выполнения работы.	47
Требования к оформлению отчета	49
Контрольные задания	49
Литература.	50
1.5. Лабораторная работа № 5. Исследование дифференцирующих и интегрирующих цепей	50
Теоретические сведения.	50

Описание лабораторной установки.	55
Порядок выполнения работы.	55
Содержание отчета	58
Контрольные задания	58
Литература.	58
1.6. Лабораторная работа № 6. Исследование операционного	
усилителя.	58
Теоретические сведения.	58
Описание лабораторной установки.	69
Порядок выполнения работы.	69
Содержание отчета	72
Контрольные вопросы и задания.	72
Литература.	72
1.7. Лабораторная работа № 7. Исследование счетчика	
импульсов и числового регистра.	73
Теоретические сведения.	73
Описание лабораторной установки.	77
Порядок выполнения работы.	78
Содержание отчета	80
Контрольные вопросы	80
Литература.	81
2. Задачи и задания	82
2.1. Электрические цепи	82
Задача 1. Анализ линейной электрической цепи	
постоянного тока	82
Задача 2. Анализ линейной электрической цепи	
переменного синусоидального тока.	83
Задача 3. Расчет последовательного колебательного	
контура	86
Задача 4. Расчет параллельного колебательного контура	88
Задача 5. Анализ пассивного линейного	
четырёхполюсника	89
2.2. Электронные приборы	91
Задание 1. Описание устройства и принципа работы	
электронного прибора.	91
Задача 6. Анализ схемы с полупроводниковым	
выпрямительным диодом	92
Задача 7. Расчет h -параметров биполярного транзистора . . .	94
2.3. Аналоговые электронные устройства.	95

Задача 8. Анализ активного режима работы биполярного транзистора в схеме включения с общим эмиттером.	95
Задача 9. Анализ схемы усилителя с отрицательной обратной связью.	96
Задание 2. Описание схемы усилительного каскада	98
Задание 3. Описание схемы автогенератора гармонических колебаний	98
2.4. Дискретные и аналого-дискретные устройства	99
Задача 10. Построение цифровых схем по заданным логическим функциям.	99
Задача 11. Разработка схемы двоично-кодированного счетчика	100
Задание 4. Описание схемы импульсного устройства.	101
Задание 5. Описание схемы цифрового устройства	101
2.5. Электротехнические устройства и элементы автоматики.	102
Задание 6. Описание электротехнического устройства	102
2.6. Электронные системы	103
Задача 12. Анализ характеристик амплитудно-модулированного колебания	103
Задача 13. Анализ характеристик радиолокационной станции	105
Приложение. Образец титульной страницы отчета по лабораторной работе	106
Список литературы	107

Учебное издание

Владимир Алексеевич Большаков,

канд. техн. наук, доцент

Татьяна Викторовна Векшина,

канд. техн. наук

Екатерина Михайловна Коринец,

канд. техн. наук

Практикум по дисциплине
«Электротехника и электроника»

Ответственный редактор: Сикарев Игорь Александрович,
доктор технических наук, профессор, РГГМУ

Начальник РИО А.В. Ляхтейнен

Редактор Л.Ю. Кладова

Верстка М.В. Ивановой

Подписано в печать 30.12.2020. Формат 60×90 ¹/₁₆. Гарнитура Times New Roman.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 7,0. Тираж 60 экз. Заказ № 1031.
РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79.
