

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

Российский государственный гидрометеорологический
университет

В.А. Большаков, Ю.М. Шапаренко

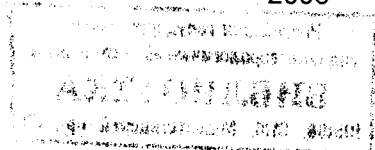
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА»



Санкт-Петербург
2006



УДК 621.38

Большаков В.А., Шапаренко Ю.М. Лабораторный практикум по дисциплине «Общая электротехника и электроника». – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 91 с.

В лабораторный практикум по дисциплине «Общая электротехника и электроника» включены семь лабораторных работ для студентов 2 и 3 курсов РГГМУ по специальностям «Метеорология», «Гидрология» и «Океанология». Лабораторные работы ориентированы на приобретение студентами практических навыков измерения характеристик электронных приборов и элементарных расчетов параметров электрических цепей.

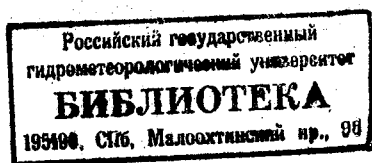
Содержащиеся в практикуме сведения из теории общей электротехники и электроники, методические указания и рекомендации по выполнению лабораторных работ позволяют использовать его в качестве дополнительного пособия для закрепления курса лекций.

Лабораторный практикум предназначен для студентов гидрометеорологических специальностей.

Рецензент: проф., д-р техн. наук Ю.А. Бычков (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет).

© Большаков В.А., Шапаренко Ю.М. 2006.

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ). 2006.



Введение

Содержащиеся в практикуме сведения из теории общей электротехники и электроники, методические указания и рекомендации по выполнению лабораторных работ позволяют использовать его в качестве дополнительного пособия для закрепления курса лекций. В каждой работе содержится список рекомендованной литературы...

Описание лабораторных установок позволяет выполнить все операции и переключения для достижения поставленной в каждой работе цели.

Порядок выполнения работы предписывает соблюдение общих Правил техники безопасности, а также строгое выполнение правил техники безопасности, изложенных в Инструкции по технике безопасности в лаборатории электротехники и электроники.

В журнале регистрации факт проведения инструктажа 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;
- название и цель работы;
- исследованные схемы;
- таблицы экспериментальных данных, соответствующие им графики и расчеты параметров по снятым характеристикам.

В некоторых работах изложены дополнительные требования.

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

Лабораторная работа № 1

Исследование полупроводниковых приборов

1. Цель работы

Изучение принципа действия типового полупроводникового диода, биполярного и полевого транзисторов; ознакомление с их условными графическими обозначениями (УГО).

Экспериментальное определение основных характеристик и параметров этих полупроводниковых приборов.

2. Теоретические сведения

2.1. Типовой полупроводниковый диод

Типовой полупроводниковый диод – это двухэлектродный (т.е. с двумя выводами) полупроводниковый прибор на базе p - n перехода, обладающий односторонней проводимостью электрического тока (вентильным свойством).

Электроды-выводы от p -области и от n -области полупроводника называют соответственно эмиттером (анодом А) и базой (катодом К) диода. Условные графическое (УГО) и буквенное (позиционное, VD) обозначения типового полупроводникового диода показаны на рис. 2.1 (ГОСТ 2.710-81).

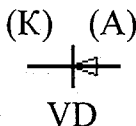


Рис. 2.1. УГО и позиционное обозначение типового полупроводникового диода

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 др. признакам. К типовым полупроводниковым диодам относят обычно широко используемые выпрямительные диоды. Главные электрические свойства таких диодов определяются вольт-амперной характеристикой (ВАХ) p - n перехода, т.е. зависимостью электрического тока через диод I_d от напряжения на диоде U_d : $I_d = f(U_d)$, здесь $f(\cdot)$ – функция. Как известно, такая ВАХ имеет две резко отличающиеся ветви – прямую и обратную.

Прямая ветвь имеет место при напряжениях на диоде $U_d > U_{пор}$ (на аноде +, на катоде –), а обратная – при $U_d \leq 0$ (на аноде –, на катоде +), где значение $U_{пор}$ – некоторая пороговая величина, обычно близкая к нулю. Прямое падение напряжения $U_{пр}$ для германиевых диодов имеет значение $U_{пр} \approx 0,2 \dots 0,4$ В, для кремниевых – $U_{пр} \approx 0,5 \dots 0,7$ 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 $I_{добр}$ обычно на несколько порядков меньше тока диода $I_{дпр}$ в прямом направлении. Поэтому можно считать, что полупроводниковый диод пропускает электрический ток («открыт») только в одном («прямом») направлении и практически не пропускает ток («закрит») в другом («обратном») направлении. Это главное свойство диода и называют его вентильным свойством.

Резко различные проводящие свойства диода в прямом и обратном направлениях характеризуют также соответствующими прямым и обратным сопротивлениями диода: $R_{пр}$ и $R_{обр}$. Ясно, что эти сопротивления для диода резко различны: $R_{пр} \ll R_{обр}$. На практике значения $R_{пр}$ составляют единицы – десятки Ом, в то время, как значения $R_{обр}$ – сотни килоОм и даже мегаОмы.

Ввиду нелинейности ветвей ВАХ параметры $R_{пр}$ и $R_{обр}$ являются дифференциальными; так, прямое сопротивление можно определять в точках рабочей части прямой ветви ВАХ:

$$R_{пр} = dU_d / dI_d.$$

Инженерный графо-аналитический расчет использует малые приращения ΔU_d и ΔI_d , взятые в окрестностях этих точек:

$$R_{пр} \approx \Delta U_d / \Delta I_d.$$

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.

На практике при расчетах электрических схем нередко полупроводниковый диод идеализируют, т.е. полагают его основные параметры следующими: $\Delta U_{пр} \approx 0$; $R_{пр} \approx 0$; $I_{д.обр} \approx 0$; $R_{обр} \approx \infty$. Величина прямого тока диода $I_{д.пр}$ ограничивается некоторым максимально допустимым значением.

2.2. Биполярный транзистор

Биполярными транзисторами называют полупроводниковые усилительные приборы на основе двух электрически взаимодействующих *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. 2.2. а, б соответственно. На схемах транзистор обозначают буквами VT.

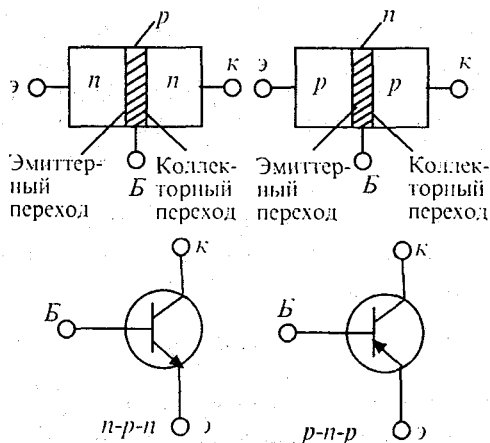


Рис. 2.2. Структуры и УГО биполярных транзисторов

Как видно из обозначения, биполярные транзисторы являются трехэлектродными электронными приборами, т.е. имеют 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 p - n - p или n - p - n транзистор. Переход p - n между базой и эмиттером называют эмиттерным, а между базой и коллектором – коллекторным. Эмиттер является источником носителей заряда (электронов или дырок), который создает 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 - p транзистора, исследуемого в данной работе. Это значит, что база должна быть отрицательной относительно эмиттера, а коллектор должен быть отрицательным относительно базы (и эмиттера).

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

Главные электрические свойства транзистора можно характеризовать его вольт-амперными характеристиками (ВАХ), а также линией нагрузки (ЛН) как зависимости падения напряжения на резисторной нагрузке от протекающего по ней тока. На практике наибольший интерес представляют семейство статических входных и выходных ВАХ.

Для исследуемого в данной работе транзистора, включенного по схеме с ОЭ, входной характеристикой называется зависимость величины тока базы I_b транзистора (входного тока) от величины напряже-

ния между базой и эмиттером $|U_{бэ}|$ (напряжение на входе), т.е. функция $I_b = f(|U_{бэ}|)$. При этом напряжение на коллекторе (относительно эмиттера) $|U_{кэ}|$ должно оставаться неизменным $|U_{кэ}| = \text{const}$; оно выступает как параметр, поэтому его различные значения порождают семейство входных характеристик. Следует заметить, что входные характеристики слабо зависят от величины параметра $|U_{кэ}|$.

По входным характеристикам транзистора определяют его входное сопротивление (в общем случае дифференциальное) $R_{вх}$:

$$R_{вх} = \frac{|\partial U_{бэ}|}{|\partial I_b|} \quad \text{при } |U_{кэ}| = \text{const} \quad R_{вх} \approx \frac{|\Delta U_{бэ}|}{|\Delta I_b|} \quad \text{при } |U_{кэ}| = \text{const}.$$

Величину этого сопротивления важно знать при анализе и расчете электрических схем. Значение $R_{вх}$ для биполярного транзистора невелико и составляет обычно 100...500 Ом. Это означает, что биполярный транзистор заметно нагружает источник сигнала (потребляет от него заметную мощность).

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 $I_б$ (или напряжения $|U_{бэ}|$), т.е. функция $I_k = f(|U_{кэ}|)$ при $I_б = \text{const}$ (или $|U_{бэ}| = \text{const}$). Характеристики, снятые при различных значениях параметра $I_б$ (или $|U_{бэ}|$), образуют семейство выходных характеристик; их называют также семейством коллекторных характеристик.

Коллекторные характеристики показаны на рис. 2.3; они все исходят из начала координат, так как при значении $|U_{кэ}| = 0$ коллекторный ток $I_k = 0$.

Самая «нижняя» характеристика соответствует параметру $I_б = |I_{к0}|$, где $I_{к0}$ — так называемый тепловой ток коллекторного перехода, зависящий от температуры, так как он создается неосновными носителями

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 $|U_{кэ}|$.

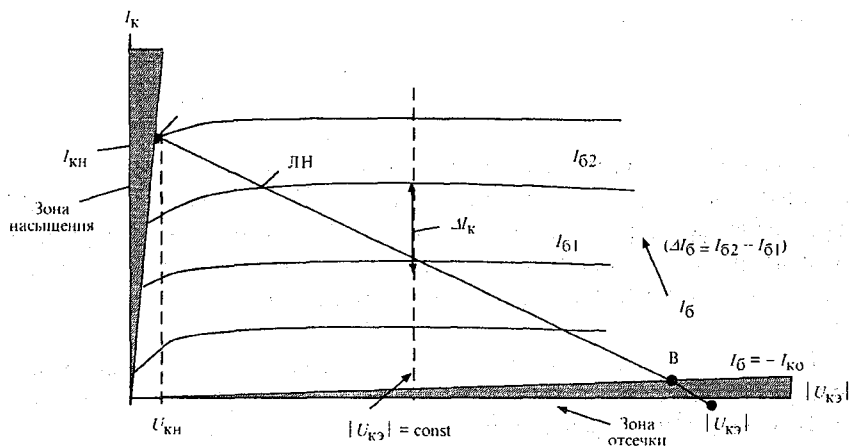


Рис. 2.3. Коллекторные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и линия нагрузки ЛН.

Выходные характеристики показывают, что коллекторный ток I_K существенно зависит от значения входного тока базы $I_Б$, причём сравнительно малым приращением тока $I_Б$ соответствуют 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 (с базы на коллектор):

$$\beta \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б} \quad \text{При } |U_{КЭ}| = \text{const};$$

Как видно, определение коэффициента β предполагает брать приращение ΔI_K и $\Delta I_Б$ при неизменном напряжении на коллекторе $|U_{КЭ}|$. Значение $\beta \gg 1$ и составляют десятки или даже сотни раз.

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

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

является большим (составляет сотни килоОм) при $I_{\text{б}} = \text{const}$. По этой причине транзистор является источником тока. 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 $\beta \gg 1$.

На практике в импульсных и цифровых устройствах широко используется также 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 $I_{\text{к0}}$ и должен быть весьма малым для нормальной работы. Напряжение на коллекторе в этом состоянии транзистора почти не отличается от напряжения источника питания: $|U_{\text{кз}}| \approx |U_{\text{ин}}|$. На коллекторных характеристиках закрытое состояние транзистора отвечает области между осью $|U_{\text{кз}}|$ и самой нижней, коллекторной характеристикой при токе $I_{\text{б}} = 0$, (рис 2.3). Эту область называют зоной "отсечки" тока в транзисторе.

В открытом состоянии переход база - эмиттер транзистора полностью открыт, и коллекторный ток $I_{\text{к}}$ имеет максимально возможное для схемы значение. Это наибольшее значение тока $I_{\text{к}}$ называют током насыщения коллектора $I_{\text{кн}}$. Величина $I_{\text{кн}}$ для данного транзистора и данного напряжения источника питания $|U_{\text{ин}}|$ определяется резистором $R_{\text{к}}$, включенным в коллекторную цепь транзистора.

Режим работы, при котором в транзисторе протекает ток $I_{\text{к}} = I_{\text{кн}}$ называют режимом "насыщения" транзистора. В этом режиме напряжение на коллекторе $|U_{\text{кз}}| = U_{\text{кн}}$ и близко к нулю. На коллекторных характеристиках данный режим отвечает зоне, примыкающих к вертикальной оси $I_{\text{к}}$ (зона насыщения), рис 2.3.

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 ($|U_{\text{кз}}|$; $I_{\text{к}}$) имеет вид

$$I_k = \frac{|U_{ин}| \cdot |U_{кз}|}{R_k}.$$

Как видно, это есть 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 $|U_{кз}|$: $|U_{кз}| = |U_{кн}|$. Аналогично при $|U_{кз}| = 0$ получаем точку на оси I_k : $I_{кн} = |U_{ин}|/R_k$. Сама линия нагрузки (рис. 2.3) располагается между зонами насыщения и отсечки транзистора.

При работе транзистора его ток I_k и напряжение $|U_{кз}|$ соответствуют как коллекторным характеристикам, так и уравнению ЛН. Поэтому смещения с одной характеристики на другую происходят только вдоль ЛН. С учетом этого определяются динамические усилительные свойства транзистора и параметры схемы с данным транзистором. В ключевом режиме транзистор также вдоль ЛН.

2.3. 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 исследуемого в работе полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом приведены на рис. 2.4, а и 2.4, б. Буквами И, С, З обозначены электроды транзистора: исток, сток и затвор соответственно.

Транзистор имеет один $p-n$ переход затвор-исток, который включён в непроводящем направлении. При этом в области $p-n$ перехода обедненная свободными носителями зона, заштрихованная на рис 2.4,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.

Неравномерность обедненного слоя обусловлена тем, что разность потенциалов между затвором (типа p) и каналом (типа n) увеличивается в направлении от истока к стоку и наименьшее сечение канала расположено вблизи стока.

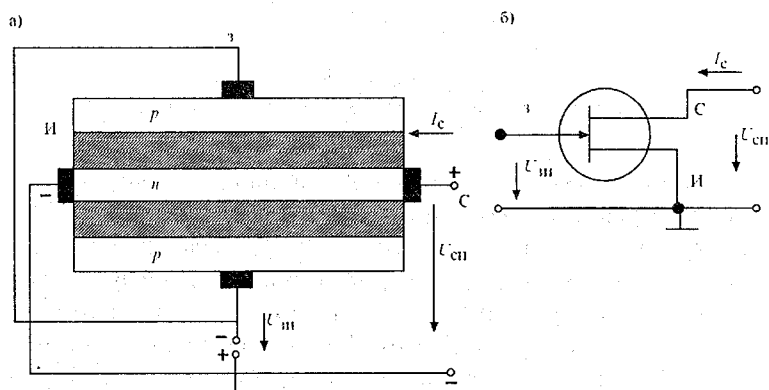


Рис. 2.4 Структура и схема включения полевого транзистора с управляющим p - n переходом

Семейства выходных и передаточных (стоко-затворных) вольт-амперных характеристик полевого транзистора для схемы включения с общим истоком (рис. 2.4, б) приведены соответственно на рис 2.5, а и 2.5, 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.

Рис. 2.5. Семейства выходных (а) и передаточных (б) стоко-затворных вольт-амперных характеристик полевого транзистора для схемы включения с общим истоком.

Стоко-затворные характеристики (рис. 2.5, б) лежат в области отрицательных напряжений $U_{зи}$. Входное сопротивление полевого транзистора, то есть 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.

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 вольт-амперным 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 ($U_{си} = 0$).

3. 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. Последнее фиксируется соответствующими индикаторными лампочками, что позволяет переопределять цену деления шкалы прибора в каждом конкретном случае.

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

4. Порядок выполнения работы

Правила техники безопасности, общие для всех работ.

При выполнении работы следует строго выполнять правила техники безопасности, изложенные в инструкции по технике безопасности в лаборатории электротехники и электроники. При возникновении не-

понятных или опасных ситуаций немедленно предупреждать преподавателя или дежурного инженера.

4.1. Исследование полупроводникового диода

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

2. 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 . Повторять данную процедуру 2–3 раза и записать полученное значение $U_{пр}$.

3. Снять прямую ветвь ВАХ диода. Начиная со значения $U_{пр}$, устанавливать поочередно значения напряжения на диоде U_d (с шагом ~ 0.1 В) и фиксировать соответствующие значения прямого тока I_d . Получить 5–6 точек характеристики. Результаты измерений можно записать в табл. 4.1.

Таблица 4.1

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; для средней области ВАХ найти прямое сопротивление диода $R_{пр} \approx \Delta U_d / \Delta I_d$.

4. Экспериментально определить обратное сопротивление диода. Переключатель "Исследуемая схема" перевести в положение "2". Обратить внимание на изменение полярности напряжений на диоде по сравнению с п.3 (схему №2 можно не зарисовывать). Поочередно установить напряжение $U_d = -2$ В и $U_d = -10$ В; записать соответствующие значения тока диода. По результатам этого эксперимента найти значение

$$R_{обр} = \frac{|\Delta U_d|}{|\Delta I_{добр}|}.$$

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

4.2. Исследование биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ)

1. Снять семейство входных характеристик транзистора. Переключатель «Исследуемая схема» перевести в положение "3"; переключатель "Сопротивление нагрузки" – в положение "О".

Установить потенциометром R_2 и контролировать в процессе измерений в каждой точке значение параметра $|U_{\text{кз}}| = 0\text{В}$. Изменяя напряжение на базе $U_{\text{бз}}$ от 0 до $-0,2\text{В}$ с шагом $0,05\text{ В}$, фиксировать в табл. 4.2 ток базы $I_{\text{б}}$. Повторить измерения для параметра $U_{\text{кз}} = -8\text{ В}$.

Таблица 4.2

Семейство входных характеристик. Результаты измерений

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

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

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

2. Снять семейство выходных характеристик транзистора. Положения переключателей на макете не менять. Установить (и контролировать в процессе измерения в каждой точке!) значение тока базы $I_{\text{б}} = 0$. Изменяя напряжение на коллекторе $U_{\text{кз}}$ согласно табл. 4.3, фиксировать и заносить в табл. 4.3 соответствующие значения тока коллектора $I_{\text{к}}$. Аналогичным образом получить 3 характеристики для значения параметра $I_{\text{б}} = 50\text{ мкА}$; 100 мкА ; 150 мкА (контролировать эти значения в каждой измеряемой точке!).

Таблица 4.3

Семейство выходных характеристик. Результаты измерений

$U_{кз}, \text{В}$		-8	-6	-4	-2	-1	-0,5	0
$I_{к},$ мкА	$I_б = 0 \text{ мкА}$							0
	$I_б = 50 \text{ мкА}$							0
	$I_б = 100 \text{ мкА}$							0
	$I_б = 200 \text{ мкА}$							0

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

$$\beta \approx \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} \text{ при } |U_{кз}| = \text{const.}$$

Достаточно найти одно значение β для зоны усиления транзистора.

3. Исследовать транзистор в ключевом режиме. Переключатель «Соппротивление нагрузки» перевести в положение «1 кОм»; (тумблер B_2 перевести в положение $E_{пит}$). Установить напряжение питания « $U_{ин}$ » = 6 В. Вернуть тумблер B_2 в положение « $U_{кз}$ »)

Установить ток $I_б = 0$, 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 $I_б$ и наблюдать за изменением тока $I_{к}$ и напряжения $|U_{кз}|$; прекратить изменение тока $I_б$ 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 данное построение.

Перевести переключатель «Соппротивление 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.

4.3 Исследование полевого транзистора, включенного по 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. 4.4.

Таблица 4.4

Семейство выходных характеристик. Результаты измерений

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

Построить график семейства выходных характеристик транзистора. Определить по выходным характеристикам статические параметры полевого транзистора: S ; R_i ; $\mu = S R_i$.

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.

5. Содержание отчета

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

Дополнительные требования:

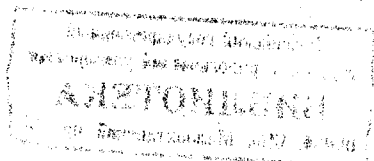
- точно изобразить исследованные схемы;
- заполнить таблицы экспериментальных данных, построить соответствующие им графики и выполнить расчеты параметров по снятым характеристикам, подготовить ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы и задания

1. Дать определение полупроводникового диода.
2. Дать пояснения 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. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004. с. 37–38; 45–58.
2. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – СПб.: КОРОНАпринт, 2004. с. 20–29; 42–48; 52–58.



3. Мержеевский А. И., Фокин А. А. Электроника и автоматика в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 159–181; 194–196.

4. Герасимов В.Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986, с. 21–38; 94–100; 105–109.

Лабораторная работа № 2

Исследование логических элементов и интегральных триггеров

1. 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.

Экспериментальное ознакомление с основными принципами работы интегральных триггеров типа RS и Т.

2. Теоретические сведения

2.1. 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, в общем случае, 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 . Таковую таблицу называют таблицей истинности. Существуют три базовые логические функции, из которых создаются более сложные комбинированные:

1. ЛОГИЧЕСКОЕ ОТРИЦАНИЕ, или ИНВЕРСИЯ.

Эта функция устанавливает следующую логическую связь между выходной переменной Y и единственной входной переменной X : если переменная X есть логический 0, т.е. $X = 0$, то переменная $Y = 1$; наоборот, при $X = 1$ выходная переменная $Y = 0$. Другими словами, выход Y является инверсным по отношению ко входу X . Инверсия записывается в виде $Y = \bar{X}$ и читается как « Y равно не X ». Имеет простейшую таблицу истинности, приведенную ниже. Инверсию называю также операцией «НЕ».

X	Y
0	1
1	0

2. ЛОГИЧЕСКОЕ УМНОЖЕНИЕ, или КОНЪЮНКЦИЯ.

Эта функция устанавливает логическую связь между выходным сигналом Y и несколькими входными переменными X_i , ($i = 1, m$), $m > 2$. Таблица истинности для случая $m = 2$ имеет вид, представленный в таблице.

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

Из таблицы видно, что значение $Y = 1$ равно единице, когда оба значения X_1 и X_2 равны единице: $X_1 = X_2 = 1$. В остальных случаях выход $Y = 0$. Согласно этому логическое умножение (конъюнкцию) называют операцией «И» (совпадением).

Для случая двух переменных логическое умножение записывается в виде $Y = X_1 \cap X_2$ (со знаком пересечения из теории множеств); используется также обычная запись $Y = X_1 X_2$.

Для произвольного значения числа переменных, т.е. $> m_2$ логическое умножение определяется и записывается аналогично случаю $m = 2$. Так, функция $Y = X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_m$ принимает значение $Y = 1$ только тогда, когда все переменные $X_i = 1$ при $i = (1, m)$; в остальных случаях (когда хотя бы одно из значений $X_i = 0$ при $i = (1, m)$) переменная $Y = 0$.

3. ЛОГИЧЕСКОЕ СЛОЖЕНИЕ, или 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, представленный в таблице.

X_1	X_2	Y
0	0	0
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) равно 1; при $X_1 = X_2 = 0$ функция $Y = 0$.

Согласно этому 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 $m \geq 2$ функция $Y = 1$, если хотя бы одно из значений $X_i = 1$ при $i = (1, m)$; значение $Y = 0$, если все переменные $X_i = 0$ при $i = (1, m)$.

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»).

Одновходовый ключ-инвертор реализует инверсию (НЕ): $Y = \overline{X}$; условные графические обозначения (УГО) инвертора, а также конъюнктора (И) и дизъюнктора (ИЛИ) показаны на рис. 2.1. а, б, в соответственно.

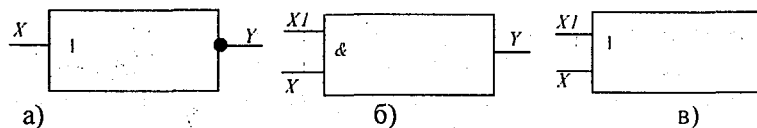


Рис. 2.1. Условные графические обозначения (УГО): а) инвертора (НЕ); б) конъюнктора (И); в) дизъюнктора (ИЛИ)

В цифровой технике данные устройства называются логическими элементами (ЛЭ) типа НЕ, И, ИЛИ. На их основе может быть реализовано сколь угодно сложная логическая функция, например, составные ЛЭ типа И-НЕ, либо ИЛИ-НЕ. Функции И-НЕ и ИЛИ-НЕ соответствуют инверсии (отрицание НЕ) результатов, получаемых при выполнении операций И и ИЛИ. Эти функции записываются в виде ($M=2$): $Y = X1X2$ – функция И-НЕ; $Y = X1 + X2$ – функция ИЛИ-НЕ.

$X1$	$X2$	И-НЕ $Y = X1X2$	ИЛИ-НЕ $Y = X1 + X2$
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 настоящее время в цифровой аппаратуре используют так называемые 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 широко распространённые цифровые транзисторно-транзисторные логические элементы. Базовый И-НЕ элемент этого типа содержит два каскада: входной – на многоэмиттерном транзисторе (МЭТ), реализующий функцию И, и выходной – так называемый сложный инвертор, реализующий функцию НЕ и обеспечивающий высокую нагрузочную способность и быстрое действие микросхемы. МЭТ содержит несколько (по числу вхо-

дов m) эмиттеров (обычно $m \leq 8$) и один общий коллектор. Это определяет возможность реализации с помощью МЭТ функции И. Аналогично устроен ЛЭ, выполняющий функцию ИЛИ-НЕ.

Микросхемы с ТТЛ элементами при напряжении источника питания $U_{\text{ип}} = 5\text{В}$ 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: обеспечивают частоту переключения f десятки МГц.

2.2. Интегральные триггеры

В цифровой и вычислительной 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);
- T-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 $Q = 0$; 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. 2.2 а, б.

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 ТГ осуществляется сигналом низкого уровня (логическим нулем), этот ТГ 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.

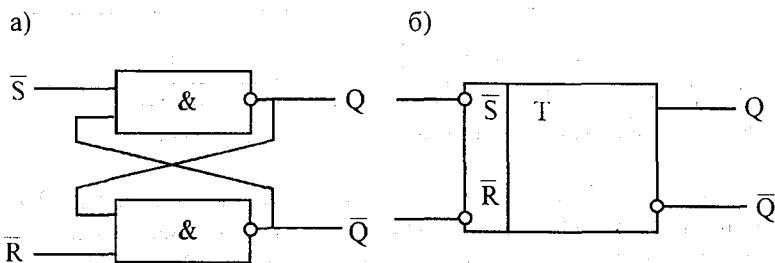


Рис. 2.2. Функциональная схема RS- триггера

Описанный алгоритм функционирования RS-триггера отображается в таблице:

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. 2.3 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:

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

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

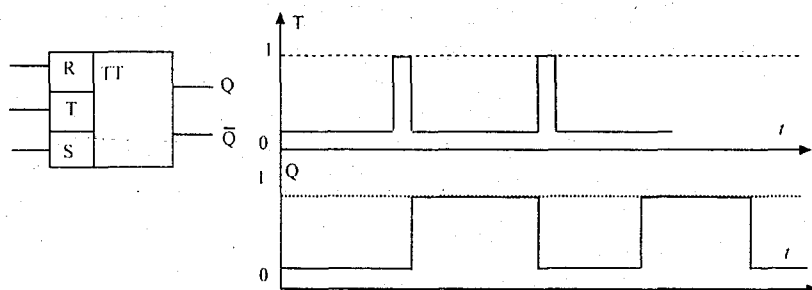


Рис. 2.3. Общее обозначение и временные диаграммы счетного Т-триггера

D-триггер (от англ. delay – задержка), приведенный на рис. 2.4, а, имеет два входа: информационный «D» и синхронизации «С». «D»-триггер запоминает на выходе Q состояние входа D при наличии на входе С синхронизирующего сигнала $C = 1$ до следующего синхросигнала.

JK-триггер (от англ. Jump – переход, keep – сохранение), изображенный на рис. 2.4, 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. 2.4, в) можно получить Т-триггер с входом Т на выводе С. Если добавить на вход К инвертор (рис. 2.4), то получится D-триггер с входом D на общем JK-входе.

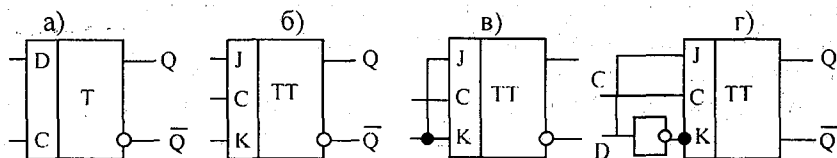


Рис. 2.4. Схемы построения ТТ D – (а); JK – (б); Т-триггер с входом Т на выводе С (в); D-триггер с входом D на общем JK – входе (г).

3. Описание лабораторных макетов

3.1. 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 XT1, с которых можно снять напряжение логической единицы. Потенциал же гнезд XT0 соответствует логическому нулю.

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

3.2. 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, входящих в корпус ИМС типа K155ЛА3 (в этом корпусе содержатся четыре двухвходовых логических элемента 2И-НЕ).

Резисторы R1, R2, подключенные к источнику питания $U_{\text{ип}}$ (+5В) и кнопка SB1 позволяют на базе RS-триггера DD1.3 и DD1.4 получить так называемый «ключ бездребезга» в результате соединения гнезда XT9 с гнездом XT5 и гнезда XT10 с гнездом XT6. При этом в исходном состоянии (кнопка отпущена) RS-триггер сброшен: гнездо XT7 имеет низкий уровень напряжения, т.е. выход $Q = 0$. При нажатии кнопки SB1 сигнал низкого уровня устанавливается на гнезде XT5, 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 K155ТМ2, содержащей в одном корпусе два отдельных D-триггера.

4. Порядок выполнения работы

4.1. 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.

4.2. Исследование работы основных ЛЭ

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

Для этого:

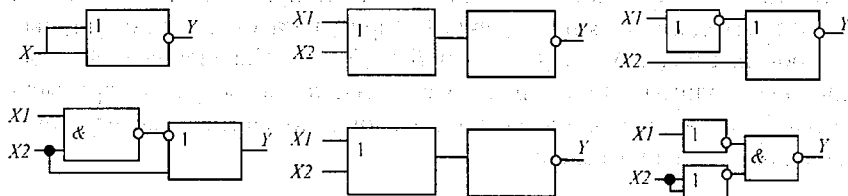
- Соединить перемычкой выход исследуемого ЛЭ с гнездом ИВ индикатора выхода;

- 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.

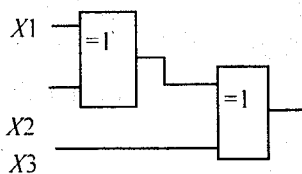
4.3. Исследование логических схем на базе основных ЛЭ

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



4.4. Исследование схемы контроля четности на основе ЛЭ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»

Собрать схему на основе двух ЛЭ «Исключающее ИЛИ», как показано на рис. 4.1. Испытать данную схему аналогично предыдущему и заполнить таблицу истинности. В графе «Примечания» таблицы указать, четному или нечетному числу единиц в каждой строке (X_1 , X_2 , X_3) таблицы соответствуют единичные значения функции Y .



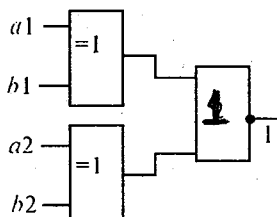
X_1	X_2	X_3	Y	Примечания
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

Рис. 4.1. Схема контроля четности на основе ЛЭ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ»

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.

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

Собрать схему согласно рис. 4.2; испытать данную схему и заполнить таблицу истинности. Анализируя таблицу, определить в каком случае выходная функция Y равна 1 – при одинаковых или различных цифровых словах $A = (a_1, a_2)$ и $B = (b_1, b_2)$. Сравнения цифровых слов необходимы, например, в тех случаях, когда требуется «просмотреть» большое количество двоичных слов и подсчитать частоту появления определённого слова.



Слово A		Слово B		Y
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	

Рис. 4.2. Схема сравнения цифровых слов на основе ЛЭ «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ».

4.6. 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 следующее:

- поочередно подключая ИВ к прямому Q и инверсному $\bar{Q}$ выходам ТГ (гнезда XT7, XT8 соответственно), определить и записать в виде таблицы его исходное состояние (оба входа ТГ высокие $S = R = 1$);
- подключить ИВ к прямому выходу Q (гнездо XT7); соединить вход S (гнездо XT5) с корпусом (гнездо XT0), а R к 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 (ХТ5)	R (ХТ6)	Q (ХТ7)	Q (ХТ8)	Режим	Примечания
1	1				Исходное состояние
0	1				$U_{\text{вых}} = B$ $U_{\text{вых}} = B$
1	1				
1	0				
1	1				

– отключить гнездо ХТ5 от корпуса (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 ХТ6) с корпусом, а вход S (гнездо ХТ5) с 1; убедиться, что ТГ сбрасывается в нулевое состояние: $Q=0$; результат опыта занести в следующую строку таблицы;

– отключить гнездо ХТ6 от корпуса (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 ХТ5 и ХТ9, а также гнезда ХТ6 и ХТ10; 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 последующей части работы.

4.7. Исследование счетного Т-триггера

Экспериментально ознакомиться с работой Т-триггера на микросхеме DD1.1. Для этого в данной микросхеме соединить между собой гнезда ХТ1 и ХТ6 и выполнить следующее:

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

S (XТ4)	R (XТ3)	Q (XТ5)	Режим
0	1		
1	1		
1	0		
1	1		

– соединить счетный вход Т-триггера DD1.2 (гнездо XТ7) с выходом ключа (гнезда XТ7 в схеме RS-триггера); периодически нажимая и отпуская кнопку SB1, наблюдать за изменением состояний Т-триггера при поступлении каждого очередного сигнала $C = 1$ (ИБ подключен к выходу ТГ – гнезду XТ8); 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 $f_{вх}$ поступления импульсов $C = 1$ на вход ТГ (гнездо XТ7) и частоты $f_{вых}$ выходных импульсов ТГ (гнездо XТ8).

5. 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.

6. 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 простой триггер?
12. Как соотносятся частоты следования импульсов на входе и выходе Т-триггера?

Литература

1. Герасимов В.Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986, с. 185–191, 191–195.
2. Мальцева Л.А. и др. Основы цифровой техники. – М.: Радио и связь, 1986, с. 15–21, 24–28.
3. Морозов А.Г. Электротехника, электроника, импульсная техника. – М.: Высшая школа, 1987.
4. Браммер Ю.А., Пашук И.Н. Импульсная техника. – М.: Высшая школа, 1985, с. 252–263.
5. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – СПб.: КОРОНАпринт, 2004, с. 123–137.

Лабораторная работа № 3

Исследование выпрямителей и стабилизаторов

1. Цель работы

Экспериментальное ознакомление с принципом действия полупроводниковых выпрямителей и стабилизатора выпрямленного напряжения.

2. Теоретические сведения

2.1. 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 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. 2.1. 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 Tr , 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.

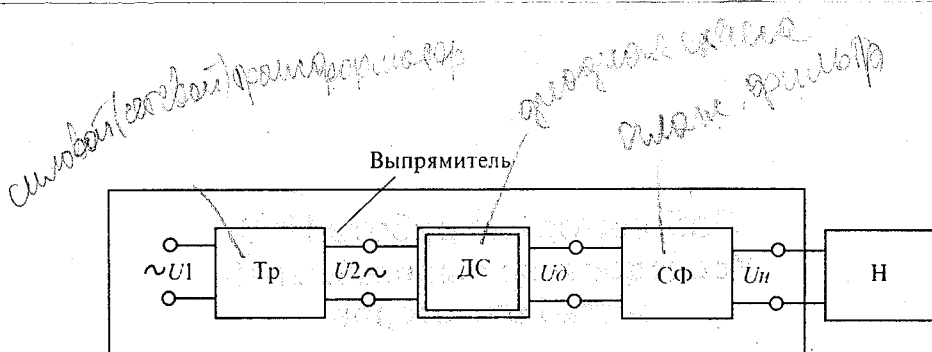


Рис. 2.1. Структура полупроводникового выпрямителя с нагрузкой

Диодная схема ДС обеспечивает одностороннее протекание тока, т.е. преобразует переменный синусоидальный ток в пульсирующий ток, состоящий на выходе ДС из однополярных полуоволн $U_d(t)$ рис. 2.2 (показан случай однополупериодного выпрямителя; не пропускаемые диодной схемой волны отмечены пунктиром). Полярность полуоволн $U_2(t)$ 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.

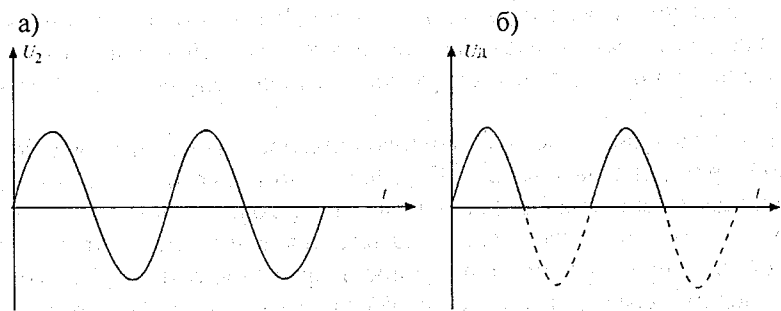


Рис. 2.2. Временные диаграммы для однополупериодного выпрямителя

Обычно же для снижения уровня пульсации используются различные сглаживающие фильтры (СФ на рис. 2.1). 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 выпрямленных

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 : $K_n = U / U_n$.

Схема простейшего однополупериодного выпрямителя без СФ приведена на рис. 2.3. В данном случае ДС включает только диод VD1. Он пропускает в нагрузку R_n лишь положительную половину тока i_n , так как оказывается открытым (прямосмещенным) только при положительной полуволне напряжения U_2 . Видно, что частота повторений тока i_n равна частоте тока сети. (рис. 2.3).

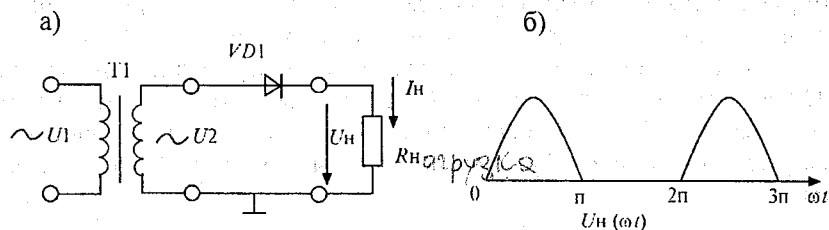


Рис. 2.3. Схема простейшего однополупериодного выпрямителя без СФ(а) и форма напряжения на выходе (б)

Для простейшего выпрямителя согласно схеме рис. 2.3 его внешняя характеристика имеет простой вид есть $U_n = U_{нх} - (R_{тр} + R_{пр})I_n$, где $U_{нх}$ – среднее выпрямленное напряжение на нагрузке при холостом ходе ($I_n = 0$); $R_{тр}$ и $R_{пр}$ – соответственно сопротивления вторичной обмотки трансформатора Т1 и прямого сопротивления 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 $U = 0,5\pi U_n$; $U_n = U_m/\pi$, где U_m – амплитуда синусоидального напряжения $U_2(t)$. Таким образом, коэффициент пульсации в простейшем однополупериодном выпрямителе без СФ равен $K_n = \frac{U}{U_n} = \pi/2 \approx 1.57$.

Как уже отмечалось, для изменения полярности выпрямленного напряжения (полярности полувольт U_n , I_n) следует изменить в схеме рис. 2.3 только полярность включения диода VD1. Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота. Однако он обладает большим коэффициентом пульсаций, пониженными значениями выпрямленного напряжения и тока, низким к.п.д. Такой выпрямитель 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 и более свободны от указанных недостатков однополупериодного устройства. На рис. 2.4, а приведена упрощенная (без СФ) схема двухполупериодного выпрямителя мостового типа. Диодная схема ДС образована здесь четырехплечевым мостом из диодов VD1...VD4; к одной диагонали этого моста подключена вторичная обмотка трансформатора T1, а к другой – нагрузка R_H ; на схемах диодный мост можно изображать упрощенно (рис. 2.4, б).

Из схемы видно, что при положительной полувольте напряжение U_2 ("+" в точке "а", "-" в точке "б") прямосмещенными и открытыми являются диоды VD3 и VD2; через них и протекает полувольтна тока нагрузки I_n от точки "а" к точке "б"; диоды VD1, VD4 в это время закрыты.

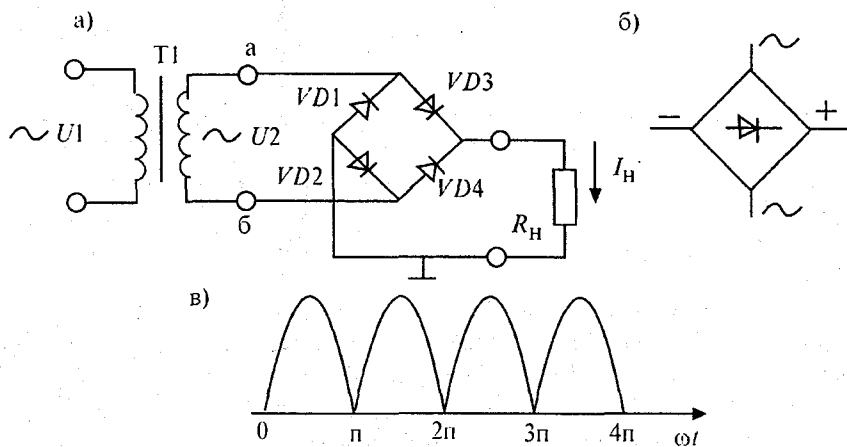


Рис. 2.4. Схема двухполупериодного выпрямителя мостового типа (без СФ)

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 диаграммы тока на рис. 2.4, в 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 $K_n \approx 10^{-3} \dots 10^{-4}$, а в электронных измерительных устройствах коэффициент K_n достигает значений $10^{-6} \dots 10^{-7}$. Резкое снижение коэффициента пульсаций обеспечивается включением сглаживающего фильтра СФ на выходе ДС. Пассивные СФ весьма разнообразны; обычно они содержат конденсаторы и катушки индуктивности (дрросели), которые оказывают соответственно очень малое и очень большое сопротивление пульсациям. Для постоянного же (выпрямленного) тока конденсатор эквивалентен почти 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.

2.2. 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 нестабильность питающих напряжений. Обычно допускаемая относительная нестабильность 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 приборах, например, стабилитронах остается неизменным при изменениях тока через них в широких пределах. Схема такого Ст приведена на рис. 2.5; она содержит стабилитрон $VD1$, включаемый обратносмещенным, и резистор $R1$, ограничивающий обратный ток стабилитрона. Как известно, стабилитрон 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. 2.5 при изменениях уровня входного напряжения $U_{вх}$ меняется ток $I_{ст}$, соответственно меняется падение напряжения на резисторе $R1$, компенсируя изменение входного напряжения. Входное же напряжение $U_{н} = U_{ст}$ почти не меняется.

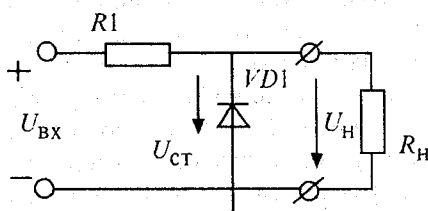


Рис. 2.5. Схема параметрического стабилизатора напряжения.

Основным достоинствами параметрических стабилизаторов напряжения являются простота схемы и надежность работы. К недостаткам относят не слишком высокую степень стабилизации, небольшой к.п.д., высокое внутреннее сопротивление стабилизатора, сравнительно узкий диапазон стабилизируемого напряжения.

2.3. Полупроводниковый компенсационный стабилизатор напряжения

Компенсационный стабилизатор напряжения (рис. 2.6) представляет собой систему автоматического регулирования.

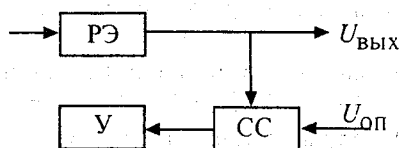


Рис. 2.6. Компенсационный стабилизатор напряжения

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 входе стабилизатора, подаваемое на нагрузку, с постоянным опорным напряжением. Разность этих напряжений (сигнал рассогласования) подается через усилитель (У) на регулируемый элемент, сопротивление которого изменяется таким образом, чтобы напряжение на нагрузке оставалось постоянным.

Принципиальная схема компенсационного стабилизатора напряжения, исследуемого в лабораторной работе, приведена на рис. 2.7.

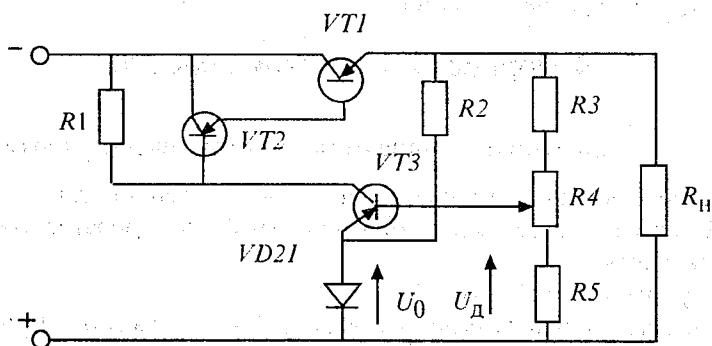


Рис. 2.7. Принципиальная схема компенсационного стабилизатора напряжения

С делителя R3, R4, R5 снимается напряжение U_d пропорциональное напряжению на сопротивлении нагрузки R_n . Это напряжение сравнивается в схеме сравнения, выполненной на транзисторе VT3 с опорным напряжением U_0 , на стабилитроне VD1. Разность напряжений $\Delta U = U_d - U_0$ определяет величину тока через транзистор VT3 и, следовательно, управляющее напряжение на базе составного транзистора VT1, VT2.

При возрастании напряжения на сопротивлении нагрузки растет ток через транзистор VT3 и напряжение на базе транзистора VT2. Сопротивление составного транзистора VT1, VT2 увеличивается, падение напряжения на нем растет, а на R_n падает. При уменьшении напряжения на сопротивлении нагрузки ток через VT3 и сопротивление составного транзистора наоборот уменьшаются, что приводит к росту напряжения на R_n . Таким образом, поддерживается постоянство напряжения на сопротивлении нагрузки.

3. Описание лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят:

- лабораторный макет, содержащий исследуемые выпрямители, стабилизатор напряжения, а также измерительные приборы на входах и выходах схем и необходимые органы управления;
- осциллограф, используемый для наблюдения формы напряжений на выходе выпрямителя в отсутствие и при наличии в нем СФ, а также для измерения уровня пульсаций.

4. Порядок выполнения работы

4.1. 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” – “ГРУБО” – 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).

4.2. Исследование однополупериодного выпрямителя

1. Исследование однополупериодного выпрямителя без СФ.

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 V_2); результаты записывать в таблицу (слева).

Однополупериодный выпрямитель без фильтра			Однополупериодный выпрямитель с фильтром	
I_n , мА	U_n , В	Примечание	I_n , мА	U_n , В
0			0	
10			10	
...		$U_m = \dots$	...	
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 полуволны 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 $K_{n \text{ расч}} = 0.5 \pi$.

4.3. Исследование однополупериодного выпрямителя с 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 с уже имеющейся осциллограммой по предыдущему пункту.

Аналогично предыдущему пункту снять внешнюю характеристику выпрямителя с СФ; данные занести в таблицу (справа).

4.4. Исследование двухполупериодного выпрямителя

Переключатель “Q1” – перевести в положение “Вкл.” – 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 снятые внешние характеристики выпрямителей следует отобразить на одном графике.

4.5. Исследование параметрического стабилизатора напряжения

На лабораторном макете включить схему 2 стабилизатора: переключатель “Исследуемая схема” – в “2”; переключатель “R_{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 $U_n = \varphi(U_{вх})$, где U_n – напряжение на нагрузке стабилизатора; $U_{вх}$ – напряжение на его входе. Напряжение $U_{вх}$ рекомендуется менять от 0 до 25В с шагом 2,5В (по вольтметру на входе), пользуясь входными регуляторами входного напряжения “ГРУБО” и “ПЛАВНО” на макете.

Результаты измерений занести в таблицу (слева)

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

Повторить измерения, переведя переключатель " $R_{доб}$ " в положение "620 Ом". Данные занести в таблицу (справа).

Полученные характеристики отобразить при оформлении отчета на одном графике.

4.6. 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.

5. Содержание отчета

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

6. 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. Определить внешнюю характеристику выпрямителя
6. Указать назначение стабилизатора выпрямленного напряжения.
7. Объяснить принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.
8. Объяснить принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения.

Литература

1. Герасимов В. Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986, с. 224–254.
2. Мержеевский А. И., Фокин А. А. Электроника и автоматика. – Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 313 – 319.
3. Лабораторные работы по основам промышленной электроники /Под ред. В. Г. Герасимова.– М.: Высшая Школа, 1989, с. 9–19.
4. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 20004, с. 431–439.

Лабораторная работа № 4

Исследование электронного усилителя

1. Цель работы

Экспериментально исследовать основные параметры транзисторного усилителя низких частот: проследить влияние на эти параметры элементов схемы усилителя.

2. 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 ту или иную совокупность пассивных элементов. В качестве АЭ используют биполярные и полевые транзисторы; находят применение также традиционные усилительные приборы – электронные лампы. Активный элемент АЭ под действием входного усиливаемого сигнала преобразует энергию источника питания в энергию выходного усиленного сигнала. Пассивные элементы усилителя (резисторы, конденсаторы и др.) служат для обеспечения исходного режима работы АЭ, температурной стабилизации этого режима и др. 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

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

где $U_{\text{ВЫХ}}$ и $U_{\text{ВХ}}$ – соответственно напряжения на выходе и на входе усилителя. Коэффициент усиления измеряют также в логарифмичес-

ких единицах – в децибелах. Коэффициент усиления по напряжению, выраженный в децибелах, равен

$$K_u[\text{дБ}] = 20 \lg K_u, \text{ дБ},$$

где K_u – исходный коэффициент усиления в разах.

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

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

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. 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. 2.1, 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 $0,707 K_0$).

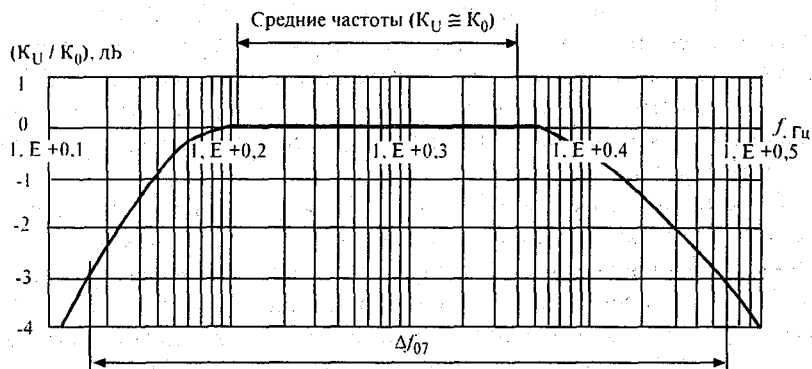


Рис. 2.1. АЧХ усилителя низких частот.

Усилительный каскад на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ), является одним из наиболее распространенных транзисторных каскадов на биполярных транзисторах. В данном каскаде (схема 1 на макете) эмиттер транзистора VT1 "заземлен" (подключен к общей шине) по переменному току сигнала через конденсатор C_3 в эмиттерной цепочке $R_3 \div C_3$. Резистор R_3 включен в схему для термостабилизации рабочей точки транзистора (обеспечивает отрицательную обратную связь по напряжению, компенсирующую действие температуры на ток транзистора). Такое "заземление" будет иметь место, если емкостное сопротивление $X_c = 1/(\omega C_3)$ конденсатора C_3 окажется пренебрежимо малым 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 $R1 \leq R2$ устанавливает рабочую точку (исходный режим) транзистора. Конденсаторы $C1$ и $C2$ называются разделительными, так как разделяют цепи прохождения постоянного тока от источника питания и переменного тока сигнала. Действительно, конденсаторы не пропускают постоянный ток как из цепи базы транзистора к источнику входного сигнала ($C1$), так и с коллектора транзистора к нагрузке усилителя ($C2$).

В то же время значения емкостей C_1 и C_2 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 C_1 и C_2 на спад усиления каскада наиболее заметно проявляется в области нижних частот, так как их емкостные сопротивления при снижении частоты сигнала возрастают и все более и более препятствуют его прохождению. Этим и 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, ибо шунтирует ("закорачивает") нагрузку, во-вторых, такую емкость, естественно, не включают, но она присутствует из-за физически неустраняемых 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 , тем меньше шунтирующее нагрузку усилителя емкостное сопротивление $1/(\omega C_0)$ и тем сильнее снижается усиление каскада.

3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка содержит:

- лабораторный макет с исследуемым усилительным каскадом с ОЭ (активный элемент здесь – биполярный транзистор $P-N-P$ - типа) и варьируемые элементы схемы усилителя: разделительный конденсатор C_p ; конденсатор C_0 , моделирующий паразитную емкость на выходе каскада; эмиттерный конденсатор C_e ;
- 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;
- вольтметр, позволяющий измерять выходное напряжение исследуемого усилителя; в режиме работы цифрового вольтметра используется мультиметр.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Подготовка лабораторной установки к работе

Зарисовать схему 1 исследуемого усилителя с макета, ознакомиться с переключателями в данном усилительном каскаде («С_р»; «С_з»; «С_о»). 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 "1". Убедиться, что включены также сигнальный генератор, мультиметр и что они подключены соответственно к входу и выходу усилителя.

4.2. 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 C _p =10 C _o =0 C _з =100	U _{вых} , В													
	K _н													
	K _н /K ₀													
	20lgK _н / 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 $U_{вх} = 0,01$ В. Для этого на генераторе должна быть нажата клавиша "0,03" (Предел шкалы "I" – 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 положе-

нии "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.

Варианты 2 и 3 (Подготовить все аналогично варианту 1).

Последовательно устанавливать 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 $U_{вх} = 0,01$ В. Результаты измерений по варианту 1 предъявить преподавателю на контроль. Повторить измерения по вариантам 2 и 3. По результатам измерений при оформлении отчета вычислить коэффициент усиления каскада $K_u = U_{вых}/U_{вх}$ в каждой частотной точке; эти данные занести в таблицу.

Для каждого варианта определить наибольшее усиление $\max K_u = K_0$ и записать в графе "Примеч." таблицы. 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; использовать 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

$U_{вх}$ В	0	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030
$U_{вых}$ В							
K_u							

Установить переключатели на макете и фиксированное значение частоты сигнала на генераторе по рекомендации преподавателя. Последовательно устанавливать на генераторе уровень входного сигнала усилителя $U_{вх}$ согласно таблице, снимать с мультиметра соответствующие значения выходного напряжения усилителя $U_{вых}$ 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.

5. Требования к оформлению отчета

Оформление стандартное. Кроме этого отчет должен содержать: схему исследованного усилительного каскада и заданные величины емкостей в соответствии с вариантами 1–3, таблицы и графики снятых зависимостей, необходимые расчеты (в таблицах).

6. Контрольные задания

1. Объяснить принцип усиления сигнала в электронном усилителе.
2. Объяснить назначение элементов схемы усилителя.
3. Определить полосу пропускания усилителя.
4. Объяснять влияние конденсаторов в схеме усилителя на его АЧХ, полосу пропускания.
5. Определить амплитудную характеристику усилителя.
6. Определить динамический диапазон работы усилителя по амплитудной характеристике.

Литература

1. Герасимов В.Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986, с.91–102.
2. Морозов А.Г. Электроника и импульсная техника. – М. Высшая школа, 1987, с. 360–377.
3. Мержеевский А.И., Фокин А.А. Электроника и автоматика в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1977, с. 210–239.
4. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2004, с. 160–170.

Лабораторная работа № 5

Исследование дифференцирующих и интегрирующих цепей

1. Цель работы

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

2. Теоретические сведения

2.1. 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 цепи называются дифференцирующими или интегрирующими. Дифференцирующая RC-цепь показана на рис. 2.1. Характер преобразования входного импульса $U_{\text{вх}}(t)$ в данной цепи определяется соотношением между длительностью этого импульса $\tau_{\text{и}}$ и постоянной времени цепи $\tau_{\text{и}} = RC$.

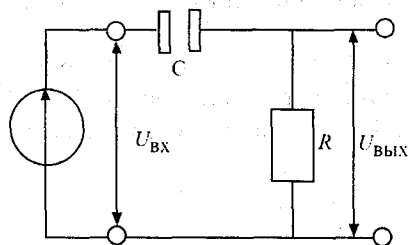


Рис. 2.1. Дифференцирующая RC-цепь

Если на вход цепи подан идеальный прямоугольный импульс высотой $U_{\text{и}}$ и длительностью $\tau_{\text{и}}$, рис. 2.2, а, то сигнал на выходе цепи имеет вид

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

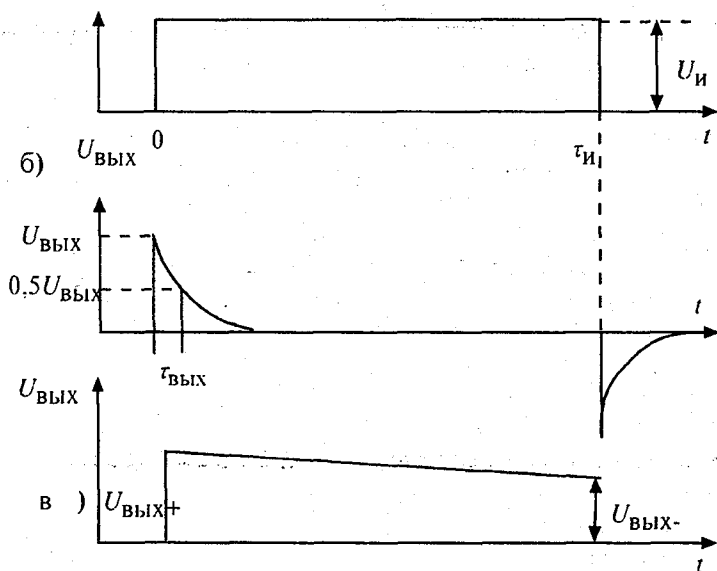


Рис. 2.2. Временные диаграммы, иллюстрирующие прохождение идеального прямоугольного импульса (а) через ДЦ с малой (б) и большой (в) постоянной времени

В начальные моменты времени $t = 0$ выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t = 0) = U_{\text{и}}$, т.е. 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 $U_{\text{и}}$. Соответствен-

но этому снижается выходное напряжение, которое согласно закону Кирхгофа равно $U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вх}}(t) - U_c(t)$.

Если τ_c существенно меньше, чем $\tau_{\text{и}}$, то конденсатор С очень быстро заряжается до значения $\approx U_{\text{и}}$, а выходное напряжение также быстро падает от значения $U_{\text{и}}$ до нуля (рис. 2.2, б). В результате, в момент $t = 0$ формируется положительный остроконечный импульс.

В момент $t = \tau_{\text{и}}$ входной сигнал скачком падает 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 $\approx U_{\text{и}}$ конденсатор С 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, ибо постоянная времени цепи остается прежней. В результате, на выходе цепи формируется отрицательный остроконечный импульс.

Рис

Два разнополярных остроконечных импульса; рис. 2.2, б, формируемые данной цепью при условии $\tau_c \ll \tau_{\text{и}}$, 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 синхрои импульсов 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

$$\tau_{\text{выхода}} \approx 0,7\tau_c = 0,7RC.$$

Если $\tau_c \gg \tau_{\text{и}}$, 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. 2.2, 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.

2.2. Интегрирующая цепь (ИЦ)

Если в рассмотренной выше цепи поменять местами элементы R и C , то цепь становится интегрирующей (расширяющей), рис. 2.3.

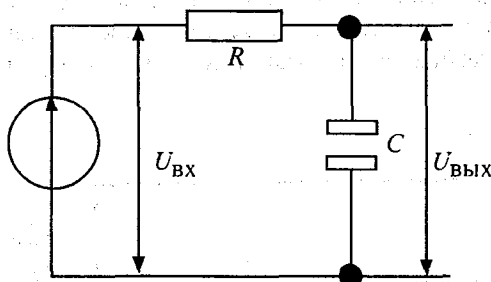


Рис. 2.3. Интегрирующая RC цепь

При подаче на вход этой цепи прямоугольного импульса, рис. 2.4, а, выходной сигнал изменяется по экспоненте вида $U_{ВЫХ}(t) = U_{ВХ} (1 - \exp(-t/\tau_{и}))$, при $0 \leq t \leq \tau_{и}$, где по-прежнему постоянная времени цепи $\tau_{и} = RC$.

Форма выходного сигнала в данной цепи также определяется соотношением между длительностями $\tau_{и}$ входного импульса и постоянной времени цепи $\tau_{и}$. Если $\tau_{и} \ll \tau_{и}$, то выходное напряжение мало отличается по форме от входного, рис. 2.4, б. Действительно, в этом случае при поступлении входного импульса конденсатор C , с которого снимается выходное напряжение, очень быстро заряжается до значения $\approx U_{и}$.

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

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. 2.4, в. Участок зарядной экспоненты 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 снижается высота выходного сигнала. В идеальном интеграторе напряжение не должно изменяться после прекращения входного импульса. В реальной RC цепи по окончании входного импульса

са 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 др. случаях.

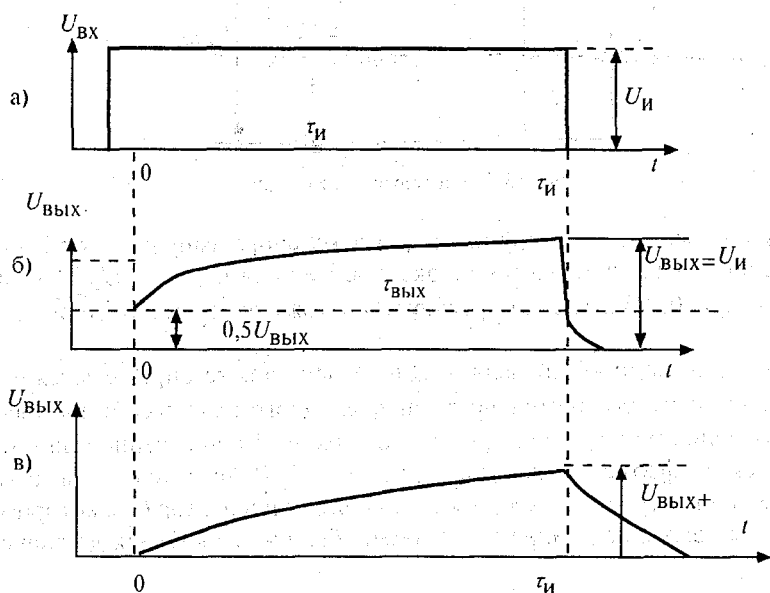


Рис. 2.4. Временные диаграммы, иллюстрирующие прохождение идеального прямоугольного импульса (а) через ИЦ с малой (б) и большой (в) постоянной времени

3. 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. 3.1.

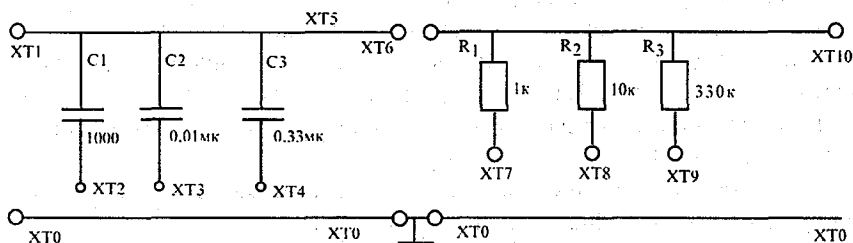


Рис. 3.1. Элементы R и C

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.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Подготовка лабораторной установки к работе

Включить питание лабораторного стола – тумблер на правой стойке стола; включить осциллограф (если он не включился вместе со столом); прогреть приборы в течение 3 ... 5 мин.

4.2 Измерение параметров входных импульсов

Выход импульсного генератора подключить к гнездам XT0÷XT1 макета, а осциллограф подключить 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 (при необходимости 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.

4.3. Исследование дифференцирующей цепи

1. Собрать дифференцирующую цепь (ДЦ) с постоянной времени $\tau_{\text{ц}} = 10$ мкс. Зарисовать схему ДЦ (см. рис. 2.1); 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 с данными элементами: 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. 2.2).

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:

$$\tau_{\text{расч}} \cong 0.7(U_{\text{и}} / U_{\text{вых}}) \tau_{\text{ц}}.$$

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 $\tau_{\text{ц}} = 3300 \text{ мкс}$.

4.4. 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. 2.3.); 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.

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 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 $U_{и}$.

5. Содержание отчета

Оформление стандартное. Кроме этого отчет должен содержать: схемы и заданные величины емкостей в соответствии с вариантами 1–3, осциллограммы (временные диаграммы) выходных процессов, изображенные в одном масштабе с входным сигналом.

6. Контрольные задания

1. Изобразить схему ДЦ; 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. Герасимов В.Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.; Высшая школа. 1986, с. 184–185.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа., 1982, с. 326–329, 341–344.
3. Криштафович А.К. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа. 1984, с. 261–265.
4. Гольденберг Л.М. Импульсные устройства. – М: Радио и связь, 1981, с. 9–13.
5. Прокофьев В.Н. Электрические цепи. Учебное пособие. – Л. : Изд. ЛГМИ, 1991, с. 59–65.

Лабораторная работа № 6

Исследование операционного усилителя

1. Цель работы

Ознакомление с типовыми схемами на базе операционных усилителей и экспериментальное исследование их технических характеристик.

2. Теоретические сведения

2.1. Понятие операционного усилителя (ОУ)

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

Условное графическое обозначение операционного усилителя приведено на рис. 2.1.

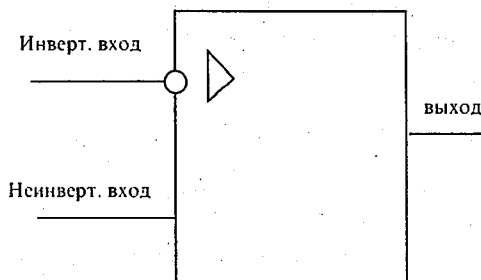


Рис. 2.1. Условное графическое обозначение операционного усилителя

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

Основные параметры операционного усилителя:

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

$$K = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$$

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

$$R_{\text{вхд}} = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_{\text{вх}}$$

– входное сопротивление по синфазному сигналу. Это сопротивление между входами операционного усилителя. $R_{\text{вкс}}$ 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 :

$$R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}}$$

– 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 (дБ), который равен отношению коэффициентов усиления по напряжению дифференциального и синфазного сигналов :

$$K_{\text{ос}} = K / K_{\text{с}} [\text{дБ}], \text{ где } K_{\text{с}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вкс}}$$

- напряжение смещения $U_{см}$, равное постоянному входному напряжению, при котором выходное напряжение равно нулю.
- входной ток $I_{вх}$, равный среднему арифметическому значению входных токов при выходном напряжении равно нулю.
- разность входных токов $\Delta I_{вх}$, протекающих через входы операционного усилителя при выходном напряжении, равно нулю.
- напряжение питания $E_{пит}$ (для большинства операционных усилителей ± 15 В).
- средний потребляемый ток по цепи питания $I_{пит}$ (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 сопротивление, 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. 2.2, имеет вид:

$$U_{вых} = -R_2 U_{ив} / R_1 + (R_2 / R_1 + 1) U_{нв}$$

где $U_{ив}$ – напряжение, подаваемое на инвертирующий вход;

$U_{нв}$ – напряжение, подаваемое на неинвертирующий вход;

$U_{вых}$ – напряжение на выходе операционного усилителя

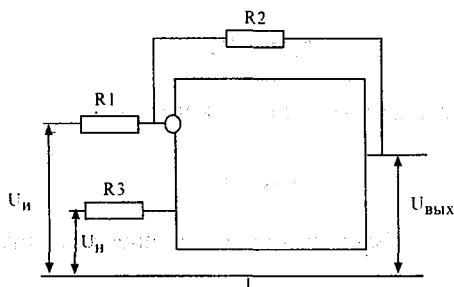


Рис. 2.2. Схема ОУ с параллельной отрицательной обратной связью по напряжению

2.2. Усилительные каскады на базе операционных усилителей

Инвертирующий усилитель (рис. 2.3.). 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 сигнала соединены параллельно. Поэтому в схеме действует параллельная обратная связь по напряжению.

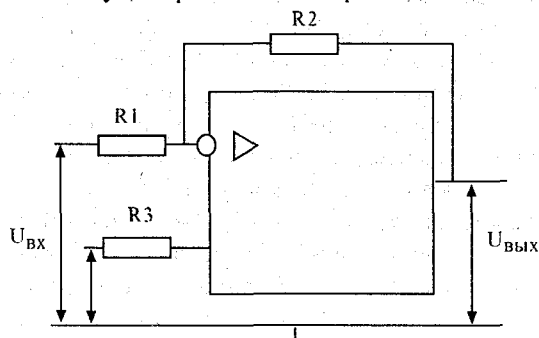


Рис. 2.3. Инвертирующий операционный усилитель

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

$$U_{вых} = - R2 U_{вх} / R1,$$

т.е. коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K_{и} = - R2 / R1.$$

Входное сопротивление такого усилителя :

$$R_{вх.и.} \approx R1.$$

Выходное сопротивление инвертирующего усилителя с обратной связью:

$$R_{вых.и.} = R_{вых} / [1 + (K/K_{и})].$$

Усилитель имеет сравнительно низкие входное и выходное сопротивления.

Неинвертирующий усилитель (рис. 2.4.). 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

$$U_{\text{ВЫХ}} = (1 + R_2/R_1) U_{\text{ВХ}}$$

Следовательно, коэффициент усиления равен $K_{\text{н}} = 1 + R_2/R_1$.

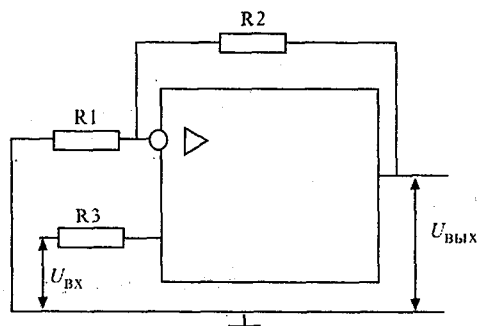


Рис. 2.4. Неинвертирующий операционный усилитель

Входное сопротивление неинвертирующего операционного усилителя с отрицательной обратной связью :

$$R_{\text{ВХ.н.}} \approx R_3 + K R_{\text{ВХ}}/K_{\text{н}}$$

Выходное сопротивление :

$$R_{\text{ВЫХ.н.}} \approx R_{\text{ВЫХ}}/(1 + K/K_{\text{н}}).$$

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

Повторитель (рис 2.5.). Повторитель напряжения используется в тех случаях, когда требуется согласовать высокое внутреннее сопротивление источника сигнала с низким сопротивлением нагрузки. Он

представляет собой неинвертирующий усилитель, в котором отсутствует резистор R1, а резистор R2 заменен проводником.

Коэффициент передачи повторителя:

$$K_n = 1.$$

Входное сопротивление:

$$R_{вх.п.} = 1 / (1 / K R_{вх} + 1 / R_{вх.с.}).$$

Выходное сопротивление:

$$R_{вых.п.} = R_{вых} / (1 + K).$$

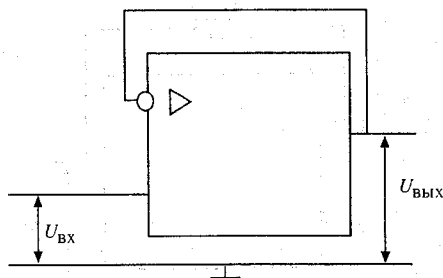


Рис. 2.5. Повторитель напряжения на ОУ

2.3. 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. 2.6.

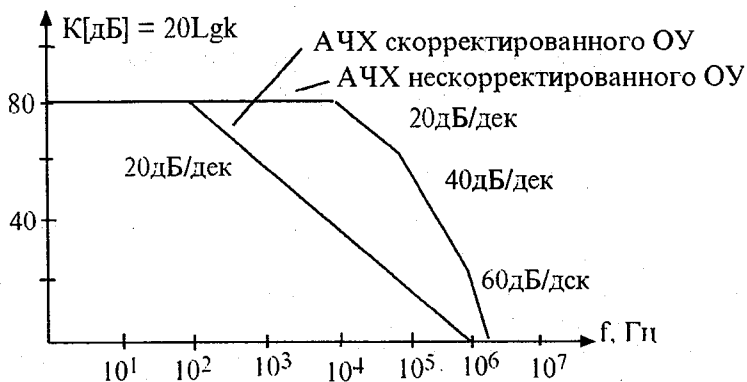


Рис. 2.6. АЧХ в логарифмическом масштабе

Амплитудная характеристика относится к статическим характеристикам, т.е. снимается на одной частоте. Она представляет собой зависимость выходного напряжения от входного, представленную на рис. 2.7.

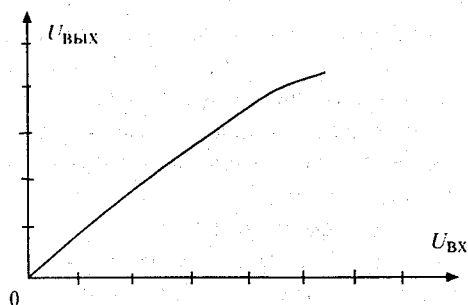


Рис. 2.7. Амплитудная характеристика ОУ

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

2.4. Функциональные устройства на операционных усилителях

2.4.1. Применение ОУ в схемах гираторов

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 неинвертирующим A и инвертирующим B входами равна нулю, на входы A и B токи не затекают. Подача переменного выходного напряжения на вход через резисторы R обратной связи приводит к образованию двух петель обратной 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 (рис. 2.8).

Описание принципа действия гиратора как преобразователя положительного сопротивления R в отрицательное — $-R$ (изменяется направление тока на обратное) можно провести 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. 2.8.

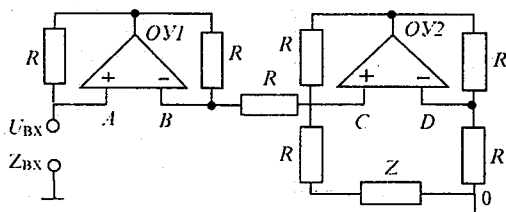
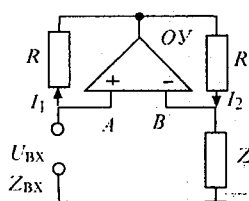


Рис. 2.8. Схема ПОИ Рис. 2.9. Преобразователь Z_{ch} в импеданс Z_{vn}

По определению $Z_{vx} = U_{vx} / I_{vx}$, по свойствам ОУ $U_{AB} = 0$ и сумма A и B токов $I_{AB} = 0$, тогда $I_1 R_1 + I_2 R_2 = 0$. Отсюда $I_1 = -I_2$ и $I_{vx} = I_1 = -I_2$, а напряжение $U_{vx} = U_A = U_B = I_2 Z$.

Найдем $Z_{vx} = I_2 Z / (-I_2) = -Z$. Если $Z = R$, то $Z_{vx} = -R$.

Принцип действия гиратора как преобразователя емкостной нагрузки Z_{ch} в индуктивный входной импеданс Z_{vn} можно описать с помощью схемы последовательного соединения двух ПОИ на ОУ1 и ОУ2, которая показана на рис. 2.9. В этой схеме нагрузкой ОУ1 является последовательное соединение R с параллельным соединением отрицательного входного сопротивления ОУ2 и внешних навесных элементов R и Z :

$$Z_{вх} = R + (-R(R + Z) / R + Z - R) = -R^2 / Z.$$

Тогда $Z_{vx} = -(-R^2 / Z) = R^2 / Z$.

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

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

Если $Z = R$, то $Z_{vx} = R$.

Схему гиратора как преобразователя емкостной нагрузки Z_{ch} в индуктивный входной импеданс Z_{vn} можно реализовать и на одном операционном усилителе (рис. 2.10).

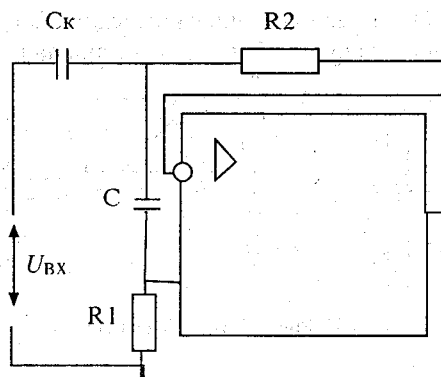


Рис. 2.10. Схема гиратора на одном ОУ

При индуктивном входном импедансе входной ток гиратора будет отставать по фазе от входного напряжения на 90° , что свойственно катушкам индуктивности объемного монтажа электронных схем.

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

2.4.2. 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. 2.11.

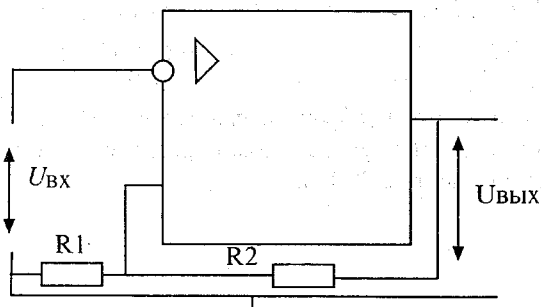


Рис. 2.11. Схема инвертирующего триггера Шмитта на ОУ

Триггер переключается при увеличении отрицательного входного напряжения до порогового значения $U = U_{\text{выхmax}} R1/(R1 + R2)$ и при уменьшении положительного напряжения на входе триггера до порогового значения $U = U_{\text{выхmin}} R1/(R1 + R2)$. Вид передаточной характеристики триггера Шмитта показан на рис. 2.12.

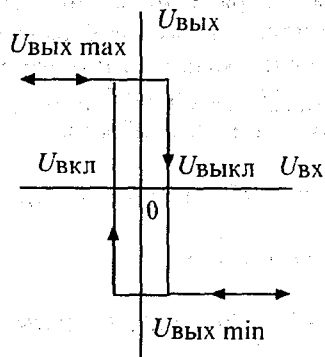


Рис. 2.12. Передаточная характеристики триггера Шмитта

2.4.3. Мультивибратор

На рис. 2.13. приведена схема мультивибратора на основе инвертирующего триггера Шмитта.

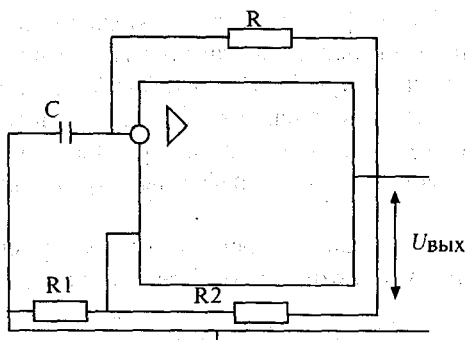


Рис. 2.13. Схема мультивибратора на основе триггера Шмитта.

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:

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

Период повторения импульсов:

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

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

3. 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, расположенным сбоку, на правой стороне макета.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Исследование схем усиления на базе ОУ

Собрать схему инвертирующего усилителя. 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 $K_{\text{ос}}$. Сравнить полученное значение с расчетным.

Собрать схему неинвертирующего усилителя при выключенном макете. Выполнить те же исследования, что и для схемы инвертирующего усилителя.

Выключить макет.

Собрать схему повторителя 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 A1 в положение «-».

4.2. Исследование амплитудных характеристик ОУ

Снять зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ для инвертирующего и неинвертирующего усилителей при $R_1 = R_3 = 10 \text{ кОм}$ и $R_2 = 560 \text{ кОм}$. Для этого при выключенном макете собрать усилитель и подключить его вход к гнезду ХТ1. 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 АЧХ при отрицательном входном напряжении.

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

Результаты измерений занести в таблицу.

Построить АЧХ для обеих схем усилителей на одном графике.

4.3. Исследование амплитудно-частотных характеристик ОУ

Снять амплитудно-частотные характеристики инвертирующего и неинвертирующего усилителей при $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 100 \text{ кОм}$, $R_3 = 10 \text{ кОм}$.

Для этого:

- собрать исследуемую схему;
- подключить вход усилителя к гнезду ХТ1;
- переключатели на макете установить в положение: SA2 «~», SA3 «К входу»;
- включить вольтметр в режим измерения переменного напряжения;
- включить генератор и установить напряжение 0,1 В;
- включить макет;
- тумблер SA3 установить в положение «К выходу»;
- изменяя частоту генератора, снять АЧХ;
- выключить макет;
- 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.

4.4. Исследование функциональных устройств на ОУ

Гиратор. При выключенном макете собрать схему колебательного контура с гиратором на операционном усилителе, приведенную на рис. 2.10. Значения параметров элементов схемы: $R_1 = 100 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$, $C = 0,01 \text{ мкФ}$, $C_k = 1 \text{ мкФ}$.

- подключить вход усилителя к гнезду ХТ1;
- переключатели на макете установить в положение: SA2 «~», SA3 «К входу»;
- включить вольтметр в режим измерения переменного напряжения;
- включить генератор и установить напряжение 0,1 В;

- включить макет;
- вольтметр подключить к точке соединения конденсаторов C_k и C и общему проводу;
- изменяя частоту генератора, снять АЧХ контура;
- выключить макет.

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

Триггер Шмитта. При выключенном макете собрать схему триггера Шмитта. Вход триггера Шмита подключить к гнезду ХТ1. 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 измерить вольтметром пороговое значение входного напряжения $U_{\text{вкл}}$. Переключив SA3 в положение «К выходу», измерить максимальное значение выходного напряжения $U_{\text{выхmax}}$.

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

Построить передаточную характеристику триггера Шмитта.

Мультивибратор. При выключенном макете собрать схему мультивибратора (рис. 2.13). 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.

5. Содержание отчета

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

6. Контрольные вопросы и задания

1. Для чего в схемах усилителей применяется отрицательная обратная связь?

2. Чем отличаются схемы инвертирующего и неинвертирующего 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

1. Герасимов В.Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа. 1986, с. 131–138, 203–205, 206–207.

2. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004, с. 228–230.

Лабораторная работа № 7

Исследование счетчика импульсов и регистра

1. Цель работы

Экспериментальное ознакомление с устройством и принципами работы цифровых счетчиков импульсов и регистров памяти чисел.

2. Теоретические сведения

2.1. 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 $K_{сч} = 2^N$ 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 $K_{сч} = 2^N$.

На рис. 2.1, а представлена функциональная схема трехразрядного ($N=3$) суммирующего счетчика, а на рис. 2.1, б его условное графическое обозначение.

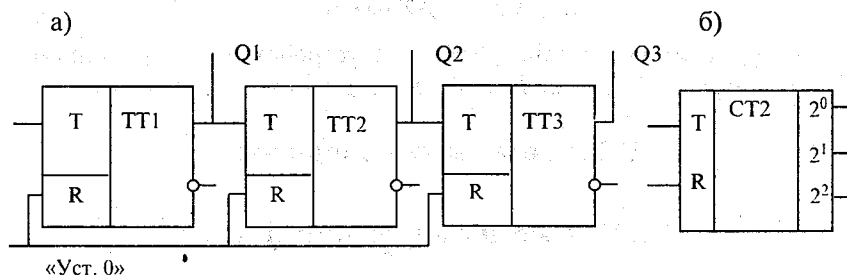


Рис.2.1 Функциональная схема трехразрядного ($N=3$) суммирующего счетчика (а) и условное графическое обозначение счетчика (б).

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. 2.1, б указывает на то, что счетчик двоичный. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу счетчика представлены на рисунке 2.2.

Как следует из этих диаграмм, период повторения импульсов после каждого триггера увеличивается в два раза. Перед началом счета все разряды счетчика устанавливаются в «0» посылкой сигнала сброса по шине «Уст. 0». При поступлении первого импульса на счетный вход триггера ТТ1 его выход Q1 переключается в состояние «1» по отрицательному фронту (срезу) этого импульса. При этом на выходах остальных триггеров сохраняется состояние «0». На выходах Q счетчика оказывается записанным число 1 в двоичном коде – 001. Второй счетный импульс переводит выход Q1 триггера ТТ1 в состояние «0», а выход Q2 второго триггера устанавливается в состояние «1» и на выходах счетчик оказывается записанным в виде двоичного кода 010 число 2. Таким же образом счетчик подсчитывает и последующие им-

пульсы, отображая на выходах Q триггеров результат счета в двоичном коде.

При поступлении 7-го импульса на вход счетчика все его разряды устанавливаются в состояние «1», а следующий 8-й импульс приводит к переполнению счетчика и установке всех его разрядов в исходное нулевое состояние. Цикл работы счетчика заканчивается в соответствии с его модулем счета (коэффициентом деления) $K_{сч} = 2^3 = 8$.

Счетчик работает в весовом коде 1-2-4, т.е. он полностью заполняется при поступлении на вход $1 + 2 + 4 = 7$ импульсов. Наибольшее распространение получили четырехразрядные счетчики, имеющие весовой код 1-2-4-8 и заполняющиеся при поступлении на счетный вход $1+2+4+8 = 15$ импульсов.

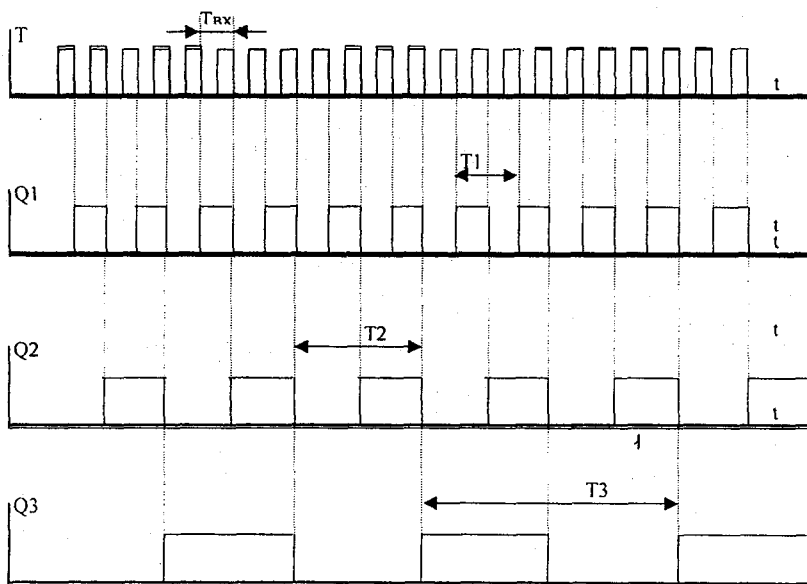


Рис. 2.2. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу счетчика.

Часто требуются счетчики, коэффициент счета которых не равен степени числа 2, например $K_{сч} = 3; 5; 7; 10$ и т.п. Такие счетчики реализуются на основе двоичных при исключении избыточных состояний принудительным сбросом счетчика в «0» после получения заданного числа $K_{сч} - 1$ на его выходе.

В качестве примера на рис. 2.3. приведена схема, а на рис. 2.4. – временные диаграммы работы для счетчика с коэффициентом счета $K_{сч} = 5$.

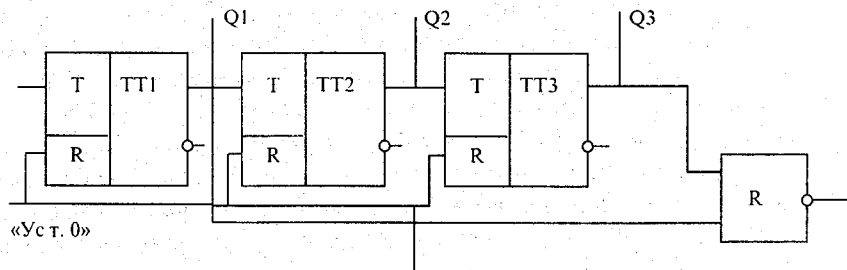


Рис.2.3. Схема счетчика с коэффициентом счета $K_{сч} = 5$.

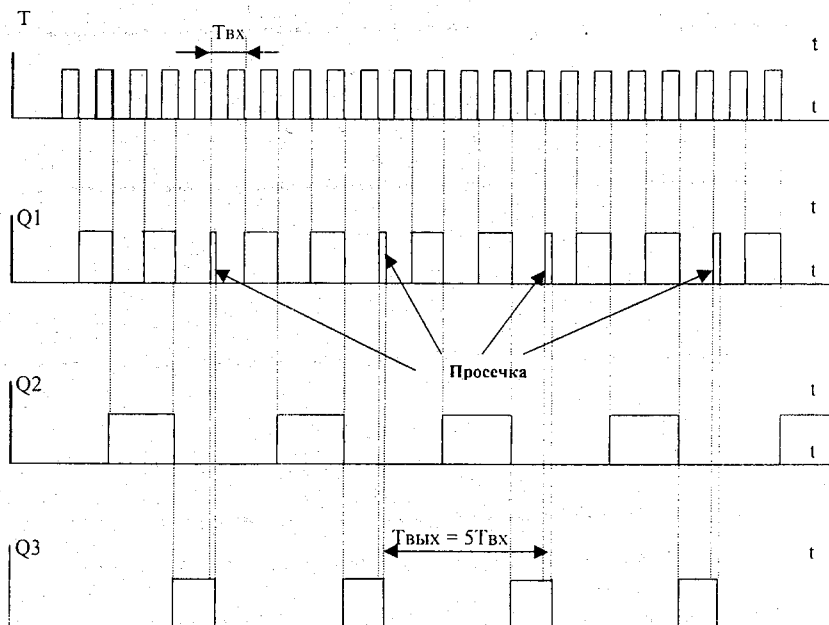


Рис. 2.4. Временные диаграммы работы счетчика с $K_{сч} = 5$.

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.

2.2. 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. 2.1.) с третьим состоянием выхода на RS-триггерах.

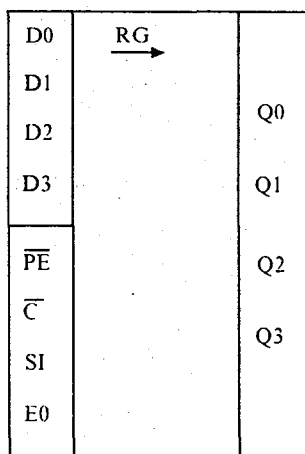


Рис. 2.1. Четырехразрядный сдвиговый регистр

Режимы загрузки данных и сдвига содержимого регистра переключаются с помощью входа параллельного разрешения (черта сверху означает, что активным является низкий уровень сигнала на входе). Если на входе высокий уровень напряжения, то данные загружаются в регистр с параллельных входов D0 – D3 синхронно с отрицательным перепадом на входе $\overline{C}$. 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 C. Если

на вывод разрешения выхода E0 подать напряжение низкого уровня, то выходы Q0 – Q3 переходят в третье Z – состояние (размыкаются).

3. 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. 3.1. приведена схема исследуемого счетчика.

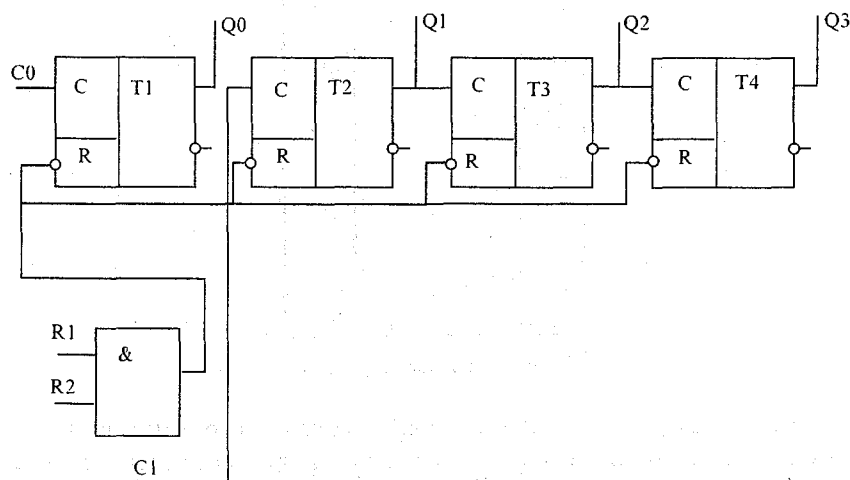


Рис. 3.1. Схема исследуемого счетчика

Микросхема содержит два счетчика: одноразрядный – на триггере T1 с коэффициентом счета 2, входом C0 и выходом Q0 и трехразрядный – на триггерах T2-T4 с коэффициентом счета $2^3 = 8$, входом C1 и выходами Q1, Q2, Q3. Если соединить последовательно все четыре

триггера, установив перемычку между выводами Q0 и C1, 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.

4. Порядок выполнения работы

4.1. 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 C1 трехразрядного счетчика с выходом отрицательного перепада  формирователя F. Подавать на счетный вход C1 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 4.1.

Исследовать трехразрядный счетчик с помощью осциллографа. Для этого подать на вход C1 счетчика с выхода генератора импульсов G импульсную последовательность с частотой 300 кГц. Используя переключатели калибровки экрана «Вольт/Дел» и «Время/Дел» измерить период следования T1, T2, T3 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 G. Занести результаты наблюдений в таблицу:

№ счетных импульсов	Состояние выхода			Примечание
	Q1	Q2	Q3	
0	0	0	0	Исходное состояние счетчика
1				$K_{сч} =$
2				$T1 =$
3				$T2 =$
4				$T3 =$
5				$T_{вн} =$
6				
7				
8				

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

Подключить выходы Q1, Q2, Q3 счетчика к входам 1, 2, 3 коммутатора SW б и подать на вход счетчика C1 последовательность импульсов с частотой 300 кГц от генератора G. 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 C1 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.

Исследовать декадный счетчик в режиме ручного управления, используя сигналы формирователя перепадов напряжения F на входе C0 и в автоматическом режиме, подавая на вход C0 сигнал с частотой 300 кГц от генератора импульсов G и наблюдая на выходных счетчика осциллограммы. По результатам наблюдений и измерений заполнить таблицу, аналогичную таблице, приведенной выше 4.1. 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.

4.2. 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 с выхода 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.

5. Содержание отчета

Оформление стандартное. Кроме этого отчет должен содержать: схемы, временные диаграммы, выводы по работе.

6. 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

1. Герасимов В.Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа. 1986, с. 195–200.
2. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004, с. 316–325.

Полный список рекомендуемых источников

1. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004.
2. Браммер Ю.А., Пашук И.Н. Импульсная техника. – М.: Высшая школа, 1985.
3. Герасимов В.Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986.
5. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника – М.: Высшая школа, 1982.
6. Гольденберг Л.М. Импульсные устройства. – М.: Радио и связь, 1981.
7. Лабораторные работы по основам промышленной электроники Под ред. В.Г. Герасимова. М.: Высшая школа, 1989.
8. Криштафович А. К. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа, 1984.
9. Мальцева Л.А. и др. Основы цифровой техники. – М.: Радио и связь, 1986.
10. Мержеевский А.И., Фокин А.А. Электроника и автоматика в гидрометеорологии. – Л.: Гидрометеониздат, 1977.
11. Морозов А.Г. Электроника и импульсная техника. М: Высшая школа, 1987.
12. Криштафович А. К. Промышленная электроника. – М.: Высшая школа, 1984.
12. Прокофьев В.Н. Электрические цепи. Учебное пособие. – Л. : Изд. ЛГМИ, 1991.
13. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – СПб.: КОРОНАпринт, 2004.

Приложение

Образец титульного листа

Российский государственный
гидрометеорологический университет

КАФЕДРА МОРСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

"ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ"

Выполнил :

Студент гр. №
Ф.И.О.

Проверил:

Санкт-Петербург
2006

Содержание

Введение..... 3

✓ Лабораторная работа № 1.

Исследование полупроводниковых приборов 4

Лабораторная работа № 2.

✓ Исследование логических элементов
и интегральных триггеров 20

✓ Лабораторная работа № 3. (3)

Исследование выпрямителей и стабилизаторов 35

✓ Лабораторная работа № 4. (4)

Исследование электронного усилителя 47

○ Лабораторная работа № 5. 7

Исследование дифференцирующих и интегрирующих цепей 54

○ Лабораторная работа № 6. (6) Транзисторных автогенераторов

Исследование операционного усилителя 63

✓ Лабораторная работа № 7.

Исследование счетчика импульсов и регистра 79

Литература. Полный список рекомендованной литературы 86

Приложение 89

Учебное издание

**Владимир Алексеевич Большаков
Юрий Михайлович Шапаренко**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по дисциплине
«Общая электротехника и электроника»**

Редактор О.С. Крайнова

ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 25.04.06. Формат 60х90 1/16. Печать офсетная.

Печ. л. 5,75. Тираж 700 Заказ № 227.

РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург. Малоохтинский пр..98.

Отпечатано в ООО «Аспринт»

37=34