

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра программного обеспечения вычислительной техники
и автоматизированных систем

И.А. Щудро

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 09.03.04 Программная инженерия и 09.03.01 Информатика и вычислительная техника

Оренбург
2019

УДК 621.38(076.5)
ББК 32.85я7
Щ 93

Рецензент – кандидат технических наук, доцент Д.В. Горбачев

Щ 93 **Щудро И.А.**
Основы электроники: методические указания / И.А. Щудро; Оренбург-
ский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 87 с.

Методические указания содержат рекомендации по проведению лабораторных работ бакалавров, обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 09.03.04 Программная инженерия и 09.03.01 Информатика и вычислительная техника.

УДК 621.38(076.5)
ББК 32.85я7 Щ93

© Щудро И.А., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа №1 Исследование характеристик полупроводниковых диодов.....	5
2 Лабораторная работа №2 Исследование основных характеристик биполярного транзистора	14
3 Лабораторная работа №3 Исследование биполярного транзистора графо – аналитическим методом	21
4 Лабораторная работа № 4 Исследование резисторного усилительного каскада	31
5 Лабораторная работа № 5 Исследование характеристик операционного усилителя.....	48
6 Лабораторная работа №6 Исследование узлов вторичных источников питания	58
7 Лабораторная работа №7 Исследование логических элементов	67
8 Лабораторная работа № 8 Синтез и исследование логических схем	75
Заключение	86
Список использованных источников	87

Введение

Настоящие методические указания предназначены для получения практических навыков студентами направлений 09.03.04 Программная инженерия и 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, при изучении дисциплин «Основы электроники» и «Электротехника и электроника», соответственно.

Методические указания содержат восемь работ, рассчитанных на 18 часов аудиторных занятий. Предлагаемые задания охватывают основные исследовательские задачи курса.

Общие методические рекомендации по использованию лабораторных работ и методических указаний:

- к выполнению лабораторной работы следует приступать после ознакомления с теоретической частью соответствующего раздела, рекомендациями, приведенными в конкретной работе и прохождения коллоквиума;
- результаты всех лабораторных работ представляются в программе Multisim (Electronics Workbench), по каждой работе оформляется отчет в тетради;
- лабораторные работы рекомендуется выполнять в порядке их нумерации;
- дополнительная информация по лабораторным работам содержится в прилагаемом списке литературы;

Методические указания могут быть реализованы на индивидуальных компьютерах и в локальных вычислительных сетях со средними техническими характеристиками. Обязательным для полной реализации курса является наличие комплекта офисных программ операционной системы Windows и программного пакета Multisim (Electronics Workbench).

Методические указания рекомендованы преподавателям как вспомогательный материал в организации и проведении занятий, а также студентам – для аудиторного и самостоятельного освоения раздела «Основы электроники».

1 Лабораторная работа №1 Исследование характеристик полупроводниковых диодов

Цель работы:

1. Исследование вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводникового выпрямительного диода.
2. Построение обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона и определение напряжения стабилизации.
3. Анализ сопротивления диода (прямое и обратное смещение) на переменном и постоянном токе.

1.1 Теоретическая часть

Как было отмечено ранее (в курсе электротехники), вольтамперная характеристика (ВАХ) любого (активного или пассивного) элемента электрической цепи представляет собой зависимость тока, протекающего через элемент от напряжения на выводах этого элемента. Чтобы снять ВАХ диода, можно воспользоваться схемой измерения, приведенной на рисунке 1.1.

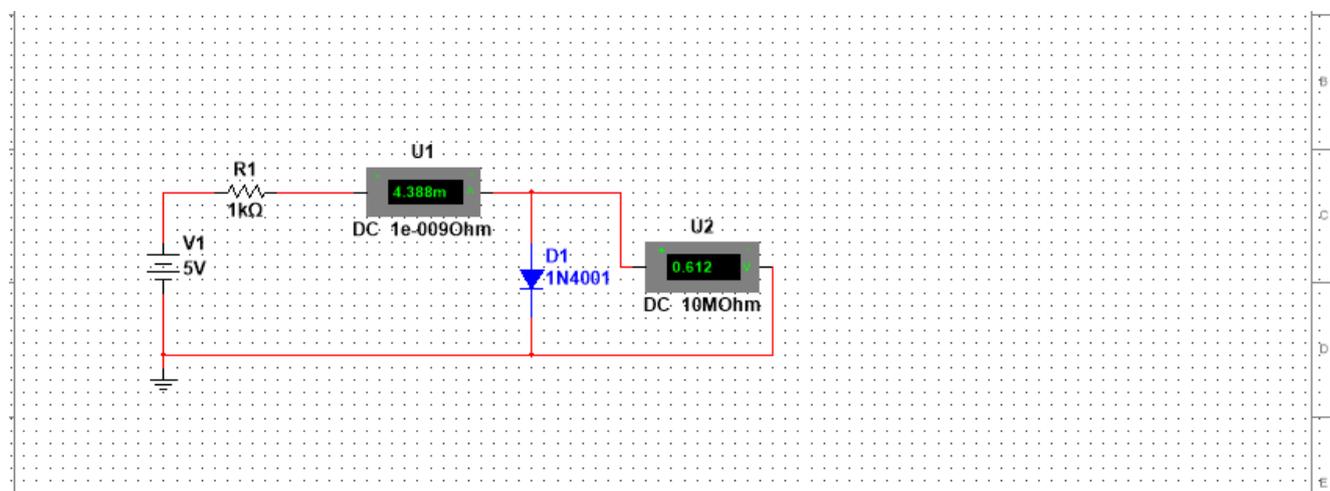


Рисунок 1.1 – Схема измерения параметров ВАХ диода

Ток диода можно вычислять из выражения:

$$I_{\text{ПР}} = (E - U_{\text{ПР}}) / R,$$

где $I_{\text{ПР}}$ ток диода в прямом направлении,

E - напряжение источника питания,

$U_{\text{ПР}}$ - напряжение на диоде в прямом направлении,

R – сопротивление дополнительного резистора, включенного в цепь диода.

Изменив полярность включения диода в той же схеме (рисунок 1.1), можно снять ВАХ диода по той же методике и в обратном направлении

$$I_{\text{ОБ}} = (E - U_{\text{ОБ}}) / R,$$

где $I_{\text{ОБ}}$ – ток диода в обратном направлении,

$U_{\text{ОБ}}$ - напряжение на диоде в обратном направлении.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) может быть получена путем измерения напряжений на диоде при протекании различных токов за счет изменения напряжения источника питания V_s .

Более быстро и удобно можно исследовать ВАХ, непосредственно наблюдая ее на экране осциллографа (рисунок 1.2). При таком подключении координата точки по горизонтальной оси осциллографа будет пропорциональна напряжению, а по вертикальной - току через диод. Поскольку напряжение в вольтах на резисторе 1 Ом численно равно току через диод в амперах ($I = U / R = U / 1 = U$), по вертикальной оси можно непосредственно считывать значения тока. Если на осциллографе выбран режим В/А, то величина, пропорциональная току через диод (канал В), будет откладываться по вертикальной оси, а напряжение (канал А) - по горизонтальной. Это и позволит получить вольтамперную характеристику непосредственно на экране осциллографа.

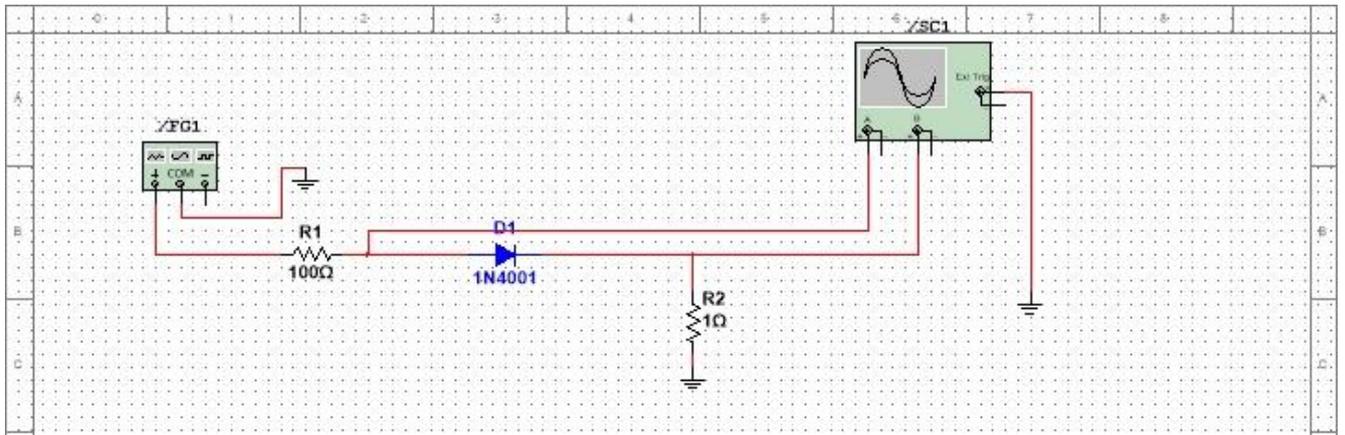


Рисунок 1.2 – Схема определения параметров ВАХ диода с помощью осциллографа

Диод представляет собой нелинейный элемент, поэтому его нельзя характеризовать величиной сопротивления, как линейный резистор. Статическое сопротивление диода зависит от величины тока и определяется по формуле:

$$R_{СТ} = U_{д} / I_{д}.$$

Кроме статического сопротивления используют понятие динамического сопротивления диода, определяемое по формуле:

$$R_{дин} = dU_{д} / dI_{д}.$$

Если в схеме, приведенной на рисунке 1.1, вместо выпрямительного диода включить стабилитрон (как показано на рисунке 1.3), получается простейшая схема параметрического стабилизатора (рисунок 1.3). Ток $I_{СТ}$ стабилитрона может быть определен вычислением падения напряжения на резисторе R:

$$I_{СТ} = (E - U_{СТ}) / R.$$

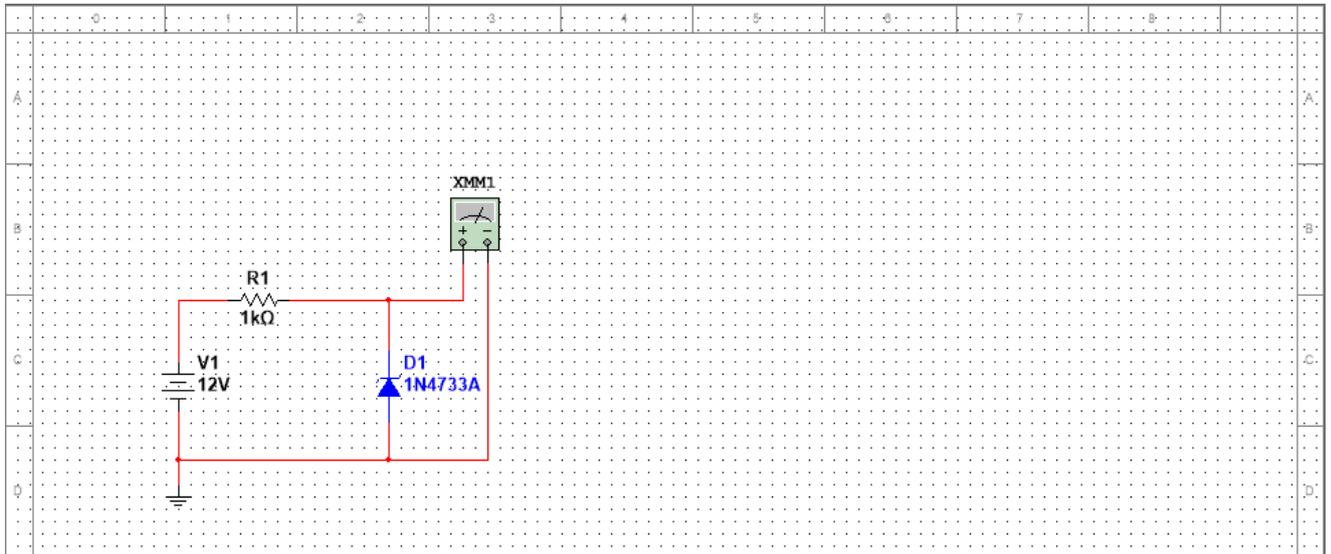


Рисунок 1.3 – Схема определения параметров ВАХ со стабилитроном

Напряжение стабилизации $U_{СТ}$ стабилитрона определяется точкой на вольт-амперной характеристике, в которой ток стабилитрона резко увеличивается. Мощность рассеивания стабилитрона $P_{СТ}$ вычисляется как произведение тока $I_{СТ}$ на напряжение $U_{СТ}$.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона вычисляется так же, как для диода, по наклону вольтамперной характеристики.

1.2 Задание на проведение исследований

- 1.2.1 Снять прямую и обратную ветви ВАХ выпрямительного диода.
- 1.2.2 Определить статическое и динамическое сопротивления диода.
- 1.2.3 Снять ВАХ стабилитрона.
- 1.2.4. Получить нагрузочную характеристику параметрического стабилитрона.

1.3 Порядок проведения экспериментов

1.3.1 Собрать схему для исследования характеристик выпрямительного диода (рисунок 1.1). Включить моделирование и записать показания приборов. Изменить полярность источника напряжения и повторить эксперимент. При этом диод бу-

дет включен в обратном смещении.

По результатам измерений вычислить ток диода при прямом и обратном смещении (используя приведенные ранее формулы). Сравнить расчетные значения с показаниями амперметра.

1.3.2 Снять вольтамперную характеристику диода:

а) прямая ветвь ВАХ. Источник напряжения включить так, чтобы диод был смещен в прямом направлении (рисунок 1.1). Включите схему. Последовательно устанавливая значения ЭДС источника равными 5 В, 4 В, 3 В, 2 В, 1 В, 0.5 В, 0 В записать значения напряжения $U_{\text{пр}}$ и тока $I_{\text{пр}}$ диода в таблицу;

б) обратная ветвь ВАХ. Перевернуть диод. Последовательно устанавливая значения ЭДС источника равными 0 В, 5 В, 10 В, 15 В записать значения тока $I_{\text{об}}$ и напряжения $U_{\text{об}}$ в таблицу;

в) по полученным данным построить графики $I_{\text{пр}}(U_{\text{пр}})$ и $I_{\text{об}}(U_{\text{об}})$;

г) построить касательную к графику прямой ветви ВАХ при $I_{\text{пр}} = 4$ мА и оценить дифференциальное сопротивление диода по наклону касательной. Пролетать ту же процедуру для $I_{\text{пр}} = 0.4$ мА и $I_{\text{пр}} = 0.2$ мА. Ответы записать в отчет;

д) аналогично пункту г) оцените дифференциальное сопротивление диода при обратном напряжении 5 В и записать экспериментальные данные в отчет;

е) вычислить сопротивление диода на постоянном токе $I_{\text{пр}} = 4$ мА по формуле $R_{\text{ст}} = U_{\text{д}} / I_{\text{д}}$, и занести результат в отчет;

ж) определите напряжение изгиба. Результаты занесите в отчет. Напряжение изгиба определяется из вольтамперной характеристики диода, смещенного в прямом направлении, для точки, где характеристика претерпевает резкий излом.

1.3.3 Получить ВАХ диода на экране осциллографа. Для этого собрать схему, как показано на рисунке 1.2. Выполнить моделирование. На ВАХ, появившейся на экране осциллографа, по горизонтальной оси считывается напряжение на диоде в милливольтках (канал А), а по вертикальной - ток в миллиамперах (канал В, 1 мВ соответствует 1 мА). Обратите внимание на изгиб ВАХ. Изображение, полученное на экране осциллографа, перенести в отчет. Измерить величину напряжения из-

гиба.

1.3.4 Собрать схему для исследования характеристик стабилитрона (рисунок 1.3). Измерить напряжение и вычислить ток через стабилитрон:

а) измерить значение напряжения $U_{СТ}$ на стабилитроне при значениях ЭДС источника 0 В, 4 В, 6 В, 10 В, 15 В, 20 В, 25 В, 30 В, 35 В и занесите результаты измерений в таблицу;

б) вычислить ток $I_{СТ}$ стабилитрона для каждого значения напряжения $U_{СТ}$. Результаты вычислений занесите в ту же таблицу;

в) по данным таблицы построить вольтамперную характеристику стабилитрона;

г) оценить по вольтамперной характеристике стабилитрона напряжение стабилизации;

д) измерить наклон ВАХ в области стабилизации напряжения и оцените дифференциальное сопротивление стабилитрона в этой области.

1.3.5 Получение нагрузочной характеристики параметрического стабилизатора:

а) подключить резистор $R_L=75$ Ом параллельно стабилитрону. Значение источника ЭДС, установить равным 20 В. Включить схему. Записать значение напряжения $U_{СТ}$ на стабилитроне;

б) повторить пункт а) при коротком замыкании и при сопротивлениях резистора R_L 100 Ом, 300 Ом, 600 Ом, 1 кОм. Результаты измерений заносить в таблицу;

в) рассчитать ток I_1 через резистор R , включенный последовательно с источником, ток I_L через резистор R_L , и ток стабилитрона $I_{СТ}$ для каждого значения R_L из таблицы. Результаты занесите в ту же таблицу.

1.3.6 Получение ВАХ стабилитрона на экране осциллографа.

Собрать схему, как показано на рисунке 1.4. Выполнить моделирование. Записать в экспериментальные данные напряжение стабилизации, полученное из графика на экране осциллографа.

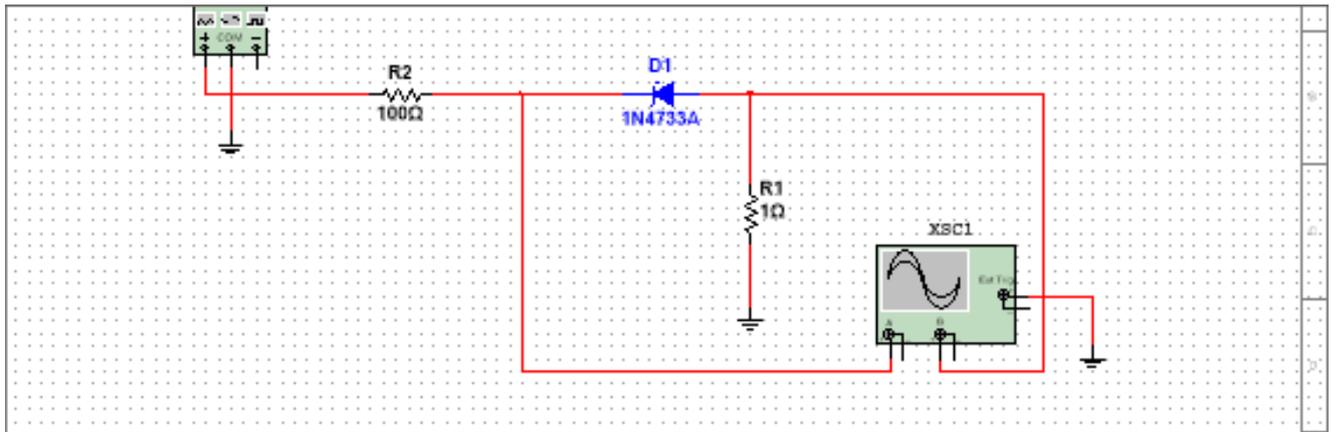


Рисунок 1.4 – Схема для исследования параметров стабилитрона

1.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 2.3.1 ... 2.3.6;
- выводы о проделанной работе;
- результаты оформить в рабочей тетради.

1.5 Контрольные вопросы

- 1 Сравните напряжения на диоде при прямом и обратном смещении по порядку величин. Почему они различны.
- 2 Сравнимы ли измеренные значения тока при прямом смещении с вычисленными значениями.
- 3 Сравнимы ли измеренные значения тока при обратном смещении с вычисленными значениями.
- 4 Что такое ток насыщения диода.
- 5 Совпадают ли точки изгиба ВАХ, полученные с помощью осциллографа и построенные по результатам вычислений.
- 6 Сравните относительное изменение напряжения на стабилитроне с относительным изменением питающего напряжения. Оцените степень стабилизации.

- 7 Влияет ли значение сопротивления нагрузки на степень стабилизации выходного напряжения стабилизатора.
- 8 Как изменяется напряжение стабилитрона $U_{СТ}$, когда ток стабилитрона становится ниже 20 мА.
- 9 Как изменяется напряжение $U_{СТ}$ на выходе стабилизатора, при уменьшении сопротивления R .

Таблица 1.1 – Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Модель диода	Модель стабилитрона
1	2	3
1	1BH62	1N4097
2	1DH62	1N4461
3	1JH62	1N4697
4	1N1199C	1N4883
5	1N1204C	1N5083
6	1N3064	1N5360B
7	1N3612GP	1N5378BG
8	1N3880	1N5932B
9	1N3900	1Z10
10	1N4002G	1SMB5920BT3G
11	1N4007	GLL4735
12	1N4383GP	MM3Z10VT1G
13	1N4446	MZ4099
14	1S1553	NZH10C
15	1S1888	PDZ10B
16	3BH41	RD10
17	8EWS10S	SML4735
18	BA221	TD10J

1	2	3
19	BAV20	Z4KE100
20	BAX12	ZPD10
21	BAY80	1PMT5927BT1G
22	BY438	1Z30
23	BYD17D	BZX79-A56
24	BYM10-200	1N4475
25	BYM26D	1N4482
26	BYV95B	1N4485
27	FMMD2835	1N4764A
28	G1812	1N4966
29	GP20B	MZPY10
30	MBR1540	1N4887

2 Лабораторная работа №2 Исследование основных характеристик биполярного транзистора

Цель работы:

- 1 Исследование основных характеристик биполярного транзистора.
- 2 Построение вольтамперных характеристик (ВАХ) биполярного транзистора.

2.1 Теоретическая часть

Биполярный транзистор является активным элементом, управляемым током в цепи управляющего вывода – базы. Для него могут быть построены две разновидности ВАХ – входная, представляющая собой зависимость тока в цепи базы транзистора от напряжения, приложенного между базой и эмиттером при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером и семейство выходных ВАХ, полученное как зависимость тока коллектора транзистора от напряжения между коллектором и эмиттером при фиксированных значениях тока в цепи базы.

На рисунке 2.1, в частности, приведены ВАХ маломощного транзистора КТ 315Б (аналог транзистора Q2N2712): слева – входные, справа – семейство выходных.

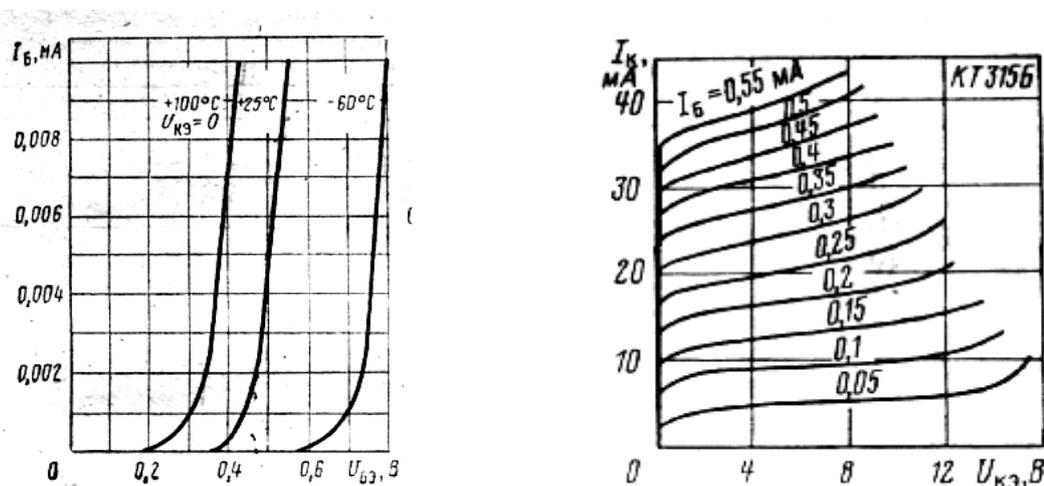


Рисунок 2.1 – Входные и выходные характеристики транзистора КТ315Б

Основные характеристики биполярного транзистора могут быть получены непосредственно из ВАХ.

Токи биполярного транзистора тесно взаимосвязаны. В частности, можно записать

$$I_K = \alpha_{ст} I_{\text{Э}} + I_{\text{КБ0}},$$

$$I_{\text{Э}} = I_K + I_B,$$

где $\alpha_{ст}$ – статический коэффициент передачи тока эмиттера;

$I_{\text{КБ0}}$ – обратный ток коллектора.

На практике $\alpha_{ст} = 0,95 \dots 0,99$.

Для тока базы можно записать

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K \approx I_K / \alpha_{ст} - I_K = I_K [(1 - \alpha_{ст}) / \alpha_{ст}] = I_K / \beta_{ст},$$

где $\beta_{ст} = \alpha_{ст} / (1 - \alpha_{ст})$ – статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером (в справочной литературе используется обозначение $h_{21\text{Э}}$, обычно принимает значение $\beta = 10 \dots 500$ в зависимости от типа и мощности транзистора).

Статический коэффициент передачи тока базы определяется как отношение тока коллектора I_K к току базы I_B :

$$\beta_{ст} = \frac{I_K}{I_B}.$$

Статический коэффициент передачи тока эмиттера равен

$$\alpha_{ст} \approx I_K / I_{\text{Э}} = \beta / (1 + \beta).$$

Дифференциальные коэффициенты передачи тока эмиттера и тока базы (в режиме усиления сигнала) определяются, соответственно, из выражений

$$\alpha = \left. \frac{di_K}{di_E} \right|_{u_{КБ} = const},$$

$$\beta = \left. \frac{di_K}{di_B} \right|_{u_{КЭ} = const}.$$

Дифференциальное входное сопротивление $r_{вх \text{ диф}}$ транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению тока базы:

$$r_{вх \text{ диф}} = \left. \frac{du_{БЭ}}{di_B} \right|_{u_{КЭ} = const} \approx \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B}.$$

2.2 Задание на проведение исследований

Выполнить исследование биполярного транзистора:

- 2.2.1 Снять входную ВАХ биполярного транзистора КТ315Б при различных температурах корпуса транзистора.
- 2.2.2 Определить обратный ток коллектора.
- 2.2.3 Снять выходную ВАХ транзистора.
- 2.2.4 Используя ВАХ транзистора и результаты измерений, определить его основные параметры: $\beta_{ст}$, β , $\alpha_{ст}$, $r_{вх \text{ диф}}$.

2.3 Порядок проведения экспериментов

- 2.3.1 Собрать схему для исследования входных ВАХ транзистора (рисунок

2.2). Транзистор 2N2712. Установить температуру транзистора равной +25°C. Изменяя напряжение источника в цепи базы в диапазоне 0 ... 1,4 В, снимать показания приборов в базовой цепи транзистора, результаты измерений заносить в таблицу 1.

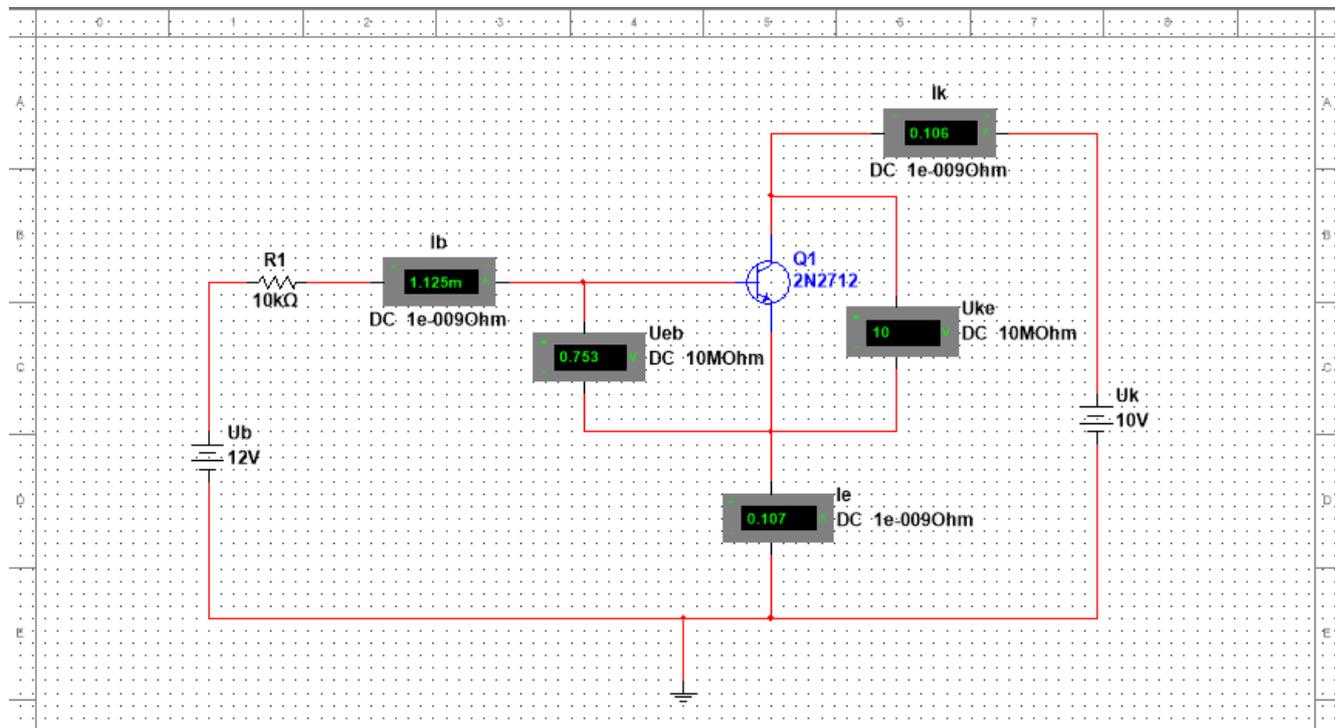


Рисунок 2.2 – Схема для исследования входных ВАХ транзистора Q2N2712

Таблица 2.1 – Результаты измерений параметров тока базы I_B в зависимости от напряжений база-эмиттер $U_{бэ}$

$U_{бэ},$ В	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
$I_B,$ мА											

По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора $I_B = f(U_{бэ})$. Сравнить полученную характеристику со справочными данными (рисунок 1).

2.3.2. Установить температуру транзистора в соответствии с вариантом индивидуального задания. Повторить измерения по п. 2.3.1. Результаты измерений занести в таблицу. По результатам измерений построить входную ВАХ транзистора, сов-

местив ее с ВАХ, построенной в п. 2.3.1.

2.3.3. По входной ВАХ (при $t^{\circ} = 25^{\circ}\text{C}$) найти сопротивление $r_{\text{вх диф}}$ при изменении напряжения $U_{\text{БЭ}}$ от 0,9 В до 0,95 В.

2.3.4. Установить напряжение источника в цепи базы равным 0 В. Включить схему. Записать результаты измерений обратного тока коллектора при данных значениях тока базы и напряжения коллектор-эмиттер.

2.3.5. Собрать схему для исследования выходной ВАХ транзистора (рисунок 2.3). Установить ток базы в соответствии с вариантом задания, изменяя параметры источника тока.

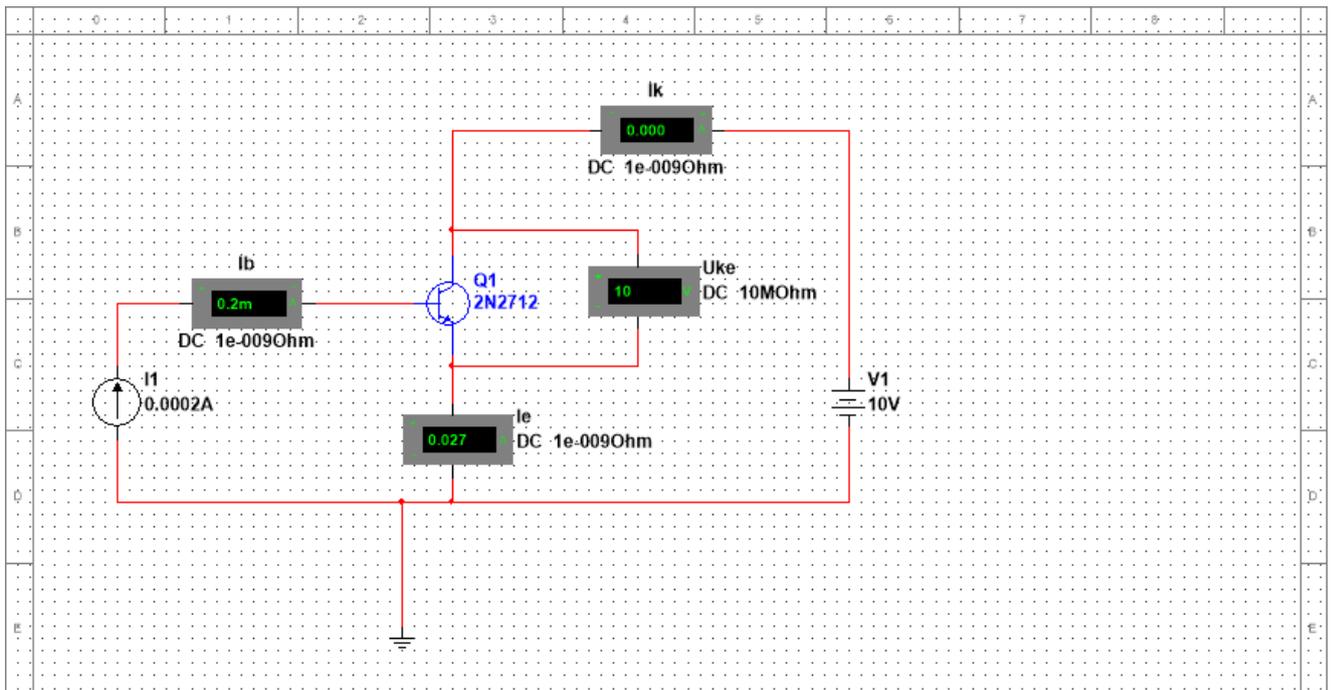


Рисунок 2.3 – Схема для исследования ВАХ заданного транзистора

Изменяя напряжение источника $U_{\text{кэ}}$, проанализировать изменение токов коллектора и эмиттера транзистора. Показания приборов занести в таблицу 2.2.

2.3.6. Построить выходную вольт-амперную характеристику транзистора $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$. Сравнить полученную характеристику со справочными данными (рисунок 2.3).

Таблица 2.2 – Показания изменения токов коллектора и эмиттера в зависимости от напряжений коллектор – эмиттер $U_{кэ}$.

$U_{кэ},$ В	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
$I_{к},$ мА												
$I_{э},$ мА												

2.3.7. Определить статические коэффициенты передачи тока базы ($\beta_{ст}$) и тока эмиттера ($\alpha_{ст}$) при $U_{кэ} = 6, 10$ и 12 В. Установить зависимость этих коэффициентов от напряжения $U_{кэ}$.

Проверить выполнение равенств

$$I_{к} = \alpha_{ст} I_{э} + I_{кБ0},$$

$$I_{э} = I_{к} + I_{Б},$$

при $U_{кэ} = 10$ В.

2.3.8. По выходной ВАХ определить дифференциальное выходное сопротивление транзистора при изменении напряжения $U_{кэ}$ от 6 до 8 В.

Сформулировать выводы о проделанной работе.

2.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 2.3.1 ... 2.3.8;
- выводы о проделанной работе;
- результаты оформить в рабочей тетради.

2.5 Контрольные вопросы

- 1 От чего зависит ток коллектора транзистора.
- 2 Зависит ли коэффициент $\beta_{ст}$ от тока коллектора. Если да, то в какой степени. Обосновать ответ.
- 3 На выходной ВАХ транзистора показать область насыщения и область отсечки коллекторного тока.
- 4 Что такое токи утечки транзистора в режиме отсечки.
- 5 Что можно сказать по выходным характеристикам о зависимости тока коллектора от тока базы и напряжения коллектор-эмиттер.
- 6 Что можно сказать по входной характеристике о сходстве или различии между базо-эмиттерным переходом и диодом, смещенным в прямом направлении.
- 7 Одинаково ли значение $r_{вх\ диф}$ в любой точке входной характеристики.
- 8 Как подключается источник напряжения к переходам база-эмиттер и база-коллектор.

Таблица 2.3 – Варианты индивидуальных заданий

№№ п/п	$t^{\circ}C$	$I_{Б},$ мА	№№ п/п	$t^{\circ}C$	$I_{Б},$ мА	№№ п/п	$t^{\circ}C$	$I_{Б},$ мА
1	-60	0,05	11	10	0,05	21	80	0,05
2	-55	0,1	12	15	0,1	22	85	0,1
3	-50	0,15	13	35	0,15	23	90	0,15
4	-45	0,2	14	40	0,2	24	95	0,2
5	-40	0,25	15	45	0,25	25	100	0,25
6	-35	0,3	16	50	0,3	26	105	0,3
7	-30	0,35	17	55	0,35	27	110	0,35
8	-25	0,4	18	60	0,4	28	115	0,4
9	-20	0,45	19	65	0,45	29	120	0,45
10	-15	0,5	20	70	0,5	30	125	0,5

3 Лабораторная работа №3 Исследование биполярного транзистора графо – аналитическим методом

Цель работы:

- 1 Закрепление теоретических знаний в области исследований биполярных транзисторов.
- 2 Формирование практических умений и навыков расчета параметров транзисторов и работы в программном пакете Multisim.
- 3 Закрепление практических навыков самостоятельного решения инженерных задач, развитие творческих способностей студентов и умений пользоваться технической, нормативной и справочной литературой.

3.1 Теоретическая часть

Исследуемая схема показана на рисунке 3.1. Статический коэффициент передачи транзистора по постоянному току определяется как отношение тока коллектора I_K к току базы I_B :

$$\beta_{DC} = I_K / I_B.$$

Статический коэффициент передачи транзистора по переменному току определяется как отношение приращения тока коллектора I_K к приращению тока базы I_B :

$$\beta_{AC} = \Delta I_K / \Delta I_B.$$

Выходными статическими характеристиками транзистора, включенного с ОЭ, является семейство характеристик

$$I_K = f(U_{KЭ}), \text{ при } I_B = \text{const.}$$

Входными статическими характеристиками транзистора, включенного с ОЭ, является семейство характеристик

$$I_B = f(U_{БЭ}), \text{ при } U_{KЭ} = \text{const.}$$

Дифференциальное входное сопротивление $R_{ВХ}$ транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер $U_{KЭ}$. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению тока базы:

$$R_{ВХ} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B = (U_{БЭ2} - U_{БЭ1}) / (I_{Б2} - I_{Б1}).$$

Дифференциальное входное сопротивление транзистора $R_{ВХ}$ в схеме с ОЭ через параметры транзистора определяется следующим выражением:

$$R_{ВХ} = R_B + \beta * R_Э,$$

где R_B - распределенное сопротивление базовой области полупроводника, $R_Э$ - дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер, определяемое из выражения: $R_Э = 25/I_Э$, где $I_Э$ - постоянный ток эмиттера в миллиамперах.

Первое слагаемое R_B в выражении много меньше второго, поэтому им можно пренебречь:

$$R_{ВХ} = \beta * R_Э.$$

Дифференциальное сопротивление $R_Э$ перехода база-эмиттер для биполярного транзистора сравнимо с дифференциальным входным

сопротивлением $R_{ВХ}$ транзистора в схеме с общей базой, которое определяется при фиксированном значении напряжения база-коллектор $U_{БК}$. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения $U_{БК}$ к вызванному им приращению тока эмиттера $I_{Э}$:

$$R_{ВХОБ} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_{Э} = (U_{БЭ2} - U_{БЭ1}) / (I_{Э2} - I_{Э1}).$$

Через параметры транзистора это сопротивление определяется выражением:

$$R_{ВХОБ} = R_{Б} / \beta + R_{Э}.$$

Первым слагаемым в выражении можно пренебречь, поэтому можно считать, что дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер приблизительно равно:

$$R_{ВХОБ} = R_{Э}.$$

В режиме отсечки полярности и значения напряжений $U_{КЭ}$ и $U_{БЭ}$ таковы, что коллекторный и эмиттерный переходы смещены в обратном направлении. В этом случае через эмиттерный переход проходит обратный ток $I_{ЭБО}$, а через коллекторный переход – ток $I_{КБО}$. Во входной цепи проходит ток базы

$$I_{Б} = I_{ЭБО} + I_{КБО}.$$

3.2 Задание на проведение исследований

В соответствии с номером варианта:

- 3.2.1 Выполнить анализ зависимости коэффициента усиления по постоянному току от тока коллектора.
- 3.2.2 Исследовать работу биполярного транзистора в режиме отсечки.
- 3.2.3 Получить входные и выходные характеристики транзистора.

- 3.2.4 Определить коэффициент передачи по переменному току.
- 3.2.5 Исследовать динамические входные сопротивления транзистора.
- 3.2.6 Рассчитать коэффициенты усиления по току, напряжению, мощности (K_i , K_u , K_p).
- 3.2.7 Вычислить КПД транзистора.

3.3 Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Определение статического коэффициента передачи транзистора по постоянному току β_{DC} в схеме с ОЭ.

Собрать схему, изображенную на рисунке 3.1 с моделью транзистора, соответствующей варианту задания. Включить схему. Записать результаты измерения тока коллектора I_K , тока базы I_B и напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ в таблицу 1 раздела "Результаты экспериментов". Подобрать значения E_b и E_k таким образом, чтобы транзистор работал в усилительном режиме (рабочая точка находится нагрузочной прямой). По полученным результатам подсчитать статический коэффициент передачи тока β_{DC} транзистора. Повторить измерения и расчет коэффициента передачи для значений E_b . Результаты занести в таблицу.

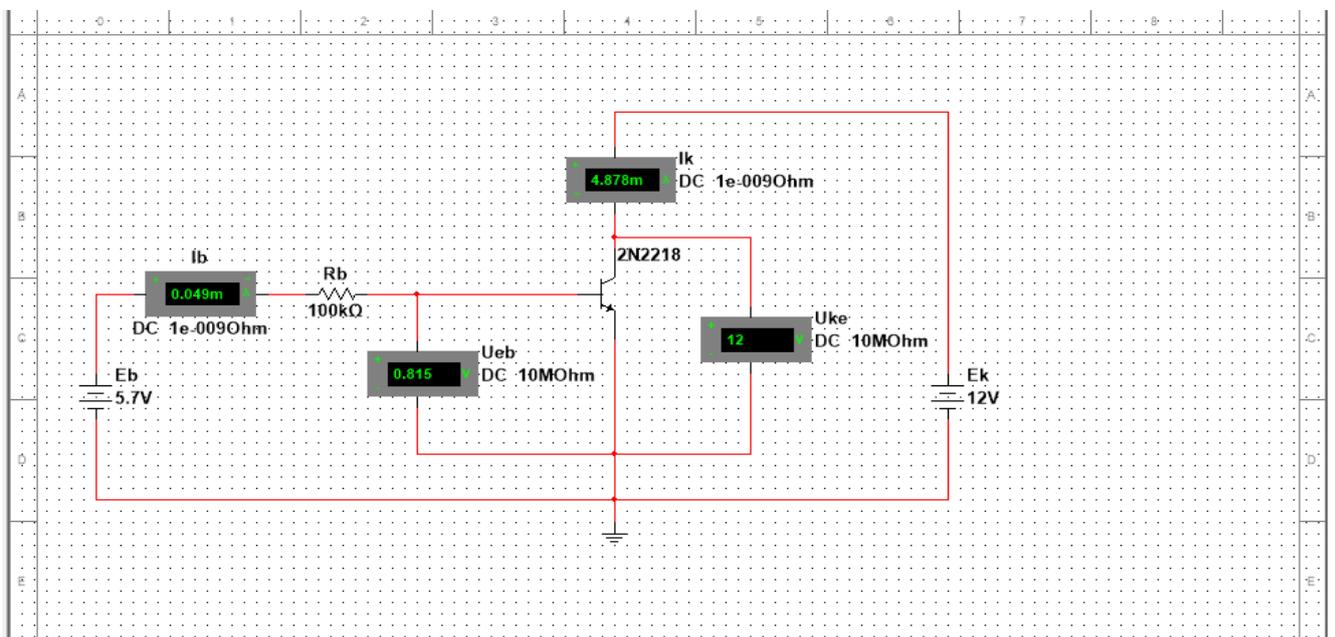


Рисунок 3.1- Схема включения биполярного транзистора с ОЭ

Эксперимент 2. Измерение обратного тока коллектора.

На схеме рисунок 1 изменить номинал источника ЭДС $E_b = 0$ В. Включить схему. Записать результаты измерения тока коллектора I_K для данных значений тока базы I_B и напряжения коллектор-эмиттер $U_{KЭ}$ в раздел "Результаты экспериментов".

Эксперимент 3. Получение выходной характеристики транзистора в схеме с ОЭ.

а) В схеме (рисунок 3.1) провести измерения тока коллектора I_K для каждого значения E_K и E_b и заполнить таблицу 3.2 в разделе "Результаты экспериментов". По данным таблицы построить семейство выходных характеристик транзистора с ОЭ, график зависимости I_K от E_K , при различных значениях тока базы I_B .

б) Собрать схему, изображенную на рисунке 3.2.

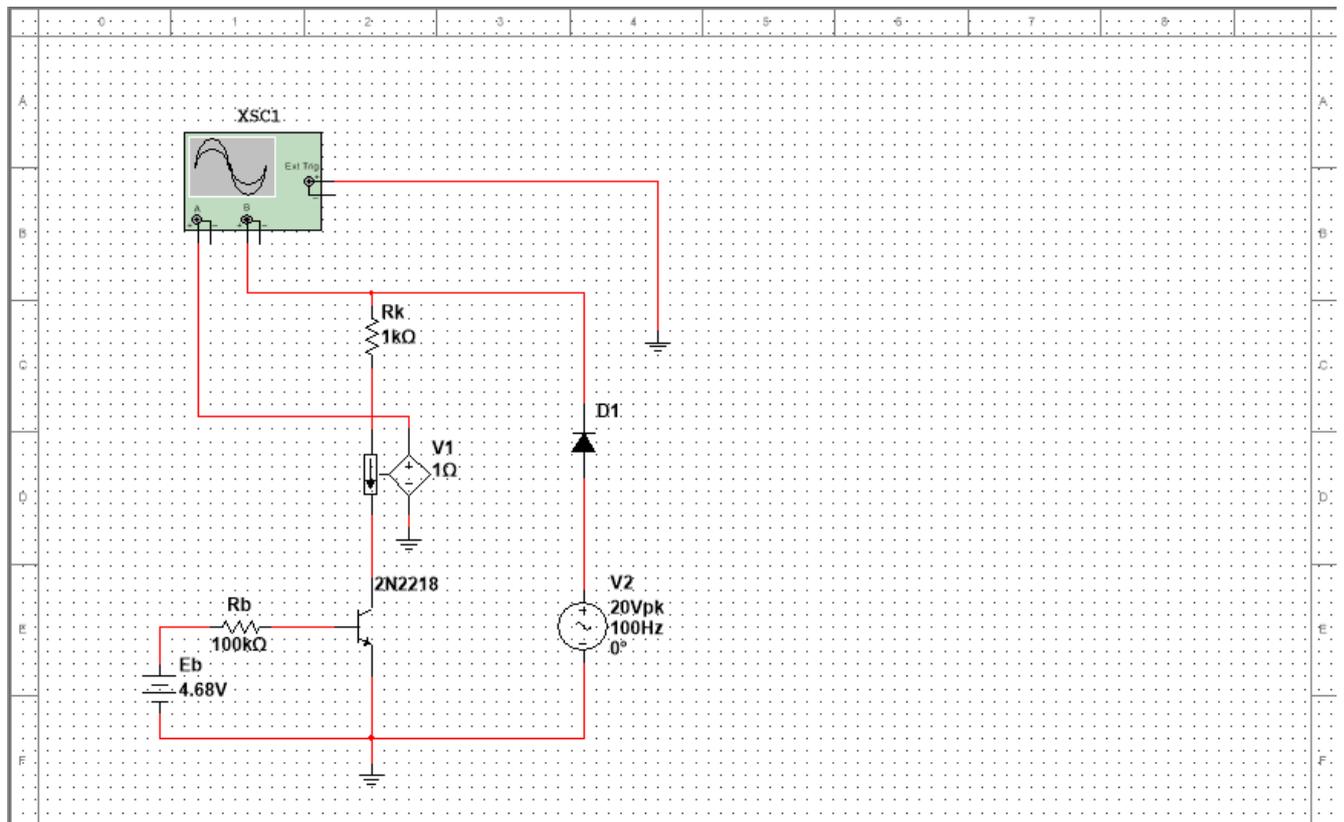


Рисунок 3.2 – Схема для получения выходных характеристик транзистора с ОЭ

в) Открыть файл со схемой, изображенной на рисунке 3.3. Включить схему. Зарисовать входную характеристику транзистора, соблюдая масштаб, в разделе "Результаты экспериментов".

г) По входной характеристике найти сопротивление $R_{вх}$ при изменении базового тока с 10мА до 30 мА . Результат записать в раздел "Результаты экспериментов".

Результаты экспериментов

Эксперимент 1. Определение коэффициента передачи транзистора по постоянному току.

Таблица 3.1 – Параметры для определения коэффициента передачи транзистора по постоянному току

E_b (В)	I_B (мкА)	$U_{кэ}$ (В)	I_K (мА)	β_{DC}
2.68				
5.00				
5.70				

Эксперимент 2. Исследование работы биполярного транзистора в режиме отсечки: $I_B=0$; $U_{кэ}=10,0$; $I_K=10,0$.

Эксперимент 3. Получение выходной характеристики транзистора в схеме с ОЭ.

Таблица 3.5 – Параметры для построения выходной ВАХ транзистора

		E_K (В)					
E_b (В)	I_B (μА)	0.1	0.5	1	5	10	20
1.66							
2.68							

3.68							
4.68							
5.7							

3.3.1 График выходной характеристики транзистора.

3.3.2 Осциллограммы выходных характеристик транзистора для разных токов базы.

3.3.3 Коэффициент передачи транзистора по переменному току β_{AC} (расчет по результатам измерений).

Эксперимент 4. Получение графика входной характеристики транзистора.

Таблица 3.6 – Параметры для построения входной ВАХ транзистора

E_b (В)	I_B (мкА)	$U_{БЭ}$ (мВ)	I_K (мА)
1.66			
2.68			
3.68			
4.68			
5.7			

3.3.4 График входной характеристики транзистора.

3.3.5 Осциллограмма входной характеристики транзистора.

3.3.6 Сопротивление $R_{ВХ}$ при изменении базового тока с 10мА до 30 мА.

Сделать выводы по каждому разделу.

3.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 3.3.1 ... 3.3.6;
- выводы о проделанной работе;

– результаты оформить в рабочей тетради.

3.5 Контрольные вопросы

1. От чего зависит ток коллектора транзистора.
2. Что такое токи утечки транзистора в режиме отсечки.
3. Что можно сказать по выходным характеристикам о зависимости тока коллектора от тока базы и напряжения коллектор-эмиттер.
4. Что можно сказать по входной характеристике о различии между базо-эмиттерным переходом и диодом, смещенном в прямом направлении.
5. Одинаково ли значение $R_{вх}$ в любой точке входной характеристики.
6. Одинаково ли значение $R_{э}$ при любом значении тока эмиттера.
7. Как отличается практическое значение сопротивления $R_{э}$ от вычисленного по формуле.

Таблица 3.7 – Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Модель транзистора n-p-n	Номер варианта	Модель транзистора n-p-n
1	2	3	4
1	2N4058	16	BD239
2	MPQ200	17	BC107
3	ST5771-1	18	BC182
4	MPS3703	19	BFS17
5	PN200	20	D40D1
6	PN4142	21	JC546
7	Q2N036	22	MPS2222
8	PE8550	23	BC107BP
9	TN4033	24	ZTX869
10	NSD203	25	YTS3904

1	2	3	4
11	TIS91	26	Q2PC945
12	2N2218	27	TN2219A
13	2N3904	28	Q2N956
14	MPS3904	29	Q2N3451
15	QNL	30	Q2N3451

4 Лабораторная работа № 4 Исследование резисторного усилительного каскада

Цель работы:

1. Освоение методики экспериментального определения основных показателей и характеристик усилительного каскада.
2. Исследование зависимости показателей и характеристик усилительного каскада от параметров элементов схемы.

4.1 Теоретическая часть

Усилителем электрических сигналов называют устройство, предназначенное для усиления входного электрического колебания по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания. Усилитель может состоять из одного или нескольких усилительных каскадов. При этом усилительным каскадом называют минимальную часть усилителя, содержащую один (реже – два) активный элемент и сохраняющую функции усилителя.

Одним из наиболее важных параметров усилителя является коэффициент усиления. В зависимости от типа усиливаемой величины, различают коэффициенты усиления напряжения K_U , тока K_I и мощности K_P .

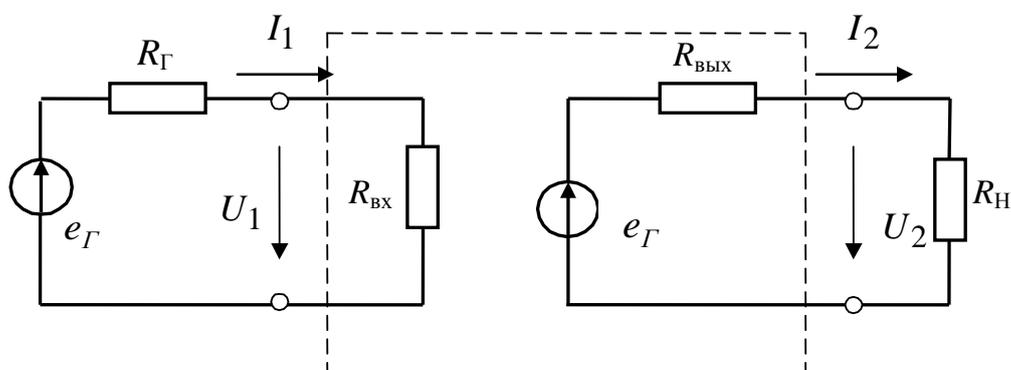


Рисунок 4.1 – Представление усилителя в виде четырехполюсника

Коэффициентом усиления напряжения усилителя называется отношение амплитудных или действующих значений выходного и входного напряжений (рисунк 4.1):

$$K_U = U_{m \text{ вых}} / U_{m \text{ вх}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = U_2 / U_1.$$

Коэффициент усиления напряжения (как, впрочем, и остальные коэффициенты усиления) определяется в установившемся режиме при гармоническом (синусоидальном) входном сигнале (при этом частота испытательного сигнала, как правило, выбирается в пределах полосы пропускания усилителя). На практике используется наиболее часто.

Коэффициентом усиления тока усилителя называется отношение амплитудных или действующих значений выходного и входного токов:

$$K_I = I_{m \text{ вых}} / I_{m \text{ вх}} = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} = I_2 / I_1.$$

Он используется реже, так как для измерения токов требуется осуществлять разрыв цепей, что трудоемко.

Отношение мощности усиленного колебания в нагрузке к мощности, подаваемой на вход, называется коэффициентом усиления мощности

$$K_P = P_H / P_{\text{вх}}.$$

Все три коэффициента усиления взаимосвязаны очевидными соотношениями:

$$K_P = K_I K_U,$$

$$K_I = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2 R_{\text{вх}}}{R_H U_1} = K_U \frac{R_{\text{вх}}}{R_H}.$$

Если усилитель состоит из нескольких усилительных каскадов, то общий коэффициент усиления усилителя определяется как произведение коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K_{общ} = K_1 K_2 \dots K_n,$$

где n – количество последовательно соединенных каскадов.

На практике при определении коэффициентов усиления часто используется логарифмическая единица – децибел. В этом случае связь между коэффициентами усиления, выраженными в относительных и логарифмических единицах, устанавливается следующим образом:

- коэффициент усиления мощности

$$K_P, [\text{дБ}] = 10 \lg K_P, \quad K_P = 10^{\frac{K_P, [\text{дБ}]}{10}};$$

- коэффициент усиления напряжения

$$K_U, [\text{дБ}] = 20 \lg K_U, \quad K_U = 10^{\frac{K_U, [\text{дБ}]}{20}};$$

- коэффициент усиления тока

$$K_I, [\text{дБ}] = 20 \lg K_I, \quad K_I = 10^{\frac{K_I, [\text{дБ}]}{20}}.$$

Логарифмические единицы удобны тем, что позволяют перемножение коэффициентов усиления заменить сложением, то есть

$$K_{общ}, [\text{дБ}] = K_1, [\text{дБ}] + K_2, [\text{дБ}] + \dots + K_n, [\text{дБ}].$$

Любой усилительный каскад содержит реактивные элементы (разделительные и блокировочные конденсаторы, емкости p - n -переходов активных элементов и др.), поэтому его входное и выходное сопротивления, в общем случае, являются комплексными величинами. В определенном диапазоне частот входного сигнала сопротивлением реактивных элементов можно пренебречь ввиду его малости, тогда амплитуда напряжения на выходе усилителя будет определяться только усилительными свойствами каскада и параметрами входного сигнала и не будет зависеть от частоты входного сигнала. Однако вне названного диапазона частот, где влиянием реактивных сопротивлений нельзя пренебрегать, будет наблюдаться существенная зависимость выходного напряжения каскада от частоты входного сигнала.

Предположим, что на вход усилителя поступает сигнал, действующее значение напряжения которого в комплексной форме равно $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_1(\omega)}$. В результате усиления на нагрузке усилителя появляется напряжение $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2(\omega)}$. Тогда комплексный коэффициент усиления напряжения равен

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j[\varphi_2(\omega) - \varphi_1(\omega)]} = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}.$$

В полученном выражении модуль комплексного коэффициента усиления напряжения $K(\omega)$ называется коэффициентом усиления напряжения усилителя. Зависимость K от частоты получила название амплитудно-частотной (кратко – частотной) характеристики (АЧХ) усилителя. На рисунке 4.2 показан вид типовой АЧХ усилителя. В качестве аргумента функции вместо угловой частоты ω взята текущая частота f ($f = \frac{\omega}{2\pi}$). Для АЧХ типичным является наличие так называемой области средних частот, в которой K почти не зависит от частоты и обозначается K_0 . Его иногда называют номинальным коэффициентом усиления.

Часто на АЧХ по вертикальной оси используют относительный масштаб, откладывая нормированное усиление $y = K / K_0$, т. е. коэффициент усиления, отнесенный к его значению на средних частотах. Такая АЧХ $y(\omega)$ или $y(f)$ называется нормированной.

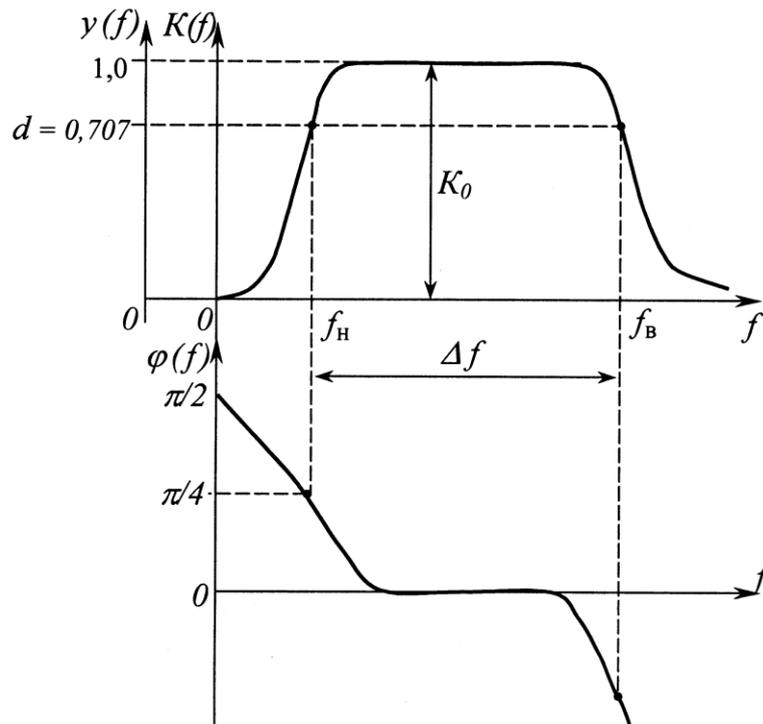


Рисунок 4.2 – АЧХ и ФЧХ усилителя

На нижних и верхних (низших и высших) частотах АЧХ обычно спадает. Частоты, на которых коэффициент усиления уменьшается относительно своего значения на средних частотах в $\sqrt{2}$ раз, называются граничными частотами усилителя: f_H (ω_H) и f_B (ω_B) – соответственно нижняя и верхняя граничные частоты. При использовании логарифмического представления коэффициента усиления, его уменьшению в $\sqrt{2}$ раз соответствует спад АЧХ в области нижних и верхних частот на 3 дБ.

Диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления напряжения усилителя уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз (не более, чем на 3 дБ), называется полосой пропускания усилителя.

Вследствие спада усиления на краях полосы пропускания не все спек-

тральные составляющие сложного колебания усиливаются в одинаковое число раз. Это приводит к искажениям его формы, которые называются частотными искажениями.

Зависимость фазового сдвига $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, вносимого усилителем в усиливаемый сигнал, от частоты называется его фазочастотной (кратко – фазовой) характеристикой. Типовая ФЧХ усилителя представлена в нижней части рисунка 4.2.

Из рисунка 4.2 видно, что в области средних частот сдвиг фаз между выходным и входным колебаниями в усилителе равен нулю, то есть ФЧХ не зависит от частоты. В области нижних частот выходное колебание опережает по фазе входное, а в области верхних частот – отстает, то есть вне полосы пропускания усилителя ФЧХ существенно зависит от частоты входного колебания. Из теории цепей известно, что если фазочастотная характеристика (ФЧХ) четырехполюсника не является прямой, исходящей из начала координат, то время прохождения через него различных спектральных составляющих сложного колебания различно. Это приводит к искажениям его формы, которые называются фазовыми.

Частотные и фазовые искажения называются линейными, так как создаются емкостями и индуктивностями схемы, которые являются линейными элементами. Они искажают форму лишь сложного колебания, а форму гармонического (синусоидального) колебания не изменяют. Линейные искажения не приводят к появлению новых составляющих в спектре сигнала. Они вызывают лишь изменение соотношения амплитуд и фаз между отдельными спектральными составляющими.

Амплитудной характеристикой (АХ) усилителя называется зависимость установившегося значения выходного напряжения от напряжения, подаваемого на вход усилителя (рисунок 4.3). Снимают амплитудные характеристики усилителей при синусоидальном входном сигнале для одной из частот, лежащих в пределах полосы пропускания.

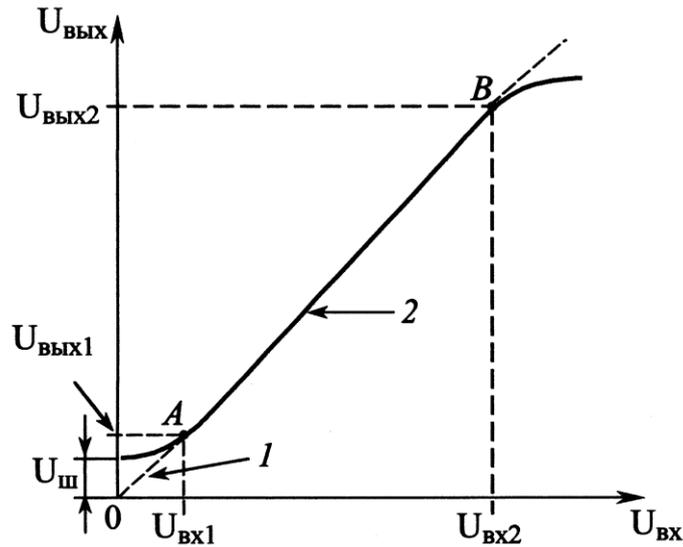


Рисунок 4.3 – Амплитудная характеристика усилителя

Отношение выходного и входного напряжений равно коэффициенту усиления K . Поэтому амплитудная характеристика, казалось бы, должна быть прямой линией, исходящей из начала координат. Однако в действительности она совпадает с этой прямой только в средней части, на участке AB .

Начальный участок AX отклоняется от прямой из-за наличия на выходе усилителя напряжения собственных помех $U_{ш}$. Верхний загиб AX обусловлен наступлением перегрузки одного из каскадов усилителя, чаще всего окончного, в результате чего начинается ограничение выходного колебания. Чтобы усиливаемый сигнал не искажался при прохождении через усилитель, необходимо, чтобы его значения находились в диапазоне от $U_{вх1}$ до $U_{вх2}$. Использование верхнего криволинейного участка характеристики приводит к нелинейным искажениям.

Как видно из рисунка 4.3, при изменении входного напряжения в пределах от $U_{вх1}$ до $U_{вх2}$ усилитель можно считать линейным устройством, для которого существует линейная зависимость между приростами входного и выходного напряжений. Таким образом, АХ дает возможность определить пределы изменения $U_{вх}$, для которых усилитель с необходимой точностью можно

рассматривать как линейное устройство.

Отношение наибольшего входного напряжения усилителя к наименьшему в пределах линейной части амплитудной характеристики называется динамическим диапазоном D усилителя:

$$D = \frac{U_{вх2}}{U_{вх1}}.$$

Обычно его выражают в децибелах: $D, [\text{дБ}] = 20 \lg \frac{U_{вх2}}{U_{вх1}}.$

Типовая схема резисторного усилительного каскада на биполярном транзисторе $p-n-p$ -типа, включенном по схеме с ОЭ, приведена на рисунке 4.4.

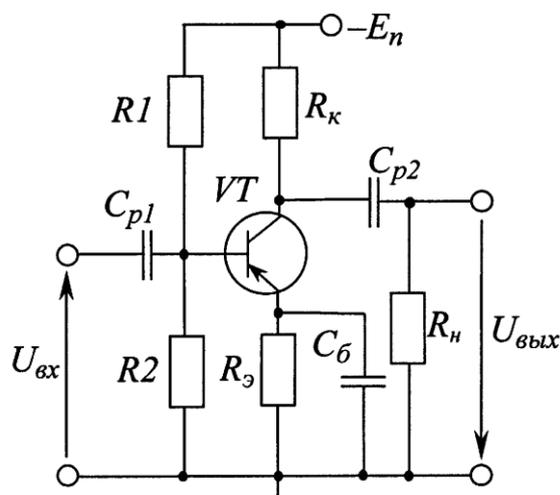


Рисунок 4.4 – Усилительный каскад с общим эмиттером

Схема содержит входную цепь, состоящую из резисторов R_1 и R_2 , задающих положение исходной рабочей точки (ИРТ) для режима A работы транзистора, и емкости C_{p1} , обеспечивающей гальваническую развязку между источником входного сигнала $U_{вх}$ и входом усилителя.

Управляемый источник тока выполнен на биполярном транзисторе VT с коллекторной нагрузкой R_k . В эмиттерную цепь транзистора включен резистор $R_э$, выполняющий роль элемента цепи отрицательной обратной связи (ООС)

по постоянному току. Наличие цепи ООС повышает температурную стабильность каскада и снижает влияние на работу каскада флуктуаций напряжения питания. Действие цепи ООС проявляется только на постоянном токе, поскольку по переменному току эмиттер транзистора соединен с землей (общим проводом) через блокировочный конденсатор C_{δ} . Входное переменное напряжение подается на базу транзистора через разделительный конденсатор C_{p1} . С выхода усилителя в нагрузку усиленное переменное напряжение подается через разделительный конденсатор C_{p2} .

Все конденсаторы в схеме выбираются так, чтобы для переменного тока в пределах полосы пропускания усилителя их сопротивление было незначительным.

При аналитическом расчете основных параметров усилительного каскада коэффициент усиления напряжения может быть вычислен по формуле

$$K = \frac{-U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{-I_{\text{вх}} h_{21} \Delta R_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}} R_{\text{вх}}} = \frac{-h_{21} \Delta (R_{\text{к экв}})}{R_2 + h_{11} \Delta \left(1 + \frac{R_2}{R_{\delta \text{ экв}}}\right)},$$

где $R_{\delta \text{ экв}}$ – эквивалентное сопротивление базового делителя, которое может быть определено по формуле

$$R_{\delta \text{ экв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$$

$R_{\text{к экв}}$ – эквивалентное сопротивление коллекторной нагрузки транзистора, равное

$$R_{\text{к экв}} = \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}};$$

$h_{21Э} = \beta$ - коэффициент передачи тока базы транзистора;

$h_{11Э} = r_б + r_э(1 + h_{21Э})$ – входное сопротивление транзистора;

$r_э = \frac{25 \text{ мВ}}{I_э}$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;

$r_б \approx \frac{r_э}{1-\alpha}$ - омическое сопротивление базовой области;

$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$ - статический коэффициент передачи тока эмиттера.

В приведенной формуле для расчета коэффициента усиления знак « \rightarrow » указывает на то, что каскад с ОЭ меняет фазу входного сигнала на противоположную.

Если внутреннее сопротивление источника сигнала очень мало ($R_с \rightarrow 0$), то коэффициент усиления может быть вычислен по упрощенной формуле

$$K \approx \frac{-h_{21Э}(R_{к экв})}{h_{11Э}}.$$

4.2 Задание на проведение исследований

4.2.1 Исследовать влияние положения исходной рабочей точки на нелинейные искажения сигнала.

4.2.2 Исследовать влияние амплитуды входного сигнала на нелинейные искажения выходного сигнала.

4.2.3 Исследовать влияние сопротивления нагрузки и емкости разделительных и блокировочных конденсаторов на коэффициент усиления напряжения.

4.2.4 Исследовать влияние емкостей конденсаторов на АЧХ и ФЧХ усилительного каскада.

4.2.5 Снять амплитудную характеристику каскада и определить динамический диапазон усилителя.

4.3 Порядок проведения экспериментов

4.3.1 Собрать схему лабораторной установки, приведенную на рисунке 4.5.

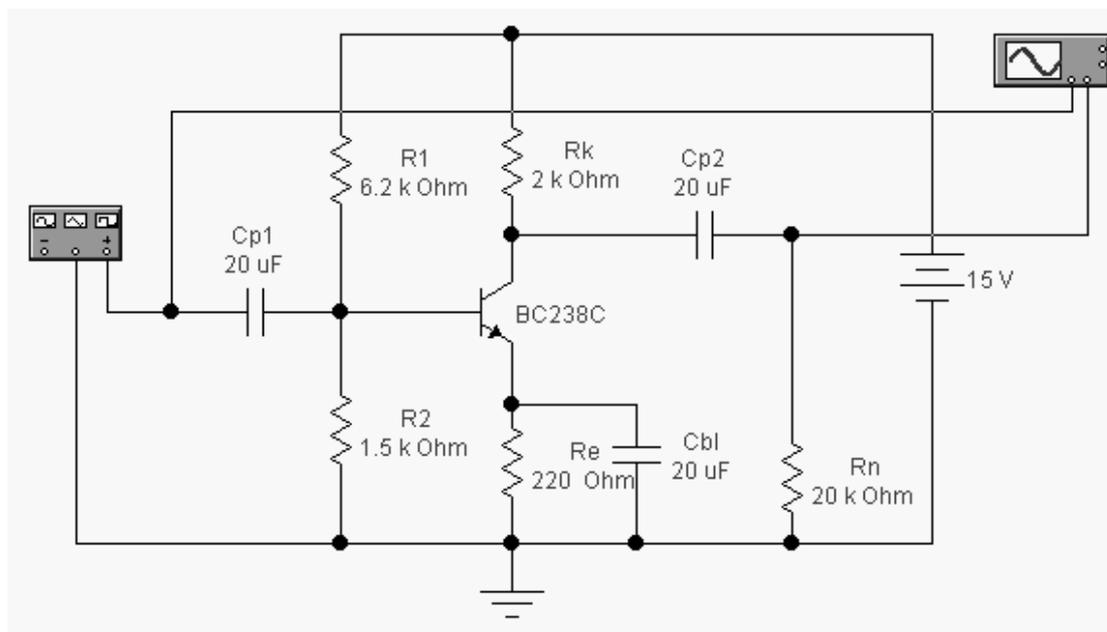


Рисунок 4.5 – Схема электронного усилителя

4.3.2 Установить амплитуду входного сигнала равной $U_{вх} = 10$ мВ, а частоту – $f_c = 1$ кГц. Измерить амплитуду сигнала на сопротивлении нагрузки R_N . Определить коэффициент усиления напряжения усилителя.

Включить амперметр в эмиттерную цепь усилительного каскада и настроить его для измерения постоянного тока (режим DC). Измерить ток в цепи эмиттера. Используя аналитические выражения и данные о параметрах элементов схемы вычислить коэффициент усиления напряжения каскада. Сравнить результаты вычислений с ранее полученным результатом.

4.3.3 Изменяя сопротивление резистора R_1 (6,2 кОм; 4,7 кОм; 4,2 кОм; 3,9

кОм; 3,3 кОм), следить за изменениями формы сигнала на нагрузке. Зафиксировать значение сопротивления, при котором возникают нелинейные искажения выходного сигнала. Занести в отчет изображение экрана осциллографа при отсутствии и при наличии нелинейных искажений (два крайних случая).

Восстановить номинал резистора R_1 равным 6,2 кОм.

Сформулировать вывод о влиянии положения исходной рабочей точки на нелинейные искажения сигнала.

4.3.4 Увеличивая амплитуду входного сигнала (10 мВ; 20 мВ; 30 мВ; 50 мВ; 150 мВ; 300 мВ), следить за изменениями формы сигнала на нагрузке. Зафиксировать значение амплитуды входного сигнала, при котором возникают нелинейные искажения выходного сигнала. Занести в отчет изображение экрана осциллографа при наличии нелинейных искажений (при первой фиксации искажений сигнала и при $U_{вх} = 300$ мВ).

Восстановить амплитуду входного сигнала равной $U_{вх} = 10$ мВ.

Сформулировать вывод о влиянии амплитуды входного сигнала на нелинейные искажения сигнала.

4.3.5 Поочередно изменяя сопротивление нагрузки R_H , емкость разделительного конденсатора C_{p2} , емкость блокировочного конденсатора $C_{бл}$, измерять с помощью осциллографа амплитуду выходного сигнала. Результаты измерений занести в соответствующую таблицу (таблицы 4.1 – 4.3).

Таблица 4.1 - Результаты эксперимента

R_H , кОм	0,1	1	10	20	50	100	200
$U_{вых}$, мВ							

Таблица 4.2 - Результаты эксперимента

C_{p2} , мкФ	0,001	0,01	0,1	1	10	20	100
$U_{вых}$, мВ							

Таблица 4.3 - Результаты эксперимента

$C_{\text{бл}}, \text{ мкФ}$	0,001	0,01	0,1	1	10	20	100
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$							

ПРИМЕЧАНИЕ: Начиная исследования по каждому из элементов схемы, восстановить исходное значение двух других элементов.

Вычислить значение коэффициента усиления напряжения. Сформулировать выводы.

Восстановить исходные значения всех элементов схемы.

4.3.6 Изменяя амплитуду входного сигнала, с помощью осциллографа измерять амплитуду сигнала на нагрузке. Результаты заносить в таблицу 4.4.

По результатам измерений построить амплитудную характеристику усилительного каскада.

Определить динамический диапазон усилителя.

Сформулировать выводы.

Таблица 4.4 - Результаты эксперимента

$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$	0	10	20	50	100	150	200	300
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$								

4.3.7 К схеме лабораторной установки подключить измеритель АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter), как показано на рисунке 4.6.

Изменяя поочередно емкости конденсаторов C_{p2} и $C_{\text{бл}}$ (по данным таблиц 4.2 и 4.3), оценить, какое влияние они оказывают на АЧХ и ФЧХ усилительного каскада. Определить полосу пропускания каскада для каждого случая, результаты занести в таблицы 4.5, 4.6. Поместить в отчет два изображения АЧХ и два изображения ФЧХ.

Сформулировать выводы о проделанной работе.

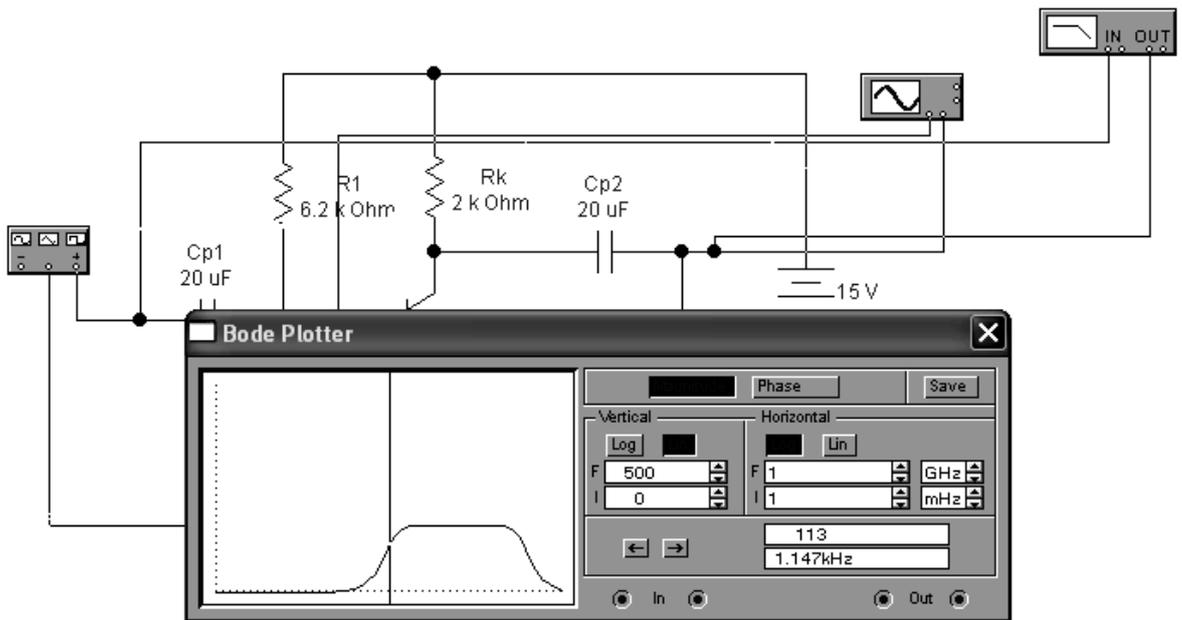


Рисунок 4.6 – Схема лабораторной установки

Таблица 4.5 - Результаты эксперимента

C_{p2} , мкФ	0,001	0,01	0,1	1	10	20	100
П, кГц							

Таблица 4.6 - Результаты эксперимента

C_{bl} , мкФ	0,001	0,01	0,1	1	10	20	100
П, кГц							

4.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 4.3.1 ... 4.3.6;
- выводы о проделанной работе;
- результаты оформить в рабочей тетради.

4.5 Контрольные вопросы

1. Что называется электронным усилителем.
2. Перечислить основные параметры усилителя. Дать им определение.
3. Записать выражение для комплексного коэффициента усиления напряжения.
4. Что называется амплитудно-частотной характеристикой усилителя. Привести график типовой АЧХ усилителя переменного тока.
5. Что называется фазочастотной характеристикой усилителя. Привести график типовой ФЧХ усилителя.
6. Что называется амплитудной характеристикой усилителя.
7. Что называется обратной связью, цепью обратной связи.
8. Привести классификацию видов ОС.
9. Как влияют различные виды ООС на параметры и характеристики усилителя.
10. Какой режим работы транзистора называется статическим, динамическим.
11. Что называется рабочей точкой, исходной рабочей точкой на ВАХ активного элемента.
12. Что называется нагрузочной прямой. Как построить нагрузочную прямую постоянного тока, переменного тока.
13. Пояснить сущность режимов работы транзистора класса *A*, *B*, *AB*.
14. Как выбирают положение исходной рабочей точки при работе транзистора в режиме класса *A*.
15. Как влияет положение исходной рабочей точки на нелинейные искажения сигнала.
16. Как влияет амплитуда входного сигнала на нелинейные искажения сигнала на выходе усилителя.
17. Как влияют емкости разделительных и блокировочных конденсаторов на полосу пропускания усилителя.
18. Привести схему, пояснить достоинства и недостатки, назвать основные

параметры каскада с ОЭ.

19. Привести схему, пояснить достоинства и недостатки, назвать основные параметры каскада с ОБ.
20. Привести схему, пояснить достоинства и недостатки, назвать основные параметры каскада с ОК.
21. Привести схему, пояснить достоинства и недостатки, назвать основные параметры дифференциального усилительного каскада.
22. Привести схему и пояснить особенности функционирования двухтактного оконечного каскада.
23. Пояснить особенности построения усилителей постоянного тока.
24. Пояснить назначение и особенности схемотехники источников эталонного напряжения и тока.
25. Пояснить особенности построения цифровых и аналоговых ключей на биполярных транзисторах.

Таблица 4.7 – Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Модель транзистора n-p-n	Номер варианта	Модель транзистора n-p-n
1	2N4058	16	BD239
2	MPQ200	17	BC107
3	ST5771-1	18	BC182
4	MPS3703	19	BFS17
5	PN200	20	D40D1
6	PN4142	21	JC546
7	Q2N036	22	MPS2222
8	PE8550	23	BC107BP
9	TN4033	24	ZTX869
10	NSD203	25	YTS3904
11	TIS91	26	Q2PC945
12	2N2218	27	TN2219A
13	2N3904	28	Q2N956
14	MPS3904	29	Q2N3451
15	QNL	30	Q2N3451

5 Лабораторная работа № 5 Исследование характеристик операционного усилителя

Цель работы:

Освоение методики экспериментального определения основных характеристик операционного усилителя.

5.1 Теоретическая часть

Операционный усилитель (ОУ) – это унифицированный многокаскадный усилитель постоянного тока, как правило, выполненный в виде интегральной микросхемы. Он успешно применяется как при решении многих технических задач (усиление и преобразование сигналов, стабилизация напряжения и тока и т. п.), так и при выполнении математических операций с аналоговыми сигналами (суммирование, вычитание, дифференцирование, интегрирование и т. д.).

На ранних этапах развития вычислительной техники ОУ использовались в аналоговых вычислительных машинах для выполнения математических операций с сигналами, откуда и появилось его наименование операционный (решающий) усилитель.

Основные параметры ОУ должны удовлетворять ряду требований, как в отношении электрических характеристик, так и в отношении его конструктивного выполнения.

Требования к электрическим характеристикам ОУ связаны, в основном, с необходимостью обеспечить:

- высокий коэффициент усиления по напряжению;
- большое входное и малое выходное сопротивления;
- линейность передаточной характеристики;
- высокую верхнюю граничную частоту пропускания.

Требования к конструктивному исполнению ОУ сводятся к следующим особенностям его конструкции:

- наличие двух автономных входов 1 и 2 (рисунок 5.1) с общей точкой, соединенной с массой усилителя;
- выполнению одного из входов (1) с неинвертирующим (совпадение по фазе), а другого (2) с инвертирующим (в противофазе) включением по отношению к выходному сигналу.

Заметим, что в условном обозначении ОУ (рисунок 1, а) показаны лишь шесть основных зажимов. Обычно ОУ снабжают большим числом зажимов (до 15), необходимых для подключения дополнительных элементов контроля, балансировки, коррекции частотной характеристики и других функций.

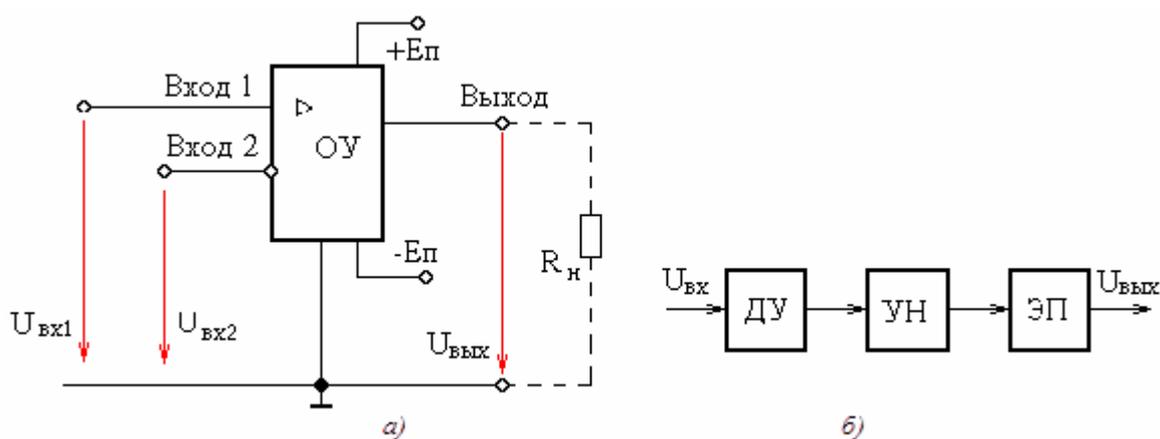


Рисунок 5.1 – Условное обозначение операционного усилителя (а) и его функциональная схема (б)

Основными показателями качества работы ОУ являются:

- коэффициент усиления напряжения $K_{У0}$, достигающий у лучших образцов значения до 10^6 ;
- входное сопротивление $R_{ВХ}$ (до 10^9 Ом);
- верхняя граничная частота, достигающая у лучших образцов значения 50 МГц.

Основу ОУ составляет дифференциальный усилитель, воздействуя на каналы прямой и обратной связи которого добиваются реализации задач, стоящих перед ОУ. Типовая функциональная схема ОУ приведена на рисунке 5.1, б. Как вид-

но, ОУ можно представить в общем виде состоящим из трех каскадов: входного дифференциального усилителя (ДУ), имеющего симметричный вход и обеспечивающего высокую стабильность, малое напряжение шумов и т. п.; промежуточного усилителя напряжения (УН), выполненного, как правило, также в виде дифференциального усилителя с большим коэффициентом усиления; выходного эмиттерного повторителя (ЭП), выполненного по двухтактной схеме и обеспечивающего малое выходное сопротивление ОУ.

Для количественной оценки стабилизирующих свойств дифференциального усилителя служит коэффициент ослабления синфазной составляющей, численно равный

$$K_{осс} = (K_U)_{пф} / (K_U)_{сф},$$

где $(K_U)_{пф}$ и $(K_U)_{сф}$ – коэффициенты усиления каскада по напряжению для противофазного (дифференциального) и синфазного сигналов соответственно.

Дифференциальные усилители с лучшими стабилизирующими свойствами (меньшим дрейфом нуля) имеют большие значения $K_{осс}$.

Интегральный операционный усилитель характеризуется рядом параметров, описывающих этот компонент с точки зрения качества выполнения им своих функций. Среди параметров, обычно приводимых в справочных данных, основными являются следующие.

Средний входной ток $I_{вх}$ В отсутствие сигнала на входах ОУ через его входные выводы протекают токи, обусловленные базовыми токами входных биполярных транзисторов или токами утечки затворов для ОУ с полевыми транзисторами на входе. Входные токи, проходя через внутреннее сопротивление источника входного сигнала, создают падения напряжения на входе ОУ, которые могут вызвать появление напряжения на выходе в отсутствие сигнала на входе. Компенсация этого падения напряжения затруднена тем, что токи входов реальных ОУ могут отличаться друг от друга на 10...20%.

Входные токи ОУ можно оценить по среднему входному току, вычисляемому как среднее арифметическое токов инвертирующего и неинвертирующего входов:

$$I_{\text{вх}} = \frac{I_1 + I_2}{2},$$

где I_1 и I_2 – соответственно, токи инвертирующего и неинвертирующего входов.

Разность входных токов $\Delta I_{\text{вх}}$ определяется выражением

$$\Delta I_{\text{вх}} = I_1 - I_2.$$

Коэффициент усиления напряжения на постоянном токе K_{U0} – показатель ОУ, определяющий насколько хорошо выполняет ОУ основную функцию – усиление входных сигналов. У идеального усилителя коэффициент усиления должен стремиться к бесконечности.

Коэффициент усиления напряжения схемы усилителя на ОУ, приведенной на рисунке 2, вычисляется по формуле:

$$K_{\text{оос}} = \frac{Z_1 + Z_{\text{ос}}}{Z_1} = 1 + \frac{Z_{\text{ос}}}{Z_1} \approx \frac{Z_{\text{ос}}}{Z_1}.$$

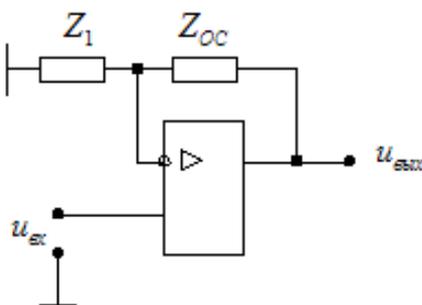


Рисунок 5.2 – Неинвертирующее включение ОУ

а в усилителе, схема которого приведена на рисунке 5.3 – по формуле

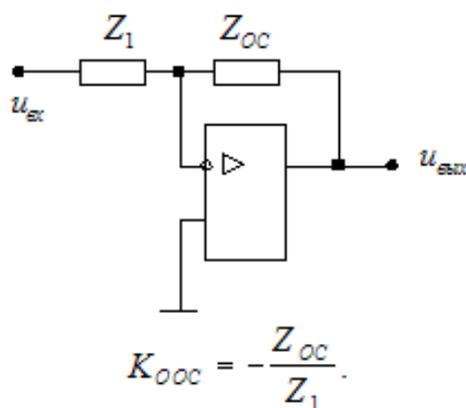


Рисунок 5.3 – Инвертирующее включение ОУ

Напряжение смещения $U_{см}$ – значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы напряжение на его выходе было равно нулю.

Напряжение смещения можно вычислить, зная выходное напряжение $\Delta U_{вых}$ при отсутствии напряжения на входе и коэффициент усиления

$$U_{см} = \frac{\Delta U_{вых}}{K_{U0}}.$$

Входное сопротивление $R_{вх}$. Различают две составляющие входного сопротивления: дифференциальное входное сопротивление и входное сопротивление по синфазному сигналу (сопротивление утечки между каждым входом и "землей"). Входное дифференциальное сопротивление для биполярных ОУ находится обычно в пределах 10 кОм ... 10 МОм. Входное сопротивление по синфазному сигналу определяется как отношение приращения входного синфазного напряжения $\Delta U_{вх\ сф}$ к вызванному приращению среднего входного тока $\Delta I_{вх\ ср}$:

$$R_{вх.сф} = \frac{\Delta U_{вх.сф}}{\Delta I_{вх.ср}}.$$

Дифференциальное входное сопротивление наблюдается между входами ОУ и может быть определено по формуле:

$$R_{\text{вх.диф}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{вх}}},$$

где $\Delta U_{\text{вх}}$ - изменение напряжения между входами ОУ, $\Delta I_{\text{вх}}$ - изменение входного тока.

Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ в интегральных ОУ составляет 20 ... 2000 Ом. Выходное сопротивление уменьшает амплитуду выходного сигнала, особенно при работе усилителя на сравнимое с ним сопротивление нагрузки.

Скорость нарастания выходного напряжения $V_{U \text{ вых}}$ равна отношению изменения выходного напряжения ОУ ко времени его нарастания при подаче на вход скачка напряжения. Время нарастания определяется интервалом времени, в течение которого выходное напряжение ОУ изменяется от 10% до 90% от своих установившихся значений:

$$V_{U \text{ вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{t_{\text{уст}}}.$$

5.2 Задание на проведение исследований

Измерить экспериментально:

- 4.2.1 Входные токи операционного усилителя (ОУ);
- 4.2.2 Напряжение смещения ОУ;
- 4.2.3 Входное и выходное сопротивления ОУ;
- 4.2.4 Время нарастания выходного напряжения.

5.3 Порядок проведения экспериментов

5.3.1. Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 5.4.

Включить схему. Измерить входные токи ОУ. По результатам измерений вычислить средний входной ток $I_{ВХ}$ и разность $\Delta I_{ВХ}$ входных токов ОУ. Результаты занести в отчет.

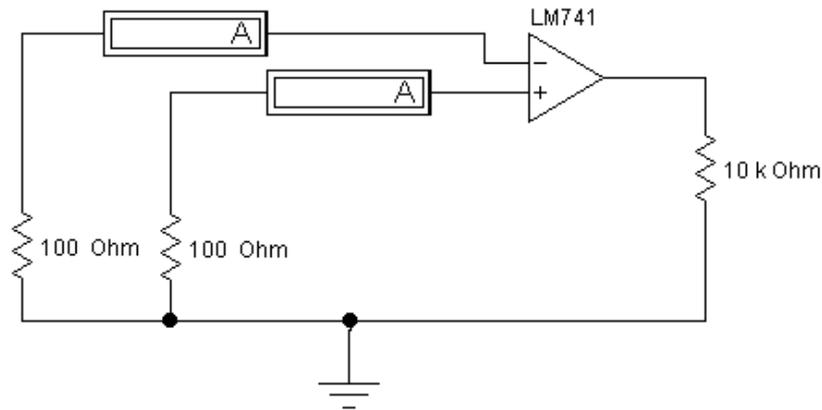


Рисунок 5.4 – Схема измерения параметров ОУ

5.3.2 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 5.5. Установить номинал резистора $R_{ООС}$ в соответствии с вариантом задания.

Включить схему. Записать показания вольтметра. По результатам измерения вычислить напряжение смещения $U_{СМ}$, используя коэффициент усиления схемы на ОУ. Результаты вычислений занести в отчет.

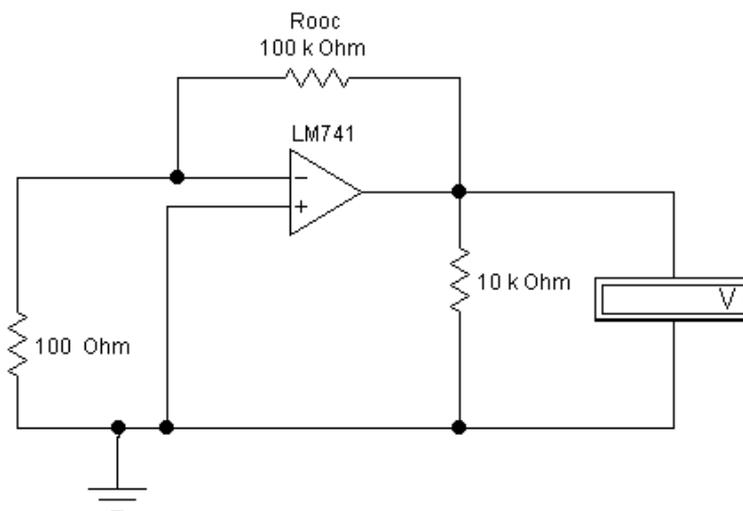


Рисунок 5.5 – Схема ОУ с ООС

5.3.3 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 5.6. Установить напряжения источников $E1$ и $E2$ в соответствии с вариантом задания.

Включить схему. Измерить входной ток $I_{ВХ}$ ОУ. Измерить входной ток после переключения ключа.

Рассчитать изменения входного напряжения и тока. По полученным результатам вычислите дифференциальное входное сопротивление ОУ.

Измерить напряжение на выходе ОУ. Уменьшать сопротивление нагрузочного резистора до тех пор, пока выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ не будет примерно равно половине значения, полученного вначале. Записать значение сопротивления R_H , которое в этом случае приблизительно равно выходному сопротивлению ОУ.

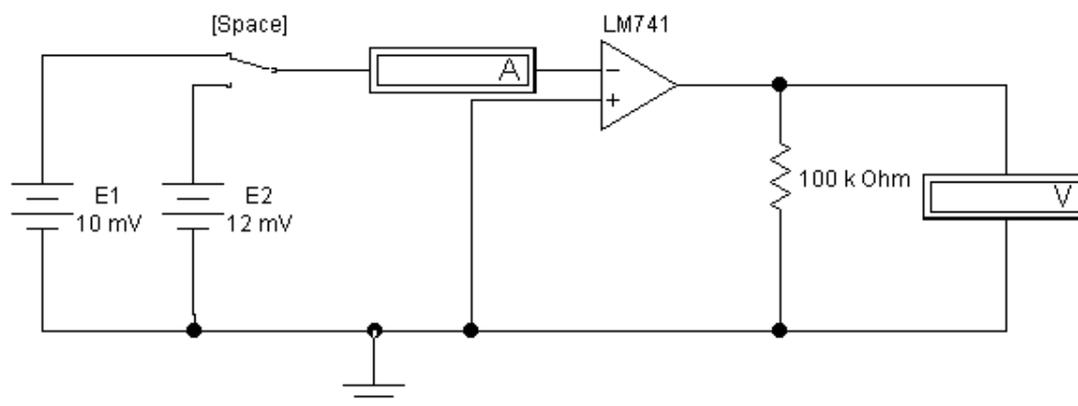


Рисунок 5.6 – Схема ОУ для определения дифференциального входного сопротивления

5.3.4 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 5.7. Установить частоту входной последовательности прямоугольных импульсов в соответствии с заданием.

Включить схему. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений. По осциллограмме определите величину выходного напряжения, время его установления и вычислите скорость нарастания выходного напряжения в В/мкс.

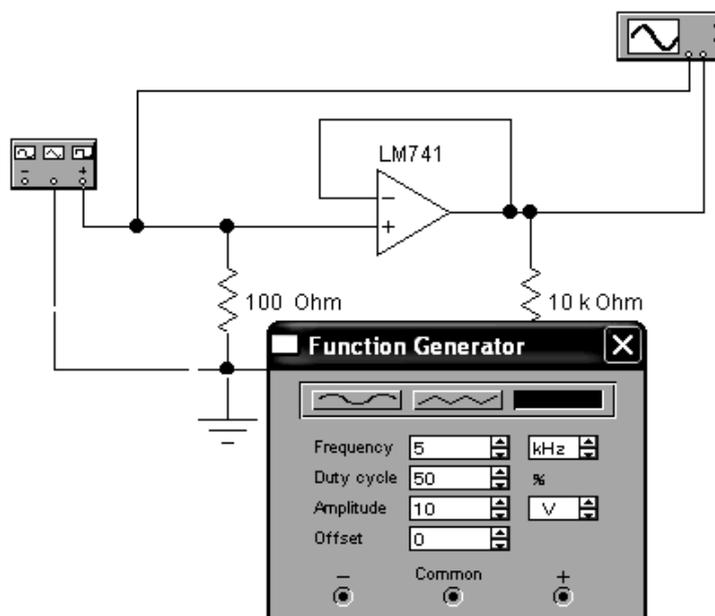


Рисунок 5.7 – Схема получения осциллограмм входного и выходного напряжений

5.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 5.3.1 ... 5.3.4;
- выводы о проделанной работе;
- результаты оформить в рабочей тетради.

5.5 Контрольные вопросы

- 1 Что называется операционным усилителем.
- 2 Как определяется коэффициент усиления напряжения при неинвертирующем включении ОУ.
- 3 Как определяется коэффициент усиления напряжения при инвертирующем включении ОУ.
- 4 Что называется напряжением смещения ОУ.
- 5 Как определяется входное дифференциальное сопротивление ОУ.
- 6 Как можно определить выходное сопротивление ОУ.
- 7 Из каких функциональных узлов состоит схема ОУ.

Таблица 5.1 – Варианты индивидуальных заданий

№№ п/п	$R_{ООС}$, кОм	$E1$, мВ	$E2$, мВ	$f_{ВХ}$, кГц	№№ п/п	$R_{ООС}$, кОм	$E1$, мВ	$E2$, мВ	$f_{ВХ}$, кГц
1	100	10	12	5	16	100	8	13	5,6
2	120	12	15	3	17	120	9	14	6
3	90	8	14	4	18	90	15	18	6,5
4	60	9	13	2	19	60	10	14	3,5
5	55	10	8	1	20	55	15	20	3,8
6	110	12	16	2,4	21	110	16	18	1,5
7	100	15	20	5,6	22	100	10	15	4,2
8	75	16	18	6	23	75	12	8	6,4
9	65	10	15	6,5	24	65	14	17	3,6
10	95	12	8	3,5	25	95	10	12	5
11	85	14	17	3,8	26	85	12	15	3
12	50	8	13	1,5	27	50	8	14	4
13	115	9	14	4,2	28	115	9	13	2
14	70	15	18	6,4	29	70	10	8	1
15	80	10	14	3,6	30	80	12	16	2,4

6 Лабораторная работа №6 Исследование узлов вторичных источников питания

Цель работы:

- 1 Освоение методики экспериментального определения основных характеристик вторичных источников питания.
- 2 Анализ процессов, протекающих в схемах однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей.
- 3 Исследование влияния емкости конденсатора фильтра на стабильность выходного напряжения.

6.1 Теоретическая часть

Среднее значение выходного напряжения U_d (постоянная составляющая) однополупериодного выпрямителя вычисляется по формуле:

$$U_d = U_m / \pi.$$

Значение U_d двухполупериодного выпрямителя вдвое больше:

$$U_d = 2U_m / \pi.$$

Частота выходного сигнала f для схемы с однополупериодным или двухполупериодным выпрямителем вычисляется как величина, обратная периоду выходного сигнала:

$$f = 1 / T.$$

При этом период сигнала на выходе однополупериодного выпрямителя в два раза больше, чем у двухполупериодного. Максимальное обратное напряжение

U_{\max} на диоде однополупериодного выпрямителя равно максимуму входного напряжения. Максимальное обратное напряжение U_{\max} на каждом диоде двухполупериодного выпрямителя с отводом от средней точки трансформатора равно разности удвоенного максимального значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_{2m} и прямого падения напряжения на диоде $U_{\text{ПР}}$:

$$U_{\max} = U_{2m} - U_{\text{ПР}}.$$

Среднее значение выходного напряжения $U_{\text{д}}$ (постоянная составляющая) мостового выпрямителя вычисляется по формуле:

$$U_{\text{д}} = 2U_{2m} / \pi,$$

где максимум вторичного напряжения на полной обмотке трансформатора U_{2m} вычисляется по формуле:

$$U_{2m} = U_{1m} (n_2 / n_1) = U_{1m} / 2,$$

где U_{1m} – максимальное значение (амплитуда) напряжения на первичной обмотке трансформатора;

n_2 / n_1 – коэффициент трансформации трансформатора питания.

Максимальное обратное напряжение U_{\max} на каждом диоде для схемы с выпрямительным мостом равно напряжению на вторичной обмотке U_{2m} .

Частота выходного напряжения f для схемы с двухполупериодным мостовым выпрямителем вычисляется по формуле, аналогичной приведенной ранее.

Если включить на выход любого из выпрямителей, рассмотренных ранее, конденсатор, то переменная составляющая выходного напряжения будет ослаблена (точнее будет выделена постоянная составляющая выходного сигнала и в различной степени будут подавлены высшие гармоники). Среднее значение выход-

ного напряжения U_d выпрямителя с емкостным фильтром может быть приближенно оценено из соотношения:

$$U_d = (U_{2\max} + U_{2\min}) / 2 = U_{2\max} - \Delta U_2 / 2,$$

где: $U_{2\max}$ и $U_{2\min}$ - максимум и минимум выходного напряжения;

$$\Delta U_2 = U_{2\max} - U_{2\min}.$$

Для оценки качества фильтра обычно используют коэффициент пульсаций ε выходного напряжения, который вычисляется из соотношения:

$$\varepsilon = (\Delta U_2 / U_d) \cdot 100\%.$$

6.2 Задание на проведение исследований

- 6.2.1 Определить аналитически и экспериментально параметры напряжения на выходе различных схем выпрямителей.
- 6.2.2 Оценить зависимость коэффициента пульсаций от емкости конденсатора фильтра и сопротивления нагрузки.
- 6.2.3 Проанализировать параметры выходного напряжения при наличии схемы стабилизации.

6.3 Порядок проведения экспериментов

- 6.3.1 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 6.1.

Выбрать трансформатор «ideal» из библиотеки «default», а диод – 1N4001. Установить действующее напряжение источника равным 50 В, частоту – 50 Гц. Выполнить моделирование. Перенести в отчет изображение осциллограмм на входе и выходе выпрямителя.

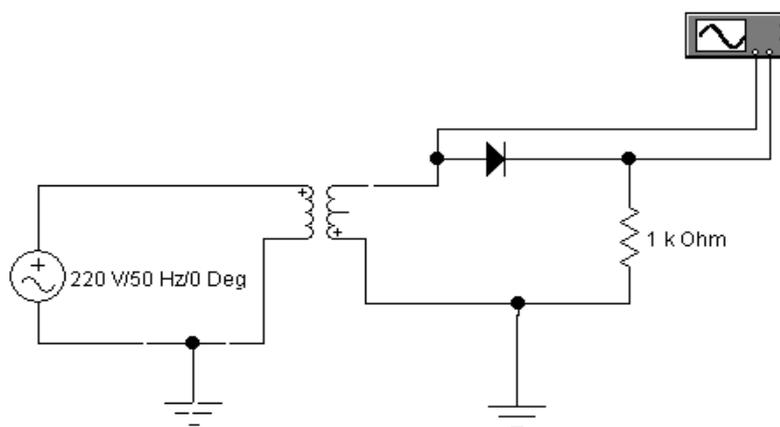


Рисунок 6.1 – Схема вторичного источника питания с выпрямителем на одном диоде

Определить амплитуду напряжения на входе выпрямителя (на вторичной обмотке трансформатора) и по формуле вычислить постоянную составляющую выходного напряжения.

Подключить к нагрузке мультиметр в режиме измерения напряжения и измерить постоянную составляющую выходного напряжения. Сравнить результат измерений с результатом вычислений.

Определить частоту сигнала на выходе выпрямителя.

6.3.2 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 6.2.

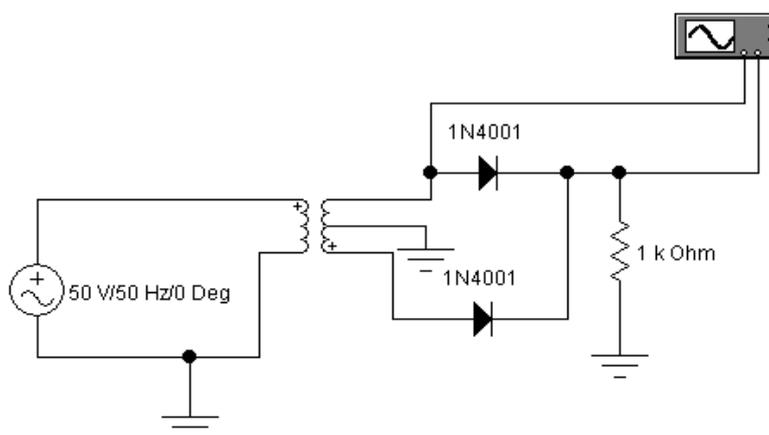


Рисунок 6.2 – Схема вторичного источника питания с выпрямителем на двух диодах

Установить действующее напряжение источника равным 50 В, частоту – 50 Гц. Выполнить моделирование. Перенести в отчет изображение осциллограмм на входе и выходе выпрямителя.

Определить амплитуду напряжения на входе выпрямителя (на половине вторичной обмотки трансформатора) и по формуле вычислить постоянную составляющую выходного напряжения.

Подключить к нагрузке мультиметр в режиме измерения напряжения и измерить постоянную составляющую выходного напряжения. Сравнить результат измерений с результатом вычислений.

Определить частоту сигнала на выходе выпрямителя.

Выполнить сравнительный анализ схем выпрямителей, исследованных в п.п. 6.3.1 и 6.3.2.

Сформулировать выводы о полученных результатах.

6.3.3 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 6.3.

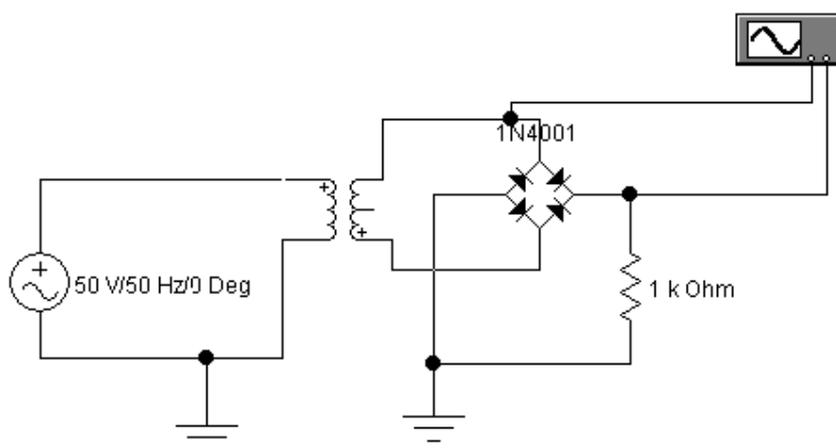


Рисунок 6.3 – Схема вторичного источника питания с двухполупериодным мостовым выпрямителем

Установить действующее напряжение источника равным 50 В, частоту – 50 Гц. Выполнить моделирование. Перенести в отчет изображение осциллограмм на входе и выходе выпрямителя.

Определить амплитуду напряжения на входе выпрямителя (на вторичной обмотке трансформатора), если коэффициент трансформации $n_2 / n_1 = 1 / 2$, и по формуле вычислить постоянную составляющую выходного напряжения.

Подключить к нагрузке мультиметр в режиме измерения напряжения и измерить постоянную составляющую выходного напряжения. Сравнить результат измерений с результатом вычислений.

Определить частоту сигнала на выходе выпрямителя.

Выполнить сравнительный анализ схем выпрямителей, исследованных в п.п. 6.3.2 и 6.3.3.

Сформулировать выводы о полученных результатах.

6.3.4 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 6.4.

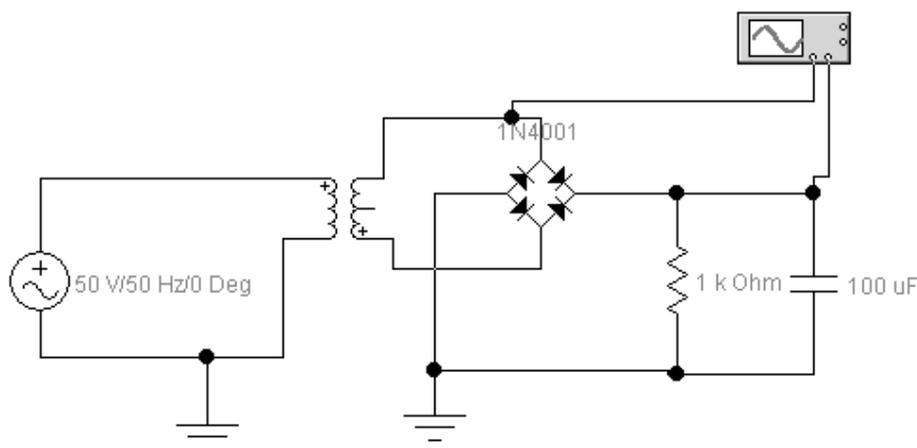


Рисунок 6.4 – Схема вторичного источника питания с двухполупериодным мостовым выпрямителем и фильтром

Установить действующее напряжение источника равным 50 В, частоту – 50 Гц. Выполнить моделирование. Перенести в отчет изображение осциллограмм на входе и выходе выпрямителя.

При сопротивлении нагрузки, равном 1 кОм, определить среднее значение выходного напряжения и значение коэффициента пульсаций, если емкость конденсатора фильтра принимает значения 10, 50 и 100 мкФ. Результаты вычислений

занести в таблицу.

При емкости конденсатора фильтра, равной 100 мкФ, определить среднее значение выходного напряжения и значение коэффициента пульсаций, если сопротивление нагрузки принимает значения 2; 1,5; 1 и 0,75 кОм. Результаты вычислений занести в таблицу.

Проанализировать полученные результаты. Сформулировать выводы.

6.3.5 Собрать схему измерений, приведенную на рисунке 6.5.

Установить действующее напряжение источника равным 50 В, частоту – 50 Гц. Выполнить моделирование.

При сопротивлении нагрузки, равном 1 кОм, определить среднее значение выходного напряжения и значение коэффициента пульсаций, если емкость конденсатора фильтра принимает значения 10, 50 и 100 мкФ. Результаты вычислений занести в таблицу.

При емкости конденсатора фильтра, взятой из таблицы 6.1, согласно варианту, определить среднее значение выходного напряжения и значение коэффициента пульсаций, если сопротивление нагрузки R_n принимает значения 2; 1,5; 1,0; 0,75; 0,5; 0,25 кОм. Результаты вычислений занести в таблицу.

Таблица 6.1 – Результаты проведения эксперимента

R_n , кОм	3	2,5	2,0	1,75	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25
ε %										
$\Delta U_{\text{вых}}$, В										

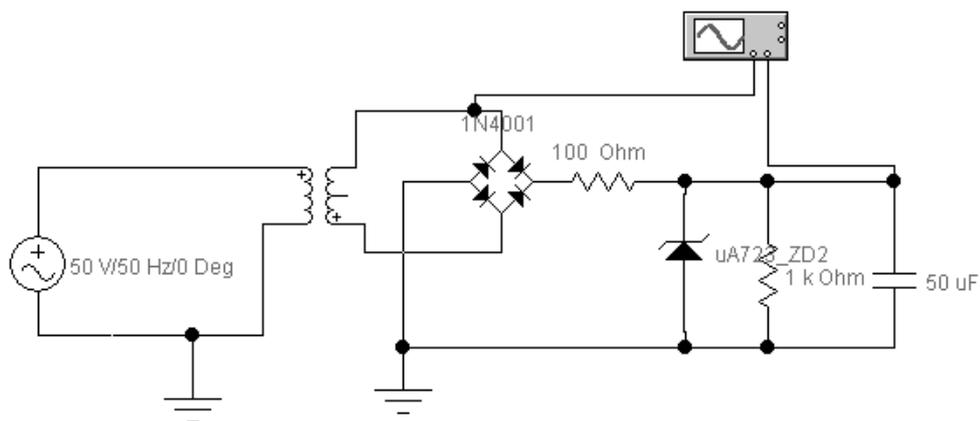


Рисунок 6.5 – Схема вторичного источника питания с двухполупериодным мостовым выпрямителем, фильтром и стабилитроном

Проанализировать полученные результаты. Сравнить значения коэффициентов пульсаций с полученными значениями в п. 6.3.4 при аналогичных параметрах конденсатора фильтра и сопротивления нагрузки.

Сформулировать выводы.

6.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 6.3.1 ... 6.3.5;
- выводы о проделанной работе;
- результаты оформить в рабочей тетради.

6.5 Контрольные вопросы

- 1 Что называется вторичным источником питания.
- 2 Как определяется постоянная составляющая выходного напряжения вторичного источника питания.
- 3 Причина возникновения коэффициентов пульсаций.
- 4 Как определяются коэффициенты пульсаций.
- 5 Из каких функциональных узлов состоит схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром.

- 6 Как влияет емкость фильтра на коэффициент пульсаций.
- 7 Как влияет емкость фильтра на среднее значение выходного напряжения.
- 8 Покажите зависимость коэффициентов пульсаций от емкости конденсатора фильтра и сопротивления нагрузки.

Таблица 6.1 – Варианты индивидуальных заданий

№№ п/п	С, мкф	№№ п/п	С, мкф
1	5	16	80
2	10	17	85
3	15	18	90
4	20	19	95
5	25	20	100
6	30	21	105
7	35	22	110
8	40	23	115
9	45	24	120
10	50	25	125
11	55	26	130
12	60	27	135
13	65	28	140
14	70	29	145
15	75	30	150

7 Лабораторная работа №7 Исследование логических элементов

Цель работы:

Освоение методики исследования логических элементов, реализующих простейшие логические функции.

7.1 Теоретические сведения

Логическим элементом называется физическое устройство, реализующее одну из операций алгебры логики или простейшую логическую функцию. Входные и выходные сигналы логических элементов могут принимать значения, соответствующие двум уровням напряжения – низкому или высокому. При положительной логике низкий уровень напряжения соответствует «логическому нулю», высокий – «логической единице» (при отрицательной логике – наоборот).

Схема, составленная из конечного числа логических элементов, называется логической схемой.

Для описания алгоритмов работы и структуры логических схем используют аппарат алгебры логики (булевой алгебры). В основе алгебры логики лежит три логических операции:

- логическое отрицание (операция НЕ, инверсия), обозначаемое надчеркиванием над логической переменной или логическим выражением;
- логическое сложение (операция ИЛИ, дизъюнкция), обозначаемое знаком «+» или « \vee »;
- логическое умножение (операция И, конъюнкция), обозначаемое одним из знаков: « \times », « \cdot », «&» или « \wedge ».

Перечисленные логические операции могут быть применены к двоичным (булевым) переменным.

Булевыми переменными называются такие переменные x_1, x_2, \dots, x_n , которые могут принимать только одно из двух значений «0» или «1»: $x_i \in \{0, 1\}$.

Логической (переключательной) функцией называется такая функция $Y =$

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которая так же как и ее аргументы (булевы переменные) может принимать только одно из двух значений «0» или «1».

Конкретная комбинация значений аргументов называется набором. Каждый набор имеет индекс, численно равный десятичному эквиваленту двоичного числа. Очевидно, что функция от n переменных определена на 2^n наборах их изображений. Число различных переключательных функций от n переменных равно 2^{2^n} .

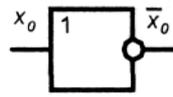
Переключательные функции от одной и двух переменных принято называть элементарными. Эти функции имеют специальные названия и обозначения и используются при воспроизведении более сложных переключательных функций.

Для выражения переключательных функций от многих переменных достаточно иметь ограниченное число разнотипных элементарных переключательных функций, называемое системой. Система переключательных функций называется функционально полной, если при помощи этих функций можно выразить любую сложную переключательную функцию. Примеры функционально полных систем:

- конъюнкция, дизъюнкция, инверсия;
- конъюнкция, инверсия;
- дизъюнкция, инверсия;
- стрелка Пирса (отрицание дизъюнкции);
- штрих Шеффера (отрицание конъюнкции).

Первая система булевых функций образует так называемый булев базис функций, а две последние — универсальный базис.

Логическое отрицание описывается логической функцией $Y = \bar{x}_0$ и может быть реализовано с помощью логического элемента, называемого инвертором. Условное графическое обозначение (УГО) инвертора приведено на рисунке 1, а. На рисунке 7.1, б показано обозначение инвертора, используемое в программе Electronics Workbench.



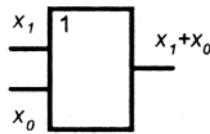
а)



б)

Рисунок 7.1 – УГО инвертора

Функция логического сложения двух переменных x_0 и x_1 – $Y = x_0 \vee x_1$ может быть реализована с помощью логического элемента дизъюнктора, условное графическое изображение которого представлено на рисунке 7.2, а (соответственно, используемое в Electronics Workbench – на рисунке 7.2, б).



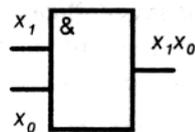
а)



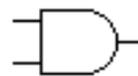
б)

Рисунок 7.2 – УГО дизъюнктора

Функция логического умножения двух переменных x_0 и x_1 – $Y = x_0 \wedge x_1$ может быть реализована с помощью логического элемента конъюнктора, условное графическое изображение которого представлено на рисунке 3, а (соответственно, используемое в Electronics Workbench – на рисунке 3, б).



а)



б)

Рисунок 7.3 – УГО конъюнктора

Для реализации логических функций отрицание дизъюнкции и отрицание конъюнкции используются соответствующие элементы Пирса (ИЛИ-НЕ) и Шеффера (И-НЕ). Условные графические обозначения элементов

приведены на рисунке 7.4.

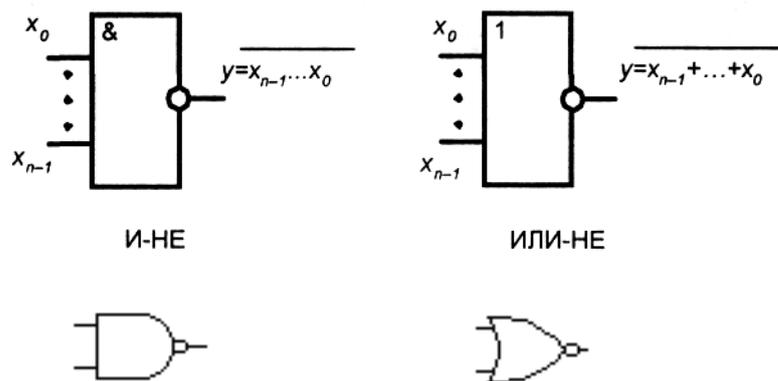


Рисунок 7.4 – УГО логических функций отрицание дизъюнкции и отрицание конъюнкции

Одной из форм представления логической функции является таблица истинности. Таблицей истинности или комбинационной таблицей называется таблица, которая содержит все возможные комбинации входных переменных x_{n-1}, \dots, x_1, x_0 и соответствующие им значения выходных переменных y_i . В общем случае таблица истинности содержит 2^n строк. В качестве примера представлена таблица истинности некоторой логической функции трех переменных (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Таблица истинности логической функции трех переменных

x_2	x_1	x_0	y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

7.2 Задание на проведение исследований

7.2.1 Исследование переключательных функций логических элементов.

7.2.2 Определение логической функции по таблице истинности логического элемента.

7.3 Порядок проведения экспериментов

7.3.1. Составить таблицы истинности логических элементов НЕ, И, ИЛИ (рисунок 7.6).

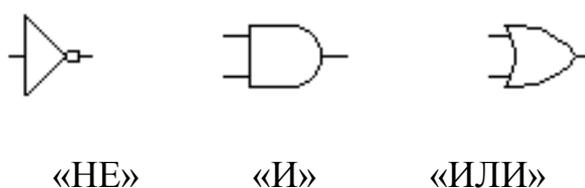


Рисунок 7.5 – УГО логических элементов НЕ, И, ИЛИ

Для проведения исследований использовать схему, приведенную на рисунке 7.6. Комбинацию входных переменных задавать с помощью кнопок А, В. Логической единице соответствует подключение источника +5 В, логическому нулю – подключение общей шины. Значение логической функции снимать с логического анализатора (Logic Analyzer). Результаты заносить в таблицу истинности, составленную для каждого элемента (пример – таблица 7.1).

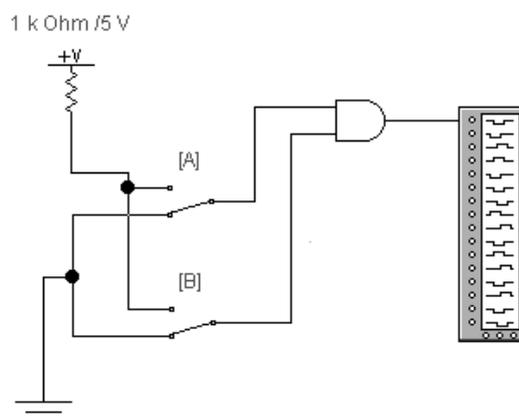


Рисунок 7.6 – Комбинационная схема для проведения эксперимента

веденную на рисунке 7.9. По полученным таблицам истинности определить тип интегральных схем (с учетом наборов логических элементов).

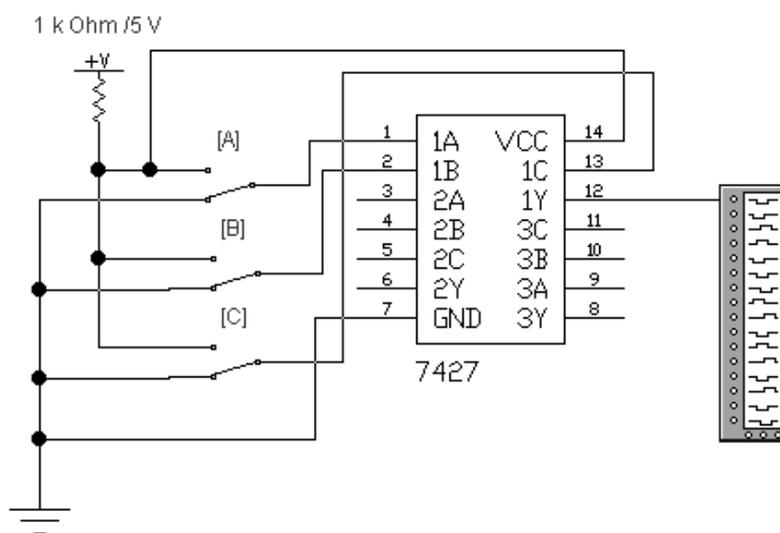


Рисунок 7.9 – Комбинационная схема для проведения эксперимента

7.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 7.3.1 ... 7.3.4;
- выводы о проделанной работе;
- результаты оформить в рабочей тетради.

7.5 Контрольные вопросы

- 1 Приведите УГО логических элементов «И», «ИЛИ», «НЕ И», «НЕ ИЛИ».
- 2 Постройте таблицы истинности для логических элементов «И», «ИЛИ», «НЕ И», «НЕ ИЛИ».
- 3 По заданным таблицам истинности определите тип логического элемента.
- 4 Постройте таблицу истинности для полу сумматора.
- 5 Постройте таблицу истинности для полного сумматора.
- 6 Постройте таблицу истинности для логического вентиля «Исключающее ИЛИ».

Таблица 7.2 – Варианты индивидуальных заданий

№№ п/п	Типы ИС	№№ п/п	Типы ИС
1	7400, 7410	16	7402, 7408
2	7402, 7411	17	7400, 7402
3	7428, 7411	18	7411, 7400
4	7408, 7427	19	7427, 7400
5	7428, 7410	20	7428, 7402
6	7402, 7410	21	7411, 7428
7	7408, 7411	22	7400, 7410
8	7408, 7427	23	7402, 7411
9	7400, 7428	24	7428, 7411
10	7402, 7408	25	7408, 7427
11	7400, 7402	26	7428, 7410
12	7411, 7400	27	7402, 7410
13	7427, 7400	28	7408, 7411
14	7428, 7402	29	7408, 7427
15	7411, 7428	30	7400, 7428

8 Лабораторная работа № 8 Синтез и исследование логических схем

Цель работы:

1. Освоение методики синтеза логических схем, выполняющих заданные логические функции.
2. Освоение методики минимизации ДНФ заданной функции с помощью карт Карно.

8.1 Теоретические сведения

8.1.1 Логические функции и способы их записи

В устройствах цифровой электроники используются элементы, входные и выходные сигналы которых могут принимать только два значения, соответствующие логической 1 («1») и логическому 0 («0»). Такие элементы называют логическими. С их помощью реализуют простейшие операции с двоичными числами (то есть с числами двоичной системы счисления).

Для описания алгоритмов работы и структуры цифровых схем используют аппарат алгебры логики, или булевой алгебры. В ее основе лежат три логические операции над логическими переменными:

- логическое отрицание (операция НЕ, инверсия), обозначаемое надчеркиванием над логической переменной или логическим выражением, например \bar{x} , $\overline{x_1 + x_2}$ и т. д.;
- логическое сложение (операция ИЛИ, дизъюнкция), обозначаемое знаком «+» или « \vee »;
- логическое умножение (операция И, конъюнкция), обозначаемое одним из знаков: « \times », « \cdot », «&», « \wedge » или отсутствием какого-либо знака между переменными, например x_1x_2 .

Логическими переменными (булевыми переменными) называются переменные x_1, x_2, \dots, x_n , которые могут принимать только два значения – 0 и 1,

то есть $x_i \in \{0, 1\}$.

Совокупность n логических переменных называется набором переменных и обозначается x_1, x_2, \dots, x_n . В общем случае может быть 2^n наборов логических переменных.

Логической функцией (булевой функцией) называется функция логических переменных $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которая так же как и ее аргументы принимает только значения 0 и 1.

Каждая логическая операция задает соответствующую логическую функцию своих переменных. Следовательно, можно говорить о трех логических функциях: конъюнкции ($y=x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$), дизъюнкции ($y=x_1+x_2+\dots+x_n$), инверсии ($y=\bar{x}$). Число аргументов (переменных) функций дизъюнкции и конъюнкции в общем случае может быть произвольным (больше двух).

Система логических функций называется функционально полной, если при помощи функций, входящих в систему, можно выразить любую сколь угодно сложную булеву функцию.

В математической логике доказывается, что если система булевых функций содержит функции конъюнкции, дизъюнкции и инверсию, то она является функционально полной.

Функционально полнотой обладают и некоторые другие системы, например, система, состоящая из одной логической функции И – НЕ («штрих Шеффера», $y = \overline{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$) и система, содержащая единственную логическую функцию ИЛИ – НЕ («стрелка Пирса», $y = \overline{x_1 + x_2 + \dots + x_n}$).

Логическую функцию можно описать несколькими способами:

- в словесной форме;
- с помощью таблицы;
- с помощью алгебраического выражения (в аналитическом виде);
- с помощью последовательности десятичных чисел и др.

Табличное представление логической функции является наиболее наглядным. Таблица, с помощью которой описывают логическую функцию, называется

таблицей истинности. Пример таблицы истинности функции $y = f(x_1, x_2, x_3)$ трех переменных показан на рисунке 8.1. Число строк в таблице истинности равно 2^n , где n – число логических переменных.

№№ наборов	x_3	x_2	x_1	y
0	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	0	*
3	0	1	1	0
4	1	0	0	1
5	1	0	1	*
6	1	1	0	*
7	1	1	1	1

Рисунок 8.1 – Пример таблицы истинности недоопределенной логической функции

8.1.2 Минимизация логических функций

Минимальная форма логической функции. ДНФ (КНФ) называется минимальной, если она содержит минимальное число букв. Чтобы получить минимальную форму логической функции, ее необходимо минимизировать.

При незначительном числе аргументов минимизацию логической функции чаще всего выполняют методом Карно-Вейча.

В общем случае число клеток диаграммы Вейча составляет 2^n , где n – число входных переменных. Каждой комбинации входных переменных (набору входных переменных) можно поставить в соответствие только одну клетку диаграммы. В клетку записывается значение логической функции (0 или 1) на данном наборе. В клетку, соответствующую запрещенному набору входных переменных,

записывается знак «*». Входные переменные располагаются по внешним сторонам диаграммы напротив ее строк и столбцов. При этом значение каждой из входных переменных относится ко всей строке или ко всему столбцу. На рисунке 8.2 приведены примеры диаграмм Вейча для логических функций двух, трех и четырех переменных.

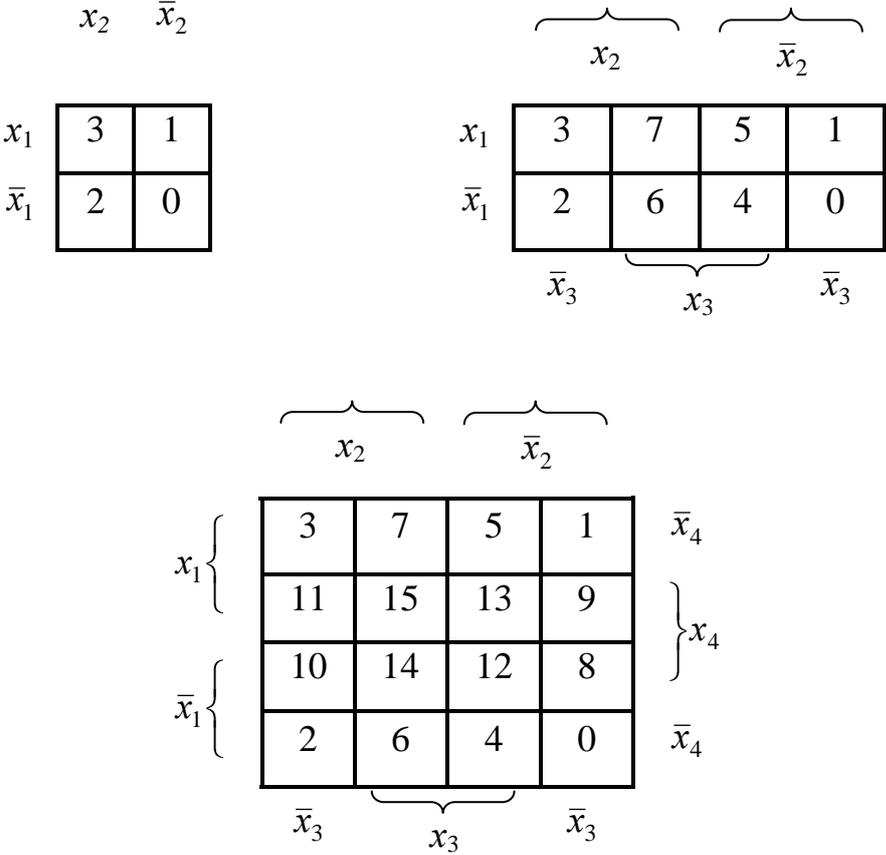


Рисунок 8.2 – Примеры диаграмм Вейча

Цифры, записанные в клетки диаграмм Вейча на рисунке 8.2, представляют собой номера наборов переменных в таблице истинности.

При склеивании переменных нужно руководствоваться следующими правилами:

- а) все клетки, содержащие единицы (при записи функции в дизъюнктивной форме) или нули (при записи в конъюнктивной форме), должны быть замкнутыми в прямоугольные контуры. Единичные контуры могут объединять несколько еди-

ниц, но не должны содержать внутри себя нулей. Нулевые контуры могут объединять несколько нулей, но не должны содержать внутри себя единиц. Одна и та же единица (или ноль) может одновременно входить в несколько единичных (нулевых) контуров. Число клеток в контуре равняется 2^i , где $i = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$;

б) в контуры можно объединять только соседние клетки, которые содержат единицы (нули). Соседними (рядом расположенными) считаются, в том числе, клетки, расположенные на противоположных сторонах диаграммы (в противоположных строках или столбцах);

в) каждой единичной клетке отвечает *конъюнкция* логических переменных, которые определяют данную клетку. Каждой нулевой клетке отвечает *дизъюнкция инверсий* логических переменных, что определяют данную клетку;

г) выражения, которые отвечают контурам, не содержат тех переменных, чьи границы пересекаются площадью, ограниченной данным контуром (другими словами, те переменные, которые в данном контуре имеют и прямое и инверсное значение – склеиваются);

д) выражение логической функции может быть записано по соответствующей ей диаграмме Вейча в дизъюнктивной или конъюнктивной форме. Дизъюнктивная форма составляется в виде дизъюнкции конъюнкций, которые отвечают единичным контурам, выделенным на диаграмме для определения функции; конъюнктивная – в виде конъюнкции дизъюнкций, которые отвечают нулевым контурам;

е) для контуров, которые охватывают разное количество клеток, получаются выражения разной сложности. Поэтому для данной логической функции можно записать по ее диаграмме Вейча несколько алгебраических выражений, которые отличаются по сложности. Наиболее сложное выражение получают в том случае, когда каждой клетке отвечает свой отдельный контур. Это выражение представляет собой ДНФ или КНФ данной функции.

Для получения по диаграмме Вейча минимального выражения логической функции следует руководствоваться правилом: единицы и нули должны объединяться минимальным числом наибольших контуров.

Рассмотрим пример минимизации логической функции трех переменных $y = f(x_1, x_2, x_3)$, заданной таблицей истинности (рисунок 8.1), воспользовавшись методом Карно-Вейча. Для начала воспользуемся представлением функции в дизъюнктивной нормальной форме. В этом случае диаграмма Вейча должна быть заполнена, как показано на рисунке 8.3.

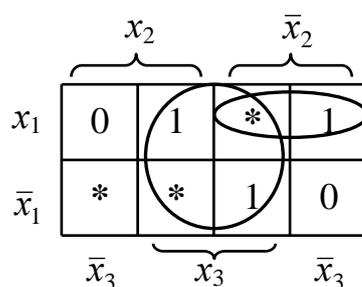


Рисунок 8.3 – Минимизация функции к виду ДНФ

Из рисунка 8.3 видно, как можно наилучшим образом объединить единицы в единичные контуры. При этом в контуры могут входить и ячейки с номерами запрещенных наборов (то есть элементами которых являются «*»). В результате такого объединения получим тупиковую форму логической функции в виде дизъюнкции конъюнкций (число которых равно числу единичных контуров) входных переменных, которые не склеились:

$$y(x_3, x_2, x_1) = x_3 + \bar{x}_2 x_1.$$

Если для представления логической функции после минимизации выбрана конъюнктивная нормальная форма, то в диаграмме Вейча объединяют нули в нулевые контуры. Как и в предыдущем случае, в нулевые контуры могут быть включены ячейки, элементами которых являются «*» (рисунок 8.4).

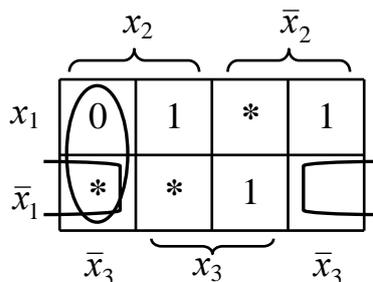


Рисунок 8.4 – Минимизация функции к виду КНФ

Тупиковая форма логической функции после минимизации представляет собой конъюнкцию дизъюнкций (число дизъюнкций равно числу нулевых контуров) *инверсных* значений тех входных переменных, которые не склеились:

$$y(x_3, x_2, x_1) = (x_3 + \bar{x}_2)(x_3 + x_1).$$

Данное выражения описывают структуру логического устройства, алгоритм функционирования которого задан функцией y (рисунок 8.1). Несмотря на то, что полученные выражения разные по виду, а, следовательно, и схема логического устройства в каждом случае будет выполнена по разному, сигналы на выходах этих схем на одних и тех же номерах разрешенных наборов входных переменных будут одинаковы.

На рисунках 8.5 и 8.6 представлены: условие синтеза функции ДНФ, цифровой автомат и, его минимизация.

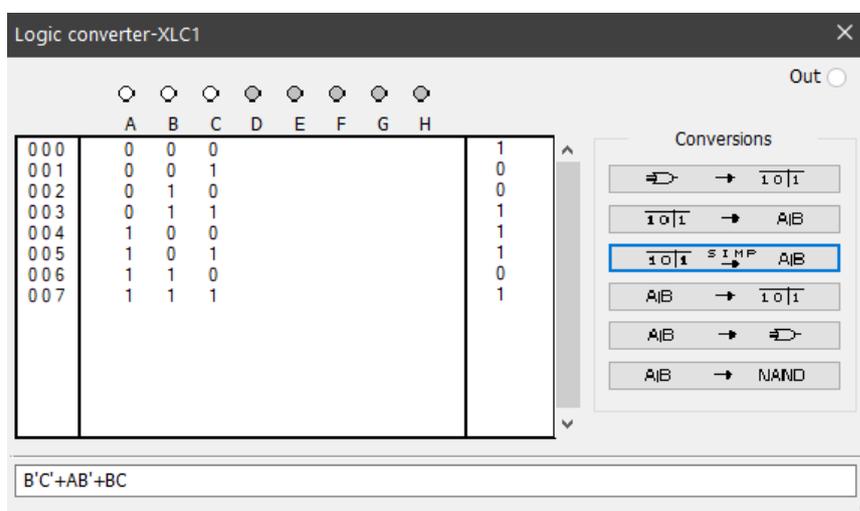


Рисунок 8.5 – Условие синтеза функции ДНФ

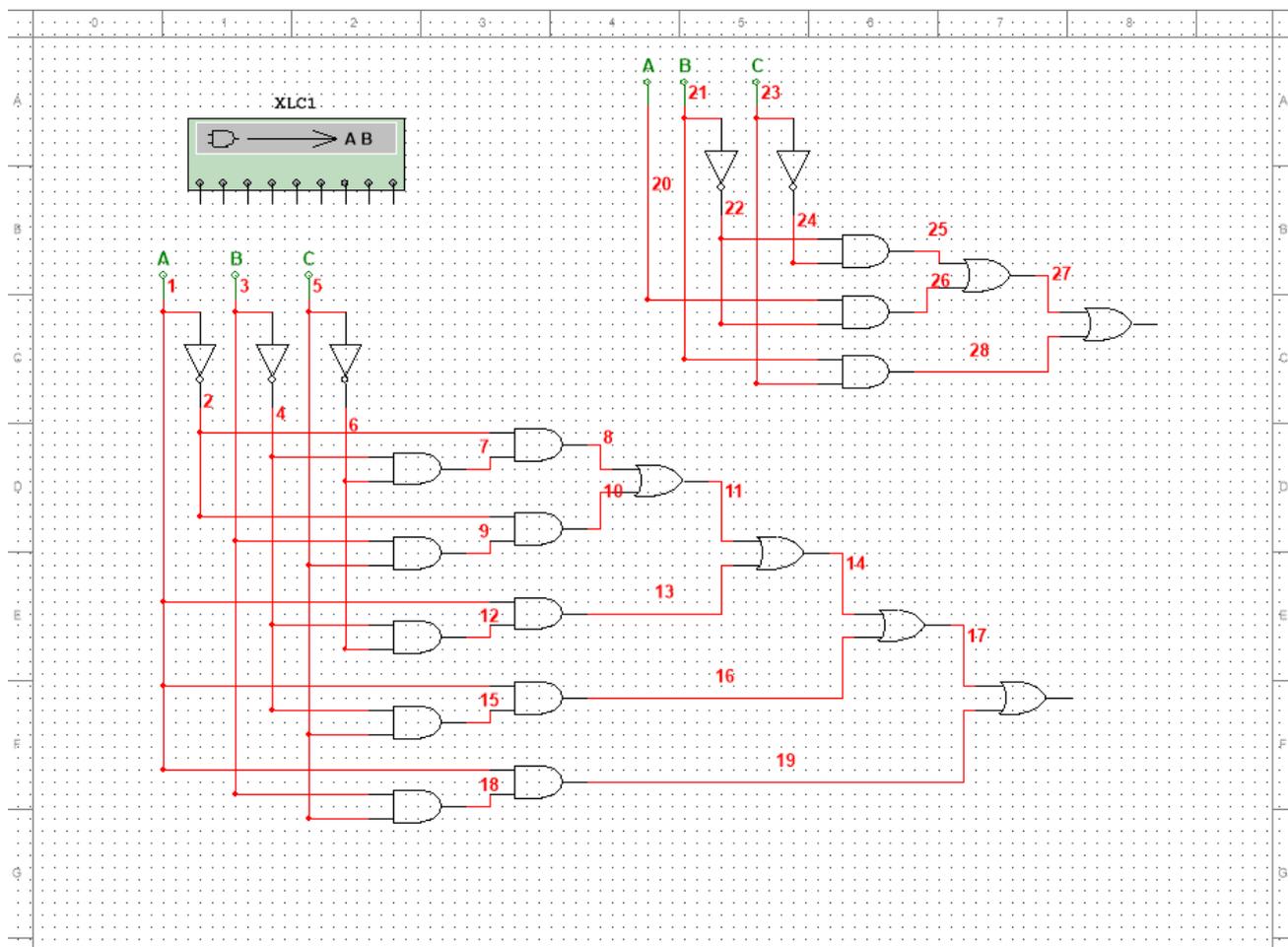


Рисунок 8.6 – Реализация функции ДНФ в виде цифрового автомата и, ее минимизация

8.2 Задание на проведение исследований

8.2.1. Разработать логическую схему для реализации частично определенной логической функции F 4-х аргументов, заданной таблицей (в соответствии с номером варианта задания). Буквой N в таблице обозначены номера наборов, на которых определены значения функции F .

8.2.2. Для минимизации логической функции использовать карты Карно (диаграммы Вейча).

8.2.3. Логическую схему, реализующую заданную логическую функцию, построить в базисе элементов 2И-НЕ.

8.2.4. Проверить функционирование разработанной схемы на всех возможных наборах аргументов.

8.3 Порядок проведения экспериментов

8.3.1 Составить таблицу истинности для логической функции F , доопределив ее на запрещенных наборах.

8.3.2 Используя карты Карно, минимизировать логическую функцию до получения ее тупиковой формы.

8.3.3 Преобразовать полученное логическое выражение к виду, позволяющему синтезировать логическую схему, реализующую заданную логическую функцию, в базисе элементов 2И-НЕ.

8.3.4 Собрать логическую схему на основе интегральных микросхем 7400 или 7428. Проверить ее функционирование, по результатам проверки составить таблицу истинности. Сравнить полученную таблицу истинности с таблицей истинности, составленной на начальном этапе синтеза схемы.

8.4 Содержание отчета

- схемы электрических цепей, используемых при исследованиях;
- результаты выполнения пунктов задания 8.3.1 ... 8.3.4;
- выводы о проделанной работе;
- результаты оформить в рабочей тетради.

8.5 Контрольные вопросы

- 1 Приведите логические функции отрицания, умножения и сложения.
- 2 Приведите логические функции «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ».
- 3 Приведите таблицу истинности для трех элементов.
- 4 Приведите методику минимизации логических функций ДНФ.
- 5 Приведите методику минимизации логических функций КНФ.
- 6 Приведите пример получения по диаграмме Вейча минимального выражения логической функции ДНФ (КНФ).

Таблица 8.1 – Варианты индивидуальных заданий

1	N	1	2	3	4	6	7	8	9	11	12
	F	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0
2	N	0	2	3	5	6	7	8	9	13	15
	F	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
3	N	1	2	3	4	6	7	9	12	13	14
	F	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
4	N	0	2	3	5	6	7	8	10	12	13
	F	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
5	N	0	1	3	4	6	9	10	11	14	15
	F	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
6	N	0	1	2	5	7	10	11	13	14	15
	F	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1
7	N	1	3	4	5	6	10	11	12	14	15
	F	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0
8	N	0	2	4	5	7	8	10	11	14	15
	F	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1
9	N	0	1	3	4	5	6	9	10	11	14
	F	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
10	N	0	1	2	4	5	7	10	11	13	15
	F	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
11	N	0	1	3	4	5	6	11	12	14	15
	F	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0
12	N	0	1	2	4	5	7	8	10	14	15
	F	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
13	N	1	2	3	4	6	8	9	11	12	13
	F	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
14	N	0	2	3	5	7	8	9	12	13	15
	F	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
15	N	1	3	4	6	7	8	9	12	13	14
	F	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1
16	N	0	2	5	6	7	8	9	10	12	13
	F	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1

Продолжение таблицы 8.1

17	N	0	2	3	5	6	7	8	9	10	13
	F	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0
18	N	1	2	3	4	6	7	8	9	12	14
	F	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1
19	N	0	2	3	5	6	7	8	12	13	15
	F	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
20	N	1	2	3	4	6	7	9	11	12	13
	F	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0
21	N	0	1	2	5	7	8	10	11	14	15
	F	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1
22	N	0	1	3	4	6	10	11	12	14	15
	F	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
23	N	0	2	4	5	7	10	11	13	14	15
	F	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1
24	N	1	3	4	5	6	9	10	11	14	15
	F	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
25	N	0	1	2	4	5	7	8	10	11	15
	F	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
26	N	0	1	3	4	5	6	10	11	12	14
	F	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1
27	N	0	1	2	4	5	7	10	13	14	15
	F	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
28	N	0	1	3	4	5	6	9	11	14	15
	F	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
29	N	0	2	3	5	6	7	8	9	10	13
	F	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0
30	N	1	2	3	4	6	7	8	9	12	14
	F	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1
31	N	0	2	3	5	6	7	8	12	13	15
	F	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
32	N	1	2	3	4	6	7	9	11	12	13
	F	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0

Заключение

1. Настоящие методические указания позволяют получить практические навыки по всем изучаемым темам дисциплин «Основы электроники» и «Электротехника и электроника» (раздел электроника).
2. Использование современного программного пакета Multisim обеспечивает широкий спектр исследуемых задач аналоговой и цифровой электроники.
3. Разработанные варианты задач реализуют индивидуальный подход к каждому обучаемому.
4. Приведенные сведения из теории, алгоритм и примеры решения задач обеспечивают высокое качество исследований.
5. Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ обучающихся различных форм и технологий обучения.
6. Учебно-методический и компетентностный подходы, реализованные в методических указаниях, позволяют обучающимся последовательно и предметно осваивать, закреплять, развивать соответствующие компетенции и трудовые функции.

Список использованных источников

1. Трубникова, В.Н. Электротехника и электроника. Часть 1. Электрические цепи [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Трубникова В.Н. – Электрон. текстовые данные. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2014. – 137 с. – Режим доступа: URL: <http://www.iprbookshop.ru/33672>. – ЭБС «IPRbooks», по паролю.
2. Электротехника и электроника [Текст]: учебник / М. В. Немцов, М. Л. Немцова.- 2-е изд., стер. - М.: Академия, 2009. - 428 с.
3. Рекус, Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники [Текст]: учеб. пособие для вузов / Г.Г. Рекус, А.И. Белоусов. – 2-е изд., перераб.–М.: Высш. шк., 2001. – 416 с.: ил. – ISBN 5-06-003984-6.
4. Рекус, Г.Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями [Текст]: учеб. пособие для вузов / Г. Г. Рекус. - Москва: Высш. шк., 2008. - 343 с.: ил. – Прил.: с. 337-340 – ISBN 978-5-06-005934-2/.
5. Сильвашко, С.А. Электротехника и электроника [Текст]: методические указания к расчетно-графическим задачам / С. А. Сильвашко; М-во образования и науки Рос. Федер. Агенство по образованию, Гос. образоват. Учреждение высш. проф. Образования «Оренбург. Гос. ун-т», Каф. Програм. обеспечния вычисл. техники и автоматизир. систем. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. – 34 с.
6. Сильвашко, С.А. Информационно-измерительная техника и электроника [Текст]: методические указания к лабораторному практикуму / С.А. Сильвашко. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. - 72 с.