

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
Информатики и радиоэлектроники»

Факультет радиотехники и электроники

Кафедра информационных радиотехнологий

**Т. Н. Дворникова**

## **ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА РАДИОСИСТЕМ И УСТРОЙСТВ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

**по изучению микроконтроллеров архитектуры ARM Cortex-M4 на базе  
отладочного модуля STM32F4 Discovery**

*Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь по образованию  
в области информатики и радиоэлектроники в качестве  
учебно-методического пособия для студентов учреждений, обеспечивающих  
получение высшего образования по специальностям  
«Радиоэлектронные системы»,  
«Радиоэлектронная защита информации»*

Минск БГУИР 2022

УДК 621.396.6 (076.5)

ББК 32.844Я73

Д24

Рецензенты:

профессор кафедры информатики и вычислительной техники учреждения образования  
«Высший государственный колледж связи»,  
кандидат технических наук, доцент, ст. научный сотрудник Е.В. Новиков;

Заведующий кафедры электроники учреждения  
образования «Белорусский национальный  
технический университет» кандидат технических наук,  
доцент Р.И. Воробей;

Кандидат физико-математических наук,  
доцент Белорусского национального  
технического университета А.А. Антошин

**Дворникова, Т. Н.**

С72 Элементная база радиосистем и устройств. Лабораторный практикум: учеб.-метод.  
пособие / Т.Н. Дворникова. – Минск : БГУИР, 2021. – с. : ил.

ISBN

Практикум состоит из восьми лабораторных работ и предназначен для изучения *и исследования сигналов и радиотехнических устройств*, а также приобретения практических навыков физического макетирования и исследования *радиотехнических* схем на лабораторном стенде IDL-800 с использованием контрольно-измерительных приборов и пакетов прикладных программ электронных систем моделирования Multisim, MATLAB. Содержит теоретические сведения по проектированию и применению наиболее распространенных *радиотехнических* узлов и устройств.

Для студентов специальностей «Радиоэлектронные системы», «Радиоэлектронная защита информации».

**УДК 621.396.6 (076.5)**

**ББК 32.844Я73**

**Д24**

ISBN

© Дворникова Т. Н., 2021

© УО «Белорусский государственный  
университет информатики и  
радиоэлектроники»

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лабораторная работа №1</i> .....	5
ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА IDL-800 .....	5
<i>Лабораторная работа №2.</i> .....	9
ОБУЧЕНИЕ РАБОТЫ С МУЛЬТИМЕТРОМ .....	9
<i>Лабораторная работа №3.</i> .....	15
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ (РЕЗИСТОРЫ).....	<b>Ошибка!</b>
<b>Закладка не определена.</b>	
<i>Лабораторная работа № 4.</i> .....	20
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМИСТОРОВ И ПОЗИСТОРОВ .....	20
<i>Лабораторная работа № 5.</i> .....	25
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИТРОНОВ И ВАРИСТОРОВ.....	25
<i>Лабораторная работа №6</i> .....	29
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ (КОНДЕНСАТОРЫ).....	<b>Ошибка!</b>
<b>Закладка не определена.</b>	
<i>Лабораторная работа № 7</i> .....	34
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ.....	34
<i>Лабораторная работа № 8</i> .....	38
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ .....	38
<i>Лабораторная работа № 9.</i> .....	42
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ФИЛЬТРОВ.....	42
<i>Лабораторная работа № 10</i> .....	50
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ .....	50
<i>Лабораторная работа № 11.</i> .....	53
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО И ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРОВ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
<i>Лабораторная работа № 12.</i> .....	59
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
<i>Лабораторная работа №13</i> .....	74

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ **Ошибка!**  
**Закладка не определена.**

<i>Лабораторная работа №14.</i> .....	95
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ В СРЕДЕ MULTISIM .....	95
<i>Лабораторная работа №15.</i> .....	107
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ .....	107
Приложение1 .....	127
Приложение 2 .....	136
Приложение 3 .....	140
Приложение 4 .....	146

## *Лабораторная работа №1*

### **ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА IDL-800**

**Цель работы:** Исследовать виды и параметры радиотехнических сигналов. Изучить методы осциллографических измерений и приобретение практических навыков работы с осциллографом.

#### **Теоретические сведения**

**Сигнал** – это любая физическая величина (например: температура, давление воздуха, интенсивность света, сила тока и т.д.), изменяющаяся со временем. Именно благодаря этому изменению сигнал может нести в себе какую-то информацию.

Электрическое колебание, содержащее сообщение называется **электрическим сигналом**.

**Детерминированный сигнал** – это сигнал, параметры которого в заданный момент времени известны со 100%-ной вероятностью.

**Случайный сигнал** – это сигнал, параметры которого можно определить с вероятностью меньше 100%.

**Пример:** белый шум.

**Периодический сигнал** – это сигнал, значение которого повторяется через определённые равные промежутки времени, называемые периодом повторения сигнала, или периодом.

Для **непериодического** это условия не выполняется.

**Управляющие сигналы** – это сравнительно низкочастотные колебания, которые содержат полезную информацию, но непригодны для непосредственной передачи в эфир с помощью радиоволн.

**Аналоговый сигнал** – это сигнал который может принимать любые значения, в определённых пределах (например, в напряжение может плавно изменяться в пределах от нуля до десяти вольт).

**Цифровой сигнал** – это сигнал, который может принимать только два (иногда три) значения, причём разрешены некоторые отклонения от этих значений. Например, от напряжения может принимать два значения: от 0 до 0,5В (уровень нуля) или от 2,5 до 5В (уровень единицы).

**Дискретный по времени** – это сигнал, параметры которого непрерывны по величине и дискретны по времени.

**Дискретный по уровню** – это сигнал, параметры которого непрерывны по времени, но дискретны по величине. Такие сигналы можно получить из непрерывных путём квантования их по уровню.

**Немодулированные ВЧ-колебания** способны распространяться на большие расстояния, но не несут полезной информации.

**Модулированные сигналы** – это высокочастотные колебания один или несколько параметров, которых изменяются по закону управляющего сигнала.

ВЧ-колебания, в отличие от низкочастотных сигналов, иногда называют радиосигналами.

В общем случае модулированный сигнал можно представить, как

$$S(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

где  $U_m$  – амплитуда сигнала;

$\omega$  – угловая частота;

$\varphi$  – начальная фаза.

### Виды простых периодических сигналов

Простейшим периодическим сигналом является гармоническое колебание (рисунок 1.1),

$$U(t) = U_m \sin \omega t \quad (1.2)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (1.3)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.4)$$

где  $U_m$  – амплитудное значения сигнала;

$\omega$  – угловая частота;

$f$  – частота сигнала;

$T$  – период сигнала.

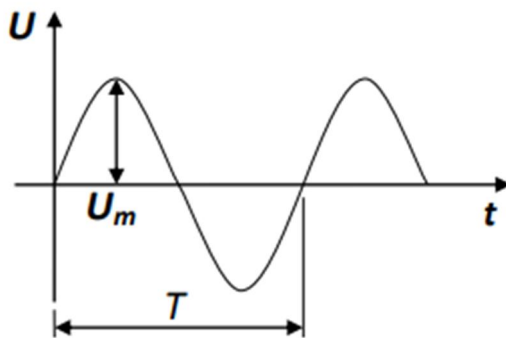


Рисунок 1.1 – Синусоидальный сигнал

Частота электрического сигнала ( $f$ ) – это количественная мера, характеризующая скорость изменения направления электрического тока (напряжения).

Угловая частота (круговая, циклическая) ( $\omega$ ) определяет скорость изменения вектора фазы электрического (магнитного) поля.

Частота электрического сигнала определяет скорость изменения направления электрического тока (раз или колебаний) в секунду. Единица измерения частоты – Герц (Гц).

Период электрического сигнала ( $T$ ) – величина обратная частоте, показывающая в течение, какого времени электрический сигнал совершает одно

циклическое колебание.

Длина волны ( $\lambda$ ) – это размерная величина, характеризующая один период колебание электромагнитного поля в пространстве.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{f} \quad (1.5)$$

Прямоугольный сигнал – это сигнал, имеющий прямоугольную форму (рис. 1.2) составляющих его импульсов, амплитуда которых постоянна (одинаковая)

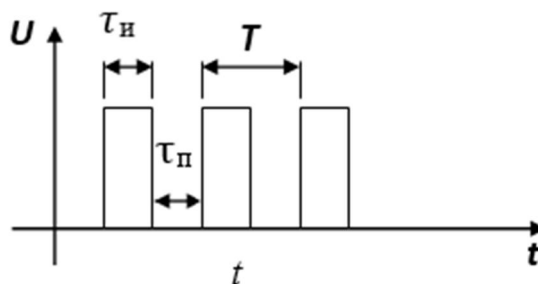


Рисунок 1.2 – Прямоугольный сигнал

$\tau_{и}$  – длительность импульса.

$\tau_{п}$  – длительность паузы.

Прямоугольный сигнал также характеризуется скважностью.

Скважность – это отношение периода следования импульсов к их длительности.

$$Q = \frac{T}{\tau_{и}} \quad (1.6)$$

Меандр – это периодический сигнал прямоугольной формы длительность импульса и длительность паузы, которого равны. То есть скважность такого сигнала равна 2.

$$\tau_{и} = \tau_{п} \quad (1.7)$$

Пилообразный сигнал – это сигнал, имеющий пилообразную форму составляющих его импульсов (рисунок 1.3), амплитуда и частота следования импульсов которого постоянна.

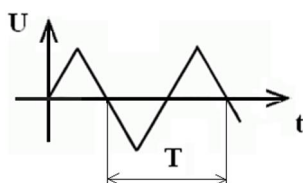


Рисунок 1.3 – Пилообразный сигнал

### **Задание № 1**

От генератора подать на осциллограф синусоидальный сигнал. Определить его параметры с помощью осциллографа. Выполнить математическую обработку результата эксперимента и привести графические представления результатов наблюдения.

### **Задание № 2**

От генератора подать на осциллограф треугольный сигнал. Определить его параметры с помощью осциллографа. Выполнить математическую обработку результата эксперимента и привести графические представления результатов наблюдения.

### **Задание № 3**

От генератора подать на осциллограф прямоугольный сигнал. Определить его параметры с помощью осциллографа. Выполнить математическую обработку результата эксперимента и привести графические представления результатов наблюдения.

## **1.3. Приборы и оборудование**

Универсальная лабораторная установка IDL-800 Digital Lab; цифровой осциллограф «БОРДО»; соединительные провода. Персональный компьютер..

## **1.5. Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Схемы измерительных установок.
3. Математическая обработка результатов эксперимента
4. Графическое представление результатов наблюдений.
5. Анализ полученных результатов.

## **1.6. Контрольные вопросы**

1. Амплитуда сигнала и методика ее измерения.
2. Виды сигналов.
3. Что такое скважность сигнала.
4. Какие измерения можно производить с помощью осциллографа.
5. Как с помощью осциллографа получить фигуру Лиссажу.

## *Лабораторная работа №2.*

### **ОБУЧЕНИЕ РАБОТЫ С МУЛЬТИМЕТРОМ**

**Цель работы:** Исследование работу делителей напряжения, измерить входные и выходные параметры.

#### *Теоретические сведения*

Блок – эксплуатационно-неавтономная, но схемное и конструктивно законченная часть устройства, выполняющая самостоятельную функцию и представляющая собой совокупность узлов или группы элементов и деталей (например, блок конденсаторов переменной емкости). Блок, предназначенный для реализации функций передачи, приема и преобразования информации или преобразования сигналов, называется радиоэлектронным блоком.

Для выбора и применения резисторов в конструкциях радиоэлектронных блоков их классифицируют по характеру изменения сопротивления, назначению и материалу резистивного элемента.

В соответствии с ГОСТ сокращенное обозначение резисторов состоит из трех элементов. Полное условное обозначение резисторов состоит из сокращенного, после которого для постоянных резисторов указывают номинальную мощность рассеяния, номинальное сопротивление, допустимое отклонение сопротивления в процентах, группу по уровню шумов (для непроволочных резисторов), группу по температурному коэффициенту сопротивления, обозначение климатического исполнения. На резисторы наносится буквенно-цифровая (или цветовая) маркировка. Она содержит номинальную мощность, номинальное сопротивление, допуск и дату изготовления. Номинальное сопротивление обозначается цифрами с указанием единицы измерения:

- Ом (Р, или Н по-старому, или вообще без буквы) – омы;
- кОм (К) – килоомы, МОм (М) – мегаомы;
- ГОм (G) – гигаомы, ТОм (T) – тераомы.

Буква обозначает множитель и определяет положение запятой десятичного знака. Полное обозначение допуска состоит из цифр, а кодирование – из букв. Для наиболее распространенных допусков используется кодировка, приведенная в табл. 2.1. Маломощные композиционные и пленочные резисторы с допуском от 2 до 20 % имеют стандартную схему цветной маркировки. При этом на резистор наносят пять цветных полосок (рис. 2.1). Первые две цветные полоски определяют первые две цифры номинального сопротивления, третья полоска – множитель, четвертая – допуск, пятая – уровень надежности (желтого или оранжевого цвета) или другие параметры.

Таблица 2.1 Кодированное обозначение номинального сопротивления, допуска и примеры обозначения

Сопротивление		Допуск		Примеры	
Множитель	Код 4	Допуск, %	Код	Полное обозначение	Код
1	K(E)	±0,1	B(Ж)*	3,9 Ом ± 5 %	3R9J
		±0,25	C(Y)	215 Ом ± 2 %	215RG
10 <sup>3</sup>	K(K)	±0,5	O(D)	1 кОм ± 5 %	1KOJ
		±1	F(P)	12,4 кОм (M) ± 1 %	12K4F
10 <sup>6</sup>	M(M)	±2	C(L)	10 кОм ± 5 %	10KJ
		±5	J(H)	100 кОм ± 5 %	M10J
10 <sup>9</sup>	CHГ	±10	K(C)	2,2 Мом4 ± 5 %	2M2K
		±20	M(B)	6,8 ГОм ± 20 %	6G8M
10 <sup>12</sup>	T(T)	±30	N(Φ)	1 ТОм ± 20 %	1ТОМ

\*В скобках указано старое обозначение.

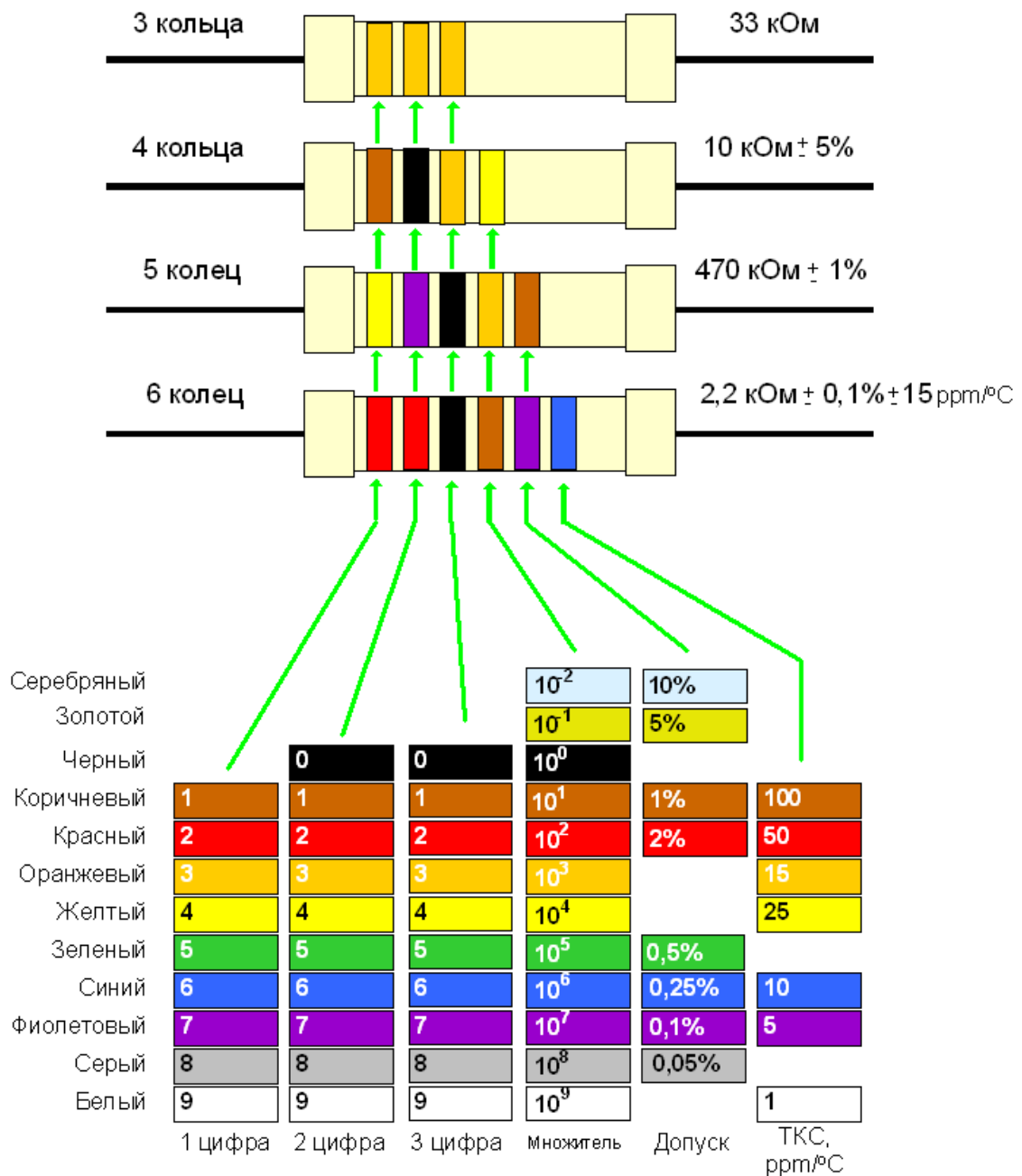


Рис 2.1 Схема цветовой кодировки резисторов

**Резистивный делитель напряжения.** Схема резистивного делителя напряжения приведена на рис. 2.2.

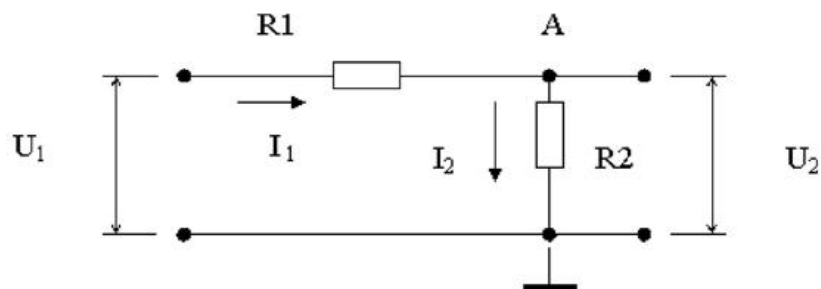


Рис. 2.2. Резистивный делитель напряжения

Резистивный делитель напряжения служит для изменения уровня входного напряжения  $U_1$  в соответствии с формулой  $U_2 = K U_1$ , где  $K$  – коэффициент передачи делителя. Для нахождения  $K$  составим уравнение по первому закону Кирхгофа для узла А в соответствии с выбранными направлениями токов:

$$I_1 - I_2 = 0. \quad (2.1)$$

Подставим в это уравнение значения токов:

$$\frac{U_1 - U_2}{R_1} - \frac{U_2 - 0}{R_2} = 0. \quad (2.2)$$

Представим уравнения в виде суммы слагаемых:

$$\frac{U_1}{R_1} - \frac{U_2}{R_1} - \frac{U_2}{R_2} = 0. \quad (2.3)$$

Перенесем в правую часть слагаемые с коэффициентами  $U_2$  и вынесем  $U_2$  за скобки:

$$\frac{U_1}{R_1} = U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.4)$$

Приведем к общему знаменателю выражения в скобках:

$$\frac{U_1}{R_1} = U_2 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}. \quad (2.5)$$

Найдем результат в виде отношения  $U_2 / U_1$ :

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.6)$$

### Порядок выполнения исследований

1. Собрать заданную схему резисторного делителя напряжения (рис. 2.3), рассчитать значения напряжения в точках А и В.

2. Измерить напряжение в точках А и В. Результат занести в табл. 2.2, сравнить с расчетными данными и сделать вывод.

Таблица 2.2

Номер варианта	Схема	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , кОм	$R_n$ , кОм
Для всех		11	11	11	11

1	а	8,2	43	13	15
2	б	33	11	8,2	18
3	в	9	5	-	1
4	а	6,2	9,1	8,2	15
5	б	8,2	9	18,6	11

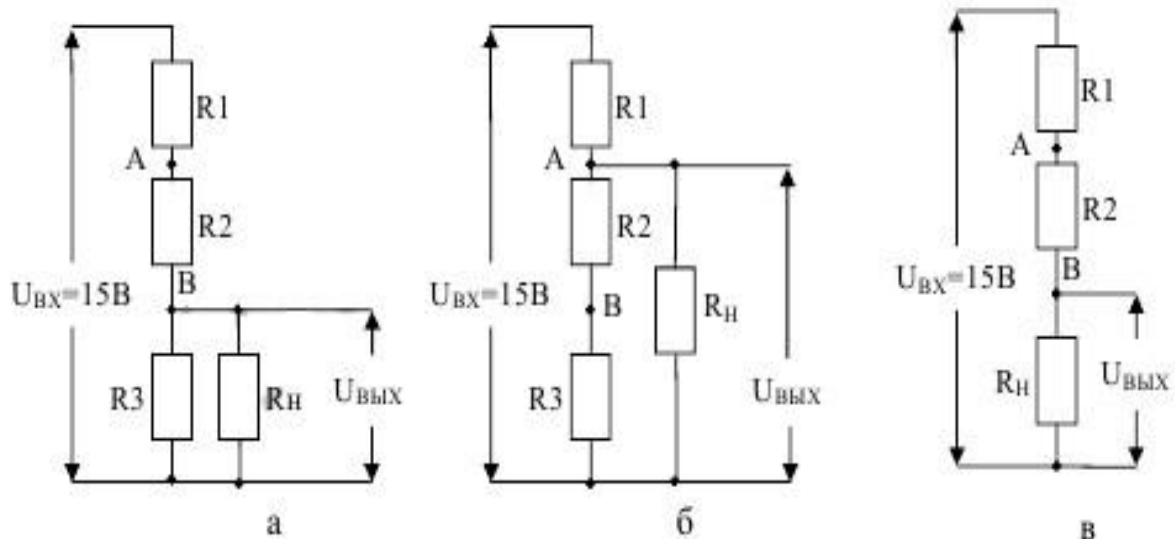


Рис. 2.3. Схемы резисторных делителей напряжения

#### Результат расчетов и наблюдений

Значение	Напряжение в точке <i>A</i>	Напряжение в точке <i>B</i>
Рассчитанное		
Измеренное		

#### Приборы и оборудование

Универсальная лабораторная установка IDL-800 Digital Lab; цифровой осциллограф БОРДО; персональный компьютер; резисторы; соединительные провода.

#### Содержание отчета.

1. Цель работы.
2. Основные формулы, используемые для расчетов.
3. Результат измерений и расчетов в виде таблиц.
4. Выводы
5. Ответы на контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы и задания

1. Определение мультиметр?
2. К каким гнездам необходимо подключить щупы мультиметра для измерения напряжения, силы тока?
3. Для чего служит резистивный делитель напряжения?
4. Выведите формулу коэффициент передачи резистивного делителя?

## *Лабораторная работа №3*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ (РЕЗИСТОРЫ)**

**Цель работы:** Ознакомиться с классификацией резисторов, номинальными рядами сопротивлений, а также различными принципами маркировки резисторов. Научиться определять маркировку резисторов и ТКС резисторов. Получить навыки определения ТКС резисторов, а также навыки обработки результатов исследования.

#### **Основные сведения о постоянных резисторах**

Резистором называют элемент электронной аппаратуры, обладающий свойством активного электрического сопротивления. В зависимости от применяемых материалов резисторы могут быть линейными (зависимость падения напряжения от тока представляет собой линейную функцию) и нелинейными, у которых сопротивление изменяется под воздействием тока или напряжения.

Мощные проволочные резисторы (от 5 до 1000 Вт) имеют трубчатое керамическое основание, на котором намотана спираль из нихрома (Ni 80% + Cr 20%) или других сплавов, содержащих никель и хром. У самых мощных резисторов спираль оголена, а у резисторов мощностью до 250 Вт покрыта защитным слоем стеклоэмали.

Композитные (объемные) резисторы (обычно мощностью от 0,125 до 2 Вт) представляют собой спеченную или полимеризованную многокомпонентную смесь, содержащую материал–связку (керамика, эпоксидная смола и др.) и проводящий компонент (обычно на основе углерода).

Пленочные резисторы (обычно от 0,075 до 2 Вт) имеют резистивный материал в виде пленки, нанесенной на диэлектрическое основание цилиндрической формы (объемные пленочные резисторы для навесного монтажа) или на плоское основание (резисторы для поверхностного монтажа или SMD-резисторы), а по типу пленки подразделяются на углеродистые, металлопленочные, металлоокисные и металлодиэлектрические.

Основными параметрами постоянных резисторов являются номинальное сопротивление, допустимое отклонение, номинальная рассеиваемая мощность и температурный коэффициент сопротивления.

Величина сопротивления резистора обычно указывается на его корпусе. Маркировка резисторов выполняется различными способами, но наиболее часто используется запись трех- или четырехзначным числовым кодом. В этом случае первые две (для трехзначного кода) или три (для четырехзначного кода) цифры

задают значащую часть номинала сопротивления, а последняя (соответственно третья или четвертая) выражает степень десятки. То есть маркировка **123** обозначает  $R = 12 \cdot 10^3 = 12 \text{ кОм}$ , а маркировка **5432** –  $R = 543 \cdot 10^2 = 54,3 \text{ кОм}$ .

Другой широко распространенной системой маркировки резисторов является цветное кодирование. На резистор в этом случае наносят цветные кольца, образующие код, которым шифруют номинальное значение и допуск (рис. 3.1, а). Менее распространенная кодировка 6 кольцами кодирует также значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС или  $\alpha_R$ ) (рис.3.1, б).

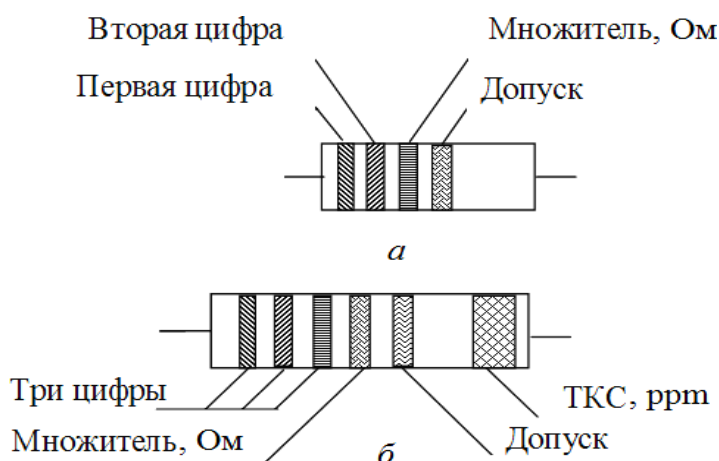


Рисунок 3.1 – Маркировка цветным кодом:  
 а) четырьмя кольцами; б) шестью кольцами

Сведения о соответствии цветов цифрам представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Сведения о соответствии цветов цифрам маркировки резисторов.

Цвет кольца	Номинальное сопротивление, Ом				Допуск, %	ТКС, ppm/°C
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель		
Серебристый	–	–	–	$10^{-2}$	$\pm 10$	–
Золотистый	–	–	–	$10^{-1}$	$\pm 5$	–
Черный	–	0	–	1	–	200
Коричневый	1	1	1	10	$\pm 1$	100
Красный	2	2	2	$10^2$	$\pm 2$	50
Оранжевый	3	3	3	$10^3$	–	15
Желтый	4	4	4	$10^4$	–	25
Зеленый	5	5	5	$10^5$	$\pm 0,5$	–
Голубой	6	6	6	$10^6$	$\pm 0,25$	10
Фиолетовый	7	7	7	$10^7$	$\pm 0,1$	5
Серый	8	8	8	$10^8$	$\pm 0,05$	1

Белый	9	9	9	10 <sup>9</sup>	–	–
-------	---	---	---	-----------------	---	---

Допустимое отклонение означает величину, на которую реальное сопротивление резистора может отличаться от указываемого на корпусе резистора и в резисторах, используемых в лабораторных работах, может составлять до 10%.

Температурный коэффициент сопротивления характеризует чувствительность сопротивления резистора к изменениям температуры. Температурный коэффициент сопротивления выражают в относительных единицах. Так как температурные изменения сопротивления резисторов очень малы, в справочниках  $\alpha_R$  указывают в единицах миллионных долей относительного изменения сопротивления на градус Цельсия ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). В настоящее время во многих справочниках вместо  $10^{-6}$  принято обозначение ppm (*parts per million* – «частей на миллион»). ТКС записывают в этом случае в ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Значение  $\alpha_R$  резистора [ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ] определяется по формуле

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \cdot 10^6, \quad (3.1)$$

где  $R$  – сопротивление резистора при некоторой заданной температуре;  $\Delta R$  – изменение сопротивления при изменении температуры на  $\Delta T$ .

### Порядок выполнения исследований

1. Произвести расшифровку номинальных сопротивлений постоянных резисторов по маркировке, результаты занести в протокол.

2. Включить стенд и мультиметры.

3. Установить мультиметр DT890B+ в необходимый диапазон измерения сопротивлений (ближайший выше значения, определенного по маркировке, например, для 36 Ом установить 200 Ом, для 7,5 кОм – 20 кОм и т. д.).

4. Установить мультиметр M890C+ в диапазон измерений температуры, записать его показания (комнатную температуру) в протокол.

5. Поместить первый из исследуемых резисторов в нагревательный элемент, подключить выводы резистора к шинам, к этим же шинам подключить мультиметр DT890B+. Собранный элемент должен соответствовать рис. 3.2.

6. Записать показания мультиметра DT890B+ в протокол.

7. Включить нагревательный элемент. Когда температура достигнет 60  $^{\circ}\text{C}$  и 90  $^{\circ}\text{C}$ , записать показания в протокол.

8. Заменить исследуемый резистор, отключить нагревательный элемент. Резистор через 1–2 минуты приобретет температуру нагревательного элемента и начнет вместе с ним остывать. При температурах 60  $^{\circ}\text{C}$  и 90  $^{\circ}\text{C}$  записать показания

в протокол.

9. Повторить измерения по пп. 7 и 8 для третьего (в режиме нагрева) и четвертого резистора (в режиме остывания), разобрать схему измерений.

10. Используя блок резисторов с неизвестными номиналами «треугольник», последовательно измерить сопротивления сторон (при измерении выбирать диапазон, как указано в п. 3), записать показания в протокол.

### Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Схемы измерений:

а) для пп. 5–9, б) для п. 10

2. Заполненная таблица 3.2, в которую должны быть внесены результаты расчета температурных коэффициентов сопротивления для диапазонов от комнатной температуры до 60 °С и от 60 °С до 90 °С (по формуле 1.1).

3. Графики зависимостей сопротивления от температуры для всех исследованных резисторов (рекомендуется построить все четыре зависимости на одном графике, для оптимального отображения хода зависимостей целесообразно по оси  $R(T)$  использовать логарифмическую шкалу).

Таблица 3.2 – Результаты исследования ТКС постоянных резисторов

№	Тип резистора	Сопротивление, $R$ , Ом				$\alpha_R$ , ppm	
		по маркировке	при ___°С (комн.)	при 60 °С	при 90 °С	Диапазон «___°С – 60 °С»	Диапазон Н «60 °С – 90 °С»
1	Композитный						
2	С углеродной пленкой						
3	Металлопленочный						
4	Пленочный планарный						

4. Подробный расчет сопротивлений резисторов в блоке «треугольник». После получения результата необходимо определить вероятное значение каждого резистора из номинального ряда (например, для полученной величины «1,234 кОм» указать «1,2 кОм из ряда E24»).

5. Выводы (с анализом полученных характеристик, описанием соответствия этих характеристик теории, причины отличий).

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМИСТОРОВ И ПОЗИСТОРОВ

**Цель работы:** Ознакомиться с классификацией резисторов, номинальными рядами сопротивлений, а также различными принципами маркировки резисторов. Научиться определять маркировку резисторов и ТКС резисторов. Получить навыки определения ТКС резисторов, а также навыки обработки результатов исследования.

#### Основные сведения о терморезисторах.

В работе исследуются температурные характеристики полупроводниковых терморезисторов с отрицательным ТКС (*Negative Temperature Coefficient* – NTC-термисторы или просто термисторы) и положительным ТКС (*Positive Temperature Coefficient* – PTC-термисторы или позисторы).

Термисторы состоят из поликристаллической смеси различных спеченных оксидов (например,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Zn}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{MgCr}_2\text{O}_4$  и  $\text{TiO}_2$ ), сверху компоненты покрываются защитной стеклоэмалью. Они характеризуются сильно падающей монотонной зависимостью сопротивления от температуры. Эта зависимость описывается следующим выражением:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (2.1)$$

где  $R_T$  – сопротивление термистора при текущей температуре  $T$ ;  $R_0$  – номинальное сопротивление термистора, указываемое для температуры  $T_0$ , равной  $+25^\circ\text{C}$  или  $298\text{ K}$ ;  $B$  – постоянная, зависящая от материала резистора (значение  $B$  обычно лежит в пределах от  $1000$  до  $6000\text{ K}$ ). Характер зависимости сопротивления термистора от температуры иллюстрируется рис. 2.1.

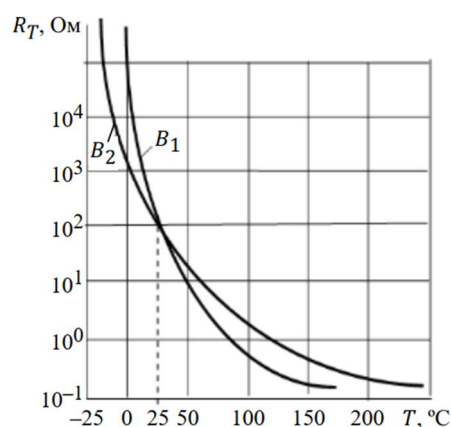


Рисунок 2.1 – Типовые температурные зависимости термисторов

По определению, температурный коэффициент сопротивления любого резистора находится по формуле (1.1). Если подставить (2.1) в (1.1) и взять производную, то получим следующее выражение для ТКС NTC-термистора:

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2}. \quad (2.2)$$

При использовании данной формулы следует помнить, что  $B$  и  $T$  выражаются в кельвинах. Из (2.2) следует, что  $\alpha_T$  термистора не является константой, а зависит от температуры (это отражено в обозначении  $\alpha_T$  вместо  $\alpha_R$ ). Во всей области рабочих температур (обычно от  $-55$  до  $+155$  °С) абсолютное значение  $\alpha_T$  термисторов оказывается в десятки раз большим, чем у линейных постоянных резисторов. Термисторы широко используются в системах автоматики как датчики температуры и в устройствах компенсации температурного дрейфа выходных сигналов усилителей.

Позисторы обычно изготавливаются на основе поликристаллической керамики из титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ), легированной различными примесями. Сопротивление позисторов на несколько порядков возрастает после превышения их температуры над некоторым значением ( $T_{ref}$ ), что связано с фазовым переходом из сегнетоэлектрического состояния в параэлектрическое (рис. 2.2). Масштаб по оси ординат принято отображать логарифмическим, поскольку рост сопротивления от температуры носит почти экспоненциальный характер.

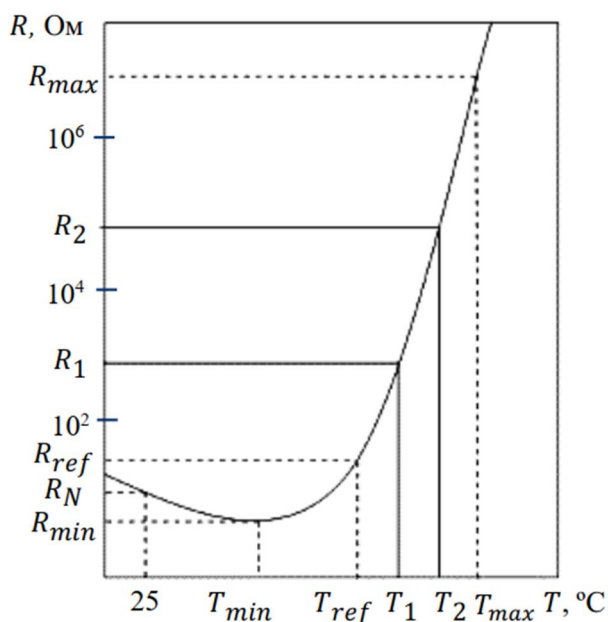


Рисунок 2.2 – Типовая температурная зависимость позистора

В области резкого увеличения сопротивления  $\alpha_T$  позистора приблизительно постоянна. Тогда, если на этом участке известны два значения

сопротивления, например,  $R_1$  и  $R_2$ , которые соответствуют двум температурам  $T_1$  и  $T_2$ , то для  $\alpha_T$  будет справедливо:

$$\alpha_T = -\frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{T_1 - T_2}. \quad (2.3)$$

В пределах этого температурного диапазона, зная сопротивление для некоторой температуры, можно рассчитать, каким станет сопротивление при другой температуре:

$$R_2 = R_1 \exp[\alpha_T (T_2 - T_1)]. \quad (2.4)$$

С помощью формулы (2.4) может быть рассчитано сопротивление позистора для выбранной температуры на основании его справочных данных. В этом случае вместо сопротивления  $R_1$  и температуры  $T_1$  используют  $R_{ref}$  и  $T_{ref}$ , соответственно. Позисторы нашли широкое применение в схемах ограничения тока, а также как высокочувствительные датчики температуры.

### Порядок выполнения исследований

1. Включить стенд и мультиметры, установить мультиметр DT890B+ в необходимый диапазон измерения сопротивления (в зависимости от номинала термистора), а мультиметр M890C+ – в диапазон измерений температуры, записать его показания в протокол.

2. Поместить термистор в нагревательный элемент, собрать схему в соответствии с рис. 1.2. Записать показания мультиметра DT890B+ в протокол.

3. Включить нагревательный элемент. Снять зависимость сопротивления термистора от температуры, нагревая его до температуры 90 °С. Результаты исследований занести в протокол.

4. Заменить термистор на позистор и повторить измерения по п. 3, результаты исследований занести в протокол. В ходе измерений необходимо изменять диапазон мультиметра в зависимости от роста сопротивления.

5. Для измерения вольтамперной характеристики позистора в режиме само-разогрева собрать схему в соответствии с рис. 2.3.

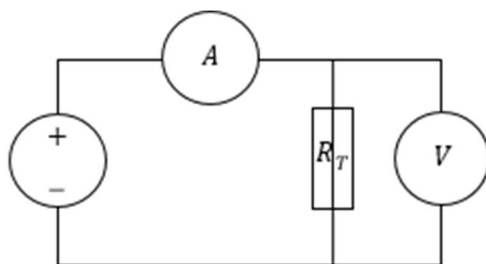


Рисунок 2.3 – Схема измерения ВАХ позистора

6. Постепенно увеличивая напряжение источника питания от 0 до 20 В, снять зависимость тока, протекающего через позистор, от подаваемого на него напряжения. Результаты исследований занести в протокол.

### Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений (рис. 1.3, а и рис. 2.3).

2. Заполненная таблица 2.1, в которую должны быть внесены результаты расчета  $\alpha_T$  для диапазонов от комнатной температуры до 90 °С. Значения  $\alpha_T$  рассчитываются по данным соседних столбцов таблицы с помощью формулы (1.1).  $T$  и  $R_T$  каждого столбца (кроме первого и последнего) участвуют в расчетах дважды как левая и правая границы выделяемых интервалов.

Таблица 2.1 – Исследование температурной зависимости сопротивления термистора

Температура $T$ , °С	Комн.	30	40	...	...	90
Температура $T$ , К						
Сопротивление $R_T$ , Ом						
$\alpha_T$ , ppm/К						

3. График зависимости сопротивления термистора от температуры.

4. Заполненная таблица 2.2, в которую должны быть внесены результаты расчета  $\alpha_T$  для диапазонов от комнатной температуры до 90 °С, а также рассчитанное экстраполированное значение температуры при 125 °С. Расчет  $\alpha_T$  производится по (2.3) для возрастающей ветви зависимости. На основании рассчитанного значения  $\alpha_T$  с помощью (2.4) производится экстраполяция графика до температуры 125 °С.

Таблица 2.2 – Исследование температурной зависимости сопротивления позистора

Температура $T$ , °С	Комн.	30	40	...	90	125
Температура $T$ , К						
Сопротивление $R_T$ , Ом						
$\alpha_T$ , ppm/°С						

5. График зависимости сопротивления позистора от температуры (для оптимального отображения хода зависимости целесообразно по оси  $R(T)$  использовать логарифмическую шкалу).

6. Заполненная таблица 2.3, в которую должны быть внесены результаты измерения вольтамперной характеристики позистора в режиме саморазогрева.

Таблица 2.3 – Результаты исследования вольтамперной характеристики позистора

Напряжение $U$ , В	0	1	2	...	...	20
Ток $I$ , мА	0					

7. График вольтамперной характеристики позистора.

8. Выводы (с анализом полученных характеристик, описанием соответствия этих характеристик теории, причины отличий).

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИТРОНОВ И ВАРИСТОРОВ

**Цель работы:** Изучить различные принципы маркировки резисторов и основные технические характеристики конденсаторов. Научиться определять маркировку резисторов. Получить навыки определения ВАХ стабилитронов и варисторов прямым и косвенным методами, а также навыками обработки результатов исследования.

#### Основные сведения о стабилитронах и варисторах

Стабилитрон – полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации напряжения в источниках питания. По сравнению с обычными диодами имеет достаточно низкое регламентированное напряжение пробоя (при обратном включении) и может поддерживать это напряжение на постоянном уровне при значительном изменении силы обратного тока. Тогда, если параллельно стабилитрону подключить нагрузку, то напряжение на ней тоже не будет изменяться. Стабилитрон характеризуется следующими основными параметрами: минимальный и максимальный токи стабилизации, напряжение стабилизации при заданном токе стабилизации, дифференциальное сопротивление, температурный коэффициент напряжения стабилизации. На рис. 3.1 показана вольтамперная характеристика стабилитрона, где  $U_{\text{стаб}}$  – это напряжение стабилизации.

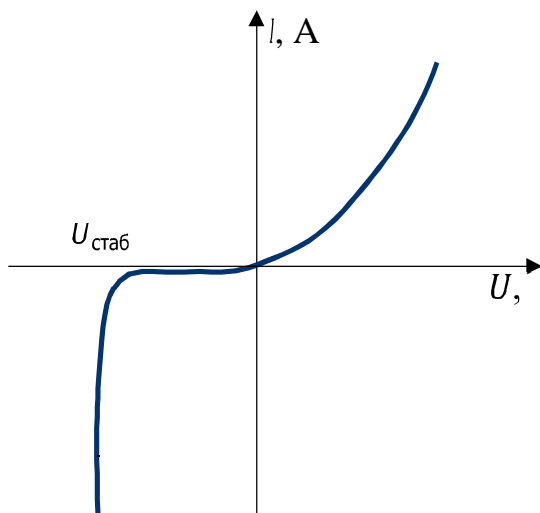


Рисунок 3.1 – ВАХ стабилитрона

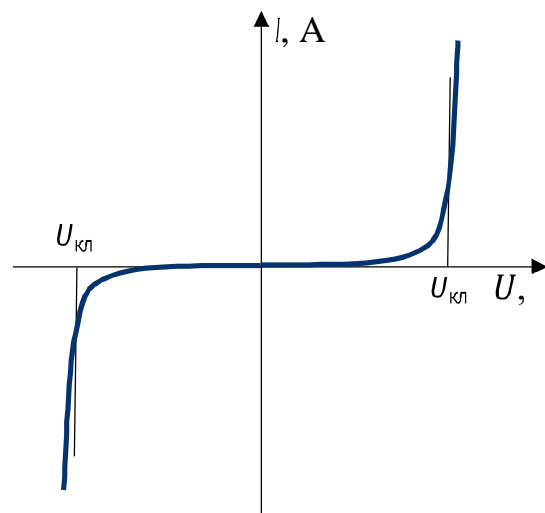


Рисунок 3.2 – ВАХ варистора

Варисторы представляют собой полупроводниковые резисторы, сопротивление которых начинает резко падать, если приложенное напряжение

увеличивается сверх определенного значения. Вольтамперная характеристика варистора (рис. 3.2) симметрична относительно начала осей координат. Варисторы изготавливают методами керамической технологии из карбида кремния или оксидов металлов. Уменьшение сопротивления с ростом напряжения связано с падением сопротивления контактов между зернами SiC или оксида. Это происходит вследствие нелинейного роста тока через  $p-n$ -переходы, образующиеся на этих контактах, в результате автоэлектронной эмиссии из острых участков зерен. Основными параметрами варисторов являются классификационное напряжение  $U_{кл}$ , максимально допустимая выделяемая энергия  $W$  и средняя рассеиваемая мощность.

Напряжение  $U_{кл}$  соответствует току через варистор, равному 1 мА. Варисторы всегда работают при напряжениях выше  $U_{кл}$ , так как основное применение варисторов – защита от кратковременных перенапряжений шунтирующим воздействием.

Одним из наиболее информативных параметров стабилитрона и варистора является их вольтамперная характеристика. Она может быть измерена несколькими методами. Наиболее простой из них – прямой, схема которого приведена на рис. 2.3. При этом ток в цепи измеряется амперметром, подключенным к исследуемому элементу последовательно, а напряжение на элементе – вольтметром, подключенным к исследуемому элементу параллельно. Если измеряемые токи малы, то целесообразно использовать схему косвенных измерений, приведенную на рис. 3.3.

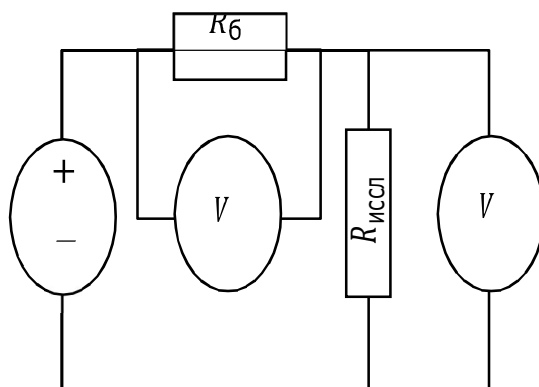


Рисунок 3.3 – Схема косвенного измерения ВАХ

В этом случае падение напряжения на исследуемом элементе  $R_{иссл}$  определяется также вольтметром, подключенным к нему параллельно, а ток, протекающий в схеме, рассчитывается как отношение напряжения, падающего на балластном резисторе  $R_6$ , к величине этого сопротивления.

## Порядок выполнения исследований

1. Включить стенд и мультиметры, установить мультиметр DT890B+ в режим амперметра постоянного тока, в диапазон «200 мА», а мультиметр M890C+ – в режим вольтметра постоянного напряжения, в диапазон «20 В». Собрать схему для измерения обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона в соответствии с рис. 2.3 (прямым методом), при этом стабилитрон подключать, обязательно соблюдая полярность (черный провод – к источнику питания, красный – к заземлению).

2. Снять вольтамперную характеристику и занести результаты в протокол. Поскольку при достижении напряжения  $U_{\text{стаб}}$  начинается быстрый рост тока, то в области  $U_{\text{стаб}}$  характеристика снимается с очень малым шагом, ориентируясь на показания амперметра, что отражено в таблице протокола ( $U_{\text{стаб}}$  у исследуемых стабилитронов может варьироваться примерно от 8 В до 13 В).

3. Измерить с помощью любого мультиметра сопротивление балластного резистора ( $R_{\text{ном}} = 620 \text{ Ом}$ ), записать результат в протокол.

4. Собрать схему для измерения обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона в соответствии с рис. 3.3 (косвенным методом), при этом стабилитрон подключать, обязательно соблюдая полярность (черный провод – к источнику питания, красный – к заземлению).

5. Снять вольтамперную характеристику и занести результаты в протокол. Поскольку при достижении напряжения  $U_{\text{стаб}}$  начинается быстрый рост тока, то в области  $U_{\text{стаб}}$  характеристика снимается с очень малым шагом, ориентируясь на показания вольтметра, подключенного к  $R_6$ , что отражено в таблице протокола.

6. Повторить пп. 1–5 для измерения одной ветви вольтамперной характеристики варистора с учетом того, что:

- вольтамперная характеристика варистора симметрична, поэтому соблюдать полярность при подключении не требуется;
- номинал балластного сопротивления для варистора  $R_{\text{ном}} = 2,2 \text{ Ом}$ ;
- вместо напряжения стабилизации  $U_{\text{стаб}}$  быстрый рост ВАХ наблюдается при  $U_{\text{кл}}$ , которое варьируется от 15 В до 21 В.

## Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений (рис. 2.3 и рис. 3.3).
2. Заполненные таблицы 3.1 и 3.2, в которые должны быть внесены результаты измерений обратной ветви ВАХ стабилитрона прямым и косвенным методами.

Таблица 3.1 – Исследование вольтамперной характеристики стабилитрона прямым методом

Напряжение $U$ , В	0					
Ток $I$ , мА	0					

Таблица 3.2 – Исследование вольтамперной характеристики стабилитрона косвенным методом

Напряжение $U$ , В	0					
Напряжение $U_6$ , мВ	0					
Ток $I$ , мА	0					

3. График обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона – на одном рисунке должны быть построены зависимости, полученные прямым и косвенным методом.

4. Заполненные таблицы 3.3 и 3.4, в которые должны быть внесены результаты измерений ВАХ варистора прямым и косвенным методами.

Таблица 3.3 – Исследование вольтамперной характеристики варистора прямым методом

Напряжение $U$ , В	0					
Ток $I$ , мА	0					

Таблица 3.4 – Исследование вольтамперной характеристики варистора косвенным методом

Напряжение $U$ , В	0					
Напряжение $U_6$ , мВ	0					
Ток $I$ , мА	0					

5. График вольтамперной характеристики варистора – на одном рисунке должны быть построены зависимости, полученные прямым и косвенным методом.

6. Выводы (с анализом полученных характеристик, описанием соответствия этих характеристик теории, причины отличий эксперимента и теории).

## Лабораторная работа №6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ (КОНДЕНСАТОРЫ)

**Цель работы:** Изучить классификацию и различные принципы маркировки конденсаторов, и их основные технические характеристики, а также процессы зарядки и разрядки конденсаторов. Научиться определять маркировку резисторов и конденсаторов, а также определять температурный коэффициент ёмкости. Овладеть навыками определения ТКЕ, а также навыками обработки результатов исследования.

#### Основные сведения о конденсаторах

Конденсатор предназначен для накопления электрического заряда. Любые два проводника, разделенные диэлектриком, образуют конденсатор. Заряд конденсатора  $Q$  связан с напряжением  $U$  на его электродах и его емкостью  $C$  выражениями  $Q = CU$ .

Основная характеристика конденсатора – емкость – выражается в фарадах [Ф]. Реальные конденсаторы обычно имеют емкость, составляющую миллиардные, миллионные или тысячные доли фарада. Поэтому для маркировки их емкости используются производные единицы: пикофарады ( $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ), нанофарады ( $1 \text{ нФ} = 1000 \text{ пФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$ ) и микрофарады ( $1 \text{ мкФ} = 1000 \text{ нФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ).

Наиболее часто емкость указывают на корпусе конденсатора в явном виде, например: 510 пФ; 15 нФ; 0,022 мкФ; 100 мкФ; 510 pF; 15 nF; 0.022  $\mu\text{F}$ ; 100  $\mu\text{F}$ . На конденсаторах малого размера принято не указывать единицы измерения: их емкость всегда выражают в пикофарадах числовым кодом, в котором первые две цифры являются значащими, а последняя цифра указывает степень  $N$  множителя  $10^N$ . Например, маркировка «102» на корпусе конденсатора означает емкость  $10 \cdot 10^2 \text{ пФ} = 1000 \text{ пФ}$ .

Допустимые отклонения емкости конденсатора от номинального значения обычно связаны с температурными нестабильностями в диапазоне рабочих температур. На пленочных, бумажных и электролитических конденсаторах допуск приводится в маркировке и указывается в процентах, например:  $\pm 5\%$ ;  $\pm 10\%$ ;  $\pm 20\%$ . Здесь принято два вида обозначений допуска. Для конденсаторов с предсказуемой монотонно изменяющейся зависимостью емкости от температуры, то есть с известным значением температурного коэффициента емкости (ТКЕ), введены группы термостабильности, указываемые на корпусе конденсатора вместе с его номинальной емкостью (табл. 4.1).

Для этой группы конденсаторов во всем диапазоне рабочих температур с

определенным допуском, достигающим  $\pm 20$ – $100\%$  от объявленной величины, ТКЕ может быть задан как постоянная величина, рассчитываемая по формуле

$$a_c = TKE = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dT} = \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta T}. \quad (4.1)$$

Таблица 4.1 – Группы термостабильности конденсаторов с постоянным ТКЕ

Относительное изменение емкости, ppm/°C	+100	+33	0	–47	–75	–150	–750	–1500
Отечественное обозначение	П100	П33	МПО	М47	М75	М150	М750	М1500
Зарубежное обозначение	A	B	G	H	L	P	U	–

Обозначение группы термостабильности конденсаторов отечественного производства, у которых в пределах рабочих температур изменение емкости не имеет монотонного характера, начинается с русской буквы Н, далее указывается допуск (в процентах) изменения емкости (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Группы термостабильности конденсаторов с неопределенным ТКЕ

Относительное изменение емкости ( $\Delta C/C$ ), %	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 30$	$\pm 50$	$\pm 70$	Более $\pm 70$
Отечественное обозначение	H10	H20	H30	H50	H70	H90
Зарубежное обозначение	2B	2C	2D (–30%+20%)	2E (–55%+20%)	–	2F (–80%+30%)

Зависимости тока и напряжения на конденсаторе во время переходных процессов в RC-цепях с источниками постоянного напряжения описываются экспоненциальной функцией. Общее решение дифференциального уравнения для цепи зарядки/разрядки конденсатора С через резистор R дает следующую зависимость напряжения на конденсаторе от текущего времени.

$$U(t) = U_{\infty} - (U_{\infty} - U_0)e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.2)$$

где  $U_{\infty}$  – напряжение на конденсаторе после окончания переходного процесса, то есть для времени  $t = \infty$ ;  $U_0$  – напряжение на конденсаторе в момент начала переходного процесса, т. е. для  $t = 0$ ;  $\tau = RC$  – постоянная времени цепи зарядки/разрядки.

Если конденсатор изначально не заряжен ( $U_0 = 0$ ), а к моменту полной зарядки (при  $t = \infty$ ) напряжение на нем становится равным напряжению источника

питания ( $U_{\infty} = U_{\Pi}$ ), то формула (4.2) приобретает вид

$$U(t) = U_{\Pi} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right]. \quad (4.3)$$

Напротив, если в начале переходного процесса ( $t = 0$ ) конденсатор был заряжен до напряжения  $U_0$ , а к концу переходного процесса он разряжается до нуля, т. е.  $U_{\infty} = 0$ , то формула (4.2) приводится к виду

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.4)$$

### Порядок выполнения исследований

1. Включить стенд и мультиметры.
2. Установить мультиметр DT890B+ в необходимый диапазон измерения емкости, установить мультиметр M890C+ в диапазон измерений температуры, записать его показания (комнатную температуру) в протокол.
3. Поместить конденсатор Y5V в нагревательный элемент, подключить выводы конденсатора к шинам, к этим же шинам подключить мультиметр DT890B+. Собранный схема должна соответствовать рис. 4.1.

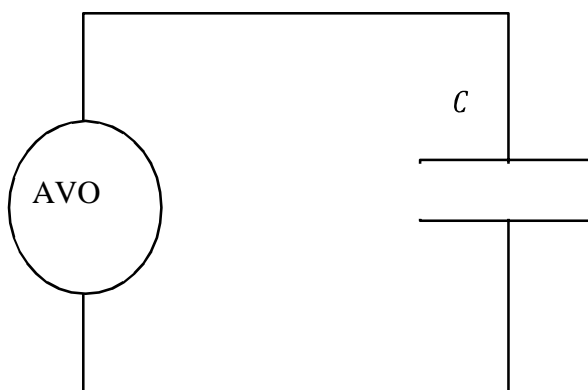


Рисунок 4.1 – Измерение температурной зависимости емкости конденсатора

4. Включить нагревательный элемент. Снять зависимость емкости конденсатора от температуры, нагревая его до 90 °С. Результаты исследований занести в протокол.
5. Заменить конденсатор Y5V на конденсатор X7R и повторить измерения по пп. 3–4, результаты исследований занести в протокол.
6. Измерить сопротивления балластных резисторов  $R_{61}$  и  $R_{62}$ , результаты занести в протокол.
7. Для измерения процесса зарядки и разрядки конденсатора с емкостью 1000 мкФ с резистором  $R_{61}$  собрать схему в соответствии с рис. 4.2. При подключении соблюдать полярность конденсатора (красный провод к

источнику питания, черный – к заземлению). До начала измерений одна клемма балластного резистора  $R_{61}$  ни к чему не подключается (положение «1»).

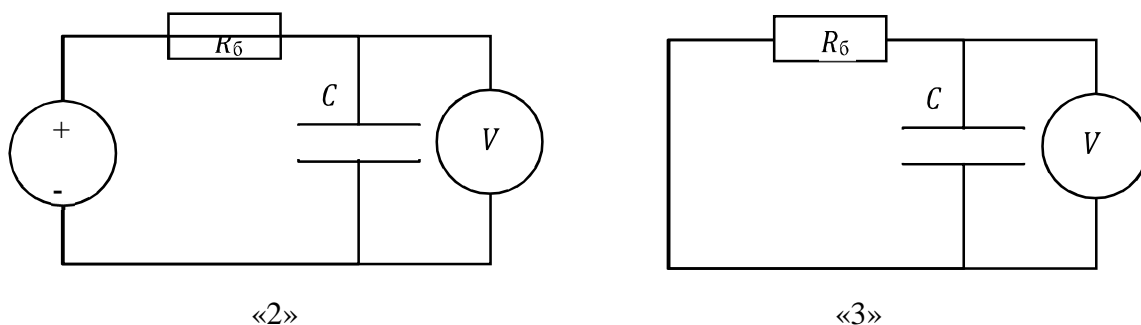


Рисунок 4.2 – Исследование процесса зарядки и разрядки конденсатора:  
«2» – момент начала зарядки, «3» – момент начала разрядки

8. Приготовить секундомер, включить стенд, выставить напряжение на источнике питания 18 В, убедиться, что заряд конденсатора равен 0.

9. Включить клемму  $R_{61}$  в положение «2» с одновременным запуском секундомера. Через каждые 15 с записывать в протокол показания вольтметра до тех пор, пока напряжение конденсатора не станет равным 15 В. Далее для исследования процесса разрядки конденсатора резистор  $R_{61}$  переключить в положение «3» – заземлить, что приведет к тому, что конденсатор начнет разряжаться через резистор  $R_{61}$ . Начиная с 15 В через каждые 15 с записывать в протокол показания вольтметра до тех пор, пока напряжение конденсатора не станет равным 1 В.

10. Повторить измерения по пп. 7–9 с балластным резистором  $R_{62}$ .

### Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений (рис. 4.1 и рис. 4.2).

2. Заполненная таблица 4.3 с рассчитанными значениями ТКЕ по формуле

4.1 (значения ТКЕ рассчитываются по данным соседних столбцов таблицы для каждого столбца (кроме первого), данные температуры и емкости каждого столбца участвуют в расчетах дважды как левая и правая границы выделяемых интервалов).

Таблица 4.3 – Результаты исследования ТКЕ конденсаторов

Температура $T$ , °С	—	30	40	50	60	70	80	90
Емкость X7R, _____ Ф								
ТКЕ X7R, ppm/°С								
Емкость Y5V, _____ Ф								

ТКЕ Y5V, ppm/°C								
-----------------	--	--	--	--	--	--	--	--

3. Графики зависимостей емкости и ТКЕ от температуры.

4. Заполненная таблица 4.4 для  $R_{61}$  (расчет теоретических зависимостей зарядки и разрядки конденсатора производится по формулам 4.3 и 4.4).

Таблица 4.4 – Результаты исследования зарядки и разрядки конденсатора 1000 мкФ

Время $t$ , с	0	15	30	45	...	
$U_{з. \text{э}}$ конденсатора (эксп.), В	0				...	15
$U_{р. \text{э}}$ конденсатора (эксп.), В	15				...	1
$U_{з. \text{т}}$ конденсатора (расч.), В	0				...	15
$U_{р. \text{т}}$ конденсатора (расч.), В	15				...	1

5. Графики экспериментальной и теоретической зависимостей изменения напряжения от времени на конденсаторе при его зарядке и разрядке (для удобства анализа все 4 графика выполнять на одном рисунке).

6. Результаты расчета, таблицы и графики, аналогично пп. 4–5 для  $R_{62}$ .

7. Выводы (с анализом полученных характеристик).

## Лабораторная работа № 7

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

**Цель работы:** Ознакомиться с различными принципами маркировки резисторов, изучить основные характеристики и основные классы индуктивностей. Научиться определять индуктивность катушек. Получить навыки определения добротности контура и резонансной частоты от числа витков катушки, а также навыками обработки результатов исследования.

#### Основные сведения об индуктивностях

Движущиеся заряды порождают магнитное поле. Магнитное поле имеет направленный характер и характеризуется векторной величиной  $B$ , называемой электромагнитной индукцией. Было бы логично присвоить величине  $B$ , по аналогии с напряженностью электрического поля  $E$ , название «напряженность магнитного поля». Однако по историческим причинам это название носит вспомогательная величина  $H$ , аналогичная вектору электрического смещения  $D$ . Связь между  $B$  и  $H$  определяется следующей формулой:

$$B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H, \quad (5.1)$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума (воздуха);  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества по отношению к вакууму.

Магнитное поле удастся сконцентрировать внутри катушки, образованной множеством близко расположенных витков с током  $I$ . Если принять, что все составляющие индукции по сечению катушки  $S$  равны некоторому среднему значению  $B$ , что справедливо для катушек с сердечником, то отдельные значения  $B$  суммируются в полный поток электромагнитной индукции, или магнитный поток, определяемый как

$$\Phi = B \cdot S = L \cdot I, \quad (5.2)$$

где  $L$  – коэффициент пропорциональности между током и полным магнитным потоком катушки, называемый индуктивностью катушки. Индуктивность зависит от геометрии катушки, от магнитной проницаемости сердечника и от магнитных свойств окружающей среды. Так, для дросселей с замкнутыми тороидальными магнитопроводами индуктивность определяется формулой

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot S}{l_{cp}}, \quad (5.3)$$

где  $N$  – количество витков;  $S$  – сечение магнитопровода;  $l_{cp}$  – средняя длина

окружности, определяемая как полусумма длин окружностей внутреннего и внешнего контуров магнитопровода. В лабораторной работе используется сердечник с  $\mu = 500$ ,  $l_{\text{ср}} = 78$  мм,  $S = 54$  мм<sup>2</sup>.

Единицей индуктивности является генри [Гн]. Одному генри соответствует индуктивность катушки без сердечника, которая развивает поток электромагнитной индукции в 1 Вб (вебер) в результате протекания тока 1 А.

В соответствии с законом Ленца изменение магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего замкнутый контур, порождает в нем возникновение индуцированной ЭДС ( $E$ ):

$$E = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.4)$$

С учетом (5.2) из (5.4) получаем выражение для ЭДС катушки индуктивности при изменении протекающего через нее тока:

$$E = -L \frac{dI}{dt}, \quad (5.5)$$

Из этого следует, что включение индуктивности последовательно с цепью нагрузки, питаемой от пульсирующего источника тока, снижает его пульсации за счет возникающей ЭДС самоиндукции. Если предположить, что ток в катушке изменяется от некоторого значения  $I$  до нуля, то работа, совершаемая этим током за время  $dt$ , будет определяться как  $dA = E \cdot I \cdot dt$ . Тогда, если индуктивность не зависит от тока, очевидно, что магнитное поле является носителем энергии, за счет которой и совершается данная работа. Таким образом, катушка с индуктивностью  $L$ , через которую протекает ток  $I$ , запасает энергию  $W$ , равную

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (5.6)$$

Катушка не может запасти энергию мгновенно. Ее нужно зарядить аналогично тому, как заряжают конденсатор. Если индуктивность подключается к источнику постоянного напряжения ( $U$ ), то ее зарядка происходит по экспоненциальному закону:

$$I(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.7)$$

где  $R$  – полное активное сопротивление, ограничивающее ток индуктивности;

$\tau = L/R$  – постоянная времени зарядки индуктивности.

Цепь, состоящую из катушки индуктивности и параллельно подключенного ей конденсатора, называют колебательным контуром. При

работе индуктивности в составе колебательного контура ее периодическая зарядка и разрядка происходят на резонансной частоте контура:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (5.7)$$

где  $C$  – емкость конденсатора, входящего в колебательный контур.

Поскольку в колебательном контуре происходит периодическое превращение энергии, запасенной в катушке индуктивности, в энергию заряженного конденсатора, то, в отсутствие потерь, справедливо:

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU^2}{2}. \quad (5.8)$$

Поскольку работа контура сопровождается потерями энергии, используют понятие добротности колебательного контура, характеризующее скорость затухания колебаний.

$$Q = \pi \cdot N_e = \pi \cdot \frac{\tau}{T}, \quad (5.9)$$

где  $N_e$  – число колебаний, в течение которых амплитуда снижается в « $e$ » раз.

### Порядок выполнения исследований

1. Включить стенд, мультиметры и осциллограф.
2. Для исследования высокочастотного колебательного контура (катушки переменной индуктивности на 18 витков с тороидальным ферритовым сердечником, соединенной параллельно с конденсатором  $C = 68$  нФ) собрать схему в соответствии с рисунком 5.1.

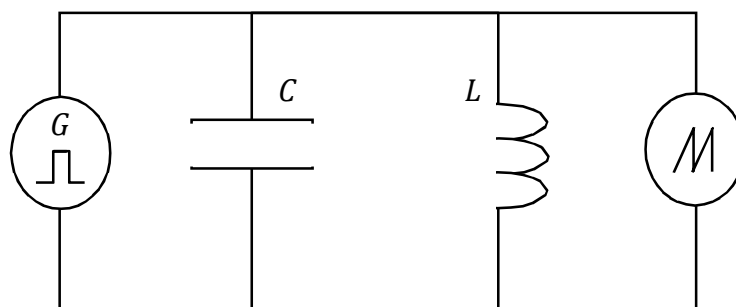


Рисунок 5.1 – Исследование колебательного контура

3. Включить генератор переменных сигналов, выбрать прямоугольный сигнал частотой 1 кГц. Подключить осциллограф, выставить ручку вертикальной развертки 1 В/дел, горизонтальной – 50 мкс/дел и регулировкой ручки подстройки добиться на экране картины, соответствующей рис. 5.2.

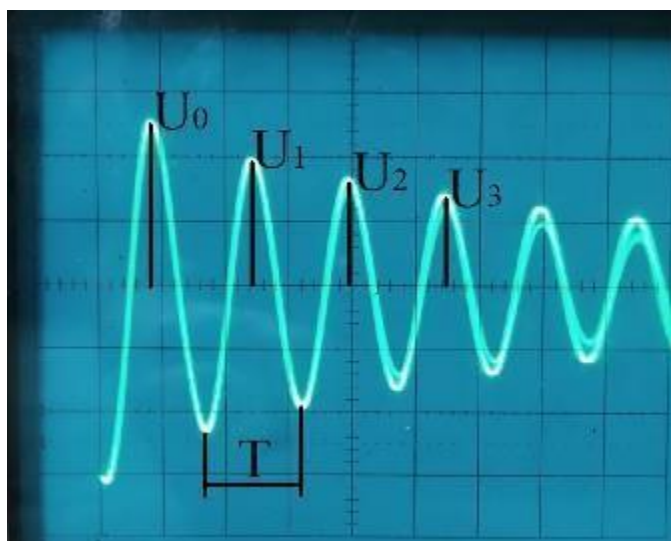


Рисунок 5.2 – Осциллограмма колебательного контура

4. Записать величину периода колебаний собственной частоты колебательного контура в протокол.

5. Записать в протокол амплитуды первых четырех периодов колебаний  $U_0$ –  $U_3$  (не забывая переводить деления шкалы осциллографа в вольты).

6. Последовательно уменьшая число витков в катушке индуктивности с шагом в два витка, снять зависимость периода колебаний контура от числа витков катушки.

### Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений (рис. 5.1).

2. Расчет теоретического (5.3) и практического (5.8) значений величины индуктивности исследуемой катушки.

3. Расчет добротности колебательного контура по (5.10). Величину  $r$  рассчитать, используя формулу (4.4) и амплитуды  $U_0$ –  $U_3$ . Для повышения точности расчета определить  $r$  для трех временных промежутков  $U_0$ –  $U_1$ ,  $U_1$ –  $U_2$  и  $U_2$ –  $U_3$ , после чего найти среднее значение  $r$ .

4. Графики теоретической и экспериментальной зависимостей индуктивности катушки от количества витков.

5. Выводы (с анализом полученных характеристик).

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ

**Цель работы:** Ознакомиться с различными принципами маркировки резисторов, изучить основные виды конструкций и принципы работы диодов, а также их основные характеристики. Получить навыки определения ВАХ диода в прямом и обратном направлении, а также навыки обработки результатов исследования.

#### Основные сведения о диодах

Полупроводниковыми диодами называются двухэлектродные приборы с односторонней проводимостью тока. Односторонняя проводимость обуславливается наличием  $p-n$ -перехода или перехода металл–полупроводник. Различия ВАХ диода с  $p-n$ -переходом и диода Шоттки с переходом металл–полупроводник представлены на рисунке 6.1.

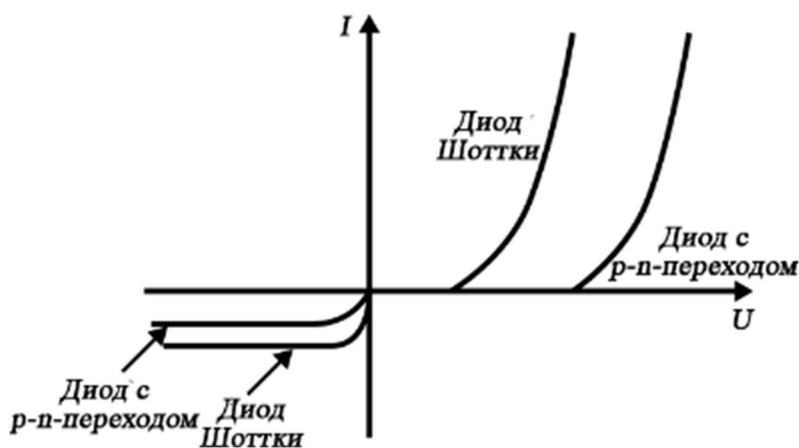


Рисунок 6.1 – ВАХ диодов

Сравнивая ВАХ выпрямительного диода на  $p-n$ -переходе и диода Шоттки, можно сделать следующие выводы: прямое падение напряжения на диоде Шоттки меньше в 2,5–3 раза, чем на диоде с  $p-n$ -переходом при одном и том же прямом токе; напряжение открытия диода Шоттки близко к 0, а у диода с  $p-n$ -переходом составляет десятые доли вольт, поэтому они не пригодны для выпрямления слабых сигналов; обратный ток диода с  $p-n$ -переходом меньше обратного тока диода Шоттки при одинаковых обратных напряжениях.

Как известно, на работу полупроводникового диода значительное влияние оказывает частота протекающего через него тока. Это связано с наличием паразитной емкости и инерционностью диода.

Емкость  $p-n$ -перехода складывается из двух частей: барьерной емкости  $C_{бар}$  и диффузионной емкости  $C_{диф}$ .

Существование барьерной емкости обусловлено наличием ионов примесей в  $p$ - $n$ -переходе. При этом  $p$ - и  $n$ -области можно рассматривать как заряженные обкладки конденсатора, где в качестве диэлектрика выступает обедненный слой. Величина данной емкости зависит от площади  $p$ - $n$ -перехода, концентрации носителей заряда, диэлектрической проницаемости материала полупроводника и приложенной разности потенциалов.

Наличие диффузионной емкости связано с изменением количества неравновесных носителей заряда в  $p$ - и  $n$ -областях. Диффузионная емкость характеризует инерционность движения неравновесных зарядов. Величина этой емкости пропорциональна времени жизни неосновных носителей заряда и зависит также от других факторов. При работе диода в цепи переменного тока барьерная и диффузионная емкости шунтируют  $p$ - $n$ -переход, что особенно сильно сказывается на высоких частотах.

Для того чтобы диод перешел из открытого состояния в закрытое, необходимо некоторое время. Если диод открыт, то через  $p$ - $n$ -переход протекает прямой ток, обусловленный перемещением основных носителей заряда. В том случае, если мгновенно изменить полярность напряжения, то основные носители зарядов, не успевшие рекомбинировать, будут перемещаться в обратном направлении. Поэтому после смены полярности напряжения через диод в течение некоторого времени будет протекать ток. Таким образом, с увеличением частоты выпрямительные свойства полупроводниковых диодов ухудшаются.

Основным параметром, определяющим частотные свойства диода, является граничная рабочая частота  $f_{гр}$ , при которой сила выпрямленного тока уменьшается на 30 % относительно номинального значения, измеренного на низкой частоте. Одним из преимуществ диодов Шоттки является возможность использования их на значительно более высоких рабочих частотах. Это связано с тем, что в диодах Шоттки неосновные носители не используются. В связи с этим пропадает проблема накопления заряда.

### **Порядок выполнения исследований**

1. Включить стенд, мультиметры и осциллограф.
2. Собрать схему для снятия прямой ветви ВАХ диодов с шунтирующим сопротивлением  $R_1 = 620 \text{ Ом}$  (рис. 6.2). Обратить внимание, что вольтметр подключен после амперметра, и на его показания не влияет падение напряжения на амперметре, которое соизмеримо с прямым падением напряжения на диоде. В то же время ток через вольтметр несоизмеримо мал с прямым током диода и не вносит заметной погрешности в показания амперметра.

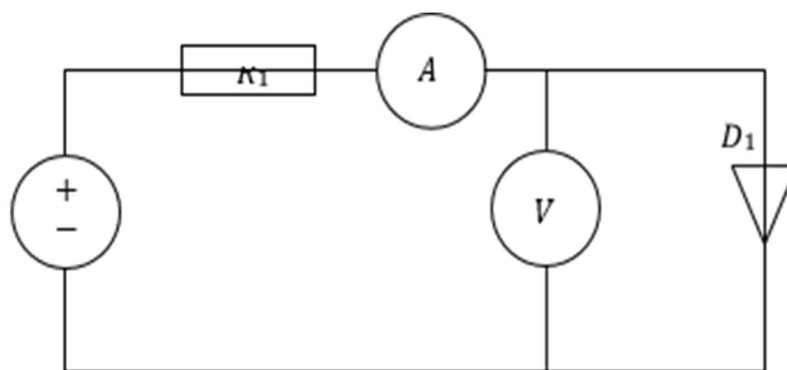


Рисунок 6.2 – Схема исследования прямой ветви ВАХ диодов

3. Изменяя входное напряжение, снимите прямую ветвь ВАХ исследуемых диодов. Измеренные значения занесите в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Исследование прямой ветви ВАХ диодов

$I, \text{мА}$		1	2	5	10	15	20	25	30	35	40
$U, \text{В}$	1N4007										
	Д220										
	1N5819										

4. Соберите схему для снятия обратной ветви ВАХ диодов, изображенную на рисунке 6.3, для чего подключите вольтметр до амперметра и подключите диод в обратном направлении. В данном случае через амперметр не протекает ток вольтметра, который теперь соизмерим с обратным током через диод. При этом падение напряжения на амперметре пренебрежимо мало по сравнению с обратным напряжением диода.

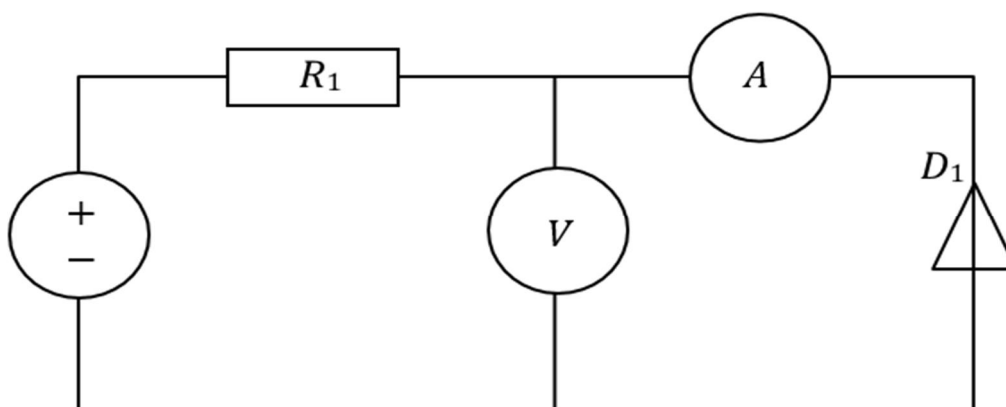


Рисунок 6.3 – Схема исследования обратной ветви ВАХ диодов

5. Изменяя входное напряжение, снимите обратную ветвь ВАХ исследуемых диодов. Измеренные значения занесите в таблицу 6.2. При проведении данных измерений необходимо учесть, что при обратном включении

некоторых диодов протекающие токи столь малы, что их невозможно зафиксировать при помощи используемых мультиметров.

Таблица 6.2 – Исследование обратной ветви ВАХ диодов

$U, \text{В}$		2	5	8	10	12	15	18	20
$I, \text{мА}$	1N4007								
	Д220								
	1N5819								

6. Для исследования характеристик диодов при работе с переменными сигналами собрать схему, изображенную на рисунке 6.4. Установить на выходе генератора однополярный сигнал прямоугольной формы частотой 50 Гц. Убедиться в отсутствии искажения сигнала при прохождении через собранную схему. Зафиксировать полученную осциллограмму.

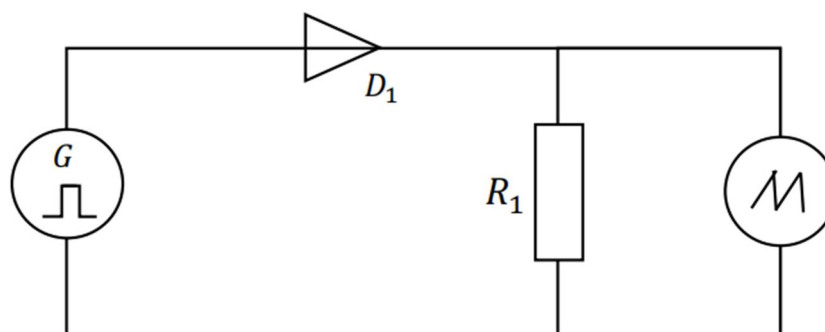


Рисунок 6.4 – Схема исследования диодов на различной частоте

7. Постепенно увеличивать частоту генерируемого сигнала до появления искажений сигнала, при этом одновременно изменяя временную развертку осциллографа. Записать в протокол установленную частоту, зафиксировать полученную осциллограмму.

8. Удвоить частоту, найденную в п. 7, и зафиксировать полученную осциллограмму.

9. Повторить измерения пп. 6–8 для всех диодов.

### Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений.
2. Вольтамперные характеристики диодов в виде таблиц и графиков. Прямую и обратную ветви ВАХ представить на одном рисунке.
3. Осциллограммы сигналов, полученные в пп. 6–8 (с указанием осей и размерностей).
4. Выводы с анализом полученных характеристик.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ФИЛЬТРОВ

**Цель работы:** Ознакомиться с основными принципами маркировки резисторов и конденсаторов, изучить принципы работы однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей, диодного моста, а также принципы работы емкостного, индуктивного и LC-фильтров. Получить навыки определения коэффициентов пульсации и сглаживания, а также навыки обработки результатов исследования.

#### Основные сведения о выпрямителях и фильтрах

Выпрямитель – это устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянное. Выпрямители необходимы везде, где необходимо питать радиоэлектронную аппаратуру от сети переменного напряжения. Выпрямители подразделяются на однофазные, питающиеся от однофазного напряжения, и трехфазные. В качестве источника питания выпрямителя обычно используют трансформатор. Трансформатор обеспечивает гальваническую развязку цепи постоянного тока (цепи нагрузки) от сети переменного тока, а также служит преобразователем входного переменного напряжения  $U_1$  в напряжение  $U_2$  (рис. 7.1).

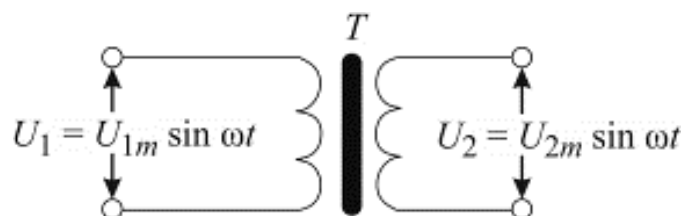


Рисунок 7.1 – Трансформатор

Основной характеристикой трансформатора является коэффициент трансформации, определяемый выражением:

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (7.1)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – действующие напряжения на первичной и вторичной обмотках;  $N_1$  и  $N_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток. Если  $U_1 > U_2$ , то трансформатор называют понижающим и наоборот.

В однополупериодном выпрямителе (рис. 7.2) диод  $VD$  пропускает ток только в одном направлении.

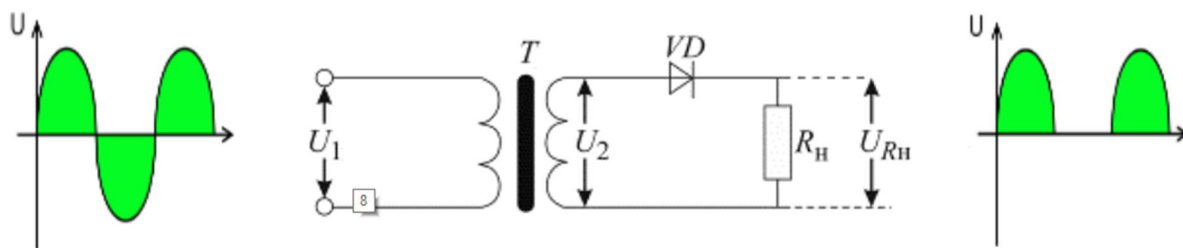


Рисунок 7.2 – Схема однофазного однополупериодного выпрямителя

При этом ток во вторичной обмотке трансформатора протекает не более половины периода фазного напряжения. В символическом изображении диода направление тока указывает электрод в форме стрелки (анод). Электрод в виде вертикальной черты называется катодом. Протекание тока через диод возможно лишь тогда, когда между анодом и катодом действует прямое напряжение. При подключении первичной обмотки трансформатора к сети синусоидального напряжения с действующим значением  $U_1$  во вторичной обмотке индуцируется напряжение  $U_2$ . В те моменты времени, когда на выходе трансформатора возникает положительная полуволна, диод открыт и через сопротивление нагрузки  $R_n$  протекает ток. При изменении полярности вторичного напряжения диод запирается. Таким образом, за каждый период через нагрузочный резистор протекает ток только в одном направлении в течение одного полупериода. Можно показать, что среднее значение (постоянная составляющая) выпрямленного напряжения и тока описываются выражениями

$$U_0 = \frac{U_2}{\pi}, \quad (7.2)$$

$$I_0 = \frac{I_{max}}{\pi}, \quad (7.3)$$

Из которых видно, что постоянные составляющие ( $U_0$  и  $I_0$ ) указанных величин в  $\pi$  раз меньше амплитудных значений.

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения  $k_{\pi}$  равен отношению амплитуды низшей гармоники (в данном случае первой) к значению постоянной составляющей  $U_0$ :

$$k_{\pi} = \frac{\pi}{2} = 1,57, \quad (7.4)$$

а максимальное значение обратного напряжения  $U_{обр.мах}$ , которое приложено к диоду в запертом состоянии, равно амплитуде вторичного напряжения.

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой содержит два диода  $VD1$  и  $VD2$  (рис. 7.3) и использует трансформатор, имеющий вывод средней точки вторичной обмотки.

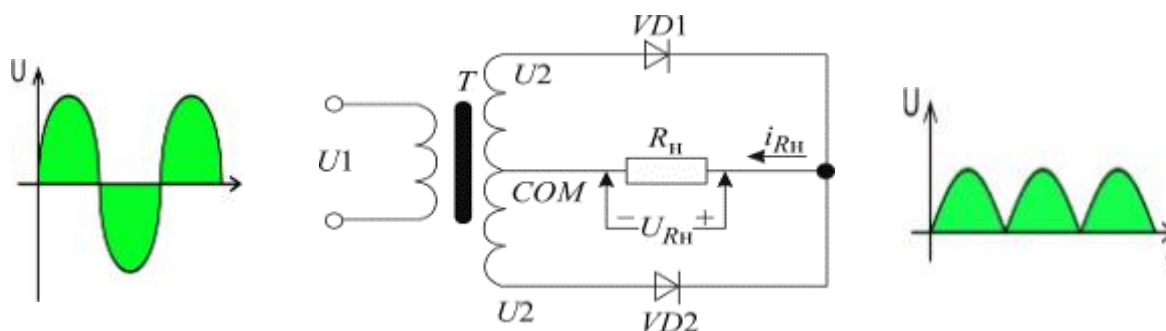


Рисунок 7.3 – Схема однофазного однополупериодного выпрямителя

Нагрузка  $R_H$  подключается между общей точкой диодов и средней точкой вторичной обмотки трансформатора. Напряжения на противоположных концах вторичной обмотки находятся в данной схеме в противофазе, таким образом, через нагрузку ток протекает в течение обоих полупериодов.

Очевидно, что поскольку здесь нет потери половины периода по напряжению, как в однополупериодном выпрямителе, то среднее значение выпрямленного напряжения здесь в 2 раза больше, чем в однополупериодной схеме

$$U_0 = \frac{2U_2}{\pi}, \quad (7.5)$$

но максимальное обратное напряжение, которое должен выдерживать каждый диод в закрытом состоянии, в данной схеме равно

$$U_0 = 2U_2, \quad (7.6)$$

Коэффициент пульсации при этом в два с лишним раза меньше, чем в однополупериодной схеме:

$$k_{\pi} = \frac{2}{3} = 0,66. \quad (7.7)$$

По сравнению с однополупериодным выпрямителем данный выпрямитель позволяет в два раза увеличить мощность, отдаваемую в нагрузку, без увеличения мощности трансформатора, однако конструкция трансформатора со средней точкой сложнее обычного и поэтому не так часто используется.

Двухполупериодный режим работы выпрямителя можно реализовать с трансформатором без средней точки вторичной обмотки в так называемой мостовой схеме (рис. 7.4), которая состоит из четырех диодов  $VD1-VD4$ , образующих выпрямительный мост. Одна диагональ моста ( $AC$ ) подключается к вторичной обмотке трансформатора, а ко второй диагонали ( $BD$ ), с которой снимается выпрямленное напряжение, подключается нагрузка  $R_H$ .

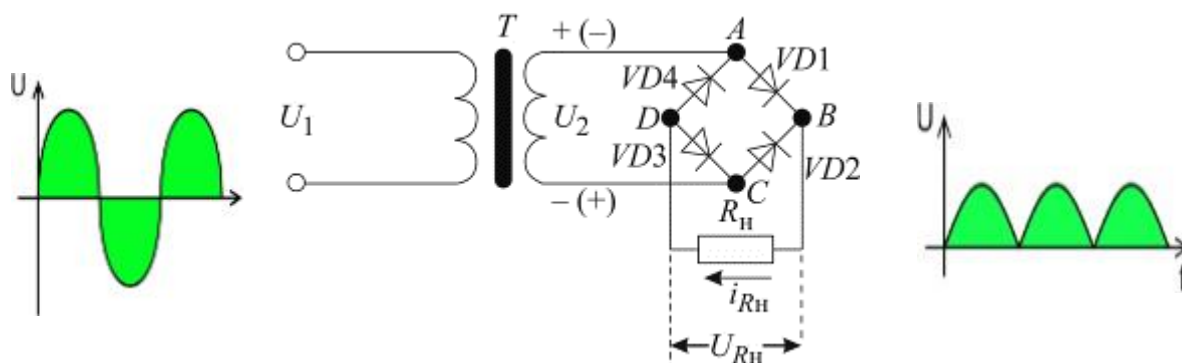


Рисунок 7.4 – Однофазная мостовая схема выпрямления

Когда на верхнем конце вторичной обмотки трансформатора действует положительное напряжение относительно нижнего конца (обозначенное на рисунке знаками «+» и «-» без скобок), диоды  $VD1$  и  $VD3$  открыты, так как к их анодам прикладывается положительное напряжение относительно катодов, и через них протекает ток по цепи:  $A-VD1-B-R_{н}-D-VD3-C$ . В этот же период диоды  $VD2$  и  $VD4$  закрыты. При смене полярности напряжения ток идет по второй цепочке, но через нагрузку в том же направлении. Таким образом, в мостовой схеме реализуется двухполупериодное выпрямление, при котором ток в нагрузке течет в неизменном направлении в течение обоих полупериодов переменного входного напряжения, коэффициент пульсации также можно определить по формуле (7.7). Данная схема выпрямления имеет более простой, а значит, более дешевый трансформатор, а обратное напряжение, прикладываемое к диоду, в два раза ниже, чем в схеме двухполупериодного выпрямления со средней точкой. Недостатком является необходимость применения удвоенного количества диодов, что приводит к снижению КПД.

В схемах однофазных выпрямителей коэффициент пульсации выпрямленного напряжения имеет значительную величину. Для уменьшения коэффициента пульсации применяют различные фильтры. Для оценки эффективности действия фильтра используется коэффициент сглаживания:

$$k_{\text{сгл}} = \frac{k_{\text{п}}}{k'_{\text{п}}} \quad (7.8)$$

где  $k_{\text{п}} = U_1/U_0$  – коэффициент пульсации выходного напряжения выпрямителя без фильтра ( $U_1$  – амплитуда низшей гармоники в спектре выходного напряжения без фильтра,  $U_0$  – среднее значение выпрямленного напряжения без фильтра,  $k'_{\text{п}} = U'_1/U'_0$  – коэффициент пульсации напряжения после фильтра ( $U'_1$  – амплитуда низшей гармоники после фильтра,  $U'_0$  – среднее значение выпрямленного напряжения после фильтра). Подставив эти выражения в (7.8), можно получить выражение

$$k_{\text{сгл}} = \lambda \cdot k_{\text{ф}}, \quad (7.9)$$

где  $\lambda$  – коэффициент передачи постоянной составляющей, практически всегда равный 1, а  $k_\phi$  – коэффициент фильтрации, равный отношению  $U_1$  к  $U'$ , таким образом, обычно  $k_{\text{сгл}} \sim k_\phi$ .

При использовании индуктивного фильтра индуктивность включается последовательно с нагрузкой. Для расчета фильтрующего действия выпрямитель заменяется двумя последовательно включенными источниками (рис. 7.5): первый – источник постоянного напряжения  $U_0$  с напряжением, равным значению постоянной составляющей выпрямленного напряжения; другой источник создает переменное напряжение  $u_1 = U_1 \sin \omega t$ , амплитуда которого  $U_1$  равна амплитуде низшей гармоники пульсаций выпрямленного напряжения.

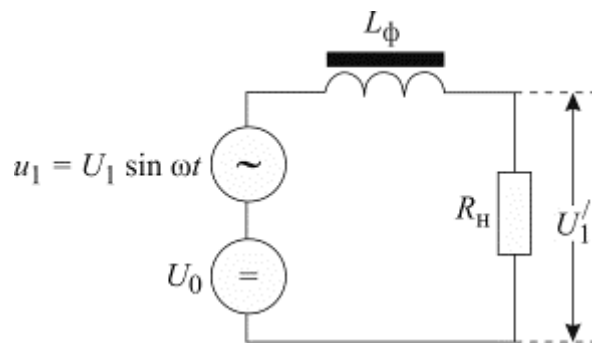


Рисунок 7.5 – Схема выпрямителя с индуктивным фильтром

Коэффициент сглаживания фильтра будет определяться выражением

$$k_{\text{сгл}} = \frac{\sqrt{R_H^2 + (\omega L_\phi)^2}}{R_H}. \quad (7.10)$$

Наоборот, если задан коэффициент сглаживания, то можно определить необходимое значение индуктивности фильтра по формуле

$$k_{\text{сгл}} = \frac{R_H}{\omega} \sqrt{k_{\text{сгл}}^2 - 1}. \quad (7.11)$$

Здесь  $\omega$  – угловая частота низшей гармоники на выходе выпрямителя ( $\omega = 2\pi f$ ). Пульсации выходного напряжения однофазного однополупериодного выпрямителя имеют частоту низшей гармоники  $f$ , совпадающую с частотой питающей сети  $f = 50$  Гц.

Емкостный фильтр состоит из конденсатора ( $C$ ), подключаемого параллельно сопротивлению нагрузки ( $R_H$ ) (рис. 7.6).

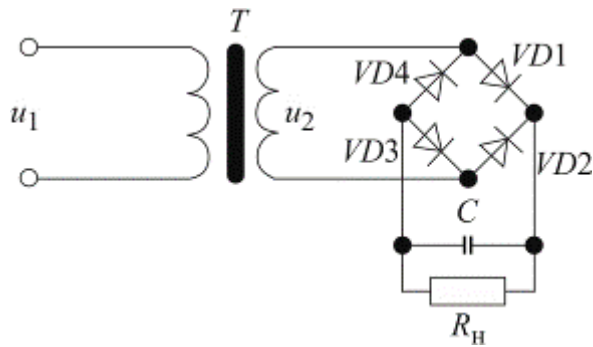


Рисунок 7.6 – Схема выпрямителя с емкостным фильтром

Когда напряжение на конденсаторе  $U_C$  меньше напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора, происходит зарядка конденсатора, а когда оно больше, конденсатор отдает свой заряд в нагрузку. В результате напряжение на нагрузке  $R_H$  сглаживается. Обычно емкость конденсатора фильтра  $C$  выбирается такой, чтобы  $X_C = 1/(\omega C) = R_H$ , тогда ток разрядки конденсатора практически равен среднему выпрямленному току, то есть  $I_0 \sim I_0 = U_0/R_H$ .

Коэффициент сглаживания при этих допущениях будет равен

$$k_{\text{сгл}} = 0,66 \cdot 4 \cdot C \cdot f \cdot R_H = 2,64 \cdot C \cdot f \cdot R_H. \quad (7.12)$$

Если задан коэффициент пульсации, то емкость конденсатора фильтра определяется соотношением

$$C = \frac{1}{4 \cdot f \cdot R_H \cdot k_{\text{п}}}. \quad (7.13)$$

Индуктивно-емкостный фильтр состоит из индуктивности, включаемой последовательно с нагрузкой и конденсатора, включенного параллельно нагрузке (рис. 7.7). Комплексное сопротивление индуктивности равно  $Z_L = j\omega L$ .

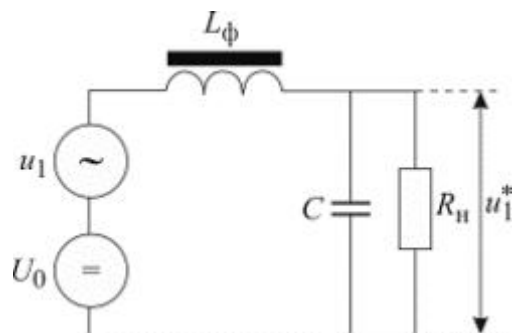


Рисунок 7.7 – Схема выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

Коэффициент сглаживания для такого фильтра будет равен

$$k_{\text{сгл}} = \omega^2 \cdot L \cdot C - 1. \quad (7.14)$$

## Порядок выполнения исследований

1. Включить стенд, определить сопротивление резистора  $R_H$ , результаты измерения занести в протокол.

2. Включить стенд, включить генератор переменного сигнала, выставить синусоидальный сигнал с частотой 1000 Гц.

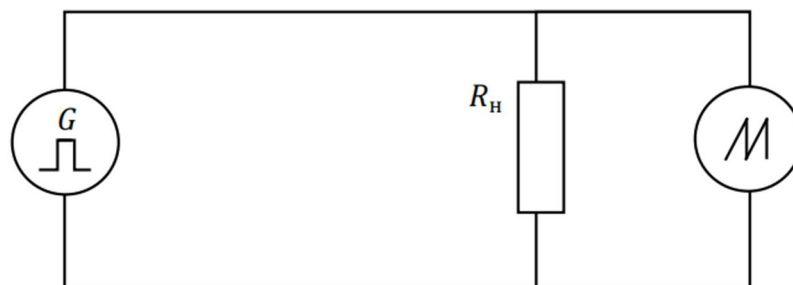


Рисунок 7.8 – Схема измерения синусоидального сигнала

3. Собрать схему (рис. 7.8), подключить осциллограф, получить на экране осциллографа изображение синусоидального сигнала, зафиксировать осциллограмму в протоколе, записать амплитуду сигнала.

4. Собрать схему однополупериодного выпрямителя (рис. 7.9), подключить осциллограф, получить на экране осциллографа изображение выпрямленного сигнала, зафиксировать осциллограмму в протоколе, записать амплитуду сигнала.

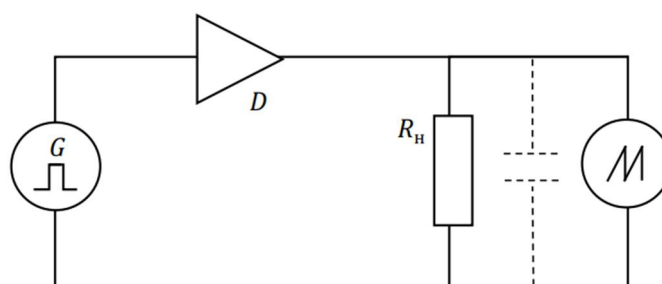


Рисунок 7.9 – Схема для исследования  
Однополупериодного выпрямителя с фильтром

5. Подключить параллельно нагрузке конденсатор емкостью 68 нФ, получить на экране осциллографа изображение сглаженного сигнала, зафиксировать осциллограмму в протоколе, записать амплитуды сигнала.

6. Собрать схему выпрямления с помощью диодного моста (рис. 7.10), подключить осциллограф, получить на экране осциллографа изображение выпрямленного сигнала, зафиксировать осциллограмму в протоколе, записать

амплитудусигнала.

7. Подключить параллельно нагрузке конденсатор емкостью 68 нФ, получить на экране осциллографа изображение сглаженного сигнала, зафиксировать осциллограмму в протоколе, записать амплитуды сигнала.

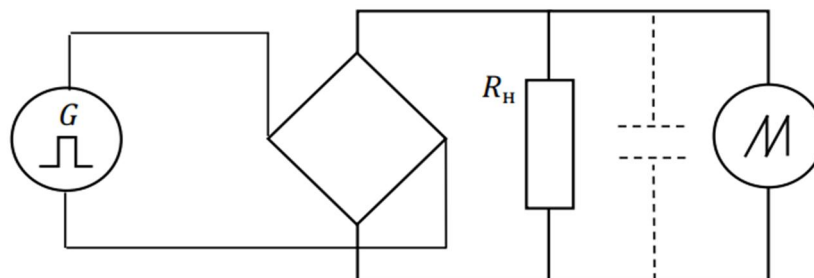


Рисунок 7.10 – Схема для исследования мостовой схемы выпрямления с фильтром

### Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений (рис. 7.2, 7.4, 7.6).
2. Осциллограммы, полученные в ходе измерений (с указанием осей и размерностей).
3. Теоретические результаты расчета коэффициента сглаживания емкостного фильтра по формуле 7.12.
4. Экспериментальные коэффициенты сглаживания по формулам (7.4), (7.7) и (7.8) с использованием значений амплитуд на осциллограммах.
5. Выводы по результатам исследований, содержащие сравнительный анализ полученных результатов.

## Лабораторная работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОДИОДОВ И ФОТОДИОДОВ

**Цель работы:** Ознакомление с основными параметрами светодиодов и фотодиодов, их измерение.

#### Основные сведения о светодиодах и фотодиодах

Светодиод – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении. При протекании через диод прямого тока происходит инжекция неосновных носителей заряда (электронов или дырок) в базовую область диодной структуры. Процесс самопроизвольной рекомбинации инжектированных неосновных носителей заряда, происходящих как в базовой области, так и в самом  $p-n$ -переходе, сопровождается переходом их с высокого энергетического уровня на низкий. При этом избыточная энергия выделяется путем излучения кванта света. Для изготовления светодиодов используются следующие полупроводниковые материалы: фосфид галлия (GaP), карбид кремния (SiC); твердые растворы: галлий–мышьяк–фосфор (GaAsP) и галлий–мышьяк–алюминий (GaAsAl), а также нитрид галлия (GaN), который имеет наибольшую ширину запрещенной зоны ( $\Delta W > 3,4$  эВ), что позволяет получать излучение в коротко- волновой части видимого спектра вплоть до фиолетового.

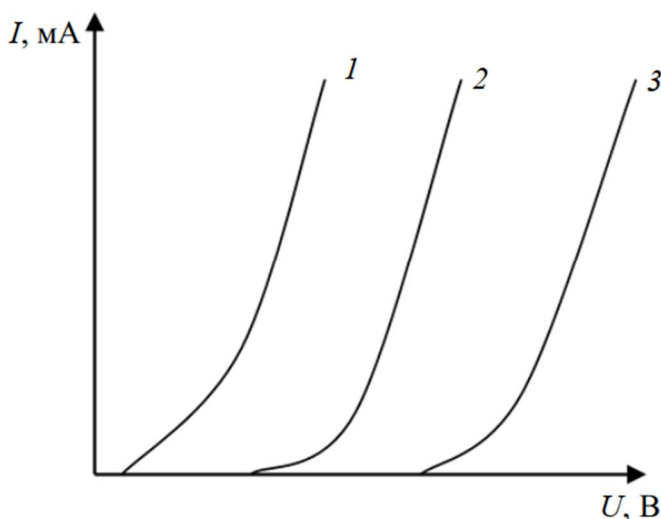


Рисунок 8.1 – ВАХ для различных светодиодов

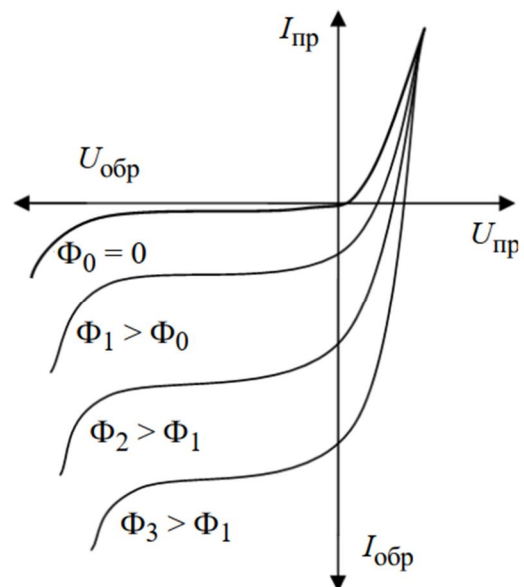


Рисунок 8.2 – ВАХ для фотодиода при различном освещении

На рис. 8.1 представлены несколько ВАХ для различных светодиодов. С некоторого порогового значения напряжения начинается резкий рост тока, это позволяет определить материал полупроводника.

Фотодиод – приемник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счет процессов в  $p$ - $n$ -переходе.

При воздействии квантов излучения в базе происходит генерация свободных носителей, которые устремляются к границе  $p$ - $n$ -перехода. Ширина базы ( $n$ -область) делается такой, чтобы дырки не успевали рекомбинировать до перехода в  $p$ -область. Ток фотодиода определяется током неосновных носителей – дрейфовым током.

Быстродействие фотодиода определяется скоростью разделения носителей полем  $p$ - $n$ -перехода и емкостью  $p$ - $n$ -перехода  $C$ . На рис. 8.2 представлена ВАХ фотодиода при различных световых потоках  $\Phi$ ; обратный ток фотодиода пропорционален световому потоку. Фотодиод может работать в двух режимах: фотогенератора – без внешнего напряжения; фотопреобразователя – с внешним обратным напряжением.

Одной из основных характеристик фотодиода является спектральная чувствительность, определяемая зависимостью фототока от длины волны падающего света. Со стороны больших длин волн она определяется шириной запрещенной зоны, с малых – поглощением и увеличением влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения. Фототок прямо пропорционален освещенности, т. е. практически все неосновные носители заряда, возникшие в базе, принимают участие в образовании фототока.

### **Порядок выполнения исследований**

1. Включить стенд, определить сопротивление резистора  $R_2$  и балластного резистора  $R_6$ , результаты измерений занести в протокол.

2. В работе исследуются четыре светодиода – красного, желтого, зеленого и синего цветов, причем собственно светодиод ( $LED$ ) и защитный резистор  $RD1$  размещены в каждом случае на одной плате. Собрать с красным светодиодом схему, изображенную на рис. 8.3 (положительный вывод светодиода (красный) подключается к источнику питания).

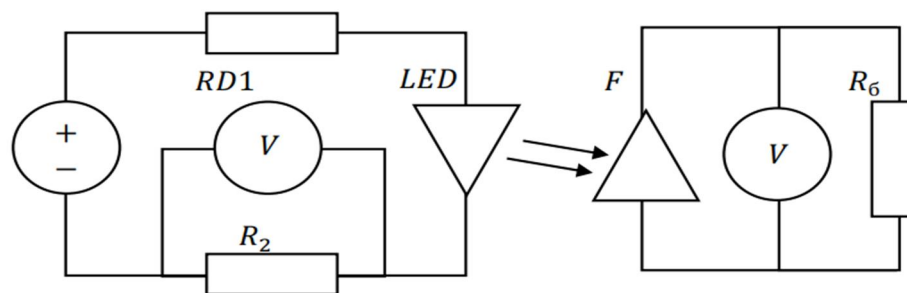


Рисунок 8.3 – Схема исследования яркости светодиодов

3. Поместить светодиод в кожух с фотодиодом. Изменяя входное напряжение  $U_{вх}$  (контролируется с помощью табло источника постоянного напряжения) от 0 до 20 В, измерить зависимости падения напряжения на балластном резисторе  $R_6$  от падения напряжения на резисторе  $R_2$ , результаты измерений занести в табл. 8.1. Повторить измерения для трех оставшихся светодиодов.

Таблица 8.1 – Исследование яркости светодиодов

$U_{вх}$ , В	0	2	...	20
$U_{R_2}$ , В для красного светодиода				
$U_6$ , В для красного светодиода				
$U_{R_2}$ , В для желтого светодиода				
$U_6$ , В для желтого светодиода				
$U_{R_2}$ , В для зеленого светодиода				
$U_6$ , В для зеленого светодиода				
$U_{R_2}$ , В для синего светодиода				
$U_6$ , В для синего светодиода				

### Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений (рис. 8.3).
2. Графики зависимости яркости светодиодов от проходящего через них тока. Ток светодиода  $I_{LED} = U_{R_2} / R_2$ , яркость светодиода определяется током фотодиода (при этом  $I_f = I_6 = U_6 / R_6$ ).
3. Выводы по результатам исследований.

## Лабораторная работа № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БИПОЛЯРНОГО И ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРОВ

**Цель работы:** Изучить методики расчёта, принципа функционирования и характеристик усилителя на биполярном транзисторе. Исследовать работу усилителя на биполярном транзисторе в среде Multisim.

#### Общие сведения

Одним из наиболее распространённых усилителей на биполярных транзисторах является усилитель с *общим эмиттером* (ОЭ). В этом усилителе эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей (рисунок 11.1). Входное напряжение  $U_{вх}$  от источника сигнала  $E_c$  с внутренним сопротивлением  $R_c$  подаётся на усиливаемый каскад на биполярном транзисторе  $VT$  через конденсатор связи  $C_{p1}$ , предотвращающий прохождение постоянной составляющей тока от источника сигнала. Усиленное выходное напряжение подаётся на нагрузку  $R_n$  через разделительный конденсатор  $C_{p2}$ , т. е. подаётся только переменная составляющая напряжения  $U_{вых}$ .

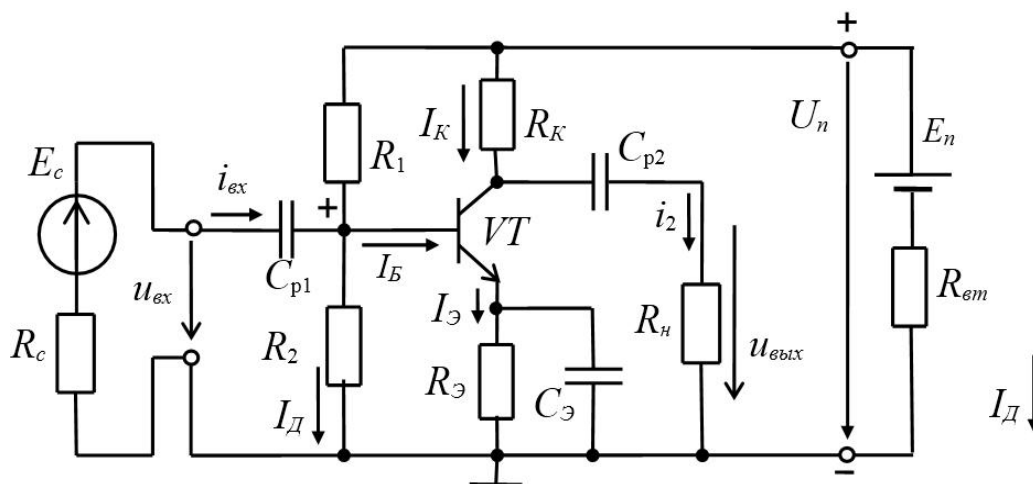


Рисунок 11.1 – Усилитель с общим эмиттером

В усилителе, кроме источника переменного сигнала, действует источник напряжения с ЭДС  $E_n$  (обычно напряжение  $U_n = 10-30$  В) с внутренним сопротивлением  $R_{вт}$ . Сопротивление резистора  $R_k$  выбирают, исходя из требований усиления входных сигналов и ограничения тока коллектора  $I_k$  транзистора  $VT$ . Обычно сопротивление  $R_k$  составляет  $0,2-5$  кОм для транзисторов малой мощности и около  $100$  Ом для транзисторов средней мощности. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  делителя напряжения питания  $U_n$  предназначены для установки тока базы  $I_b$  транзистора (по постоянному току) в соответствии с рабочей точкой (точкой покоя) на линии нагрузки (рисунок 11.2).

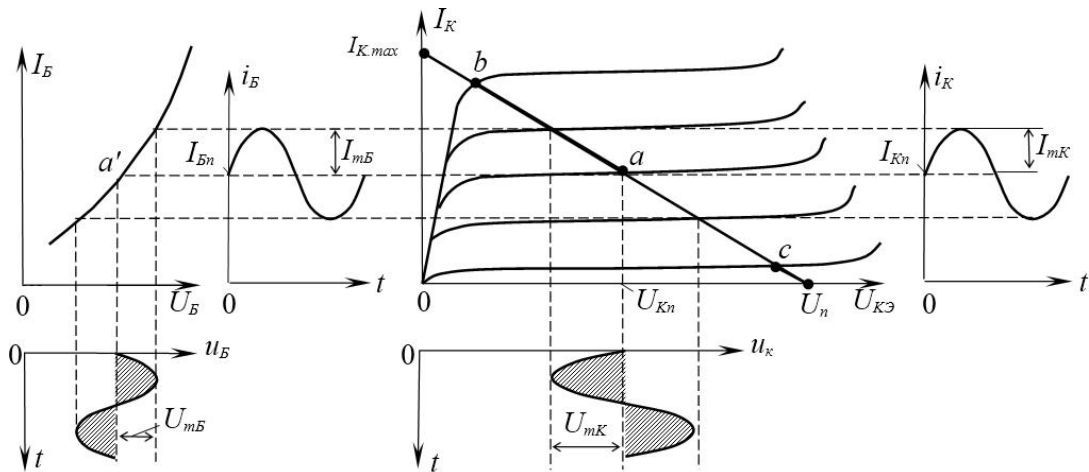


Рисунок 11.2 – К расчёту усилителя

С помощью резистора  $R_3$  создаётся обратная отрицательная связь усилителя по постоянному току, обеспечивающая температурную стабилизацию его режима усиления. Так, при увеличении температуры возрастают постоянные составляющие токов коллектора  $I_K$  и эмиттера  $I_3$  и падает напряжение  $R_3 I_3$ . В результате напряжение  $U_{BЭ}$  уменьшается, что вызывает уменьшение тока базы  $I_B$  и, следовательно, тока  $I_K$ , стабилизируя его.

Конденсатор  $C_3$  большой ёмкости (десятки микрофард) шунтирует сопротивление резистора  $R_3$  по переменному току, что исключает ослабление усиливаемого сигнала по переменному току цепью обратной связи.

В режиме работы усилителя по *постоянному току* для получения наименьших нелинейных искажений усиливаемого сигнала рабочую точку  $a$  (см. рисунок 11.2) выбирают посередине рабочего участка  $bc$  линии нагрузки по постоянному току, описываемой уравнением:

$$I_{Kn} = (U_n - U_{Kn}) / R_k, \quad (11.1)$$

$$U_{Kn} = U_{KЭ} + R_3 I_{Эn}. \quad (11.2)$$

Линию нагрузки строят следующим образом. Из приведенного управления следует, что при  $I_{Kn} = 0$   $U_{Kn} = U_{П}$ , а при  $U_{Kn} = 0$   $I_{K.max} = U_{П} / R_k$ .

Через две найденные точки проводят прямую (нагрузочную) линию. Задав ток базы в режиме покоя, находят на пересечении линии нагрузки по постоянному току с выходной характеристикой транзистора при  $I_B = I_{BП}$  точку покоя  $a(U_{Kn}, I_{Kn})$ .

Приблизительно токи покоя коллектора и эмиттера в рабочей точке  $a$  рассчитывают по формулам:

$$I_{KП} \approx 0,5 I_{Kmax} = \frac{U_n}{2R_k}, \quad (11.3)$$

$$I_{ЭП} = I_{KП} + I_{BП} \approx I_{BП} (1 + \beta). \quad (11.4)$$

Сопротивления

$$R_3 = \frac{U_{ЭП}}{I_{ЭП}}, \quad (11.5)$$

$$R_K = U_{\Pi} / (2I_{Kn}). \quad (11.6)$$

А ёмкость

$$C_{\text{э}} = 10 / (2\pi f R_{\text{э}}), \quad (11.7)$$

где  $f$  – минимальная частота входного напряжения.

Сопротивление резистора  $R_2$  вычисляется по формуле:

$$R_2 \approx \frac{U_{\text{эп}} + U_{\text{БЭп}}}{I_{\text{д}}}. \quad (11.8)$$

При этом  $U_{\text{БЭп}} \approx 0,3 \text{ В}$  – для германиевых и  $U_{\text{БЭп}} \approx 0,65 \text{ В}$  – для кремниевых транзисторов;  $I_{\text{д}}$  – ток делителя напряжения,  $I_{\text{д}} = (3 - 10)I_{\text{Бп}}$ .

Сопротивление резистора  $R_1$  определяется по формуле:

$$R_1 \approx \frac{U_{\Pi} - U_{\text{эп}} - U_{\text{БЭп}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{Бп}}}. \quad (11.9)$$

В режиме работы усилителя по переменному току принимают:

$$u_{\text{э}} = (1/\omega_c C) i_{\text{э}} \approx 0. \quad (11.10)$$

При подаче на вход усилителя переменного напряжения происходят изменения токи базы, тока коллектора и напряжения на коллекторе.

Амплитуда переменного коллекторного тока  $I_{mK}$  примерно в  $h_{21}$  раз больше амплитуды тока базы, а амплитуда коллекторного напряжения  $U_{mK}$  во много раз больше амплитуды входного напряжения. Таким образом, в схеме усилителя с ОЭ усиливается ток и напряжение входного сигнала.

Используя графики, изображенные на рисунке 11.2, следует определить входное сопротивление и коэффициенты усиления каскада:

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{U_{mБ}}{I_{mБ}}; K_1 \approx \frac{I_{mK}}{I_{mБ}}; K_u \approx \frac{U_{mK}}{U_{mБ}}; K_p = K_i K_u. \quad (11.11)$$

При этом положительному полупериоду входного напряжения соответствует отрицательный полупериод выходного напряжения. Иначе говоря, между входным и выходным напряжениями существует сдвиг фаз, равный  $180^\circ$ , т. е. схема усилителя с ОЭ является инвертирующим устройством, усиливающим и изменяющим фазу входного напряжения на  $180^\circ$ .

Наличие в усилителе ёмкостей  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  приводит к частотным искажениям усиливаемых сигналов в области нижних частот: с уменьшением частоты входного сигнала увеличивается сопротивление конденсатора

$$X_{Cp1} = \frac{1}{\omega C_{p1}}. \quad (11.12)$$

Следовательно, снижается входное и выходное напряжения. Это приводит

к уменьшению коэффициента усиления с уменьшением частоты, а наличие в усилителе междуэлектродных ёмкостей транзистора и монтажных ёмкостей приводит к возникновению частотных искажений усиливаемых сигналов в области высоких частот.

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_H R} \quad (11.13)$$

где  $R$  – входное и выходное сопротивления усилительного каскада для  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  соответственно.

Входное сопротивление усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ обычно имеет значение около нескольких сотен Ом. Выходное сопротивление обычно на порядок больше входного.

Реальный коэффициент усиления по напряжению всегда меньше коэффициента усиления ненагруженного усилителя. Это различие тем заметнее чем больше выходное сопротивление усилителя и меньше сопротивления нагрузки. На практике реальный коэффициент усиления каскада может достигать нескольких сотен, а коэффициент усиления по мощности в схеме с ОЭ – нескольких тысяч.

### Порядок выполнения исследований

На основании заданного типа транзистора, параметров усилителя произвести расчёт элементов схемы (см. рисунок 11.2) и осуществить их выбор. Исходные данные приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Исходные данные

Тип транзистора		Заданный параметр						
		$U_{п}$ , В	$I_{кп}$ , мА	$f_{п}$ , Гц	$R_{п}$ , Ом	$h_{21э}$		
Расчитанный параметр								
$I_{Бп}$ , А	$I_{д}$ , А	$R_{к}$ , Ом	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$C_э$ , мкФ	$C_{p1}$ , мкФ	$C_{p2}$ , мкФ
Выбрано								

Для подтверждения правильности расчётов произвести моделирование работы усилителя в программе Multisim, построив их модели согласно рисунку 11.3. Напряжения и токи в схемах отображаются с помощью виртуальных вольтметров, амперметров и осциллографа Tektronix-XSC1. Входной сигнал формируется функциональным генератором Agilent-XFG1.

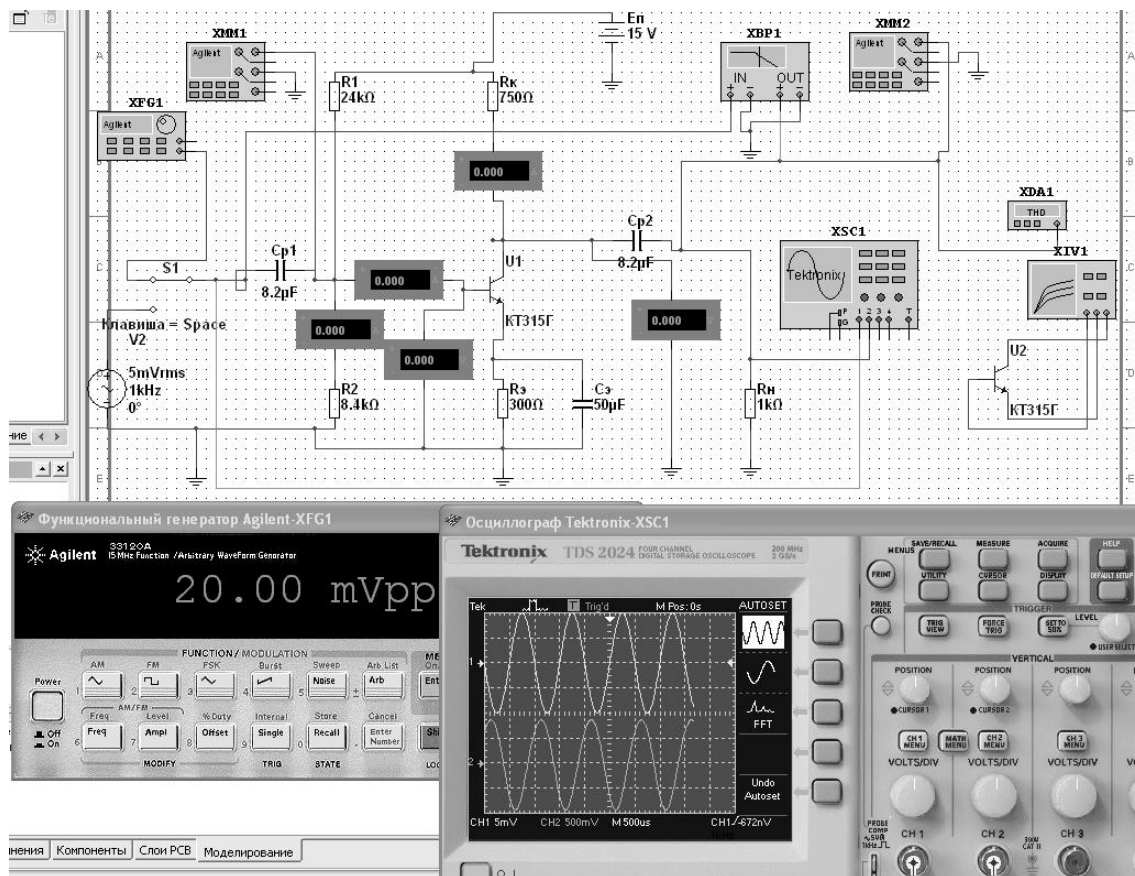


Рисунок 11.3 – Схема усилительного каскада в среде Multisim

Для отображения параметров усилителя по постоянному току (в режиме покоя) в свойствах измерительных приборов установить «DC».

С помощью характеристикографа XIV1 снять входные и выходные характеристики биполярного транзистора. Построить линию нагрузки. Определить положение рабочей точки. Определить максимальную величину входного сигнала для работы усилительного каскада в линейном режиме (без искажения формы передаваемого сигнала). Рассчитать входное сопротивление усилительного каскада  $R_{вх}$ , коэффициенты усиления  $K_i$ ,  $K_u$ ,  $K_p$ .

Подать на вход усилительного каскада переменный синусоидальный сигнал с амплитудой, не превышающей  $U_{мб}$ . Снять осциллограмму выходного сигнала. Измерить параметры усилителя в режиме переменного сигнала (свойство прибора «АС»). Заполнить таблицу 11.2 (моделирование).4 Увеличить амплитуду входного сигнала до получения искажений сигнала на выходе.

Увеличить амплитуду входного сигнала до получения искажений сигнала на входе. Наблюдать увеличение коэффициента нелинейных искажений с помощью прибора XDA1.

Исследовать влияние  $R_n$ ,  $C_3$  на амплитуду выходного сигнала.

С помощью плоттера Боде снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилительного каскада. Определить нижнюю и верхнюю частоты  $f_H$ ,  $f_B$ , при которых происходит снижение коэффициента усиления в  $\sqrt{2}$  раз. Исследовать влияние ёмкости разделительного конденсатора  $C_{p2}$  на АЧХ.

Результаты занести в таблицу 11.2 (моделирование).

Таблица 11.2 – Результаты измерений

Результат работы	Результат измерений								
	$R_{н}, В$	$C_{э}, мкФ$	$U_{вх}, мВ$	$I_{вх}, мА$	$U_{н}, В$	$I_{н}, мА$	$K_{Г}, \%$	$f_{н}, кГц$	$f_{в}, кГц$
Моделирование									
Результат вычислений									
$R_{вх}, Ом$	$K_i$			$K_u$			$K_p$		

### *Содержание отчета*

Отчёт должен содержать: цель работы, задание к работе, схемы для моделирования работы усилительного каскада в среде Multisim, осциллограммы входных и выходных напряжений, входные и выходные характеристики биполярного транзистора, АЧХ усилителя, основные параметры усилителя в виде таблицы, вывод по работе.

### *Контрольные вопросы*

- 1 Почему усилитель называют с общим эмиттером?
- 2 Зачем нужен резистивный делитель в цепи базы?
- 3 От параметров каких элементов зависит коэффициент усиления усилителя?
- 4 Как добиться расположения точки  $a$  на середине отрезка  $bc$  (см. рисунок 11.2)?
- 5 Каково назначение конденсаторов  $C_{p1}, C_{p2}, C_{э}$ ?

## Лабораторная работа № 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

**Цель работы:** Изучить работу операционного усилителя. Исследовать работу инвертирующего и неинвертирующего операционного усилителей (ОУ).

#### Теоретические сведения

В настоящее время одним из основных видов усилителей, применяемых в различных устройствах техники, в том числе и в аппаратуре связи, является операционный усилитель.

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель электрических сигналов, предназначенный для выполнения различных операций с входными сигналами при работе со схемой с глубокой отрицательной связью. Первоначально эти усилители предназначались для выполнения различных математических операций сложения, умножения, интегрирования и т. д. Созданные на дискретных элементах ОУ, оказывались очень громоздкими и дорогостоящими, так как для выполнения заданных операций требовались сложнейшие схемы, состоящие из десятков усилительных элементов, диодов, и поэтому такие ОУ применялись довольно редко.

Только внедрение ИМС позволило построить на их базе ОУ, обладающие многофункциональными возможностями, малыми габаритными размерами и большой надежностью, простотой в эксплуатации.

Операционный усилитель обладает свойствами, наиболее соответствующими основным требованиям к усилительным устройствам: большим коэффициентом усиления, большим входным сопротивлением, малым входным сопротивлением, широким частотным диапазоном, низким уровнем шума.

Идеальный ОУ должен иметь следующие параметры: коэффициент усиления  $K \gg 1$ , входное сопротивление  $R_{вх} \gg 1$ , выходное сопротивление  $R_{вых} \ll 1$ , полосу пропускания  $0 \dots \infty$  Гц, уровень шума  $U_{ш} = 0$ .

Достижение этих показателей и есть основное требование к ОУ.

В зависимости от конкретного применения ОУ в реальных устройствах к ним предъявляют и дополнительные требования, связанные со спецификой данного устройства.

Следует отметить, что ряд современных ОУ обладает свойствами, близкими к идеальным, но не по всем показателям, так как между выполнением отдельных требований к ОУ существуют противоречия, которые нетрудно понять на основе ранее проведенного анализа работы усилителей на дискретных элементах.

Наличие коэффициента усиления  $K \gg 1$  создает возможность введения очень глубокой ООС, что позволяет добиться минимальных линейных и

нелинейных искажений, стабилизировать параметры ОУ при изменении температуры питающих напряжений.

Большое  $R_{\text{вх}}$  свидетельствует о том, что практически на входе не потребляется энергии от источника сигнала, что ко ОУ может быть подключен источник сигнала с любым внутренним сопротивлением. Очень малое сопротивление  $R_{\text{вых}}$  позволяет подключить к выходу ОУ низкоомную нагрузку, при этом потери мощности на выходном сопротивлении ОУ будут незначительны.

Наличие низкого уровня шума означает, что реальная чувствительность ОУ очень велика, что ОУ способен усиливать самые слабые сигналы.

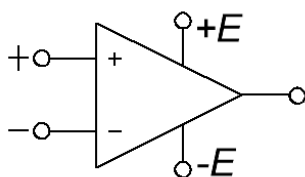


Рис. 12.1. Условное обозначение ОУ

Условное обозначение ОУ (рис. 3.1) — треугольник, у которого на стороне основания слева показаны два входа, а справа в вершине - выход. Вход со знаком « + » является неинвертирующим, при подаче входного сигнала на этот вход полярность сигнала на выходе остается той же, что и на входе; вход со знаком « - » - инвертирующий, а при подаче сигнала на этот вход на выходе его полярность меняется на противоположную. На боковых сторонах треугольника, расположены выводы подключения источников питания, кроме того, имеются дополнительные выводы, назначение которых будет также рассмотрено.

### Основные параметры ОУ

Как и все электронные приборы, ОУ характеризуются своими параметрами — основными показателями, по которым выбирают тот или иной прибор для применения в реальной схеме. Параметры различных типов ОУ меняются в довольно широких пределах.

Рассмотрим параметры ОУ.

**Входное сопротивление** – дифференциальное сопротивление переменному току на входе  $R_{\text{вх. диф}} = \Delta U_{\text{вх. диф}} / \Delta I_{\text{вх}}$  - отношение приращения дифференциального входного напряжения к соответствующему приращению тока неинвертирующего входа в режиме короткого замыкания.

Идеальное  $R_{\text{вх. диф}} \text{ ® } \infty$ . Реальное  $R_{\text{вх}}$  в зависимости от схемы входного каскада ОУ составляет от 4 ... 5 кОм до десятков МОм. Большое  $R_{\text{вх}}$  позволяет обеспечить управление усилителем при наименьших затратах мощности источником сигнала и передать на вход ОУ без потерь напряжение источника сигнала.

Обычно в ОУ происходит большое подавление синфазной составляющей, и поэтому входное синфазное сопротивление  $R_{\text{вх.с}}$  на несколько порядков больше  $R_{\text{вх.диф}}$ .

**Средний ток**  $I_{\text{вх}}$  – среднее арифметическое значение постоянных входных токов инвертируемого и неинвертируемого входов в отсутствие сигнала. Обычно  $I_{\text{вх}}$  не превышает сотен наноампер.

**Входной ток сдвига**  $DI_{\text{вх}} = I_{\text{вх}}^+ - I_{\text{вх}}^-$  – разность между входными токами. Входной ток сдвига в несколько раз меньше среднего входного тока.

**Напряжение смещения**  $U_{\text{см}}$  – напряжение постоянного тока, которое должно быть приложено к дифференциальному входу ОУ, чтобы его  $U_{\text{вых}} = 0$ . Обычно составляет не более единиц милливольт.

**Дрейф выходного напряжения смещения**  $\varepsilon_{\text{см}} = DU_{\text{см}} / DT^{\circ}\text{C}$  – отношение изменения входного напряжения смещения к изменению окружающей температуры. Обычно составляет 1 ... 5 мкВ/°С.

**Выходное сопротивление**  $R_{\text{вых}}$  – внутреннее сопротивление выхода ОУ. Идеальное  $R_{\text{вых}} \rightarrow 0$ , при этом все выходное напряжение выделяется без потерь в нагрузку. Реальное  $R_{\text{вых}}$  составляет единицы и сотни ом.

**Коэффициент усиления**  $K = DU_{\text{вых}} / DU_{\text{диф}} = DU_{\text{вых}} / (DU_{\text{вх}}^+ - DU_{\text{вх}}^-)$  – отношение изменения  $U_{\text{вых}}$  к соответствующему изменению разности входных напряжений при разомкнутой цепи обратной связи. В идеальных ОУ  $K \rightarrow \infty$ , в реальных ОУ  $K$  составляет от сотен до сотен тысяч. Так как  $U_{\text{вых}}$  ограничено напряжением источника питания, которое обычно не превышает 10... 15 В, то при очень больших коэффициентах усиления  $U_{\text{вх}}$  очень мало. При больших  $U_{\text{вх}}$  транзисторы попадают в режим насыщения.

**Полоса пропускания** – полоса частот, в которой  $U_{\text{вых}}$  уменьшается не менее чем до 0,707 своего максимального значения при неизменной амплитуде на входе.

Идеальная полоса пропускания ОУ  $\rightarrow \infty$ . Реальная полоса пропускания ограничена. Максимальную частоту полосы пропускания иногда называют частотой среза. Иногда указывается частота единичного усиления  $f_1$ , при которой коэффициент усиления уменьшается до 1.

**Скорость нарастания выходного напряжения**  $V_{U_{\text{вых}}} = DU_{\text{вых}} / Dt$  – отношение приращения  $DU_{\text{вых}}$  к интервалу времени  $Dt$ , за который происходит это приращение, при подаче на вход прямоугольных импульсов. Чем выше частота среза, тем больше скорость нарастания выходного напряжения.

**Время установления выходного напряжения**  $t_{\text{н}}$  – время, в течение которого  $U_{\text{вых}}$  ОУ изменяется от уровня 0,1 до уровня 0,9 установившегося значения  $U_{\text{вых}}$  при воздействии на вход ОУ прямоугольных импульсов.

Время установления также пропорционально частоте среза.

**Максимальный выходной ток**  $I_{\text{вых max}}$  – предельная амплитуда выходного тока, который может быть дан в нагрузку.

**Максимальная мощность рассеяния**  $P_{\text{max}}$  – максимально допустимая мощность, которая может быть рассеяна ОУ при наличии входного напряжения и подключенной нагрузке.

Типичные характеристики ОУ многокаскадного усилителя постоянного тока представлены на рис.12.2, 12.3.

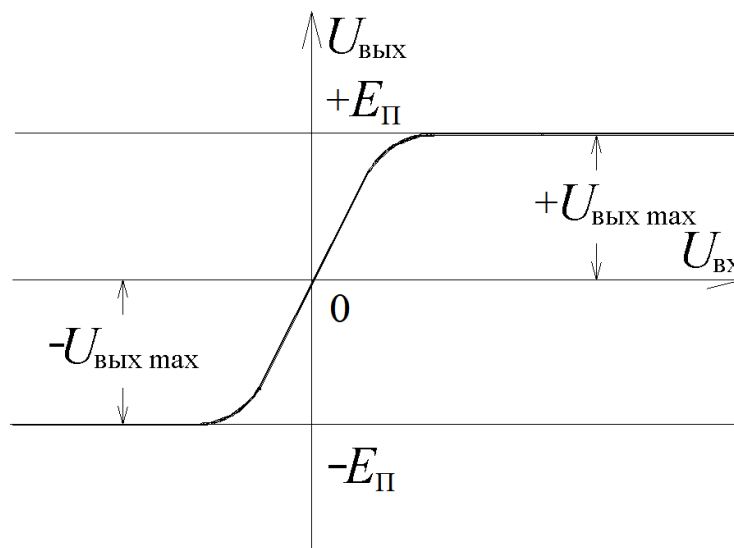


Рис. 12.2. Передаточная характеристика ОУ

Передаточная характеристика (рис.3.2) смещена в общем случае на напряжение смещения нуля  $U_{\text{см0}}$ , поэтому даже при отсутствии входного на выходе есть напряжение  $U_{\text{вых0}}$ . Причина смещения нуля - асимметрия усилительных плеч первого каскада ОУ, неточность сдвига уровня, балансировка, асимметрия питающих напряжений, действие синфазного сигнала.

Выходные максимальные напряжения  $U_{\text{вых max}}$ ,  $-U_{\text{вых max}}$  практически равны напряжению питания. Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики ОУ, снятые в режиме малого сигнала, имеют вид, изображенный на рис. 3.3.

Плавные кривые линии – реальные характеристики, ломаные прямые - их аппроксимации. Наиболее распространенной является аппроксимация частотной характеристики отрезками прямых, наклон которых соответствует  $n \times 20$  дБ/дек, а фазовой - участками, фазовый сдвиг на которых равен  $n \times (\pi / 2)$ , где  $n=0,1,2...$  (так называемые диаграммы Боде).

Диаграммы Боде соответствуют внутренней структуре частотной и фазовой характеристик многокаскадного ОУ, которые складываются из характеристик отдельных каскадов:

$$K(f) [\text{дБ}] = \sum K_i [\text{дБ}]$$

$$\varphi(f) = \sum \varphi_i(f)$$

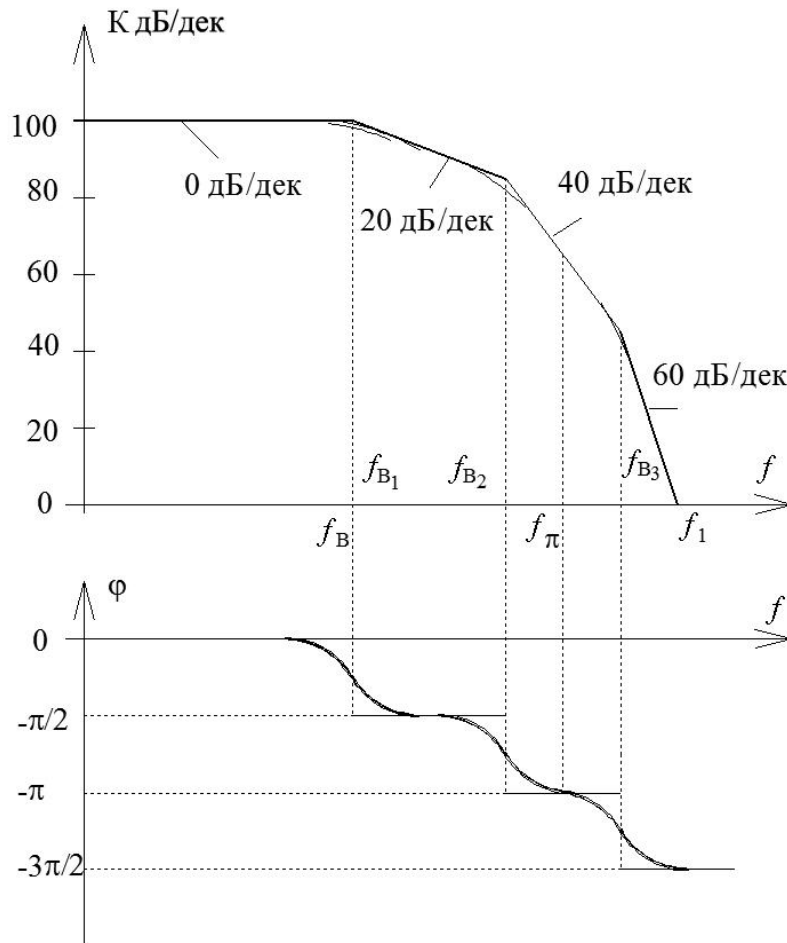


Рис. 12.3. Характеристики ОУ - амплитудно-частотная; фазово-частотная.

Характеристики отдельных каскадов близки к характеристикам эквивалентной RC-цепи:

$$K_i(f) = \frac{K_{0i}}{\sqrt{1 + (f / f_{B_i})^2}} \gg K_{0i} \text{ при } f \ll f_{B_i},$$

$$K_i(f) = \frac{K_{0i}}{\sqrt{1 + (f / f_{B_i})^2}} \gg K_{0i} \cdot (f / f_{B_i}) \text{ при } f \gg f_{B_i}$$

$$\varphi_i(f) = -\arctg(f / f_{B_i}) \gg 0 \text{ при } f \ll f_{B_i},$$

$$\varphi_i(f) = -\arctg(f / f_{B_i}) \gg -\rho / 2 \text{ при } f \gg f_{B_i}$$

где  $f_{B_i} = \frac{1}{2\pi} \cdot r_i$  — верхняя граничная частота  $i$ -го каскада;

$r_i$  - постоянная времени эквивалентной RC-цепи  $i$ -го каскада.

Таким образом, частоты излома характеристик ОУ соответствуют

(примерно) граничным частотам отдельных каскадов. Погрешность аппроксимации не превышает обычно 3дБ для частотной и  $T/4$  - для фазовой характеристики, что вполне достаточно для практических целей пользования ОУ. Следует иметь в виду, что если граничные частоты отдельных каскадов близки друг к другу, то реальные характеристики не показывают в явном виде изломы, соответствующие аппроксимации по Боде.

Параметры амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик:

$f_v$  – верхняя граничная частота ОУ с разомкнутой обратной связью, измеренная в режиме малого сигнала. Ее величина определяется частотной характеристикой самого инерционного каскада ОУ и в свою очередь определяет ход переходной характеристики ОУ;

$f_{\text{ед. усил.}}$  – частота единичного усиления. Она определяет предельный диапазон частот устройств на ОУ при введении сколь угодно глубокой отрицательной обратной связи;

$f_\pi$  – частота, на которой внутренний фазовый сдвиг в ОУ достигает величины  $\rho$  радиан ( $180^\circ$ ). При применении ОУ с внешней частотно-независимой отрицательной обратной связью именно на этой частоте возникает самовозбуждение, если на ней петлевое усиление  $\beta K \geq 1$ .

### Структура и назначение элементов ОУ

Типовой интегральный операционный усилитель содержит обычно три каскада (рис.3.4) — дифференциальный (ДУ), усилитель напряжения (УН) и усилитель мощности (УМ).

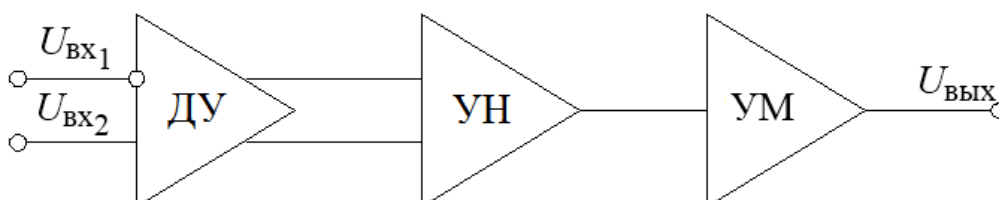


Рис. 12.4. Структура типового ОУ

Первый каскад ОУ обязательно дифференциальный, поскольку это необходимо для уменьшения дрейфа нуля, подавления синфазной помехи, для расширения возможности управления ОУ. В его состав входят усилительные плечи, генератор стабильного тока, цепи термостабилизации, балансировки. Для увеличения входного сопротивления усилительные плечи могут выполняться на составных транзисторах. Каскад усиления напряжения также обычно выполняется по дифференциальной схеме для увеличения степени подавления дрейфа и синфазной помехи.

Каскад усиления мощности обычно двухтактный, имеет малое выходное, но большое входное сопротивление (чтобы увеличить эквивалентную нагрузку и коэффициент усиления второго каскада).

Во 2-й или 3-й каскад входят также схема сдвига уровня, цепь коррекции для обеспечения устойчивости, элементы защиты от перегрузки.

Схема сдвига уровня необходима для того, чтобы при входном напряжении, равном нулю, получить и выходное напряжение постоянного тока, равное нулю.

Кроме того, в современных ОУ содержатся многочисленные цепи внутренней обратной связи, термокомпенсации, коррекции, стабилизации.

Широкое использование находят операционные усилители, собранные по двухкаскадной схеме. Основное их достоинство - большая устойчивость к самовозбуждению, при этом сохраняются все достоинства трехкаскадного ОУ

Уменьшение числа каскадов повышает быстродействие ОУ. В схемах ОУ делается внешний вывод от первого каскада для компенсации напряжения смещения во внешней цепи. В выходных цепях применяют схемы защиты от перегрузок.

### **Схема включения ОУ**

Для обеспечения нормальной работы ОУ необходимо выполнять правила включения их в схему.

ОУ питаются, как правило, от двухполярного источника питания с равными напряжениями ( $\pm 12,6\text{В}$ ,  $\pm 15\text{В}$  и др.). Причем, если заземляется одна из внутренних точек ОУ, то допустима нестабильность и асимметрия  $\pm E_{\text{ИП}}$  не более 10 %.

При включении ОУ без или с неглубокой обратной связью может потребоваться балансировка ОУ.

### **Типовые применения ОУ**

#### **ОУ с резистивной обратной связью:**

Внешняя частотно-независимая резистивная обратная связь, охватывающая ОУ, изменяет его коэффициент усиления и полосу частот, не изменяя формы частотной характеристики. Поэтому нередко говорят, что ОУ в этом режиме является «масштабным усилителем». В зависимости от того, на какой вход ОУ подается полезный сигнал, различают инвертирующее, неинвертирующее и дифференциальное включения ОУ.

Требования, предъявляемые к параметрам ОУ, зависят от выполняемых функций. В каждом конкретном случае выбирают тот тип ОУ, у которого параметры в наибольшей степени удовлетворяют предъявленным требованиям.

В связи с тем что существует определенное противоречие в получении нескольких групп оптимальных параметров ОУ, приходится изготавливать ОУ специального назначения, например, высокочастотные ОУ с широкой полосой пропускания, большой скоростью нарастания выходного напряжения и т. д., но в этом случае трудно получить ОУ с минимальными погрешностями на входе. В

других случаях добиваются наибольшей точности параметров. Такие ОУ получили название прецизионных (высокоточных).

Таким образом, имеются ОУ общего назначения — универсальные, многофункциональные, которые больше всего применяют в аппаратуре связи, и ОУ частного применения, которые имеют оптимальные значения по какой-то группе параметров.

### Инвертирующие и неинвертирующие усилители:

На рис. 12.5 показана схема на ОУ, получившая наиболее широкое применение. Это усилитель с отрицательной обратной связью, у которого коэффициент усиления задаётся резисторами  $R_{oc}$  и  $R_{вх}$ . Он способен усиливать сигналы как переменного, так и постоянного тока.

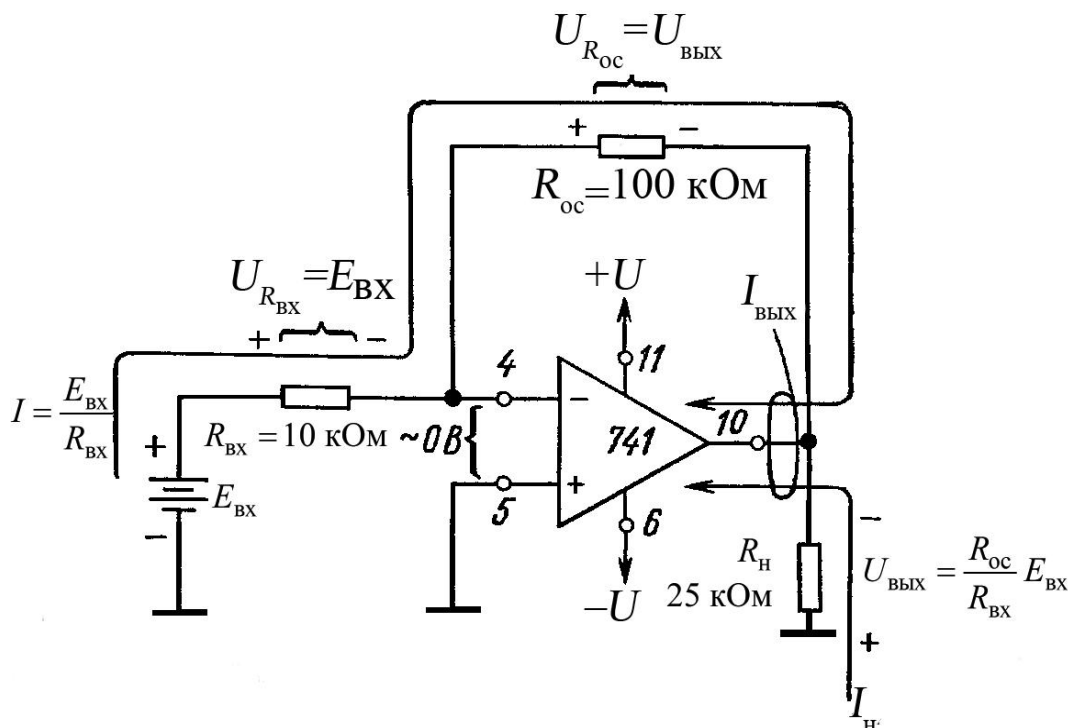


Рис. 12.5. Инвертирующий усилитель при положительном напряжении на входе (+).

Номера выводов ОУ 741 в корпусе DIP проставлены рядом с маленькими кружочками. Напряжение  $E_d$  между входами (+) и (-) фактически равно нулю. Ток, потребляемый этими входами, пренебрежимо мал.

### Подача на инверсный вход положительного напряжения

На рис.12.5 к инверсному входу ОУ через входной резистор  $R_{вх}$  приложено положительное напряжение  $E_{вх}$ . Отрицательная обратная связь осуществляется резистором обратной связи  $R_{oc}$ . Поскольку ОУ работает в ненасыщенном режиме, напряжение между входами (+) и (-) практически равно 0В и поэтому неинверсный вход также находится под нулевым потенциалом, т. е. потенциалом

земли. Вот почему говорят, что вход (–) виртуально заземлён.

Так как на одном из конце резистора  $R_{\text{ВХ}}$  имеется потенциал  $E_{\text{ВХ}}$ , а на другом –0В, то падение напряжения на  $R_{\text{ВХ}}$  равно  $E_{\text{ВХ}}$ . Ток  $I$  через резистор находят по закону Ома:

$$I = \frac{E_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}}. \quad (12.1,а)$$

В сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  входит и сопротивление генератора сигналов.

Весь входной ток  $I$  протекает по  $R_{\text{ОС}}$ , поскольку вход (–) ОУ потребляет ток пренебрежимо малой величины. Заметим, что ток в  $R_{\text{ОС}}$  определяется  $R_{\text{ВХ}}$  и  $E_{\text{ВХ}}$ , а не значениями  $R_{\text{ОС}}$  или параметрами операционного усилителя.

Падение напряжения на  $R_{\text{ОС}}$  равно просто  $IR_{\text{ОС}}$  или:

$$U_{R_{\text{ОС}}} = IR_{\text{ОС}} = \frac{E_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}} R_{\text{ОС}}. \quad (12.1,б)$$

Из рис. 12.1 видно, что один конец  $R_{\text{ОС}}$  соединён с нагрузкой  $R_{\text{Н}}$ . Напряжение относительно земли в точке этого соединения равно  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Вторые концы  $R_{\text{ОС}}$  и  $R_{\text{Н}}$  находятся под потенциалом земли. Следовательно,  $U_{\text{ВЫХ}}$  равно  $UR_{\text{ОС}}$  (напряжению на  $R_{\text{ОС}}$ ). Для определения полярности  $U_{\text{ВЫХ}}$ , заметим прежде всего, что левый по схеме конец  $R_{\text{ОС}}$  имеет потенциал земли. Направление тока, задаваемое  $E_{\text{ВХ}}$ , таково, что правый конец  $R_{\text{ОС}}$  находится под отрицательным потенциалом. Отсюда следует, что при положительном напряжении  $E_{\text{ВХ}}$  напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  – отрицательное. Теперь, приравняв  $U_{\text{ВЫХ}}$  к  $U_{\text{ОС}}$  и добавив знак минус, отражающий тот факт, что  $U_{\text{ВЫХ}}$  имеет полярность, противоположную полярности  $E_{\text{ВХ}}$ , имеем

$$U_{\text{ВЫХ}} = - E_{\text{ВХ}} \frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}}. \quad (12.2,а)$$

Коэффициент усиления ОУ с обратной связью можно получить из (12.2а) в следующем виде:

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ОС}}}{E_{\text{ВХ}}} = - \frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}}. \quad (12.2б)$$

Знак минус в (12.2б) указывает, что полярность выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$  обратна (инверсна) полярности  $E_{\text{ВХ}}$ . По этой причине схема ОУ на рис. 12.1 называется инвертирующим усилителем.

## Ток нагрузки и выходной ток

Ток нагрузки  $I_H$ , который протекает по  $R_H$ , определяется только  $R_H$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$ , но отдаёт его в нагрузку выходная цепь ОУ. Таким образом,  $I_H = U_{\text{ВЫХ}} / R_H$ . Ток в  $R_{\text{ОС}}$  также поступает из выходной цепи операционного усилителя. Выходной ток ОУ, следовательно, равен:

$$I_{\text{ВЫХ}} = I + I_H \quad (12.3)$$

Максимальное значение  $I_{\text{ВЫХ}}$  определяется типом ОУ; обычно оно лежит между 5 и 10 мА.

**Пример 12.1.** Пусть на рис 12.1  $R_{\text{ОС}}=100$  кОм.  $R_{\text{ВХ}}=10$  кОм и  $E_{\text{ВХ}} = 1$  В. Определить: а)  $I$ , б)  $U_{\text{ВЫХ}}$ , в)  $K_{\text{ОС}}$ .

*Решение:* а) из (12.1,а):

$$I = \frac{E_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{1\text{В}}{10\text{ кОм}} = 0,1\text{мА};$$

б) из (12. 2,а)

$$U_{\text{ВЫХ}} = - \frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}} E_{\text{ВХ}} = - \frac{100\text{ кОм}}{10\text{ кОм}} 1\text{В} = - 10\text{В};$$

в) используя (12.2,б), получаем

$$K_{\text{ОС}} = - \frac{R_{\text{ОС}}}{R_{\text{ВХ}}} = - \frac{100\text{ кОм}}{10\text{ кОм}} = - 10.$$

Последний результат можно проверить, взяв отношения  $U_{\text{ВЫХ}}$  и  $E_{\text{ВХ}}$ :

$$K_{\text{ОС}} = - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{ВХ}}} = - \frac{10\text{ В}}{1\text{ В}} = - 10.$$

## Неинвертирующий усилитель

На рис. 12.8,а и рис. 12.8,б показаны неинвертирующие усилители; это означает, что выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  имеет ту же полярность, что и входное напряжение  $E_{\text{ВХ}}$ . У инвертирующего усилителя входное сопротивление равно  $R_{\text{ВХ}}$  (см. подразд. 4.1); входное же сопротивление неинвертирующего усилителя есть входное сопротивление ОУ, которое имеет исключительно большую величину, обычно не меньше 100Ом. Так как напряжение между инверсным и неинверсным

входами ОУ практически равно нулю, оба этих входа находятся под одним и тем же потенциалом  $E_{\text{ВХ}}$ . Отсюда следует, что  $E_{\text{ВХ}}$  падает на  $R_1$  и вызывает в нем ток  $I$ , равный

$$I = \frac{E_{\text{ВХ}}}{R_1}. \quad (12.10a)$$

Направление этого тока зависит от полярности  $E_{\text{ВХ}}$ . Сравним рис. 1.8,а и рис. 12.8,б. Ток через входа (-) ОУ пренебрежимо мал, поэтому  $I$  течёт по  $R_{\text{ОС}}$  и падение напряжения на нем можно выразить в следующем виде:

$$U_{R_{\text{ОС}}} = IR_{\text{ОС}} = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} E_{\text{ВХ}}. \quad (12.10б)$$

Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  равно сумме напряжений на  $R_1$  (т. е.  $E_{\text{ВХ}}$ ) и на  $R_{\text{ОС}}$  (т. е.  $UR_{\text{ОС}}$ ):

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ВХ}} + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} E_{\text{ВХ}},$$

или

$$U_{\text{ВЫХ}} = \left(1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}\right) E_{\text{ВХ}}. \quad (12.11a)$$

Чтобы получить выражение для коэффициента усиления по напряжению, преобразуем (4.11,а); при этом получим

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}. \quad (12.11б)$$

Из последнего уравнения видно, что коэффициент усиления по напряжению неинвертирующего усилителя равен абсолютной величине коэффициента усиления инвертирующего усилителя ( $R_{\text{ОС}}/R_1$ ) плюс 1.

### Порядок выполнения исследований

#### Инвертирующий усилитель:

1.Соберите инвертирующий усилитель, показанный на схеме 12.11 используя  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{\text{ОС}} = 24 \text{ k}\Omega$ . Выходной сигнал генератора IDL-800 является входным для усилителя ( $U_{\text{ВХ}}$ ).

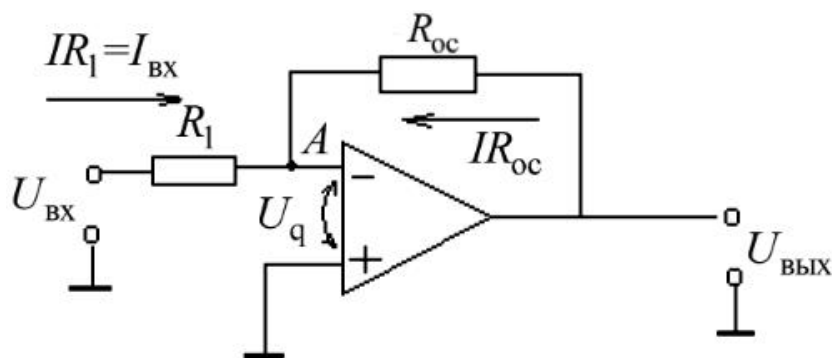


Рис. 12.6. Схема инвертирующего усилителя

2. Изменяя входной сигнал, как показано в таб. 12.5, 12.6 наблюдайте выходной сигнал и заполните таблицу, каждый раз сверяя теоретическое и реальное значения.

3. Нарисуйте временные диаграммы входных и выходных сигналов для  $U_{вх} = \min$  и  $U_{вх} = \max$  для синусоидальной, треугольной и прямоугольной форм входных сигналов.

4. Повторите п. 1, 2 и 3 для инвертирующего усилителя с  $R_1=10 \text{ к}\Omega$  и  $R_{oc}=100 \text{ к}\Omega$ .

Таблица 12.1,а Значения выходного сигнала инвертирующего усилителя ( $R_1=10 \text{ к}\Omega$ ,  $R_{oc}=24 \text{ к}\Omega$ )

$U_{вх}$ , (В)	$U_{вых} = U_{вх} \frac{R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$U_{вых} =$ Практическая	$A_{oc} = \frac{R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$A_{oc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$ Практическая
0,2 В				
0,4 В				
0,6 В				
0,8 В				
1,0 В				
1,2 В				
1,4 В				
1,6 В				
1,8 В				
2,0 В				

Таблица 12.2 Значения выходного сигнала инвертирующего усилителя  
( $R_1=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_{oc}=100\text{ k}\Omega$ )

$U_{\text{ВХ}}$ , (В)	$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \frac{R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$U_{\text{ВЫХ}} =$ Практическая	$A_{oc} = \frac{R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$A_{oc} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ Практическая
0,2 В				
0,4 В				
0,6 В				
0,8 В				
1,0 В				
1,2 В				
1,4 В				
1,6 В				
1,8 В				
2,0 В				

5. Объясните результаты экспериментов и сделайте выводы.

### Неинвертирующий усилитель:

1. Соберите неинвертирующий усилитель, показанный на схеме рис. 12.12, используя  $R_1=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_{oc}=24\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_3=24\text{ k}\Omega$ . Выходной сигнал генератора является входным для усилителя ( $U_{\text{ВХ}}$ ).

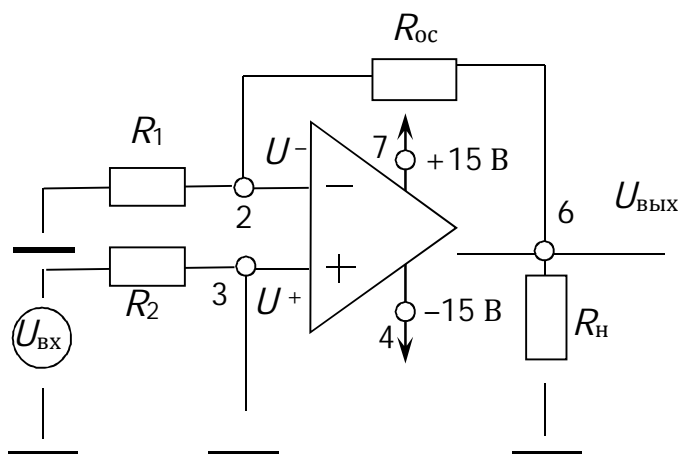


Рис. 12.12. Схема неинвертирующего усилителя с входным делителем

2. Изменяя входной сигнал, как показано в таб. 12.3, наблюдайте выходной сигнал и заполните таблицу, каждый раз сравнивая теоретическое и практическое значения.

3. Нарисуйте временные диаграммы входного и выходного сигналов для  $U_{\text{ВХ}} = \min$  и  $U_{\text{ВХ}} = \max$  для синусоидальной, треугольной и прямоугольной форм входных сигналов.

Таблица 12.3 Значения выходного сигнала неинвертирующего усилителя  
( $R_1=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_{oc}=24\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_3=24\text{ k}\Omega$ )

$U_{вх}$ , (В)	$U_{ввых} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$U_{ввых} =$ Практическая	$A_{oc} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$A_{oc} = \frac{U_{ввых}}{U_{вх}}$ Практическая
0.2 В				
0.4 В				
0.6 В				
0.8 В				
1.0 В				
1.2 В				
1.4 В				
1.6 В				
1.8 В				
2.0 В				

4. Повторите п. 1, 2 и 3 для неинвертирующего усилителя  $R_1=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_{oc}=100\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_3=100\text{ k}\Omega$ .

Таблица 12.4 Значения выходного сигнала неинвертирующего усилителя:  
( $R_1=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_{oc}=100\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=10\text{ k}\Omega$ ,  $R_3=100\text{ k}\Omega$ )

$U_{вх}$ , (В)	$U_{ввых} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$U_{ввых} =$ Практическая	$A_{oc} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1}$ Теоретическая	$A_{oc} = \frac{U_{ввых}}{U_{вх}}$ Практическая

0,2 В				
0,4 В				
0,6 В				
0,8 В				
1,0 В				
1,2 В				
1,4 В				
1,6 В				
1,8 В				
2,0 В				

5. Объясните результаты экспериментов и сделайте выводы.

### Содержание отчёта

1. Цель лабораторной работы.
2. Схемы устройств, исследованных в работе.
3. Результаты исследований.
4. Выводы.
5. Ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Разработайте инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления 5 и  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ;
2. Разработайте неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления 5 и  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ;
3. Разработайте неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления 5 и  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ .

## Лабораторная работа №13

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

**Цель работы:** Изучение базовых логических функций. Исследование функционирования основных логических элементов.

#### Краткие теоретические сведения

Все цифровые устройства построены на элементах, которые выполняют те или иные логические операции. Для анализа и синтеза цифровых устройств используется аппарат алгебры логики. В общем случае цифровые устройства разделяются на два типа:

- комбинационные, и
- последовательностные.

В комбинационных устройствах выходной сигнал в любой момент времени зависит только от значений входных сигналов в тот же момент времени.

В последовательностных устройствах выходной сигнал в любой момент времени зависит как от значений входных сигналов в данный момент времени, так и от значений входных сигналов в предыдущие моменты времени. Для этого эти устройства имеют память. В последовательностных устройствах комбинационные устройства являются составной частью, поэтому комбинационные устройства изучаются первыми.

Рассмотрим комбинационное устройство, блок-схема которого показана на рис. 13.1.



Рис. 13.1. Блок-схема комбинационного устройства

Входные и выходные сигналы комбинационного устройства могут принимать только два логических значения 0 или 1, т.е.  $x_i \in \{0, 1\}$ ;  $y_i \in \{0, 1\}$ . Любая совокупность входных сигналов может быть представлена вектором  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  и называется входным набором.

Очевидно, что существует  $2^n$  различных входных наборов. Сопоставим каждому входному набору определенное значение выходного сигнала  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Тогда работа комбинационной схемы (устройства) может быть описана с помощью функции, отображающей множество входных наборов

в значение выходной переменной  $Y$ .

*Определение.* Функцией алгебры логики (ФАЛ)  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  называется функция, дающая однозначное отображение множества векторов  $X$  в переменную  $Y$ .

Так как число различных входных наборов равно  $2^n$ , то любая ФАЛ может быть задана в виде таблицы со  $2^n$  строками, табл. 1.1.

Таблица 13.1

$x_1$	$x_2$	...	$x_{n-1}$	$x_n$	$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
0	0	...	0	0	$\alpha_1$
0	0	...	0	1	$\alpha_2$
0	0	...	1	0	$\alpha_3$
...	...	...	...	...	...
1	1	...	0	0	$\alpha_{2^n-3}$
1	1	...	0	1	$\alpha_{2^n-2}$
1	1	...	1	0	$\alpha_{2^n-1}$
1	1	...	1	1	$\alpha_{2^n}$

В левой части таблицы перечислены все возможные входные наборы, а в правой записаны значения функции на этих наборах.

Каждая ФАЛ представляет собой двоичный набор длины  $2^n$ , а число возможных таких наборов равно  $2^{2^n}$ , поэтому справедливо следующее утверждение, что число различных функций алгебры логики, зависящих от  $n$  аргументов, конечно и равно  $2^{2^n}$ .

Рассмотрим несколько примеров. Пусть  $n = 1$ , тогда число функций алгебры логики  $2^{2^1} = 4$ . Эти функции приведены в табл. 13.2.

Таблица 13.2

$x$	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
0	0	0	1	1
1	0	1	0	1

Функции  $f_0$  и  $f_3$  – логические константы (константа нуля и константа единицы). Функция  $f_1$  называется функцией тождества или просто тождеством, т.к.  $f_1 = x$ , а функция  $f_2$  называется функцией отрицания или просто отрицанием,  $f_2 = \bar{x}$  (читается «не X»), функция НЕ.

Для  $n = 2$  существует  $2^{2^2} = 2^4 = 16$  функций алгебры логики; они

приведены в табл. 13.3.

Таблица 13.3

$x_1$	$x_2$	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{14}$	$f_{15}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Операц. символ		.	$\neg$			$\neg$		$\bar{A}$	+	$\downarrow$	$\odot$		$\otimes$		$\otimes$	$\uparrow$	

Рассмотрим эти функции.

Функции  $f_0(x_1, x_2)$  и  $f_{15}(x_1, x_2)$  - логические константы. Функция  $f_0(x_1, x_2) = 0 = \overline{f_{15}(x_1, x_2)}$  - константа нуль (функция нуль). Технически  $f_0$  реализуется генератором нуля, рис. 13.1а.

Функция  $f_{15}(x_1, x_2) = 1 = \overline{f_0(x_1, x_2)}$  - константа единица (функция единица). Технически реализуется генератором единицы, рис. 1.1 б).

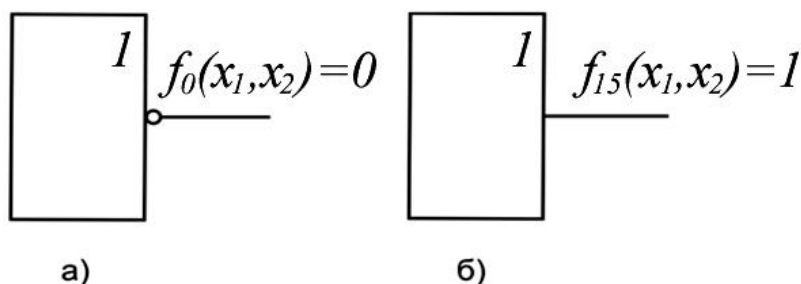


Рис. 13.1. Условное обозначение генераторов логических констант

Будем продолжать рассматривать функции в табл. 13.3 по парам, так как по отношению к любой функции вторая функция в паре является инверсной.

Функция  $f_1(x_1, x_2)$  - конъюнкция, логическое умножение, функция И,

$$f_1(x_1, x_2) = x_1 \& x_2 = x_1 \times x_2 = x_1 x_2 = \overline{f_{14}(x_1, x_2)}.$$

Технически реализуется логическим элементом И, как показано на рис.13.2а.

Функция  $f_{14}(x_1, x_2)$  - функция Шеффера, функция И-НЕ,

$$f_{14}(x_1, x_2) = \overline{x_1 x_2} = \overline{f_1(x_1, x_2)}.$$

Технически реализуется логическим элементом Шеффера, элементом И-НЕ, см. рис. 13.2б.

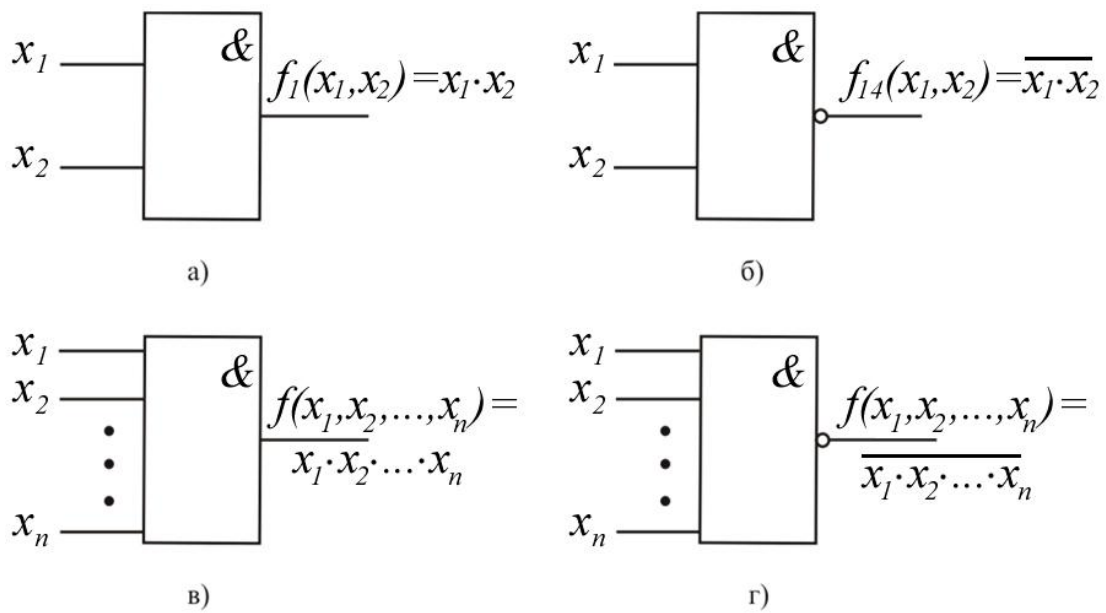


Рис.13.2. Условное обозначение логических элементов И и И-НЕ

Функции И и И-НЕ могут быть, как и соответствующие им логические элементы, с произвольным числом переменных (входов), рис. 13.2в, г.

Функция  $f_2$  - запрет 1-го аргумента,

$$f_2(x_1, x_2) = x_1 \neg x_2 = x_1 \times x_2 = \overline{x_1 \cdot x_2} = f_{13}(x_1, x_2).$$

Технически реализуется элементом запрета, рис. 13.3а.

Функция  $f_{13}$  - импликация от 1-го аргумента ко второму,

$$f_{13}(x_1, x_2) = x_1 \circ x_2 = \bar{x}_1 + x_2 = \overline{x_1 \cdot x_2} = f_2(x_1, x_2).$$

Технически реализуется импликатором, рис. 13.3б.

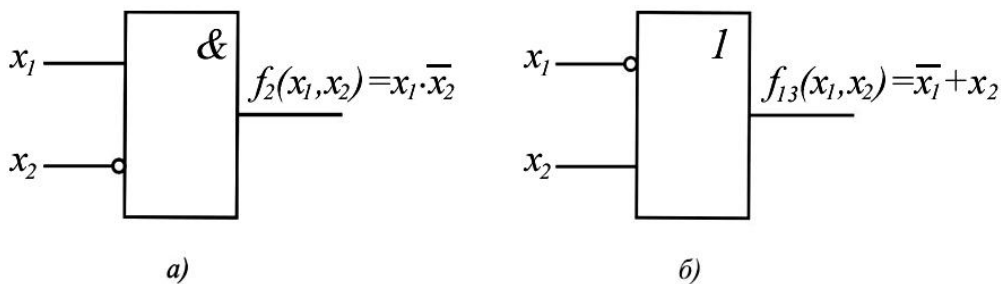


Рис. 13.3. Условное обозначение элемента запрета а) импликатора б)

Функция  $f_3$  - повторение первого аргумента (функция ДА),

$$f_3(x_1, x_2) = x_1 = \overline{x_1 \cdot x_2} = f_{12}(x_1, x_2).$$

Технически реализуется повторителем, рис 13.4а.

Функция  $f_{12}$  - отрицание первого аргумента (функция НЕ),

$$f_{12}(x_1, x_2) = \bar{x}_1 = \overline{x_1 \cdot x_2} = f_3(x_1, x_2).$$

Технически реализуется инвертором, рис.13.4б.

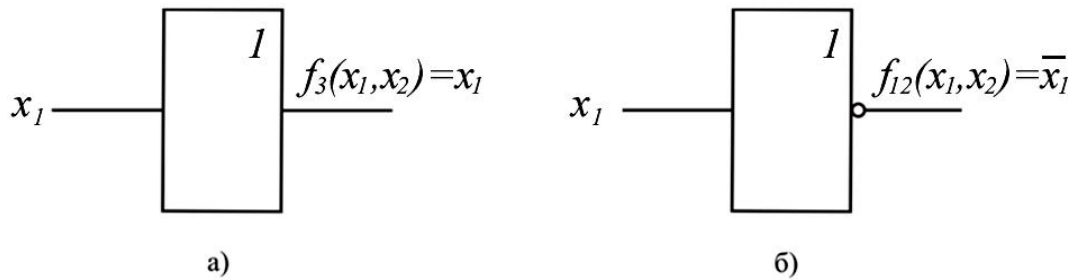


Рис. 13.4. Условные обозначения повторителя и инвертора

Функция  $f_4$  - запрет 2-го аргумента,

$$f_4(x_1, x_2) = x_2 \neg x_1 = \bar{x}_1 \times x_2 = \overline{f_{11}}(x_1, x_2).$$

Функция  $f_{11}$  - импликация от 2-го аргумента к 1-му,

$$f_{11}(x_1, x_2) \times x_2 \oplus x_1 = x_1 + \bar{x}_2 = f_4(x_1, x_2).$$

Функция  $f_5$  - повторение 2-го аргумента,

$$f_5(x_1, x_2) = x_2 = \overline{f_{10}}(x_1, x_2).$$

Функция  $f_{10}$  - отрицание второго аргумента,

$$f_{10}(x_1, x_2) = \bar{x}_2 = \overline{f_5}(x_1, x_2).$$

Функция  $f_6$  - неравнозначность, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ,

$$f_6(x_1, x_2) = x_1 \dot{\wedge} x_2 = \bar{x}_1 x_2 + x_1 \bar{x}_2 = \overline{f_9}(x_1, x_2).$$

Технически реализуется логическим элементом «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ», рис.13.5а.

Функция  $f_9$  - равнозначность, эквивалентность, «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ-НЕ»,

$$f_9(x_1, x_2) = x_1 \ddot{\wedge} x_2 = x_1 x_2 + \bar{x}_1 \bar{x}_2 = \overline{x_1 \dot{\wedge} x_2} = \overline{f_6}(x_1, x_2)$$

Технически реализуется элементом равнозначность, «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ-НЕ», рис.13.5б.

Функции неравнозначность и равнозначность могут быть, как и соответствующие им логические элементы, с произвольным числом переменных (входов), рис. 13.5 в,г. Функция неравнозначность равна 1, если число аргументов равных 1 нечетно.

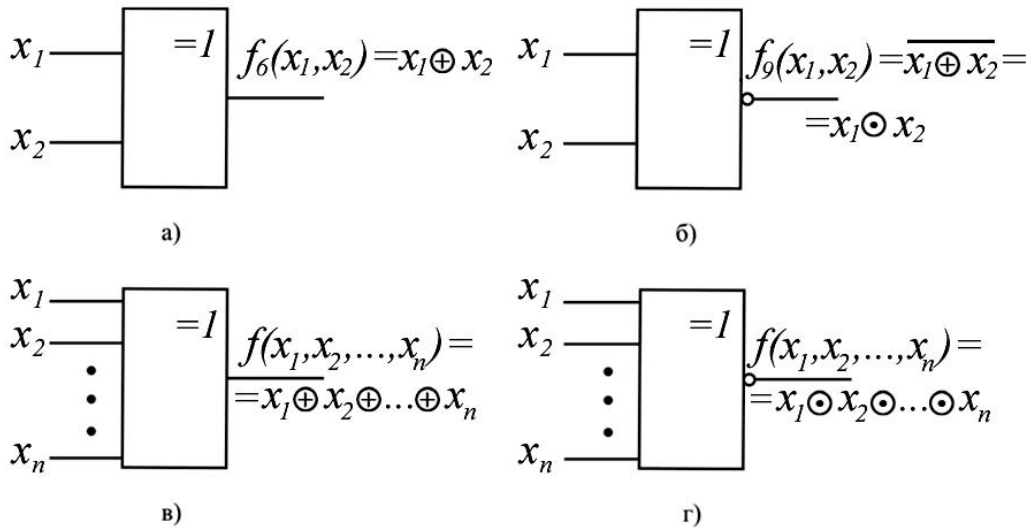


Рис. 13.5. Логические элементы, реализующие функции неравнозначность и равнозначность

Функция  $f_7$  - дизъюнкция, функция ИЛИ,

$$f_7(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = \overline{f_8(x_1, x_2)}.$$

Технически реализуется элементом ИЛИ, рис. 13.6а.

Функция  $f_8$  - функция Пирса или функция Вебба (функция ИЛИ-НЕ),

$$f_8(x_1, x_2) = \overline{x_1 + x_2} = \overline{f_7(x_1, x_2)}.$$

Технически реализуется элементом Пирса или Вебба (элемент ИЛИ-НЕ), рис.13.6б.

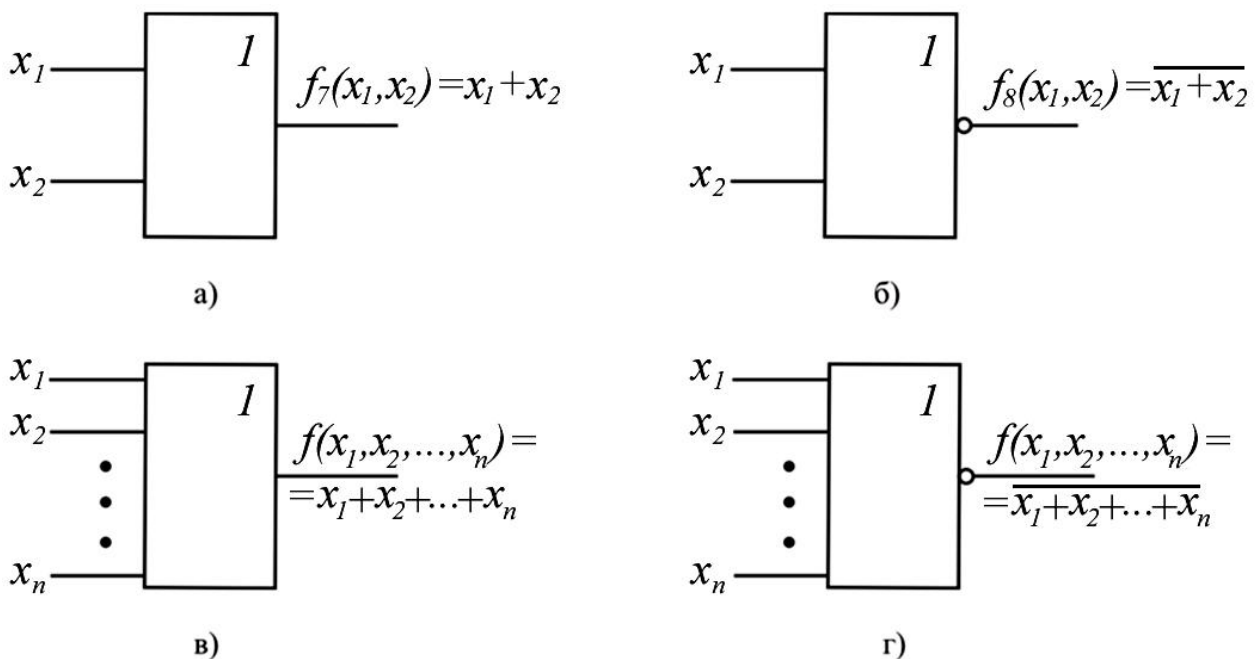


Рис.13.6. Логические элементы ИЛИ и ИЛИ-НЕ

Функции ИЛИ и ИЛИ-НЕ могут быть, как и соответствующее им логические элементы, с произвольным числом переменных (входов), рис.13.6в,г.

Значение функций двух переменных в общей теории логических функций состоит в том, что с их помощью может быть представлена любая сколько угодно сложная ФАЛ. Средством для такого представления является суперпозиция булевых функций или подстановка одних логических функций вместо аргументов в другие функции. Возможность такой подстановки обуславливается тем, что в силу определения, области значений функций и их аргументов совпадают.

Для выражения сложных логических функций достаточно использовать не все элементарные функции, а только их некоторую часть, называемую базисом или системой.

Система элементарных функций  $F_1, F_2, \dots, F_k$  называется функционально полной, если любую функцию алгебры логики можно записать в виде формулы через функции  $F_1, F_2, \dots, F_k$ .

Минимальным базисом называется такая функционально полная система,  $F_1, F_2, \dots, F_m$  для которой удаление любой одной из входящих в нее функций превращает эту систему в функционально не полную.

Примерами полных систем являются:

1.  $F_1(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2$ ,  $F_2(x_1, x_2) = x_1 + x_2$ ,  $F_3(x) = \bar{x}$ ;
2.  $F_1(x_1, x_2) = x_1 + x_2$ ,  $F_2(x) = \bar{x}$ ;
3.  $F_1(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2$ ,  $F_2(x) = \bar{x}$ ;
4.  $F(x_1, x_2) = \overline{x_1 + x_2}$ ;
5.  $F(x_1, x_2) = \overline{x_1 \times x_2}$ ;
6.  $F_1(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2$ ;  $F_2(x_1, x_2) = x_1 \dot{\wedge} x_2$ ;  $F_3(x) = 1$ ;

ФАЛ можно изменять, упрощать. Для проведения таких манипуляций используются основные законы алгебры логики, правила, теоремы упрощения, которые представлены в виде табл. 13.4.

Таблица 13.4

Основные законы, правила и теоремы алгебры логики	
Для оператора (+)	Для оператора (·)
Переместительный закон (коммутативный)	
$x_1 + x_2 = x_2 + x_1$	$x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$
Сочетательный закон (ассоциативный)	
$(x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + (x_2 + x_3)$	$(x_1 \cdot x_2) \cdot x_3 = x_1 (x_2 \cdot x_3)$
Распределительный закон (дистрибутивный)	
$x_1 \cdot (x_2 + x_3) = x_1 x_2 + x_1 x_3$	$x_1 + x_2 \cdot x_3 = (x_1 + x_2) \cdot (x_1 + x_3)$
Закон отрицания (закон де Моргана)	
$\overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$	$\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$
Операции с логической 1 и 0	
$x + 0 = x$	$x \cdot 0 = 0$
$x + 1 = 1$	$x \cdot 1 = x$
Правило повторения (идемпотентности)	
$x + x = x$	$x \cdot x = x$
Правило дополнительности	
$x + \bar{x} = 1$	$x \cdot \bar{x} = 0$
Правило двойного отрицания	
$\overline{\bar{x}} = x$	
Теоремы упрощения	
$x_1 x_2 + x_1 \bar{x}_2 = x_1$	$(x_1 + x_2)(x_1 + \bar{x}_2) = x_1$
$x_1(x_1 + x_2) = x_1$	$x_1 + x_1 x_2 = x_1$
$x_1(\bar{x}_1 + x_2) = x_1 x_2$	$x_1 + \bar{x}_1 x_2 = x_1 + x_2$

## Порядок выполнения лабораторной работы

Оборудование и компоненты: универсальная лабораторная установка IDL-800, ИС 1533ЛА3(74ALS00) – четыре логических элемента 2И-НЕ, ИС 1533ЛЕ1(74ALS02) – четыре логических элемента 2ИЛИ-НЕ, ИС 1533ЛН1(74ALS04) – шесть логических элементов НЕ, ИС 1533ЛИ1(74ALS08) – четыре логических элемента 2И, ИС 1533ЛЛ1(74ALS32) – четыре логических элемента 2ИЛИ, ИС 1533ЛП5(74ALS86) – четыре двухвходовых логических элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

### Исследование логических элементов И

#### Двухвходовый элемент И

1. Разместить ИС 1533ЛИ1 на наборной панели IDL-800.
2. Вывод 14 ИС соединить с источником питания +5V, а вывод 7 с общей шиной установки.
3. Собрать схему, как показано на рис. 13.7а.
4. Изменяя состояния входов  $x_1$  и  $x_2$  с помощью переключателей SW заполнить таблицу истинности логического элемента 2И, таблица 1.5а.

#### Многовходовый элемент И

1. Используя двухвходовые элементы И, собрать трехвходовый элемент И, реализующий функцию

$$f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 \wedge x_2) \wedge x_3 = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3,$$

как показано на рис.13.8 а.

2. Изменяя состояния входов  $x_1, x_2, x_3$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности логического элемента 3И, табл. 13.5б.

Таблица 13.5а

Входы			Выходы	
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 \wedge x_2$	$x_1 \wedge x_2 \wedge x_3$
0	0	0		
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		

Таблица 13.5б

ВХОДЫ		ВЫХОД
$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2)$
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

1	1	1		
---	---	---	--	--

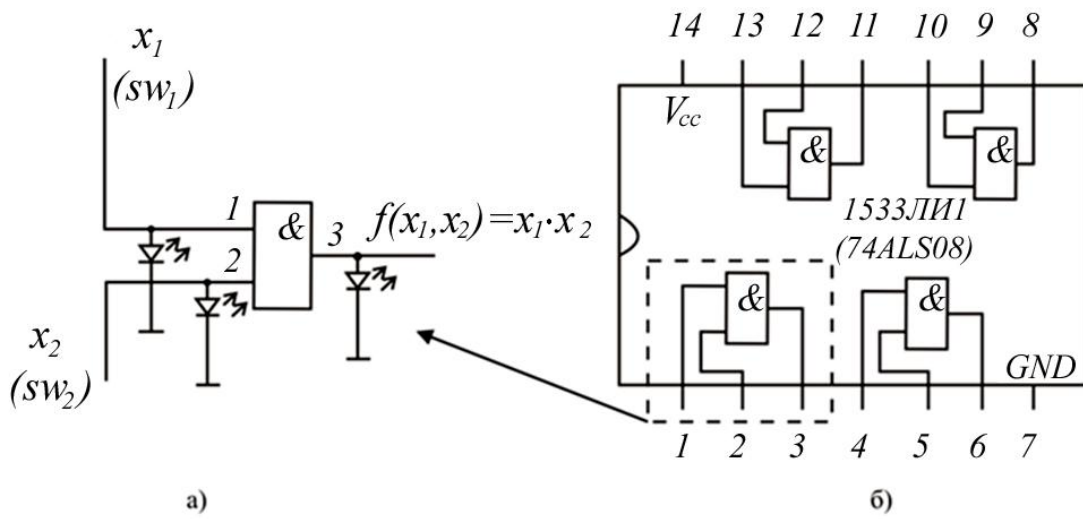


Рис 13.7

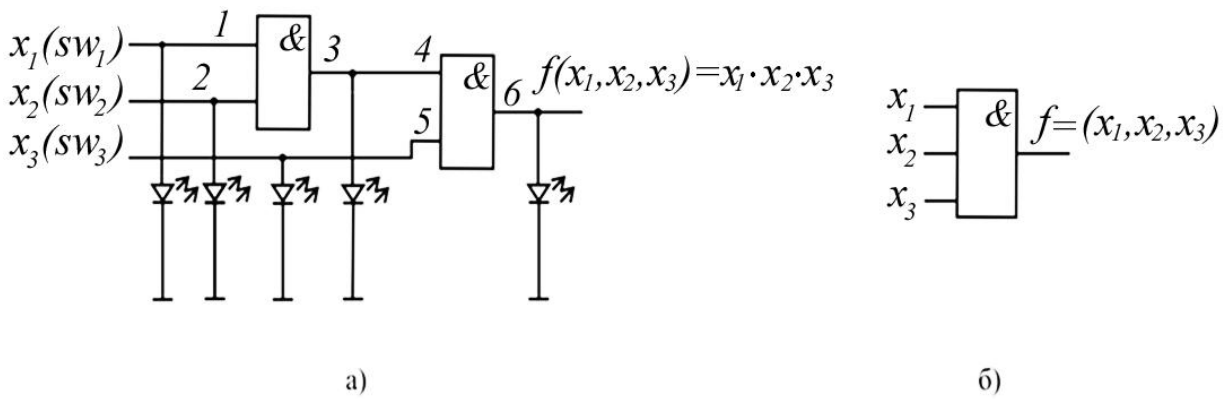


Рис 13.8

### Исследование логических элементов ИЛИ

### Двухвходовый элемент ИЛИ

1. Разместить ИС 1533ЛЛ1 (74ALS32) на наборной панели IDL-800.
2. Вывод 14 ИС соединить с источником питания +5V, а вывод 7 с общей шиной установки.
3. Собрать схему, как показано на рис. 13.9а.
4. Изменяя состояние входов  $x_1, x_2$ , исследовать работу двухвходового элемента ИЛИ, заполнить таблицу истинности логического элемента, табл. 13.6.

### Многовходовой элемент ИЛИ

1. Используя двухвходовые элементы ИЛИ собрать трехвходовый элемент ИЛИ, реализующий функцию
 
$$f(x_1, x_2, x_3) = (x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + x_2 + x_3,$$
 как показано на рис 13.10а.
2. Изменяя состояния входов  $x_1, x_2, x_3$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности логического элемента ЗИЛИ, таблица 13.7.

Таблица 13.6

Входы		Выход
$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2)$
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Таблица 13.7

Входы			Выходы	
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 + x_2$	$x_1 + x_2 + x_3$
0	0	0		
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

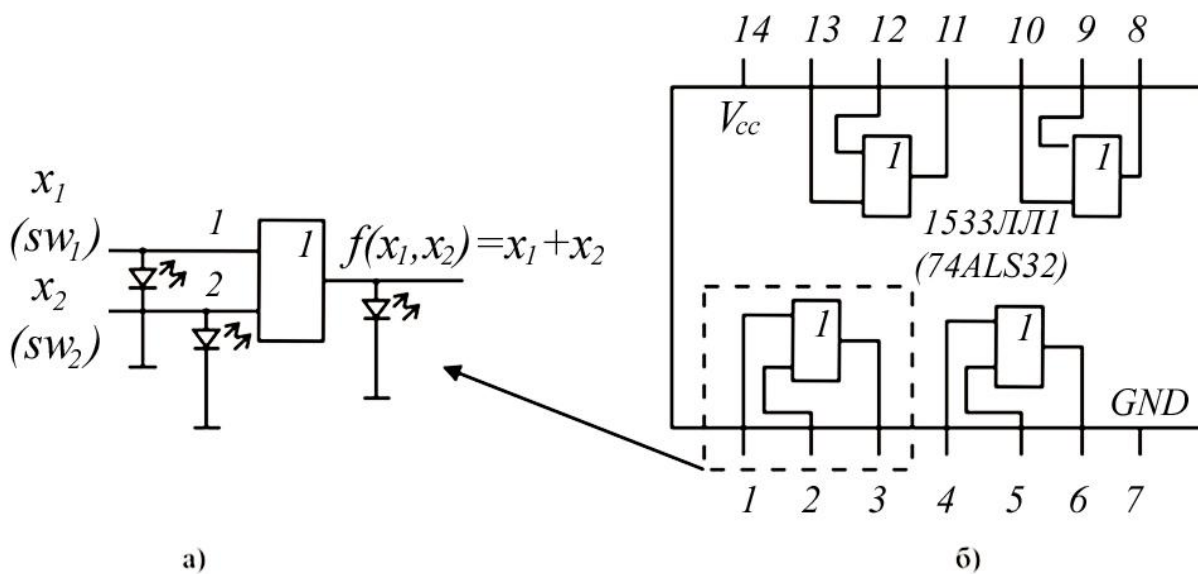


Рис 13.9

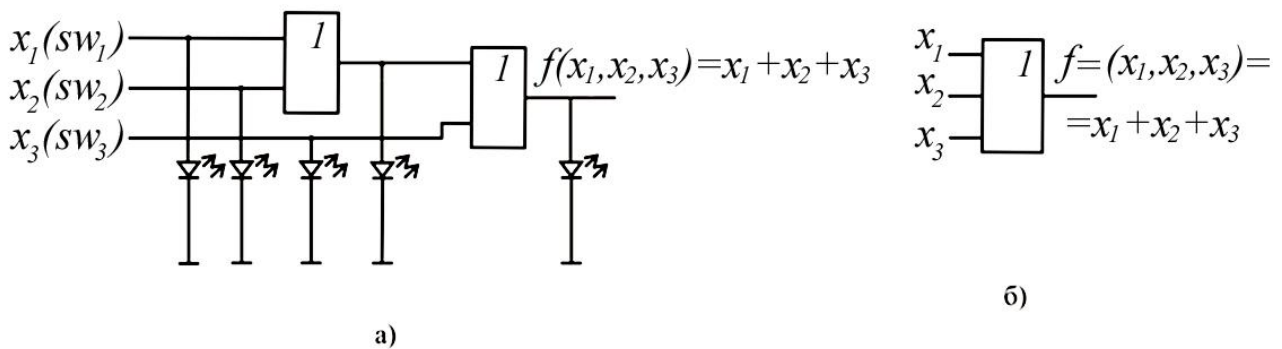


Рис 13.10

### Исследование инвертора

1. Разместить ИС 1533ЛН1 (74ALS04) на наборной панели IDL-800.
2. Вывод 14 ИС соединить с источником питания +5V, а вывод 7 с общей шиной установки.
3. Собрать схему, как показано на рис. 13.11а.
4. Изменяя состояние входа  $x$ , исследовать работу инвертора, заполнить таблицу истинности инвертора, табл. 13.8.

Таблица 13.8

Вход	Выход
$x$	$f(x) = \bar{x}$
0	
1	

## Исследование логического элемента И-НЕ

### Двухвходовый элемент И-НЕ

1. Разместить ИС 1533ЛА3(74ALS00) на наборной панели IDL-800.
2. Вывод 14 ИС соединить с источником питания +5V, а вывод 7 с общей шиной установки.
3. Собрать схему, как показано на рис13.12а.
4. Изменяя состояния входов  $x_1$  и  $x_2$ , исследовать работу двухвходового элемента И-НЕ, заполнить таблицу истинности, табл. 13.9.

Таблица 13.9

Входы		Выход
$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2)$
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Таблица 13.10

Вход	Выход
$x$	$f(x) = \bar{x}$
0	
1	

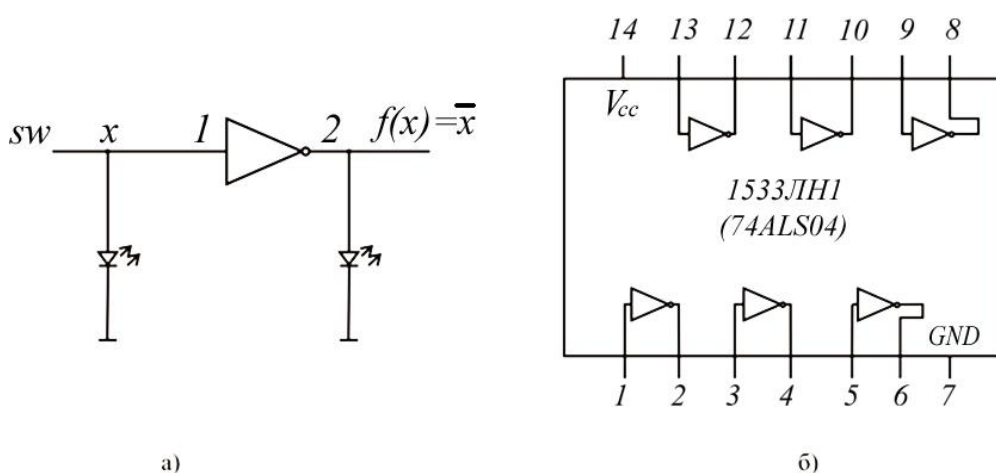


Рис 13.11

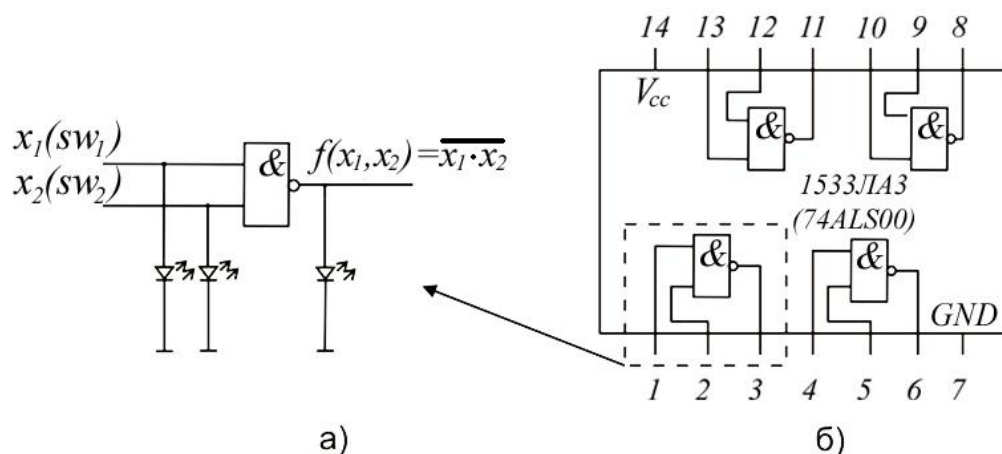


Рис 13.12

### Двухвходовый элемент И-НЕ, используемый как инвертор

Если соединить входы двухвходового элемента И-НЕ, то элемент будет работать как инвертор.

1. Собрать схему, как показано на рис. 13.13 а.
2. Изменяя состояние входа X, исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.10.

### Многовходовый элемент И-НЕ

1. Используя двухвходовые элементы И-НЕ, собрать трехвходовый элемент И-НЕ, реализующий функцию  $f(x_1, x_2, x_3) = \overline{x_1 \times x_2 \times x_3}$ , рис. 13.13 б.
2. Изменяя состояния входов  $x_1, x_2, x_3$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.11.

### Реализация функции ИЛИ, с помощью логических элементов И-НЕ

1. Используя двухвходовые элементы И-НЕ, собрать схему, реализующую операцию ИЛИ, как показано на рис. 13.13в.
2. Изменяя состояния входов  $x_1$  и  $x_2$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.12.

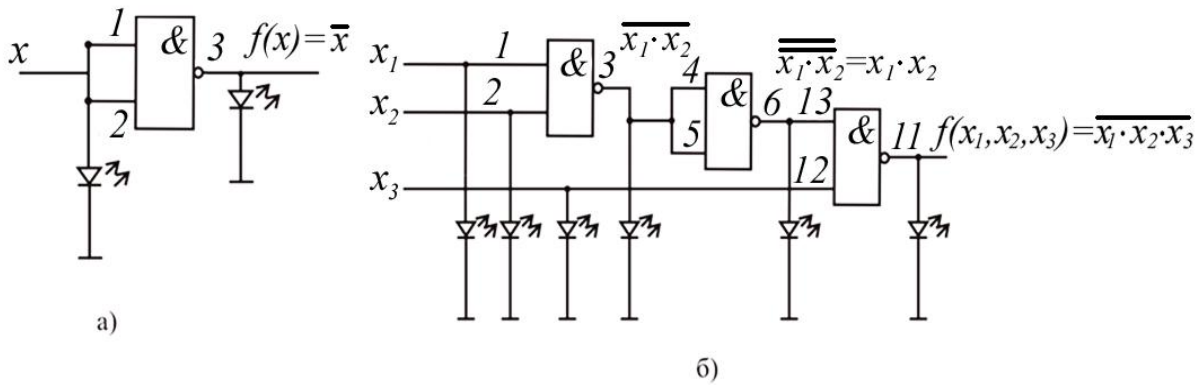
Таблица 13.11

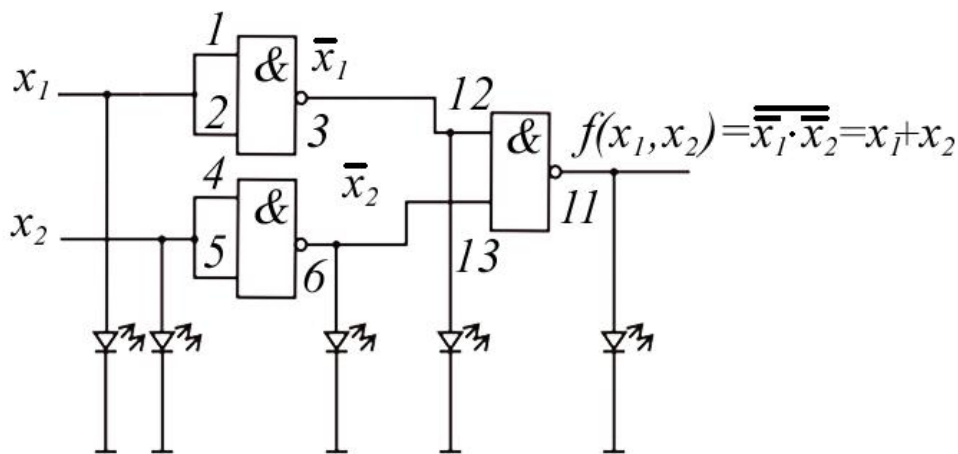
Входы			Выходы		
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\overline{x_1 \times x_2}$	$x_1 \vee x_2$	$\overline{x_1 \times x_2 \times x_3}$

0	0	0			
0	0	1			
0	1	0			
0	1	1			
1	0	0			
1	0	1			
1	1	0			
1	1	1			

Таблица 13.12

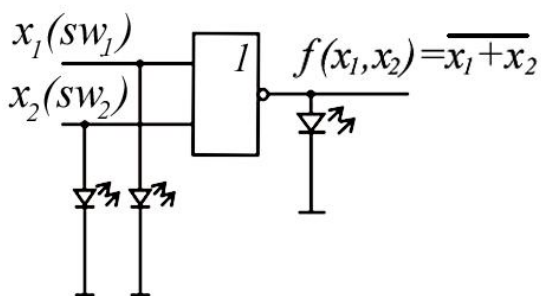
Входы		Выходы		
$x_1$	$x_2$	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$x_1 + x_2$
0	0			
0	1			
1	0			
1	1			



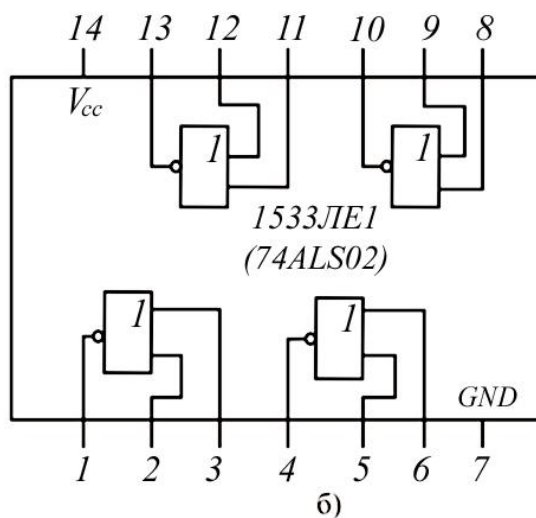


в)

Рис 13.13



а)



б)

Рис 13.14

## Исследование логического элемента ИЛИ-НЕ

### Двухвходовый элемент ИЛИ-НЕ

1. Разместить ИС 1533JE1 (74ALS02) на наборной панели IDL-800.
2. Вывод 14 ИС соединить с источником питания +5V, а вывод 7 с общей шиной установки.
3. Собрать схему, как показано на рис. 13.14 а.
4. Изменяя состояние входов  $x_1$  и  $x_2$ , исследовать работу элемента 2ИЛИ-НЕ, заполнить таблицу истинности, табл. 13.13.

## Двухвходовый элемент ИЛИ-НЕ, используемый как инвертор

Если соединить входы элемента ИЛИ-НЕ, то элемент будет работать как инвертор.

1. Собрать схему, как показано на рис.13.15 а.
2. Изменяя состояние входа  $x$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.14.

Таблица 13.13

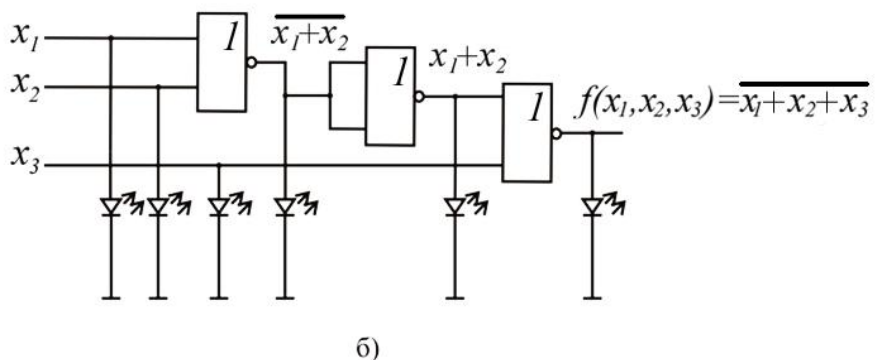
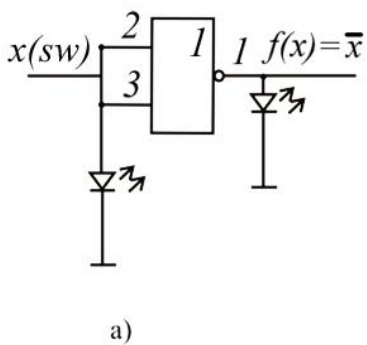
Входы		Выход
$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2) = \overline{x_1 + x_2}$
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

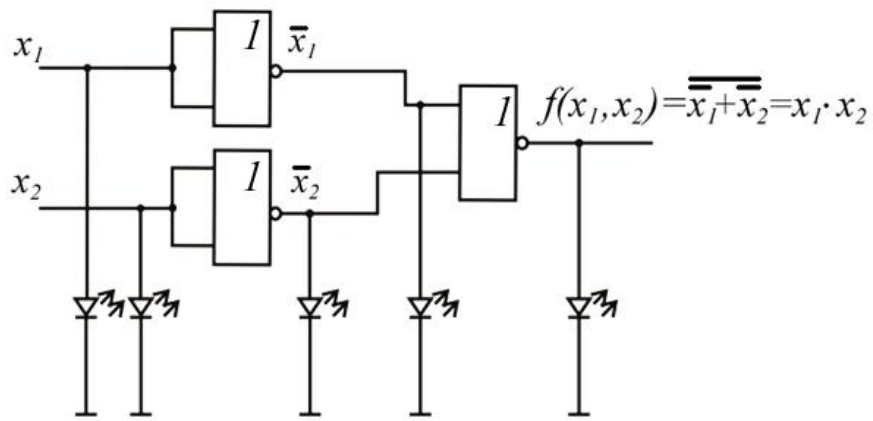
Таблица 13.14

Вход	Выход
$x$	$f(x) = \bar{x}$
0	
1	

## Многовходовый элемент ИЛИ-НЕ

1. Используя двухвходовые элементы ИЛИ-НЕ, собрать трехвходовый элемент ИЛИ-НЕ, реализующий функцию  $f(x_1, x_2, x_3) = \overline{x_1 + x_2 + x_3}$ , рис. 13.15б.
2. Изменяя состояние входов  $x_1, x_2, x_3$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.15.





в)

Рис 13.15

Реализация функции И с помощью логических элементов ИЛИ-НЕ

1. Используя двухвходовые элементы ИЛИ-НЕ, собрать схему, реализующую операцию И, как показано на рис 13.15в.
2. Изменяя состояния входов  $x_1, x_2$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.16.

Таблица 13.15

Входы			Выходы		
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\overline{x_1 + x_2}$	$x_1 + x_2$	$\overline{x_1 + x_2 + x_3}$
0	0	0			
0	0	1			
0	1	0			
0	1	1			
1	0	0			
1	0	1			
1	1	0			
1	1	1			

Таблица 13.16

Входы		Выходы		
$x_1$	$x_2$	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$x_1 \cdot x_2$

0	0			
0	1			
1	0			
1	1			

## Исследование логического элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

### Двухвходовый элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

1. Разместить ИС 1533ЛП5 (74ALS86) на наборной панели IDL-800.
2. Выход 14 ИС соединить с источником питания +5V, а вывод 7 с общей шиной установки.
3. Собрать схему, как показано на рис. 13.16а.
4. Изменяя состояние входов  $x_1$  и  $x_2$ , исследовать работу двухвходового элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, заполнить таблицу истинности, табл. 13.17.

### Многовходовый элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

1. Используя двухвходовые элементы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, собрать схему трехвходового элемента ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, рис.13.17а.
2. Изменяя состояния входов  $x_1, x_2, x_3$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.18.

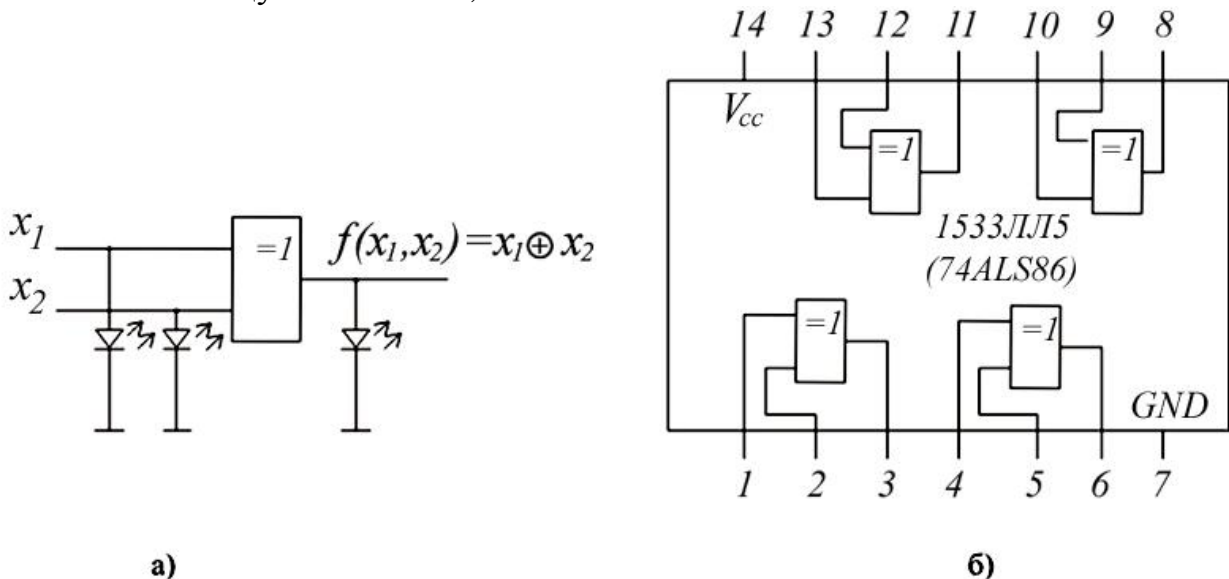


Рис 13.16

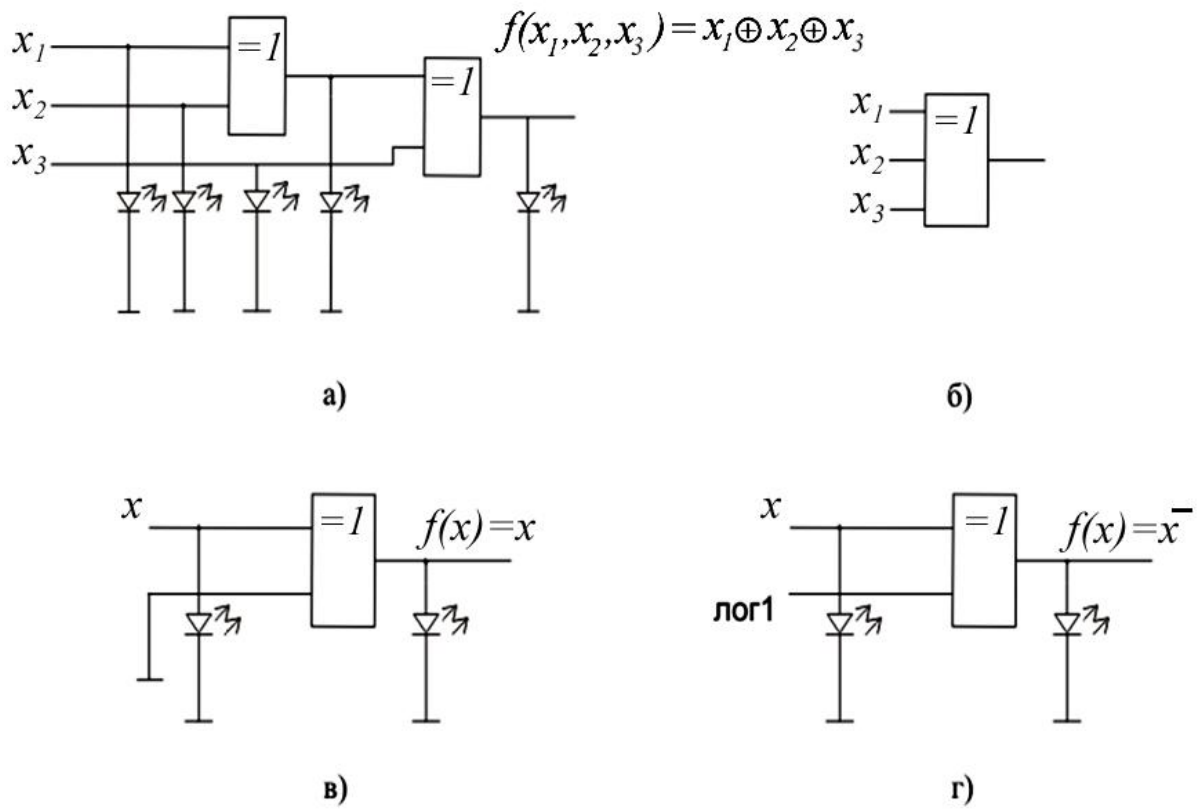


Рис 13.17

Таблица 13.17

Таблица 13.18

Входы		Выход	Входы			Выходы	
$x_1$	$x_2$	$f(x_1, x_2) = x_1 \dot{\wedge} x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 \dot{\wedge} x_2$	$x_1 \dot{\wedge} x_2 \dot{\wedge} x_3$
0	0		0	0	0		
0	1		0	0	1		
1	0		0	1	0		
1	1		0	1	1		
			1	0	0		
			1	0	1		
			1	1	0		
			1	1	1		

Логический элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, используемый как повторитель

1. Собрать схему, как показано на рис. 13.17в.
2. Изменяя состояние входа  $x$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.19.

Логический элемент ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, используемый как инвертор

1. Собрать схему, как показано на рис. 13.17 г.
2. Изменяя состояния входа  $x$ , исследовать работу схемы, заполнить таблицу истинности, табл. 13.20.

Таблица 13.19

Вход	Выход
$x$	$f(x) = x$
0	
1	

Таблица 13.20

Вход	Выход
$x$	$f(x) = \bar{x}$
0	
1	

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы, исследуемые в работе.
3. Таблицы, отражающие результаты исследований.
4. Выводы по результатам исследований.

### Контрольные вопросы

1. Что называется функцией алгебры логики?
2. Основные ФАЛ для двух переменных.
3. Что такое полная система ФАЛ?
4. Основные логические элементы, их обозначения.
5. Многовходовые логические элементы.

## Лабораторная работа №14.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ В СРЕДЕ MULTISIM

**Цель работы:** Освоение основных практических навыков работы с моделями источников импульсных, гармонических и модулируемых колебаний.

#### Теоретические сведения

Комплекс Multisim представляет собой средство программной разработки, моделирования и отладки электрических цепей.

Для его работы требуется персональный компьютер, процессор которого имеет тактовую частоту не ниже 233 МГц, и операционная система WindowsXP или Windows 7.

#### Интерфейс программного комплекса Multisim

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рисунок 14.1).

Для правильной работы документа необходимо, чтобы на компьютере была установлена программа MULTISIM 11.0 и файлы с расширением NlCircuitDesignSuitev. 11.0.

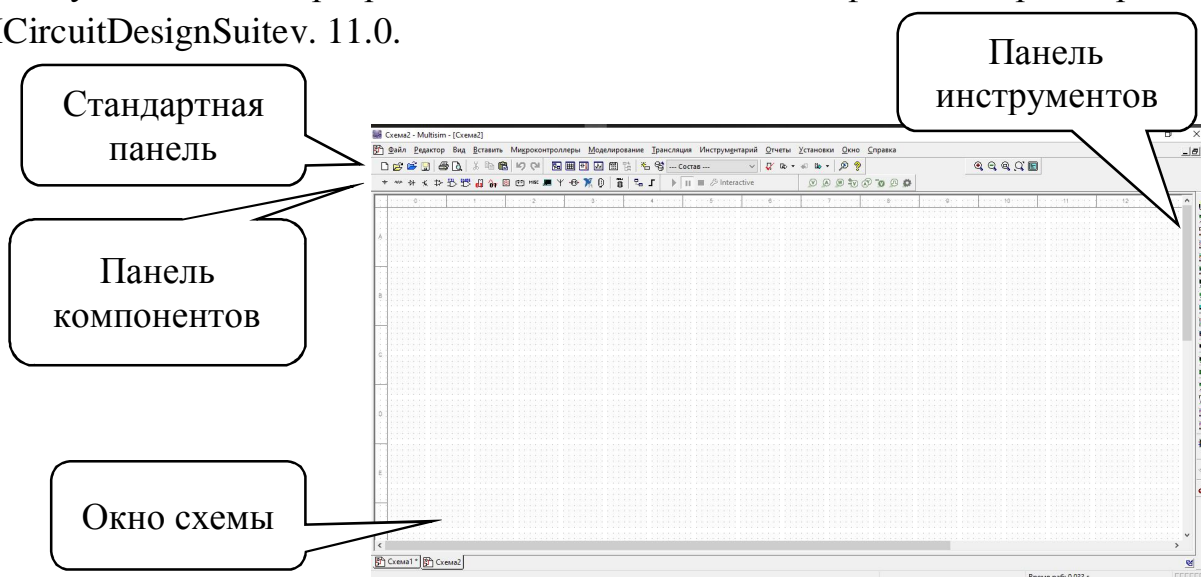


Рис. 14.1 – Общий вид интерфейса среды Multisim

Для создания в рабочей области некоторой электронной схемы и последующего анализа, используются следующие кнопки, представленные на рис. 14.2 (по порядку):

1. Источники питания.
2. Базисные элементы.
3. Диоды.
4. Транзисторы.
5. Аналоговые компоненты.
6. Логические микросхемы ТП.
7. Логические микросхемы CMOS.
8. Цифровые микросхемы.
9. Аналого- цифровые компоненты.
10. Индикаторы.
11. Компоненты питания.
12. Прочие компоненты.
13. Периферийные устройства.
14. ВЧ-компоненты.
15. Электромеханические компоненты инструментов, которые используются при разработке схем и их анализе.



Рис. 14.2 – Основные кнопки для создания схем:

В правой части схемы находится набор измерительных инструментов, которые используются при разработке схем и их анализе, рисунке 14.3.

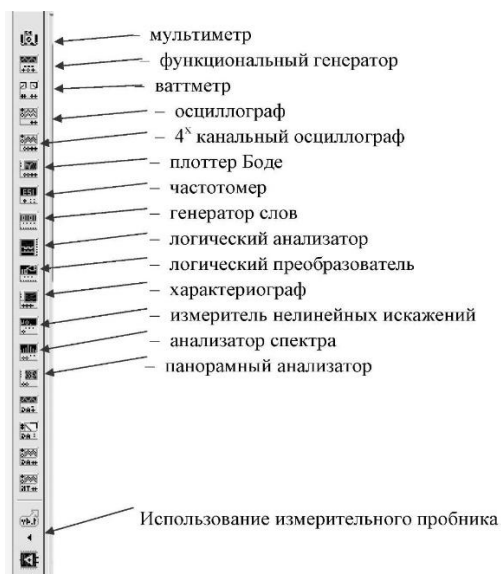


Рис. 14.3 – Набор измерительных инструментов

**Окно разработки (DesignToolbox).** В окне разработки находятся средства управления различными элементами схемы. Закладка «Доступность» (Visibility) позволяет скрыть или отобразить слои схемы рабочей области. Закладка «Иерархия» (Hierarchy) отображает взаимосвязь между файлами открытого проекта в виде древовидной структуры. Закладка «Проект» (Project) содержит информацию об открытом проекте. Пользователь может добавить файлы в папки открытого проекта, изменить доступ к файлам и создать архив папки.

**Глобальные настройки.** Глобальные настройки управляют свойствами среды Multisim. Доступ к ним открывается из диалогового окна «Свойства» (Preferences). Выберите пункт «Опции/глобальные настройки» (Options/GlobalPreferences), откроется окно «Свойства» со следующими закладками:

**Paths** (Путь) – здесь Вы можете указать путь к файлам баз данных и другие настройки;

**Save** (Сохранить) – здесь Вы можете настроить период автоматического сохранения и нужно ли записывать данные эмуляции вместе с прибором;

**Parts** (Компоненты) – здесь Вы можете выбрать режим размещения компонентов и стандарт символов (ANSI или DIN). Также здесь находятся настройки эмуляции по умолчанию.

**General** (Общие) – здесь Вы можете изменить поведение прямоугольника выбора, колеса мыши и инструментов соединения и автоматического соединения.

**Настройки листа.** Диалоговое окно настройки свойства листа (Sheet Properties) используется для изменения свойств каждого листа. Эти свойства сохраняются с файлом схемы.

Настройки листа сгруппированы в следующие закладки.

**Circuit** (Схема) - здесь Вы можете выбрать цветовую схему и внешний вид текста рабочей области.

**Workspace** (Рабочая область) - здесь Вы можете настроить размер листа и его свойства.

**Wring** (Соединение) - здесь находятся настройки соединений и шины.

**ВНИМАНИЕ!** При создании и изучении различных электрических схем все узлы соединения должны быть пронумерованы. Это возможно сделать, если выбрать опцию «Установки/Схемные установки» и в поле «Номера цепей» нажать кнопку «Отображать». Затем нажать «ОК» (рисунок 14.4, 14.5).

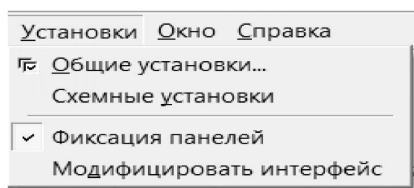


Рис. 3.4 – Схемные установки



Рис.14.5 – Установка номеров соединений

**Проводник компонентов.** Проводник компонентов (Component Browser) – это место, где Вы собираете компоненты, чтобы разместить их на схеме.

После выбора компонентов из базы данных они размещаются на схеме и соединяются между собой. Двойной щелчок по компоненту в проводнике прикрепит его к курсору. После этого можно поместить элемент на схему, просто нажав на правую кнопку мыши.

В это время и после установки компоненты можно повернуть. Чтобы это сделать в первом случае, нажмите **Ctrl-R**. Чтобы повернуть установленный компонент, выделите его и тоже нажмите **Ctrl-R** или выберите в контекстном пункте пункт повернуть на  $90^\circ$  по или против часовой стрелки. Для выбора нескольких компонентов прижмите кнопку мыши и перемещайте ее, рисуя прямоугольник вокруг нужных компонентов. Выбранные элементы обозначаются пунктирной линией. Клавиша **Shift** позволяет добавлять или снимать выделение с нескольких компонентов.

Необходимо отметить, что изменить параметры компонентов схемы возможно и путем двойного щелчка левой кнопки мышки на выбранный элемент схемы. При этом открываются закладки, в которых необходимо внести соответствующие изменения.

Чтобы начать вести соединяющий провод, кликните по разъему. Чтобы завершить соединение, кликните по конечному терминалу.

## Работа с приборами

**Мультиметр.** Мультиметр предназначен для измерения переменного или постоянного тока, или напряжения, сопротивления или затухания между двумя узлами схемы. Диапазон измерения мультиметра подбирается автоматически. Его внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить.

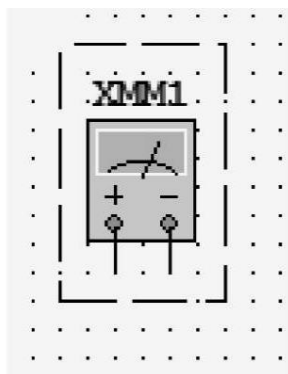


Рис. 14.6 – Символ мультиметра

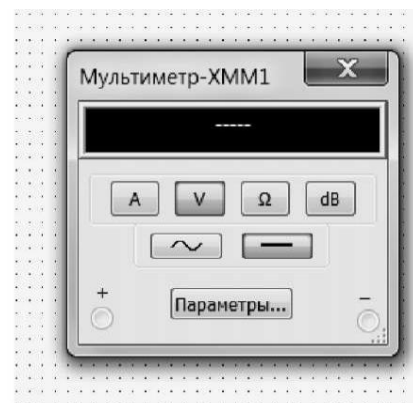


Рис. 14.7 –лицевая панель мультиметра

**Генератор сигналов.** Генератор сигналов (function generator) - это источник напряжения, который может генерировать синусоидальные, пилообразные прямоугольные импульсы. Можно изменить форму сигнала, его частоту, амплитуду, коэффициент заполнения и постоянный сдвиг. Диапазон генератора достаточен, чтобы воспроизвести сигналы с частотами от нескольких Герц до Меггерц.

У генератора сигналов есть три источника сигналов. Общий центральный вывод определяет положение нуля.

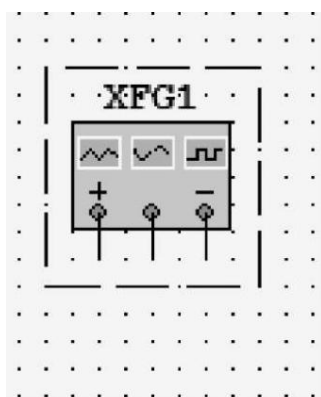


Рис. 14.8 – Символ генератора сигналов

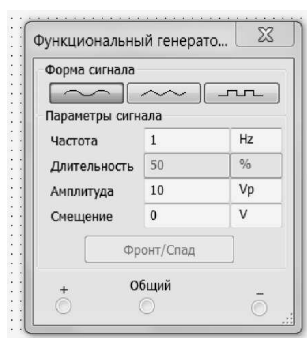


Рис. 14.9 – Лицевая панель генератора

**Осциллографы.** В Multisim есть несколько модификаций осциллографов, которыми можно управлять как настоящими. Они позволяют устанавливать параметры развертки и напряжения, выбирать тип и уровень запуска измерений. Мы будем использовать в лабораторных занятиях 2-канальный осциллограф (рис.14.10, 14.11).



Рис. 14.10 – Символ осциллографа

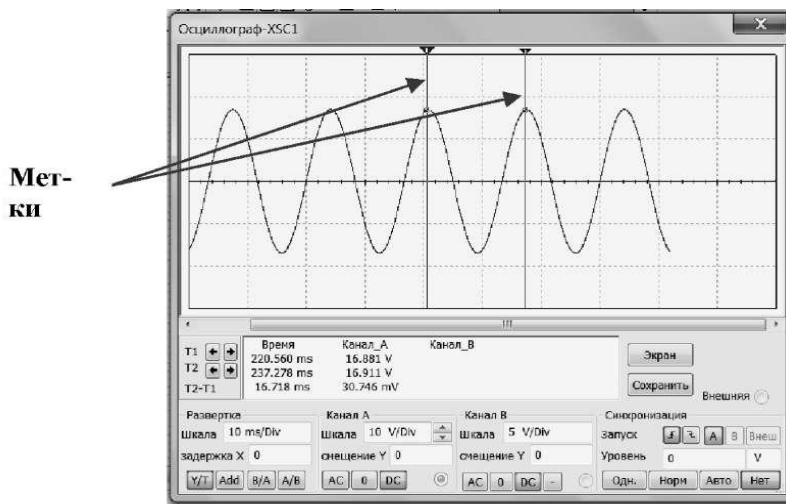


Рис. 14.11 – Лицевая панель осциллографа

Из рис.14.11 видно, что с помощью меток возможно измерять амплитудные значения и временные интервалы.

**Плоттер Бode.** Плоттер Бode отображает относительный амплитудный и фазовый отклик выходного и входного сигналов. Это особенно удобно при анализе свойств полосовых фильтров

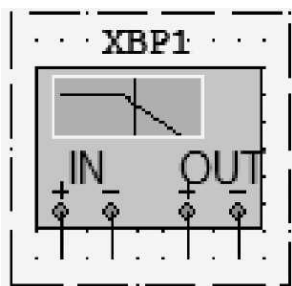


Рис.14.12 – Символ плоттера Бode

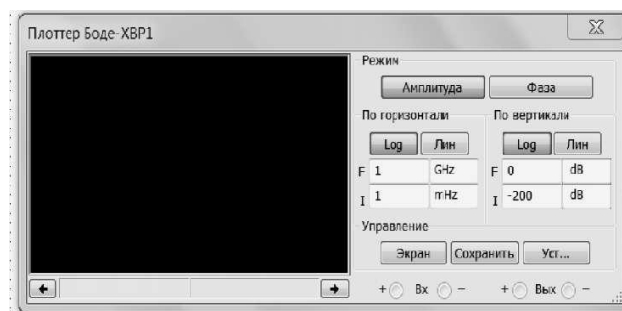


Рис.14.13 – Лицевая панель плоттера Бode

**Анализатор спектра.** Спектральный анализатор (Spectrum analyzer) для измерения спектра амплитуд гармоник с заданной частотой.

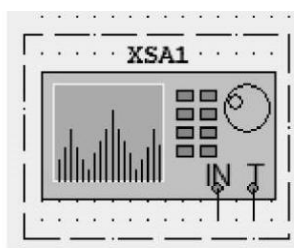


Рис.14.14 – Символ анализатора спектра

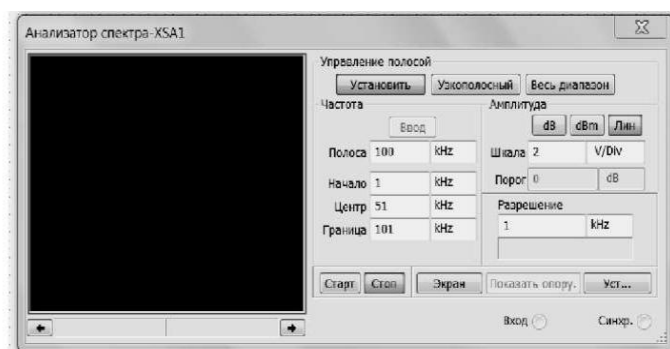


Рис. 14.15 – Лицевая панель анализатора спектра

### Задание 1

Изучить основные принципы работы с пакетом MULTISIM.

Изучить назначение основных элементов наборов Sources, Basic и Instruments.

Для этого Вам необходимо выбрать группу (POWERSOURCES) и найти символ источника чисто гармонических колебаний. Здесь же находится символ элемента «Заземление» - (GROUND).

В группе (SIGNALVOLTAGESOURCES) находятся различные источники модулированных колебаний.

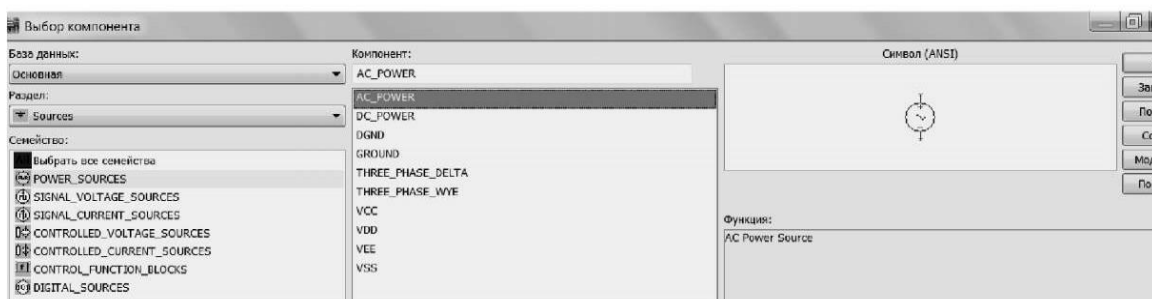


Рис.14.16 – Группа источников сигналов

Необходимо выбрать генераторы с АМ (AM VOLTAGE), ЧМ (FM VOLTAGE) и импульсной последовательности (PULSEVOLTAGE).

**ВНИМАНИЕ!** При задании не целых параметров *вместо запятой ставится точка*. Например, коэффициент модуляции  $M = 0.5$ .

### Задание 2

Изучить методику создания электронных схем.

Запустите Multisim. Автоматически будет создан новый файл, который необходимо сохранить по команде «File/Save as». Файл назвать по фамилии исполнителя.

Создайте в рабочей области резистивный делитель с коэффициентом передачи  $K_d = 1/2$ . Для этого из набора компонентов перенесите резисторы и источник гармонических колебаний на рабочий стол с помощью «мышки», не отпуская левую кнопку. Соедините выводы резисторов и генератора для получения заданной схемы. Для этого щелкните по одному из выводов левой кнопкой мыши и, не отпуская кнопку, доведите курсор до вывода другого элемента. Обозначьте эти резисторы и установите необходимые значения, для чего дважды щелкните мышью на нужном элементе. Появится соответствующая закладка (рисунок 14.17).

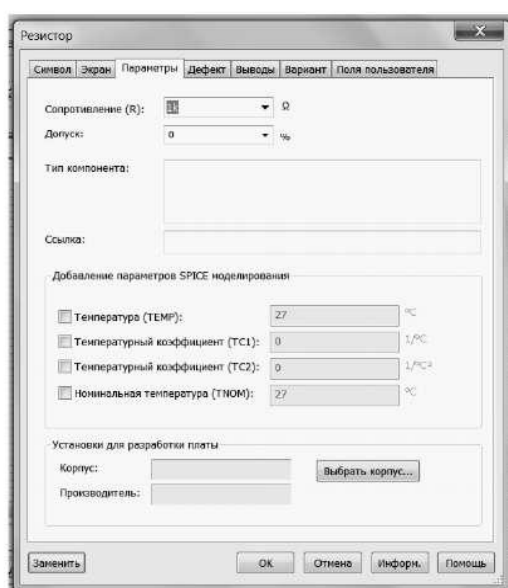


Рисунок 14.17 – Изменение параметров резистора.

Подобным образом установите параметры источника колебаний (см. рис. 3.9). Затем проставьте номера узлов. К узлам (1) и (2) подключите входы виртуального осциллографа.

Для наглядности обозначьте провода к осциллографу разными цветами. Для этого надо щелкнуть левой кнопкой мыши, затем WireProperties/SetNodeColor. Дважды щелкните по значку осциллографа. Появится панель осциллографа. Включите схему (щелчок по «1» выключателя «0-1»). Изменяя параметры развертки, добейтесь устойчивого изображения. Щелкните мышкой по кнопке «Pause».

### Задание 3

Подключите источник АМ колебаний, установите требуемые параметры (рисунок 3.18) и просмотрите форму колебаний.



Рисунок 14.18 – Панель установки параметров генератора АМ колебаний

#### Задание 4

Подключите источник ЧМ колебаний. Установите требуемые параметры и просмотрите форму колебаний.

#### Задание 5

Подключите источник импульсных колебаний. Установите требуемые параметры и просмотрите форму колебаний (рисунок 3.19).

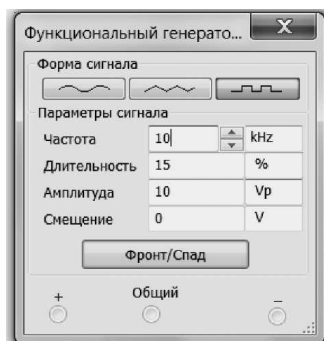


Рисунок 14.19 – Установка параметров генератора прямоугольной последовательности видеоимпульсов

**ВНИМАНИЕ!** Чтобы подключать различные источники сигналов, необходимо:

- щелчком правой кнопки мыши выделить источник сигнала и затем щелкнуть «Delete»;
- щелчком левой кнопки мыши выделить провод и щелкнуть «Delete»;
- в образовавшийся разрыв подключить новый источник.

В виртуальном двухлучевом осциллографе, как и в реальном, в каждом канале имеется «закрытый» вход (AC) для сигналов без постоянной составляющей, и «открытый» - (DC) для сигналов с постоянной составляющей. С целью получить удобные для наблюдения осциллограммы исследуемых колебаний, необходимо подбирать длительность развертки осциллографа и значения координаты «у» масштабной сетки.

### Задание 6

Произвести спектральный анализ сигналов.

Выберите в меню «Simulate /Analysis» команду «Fourier». Заполните необходимые позиции закладки (рисунке 14.20). Затем на этой закладке выберите опцию «Переменные», откроется окно (рисунок 14.21).

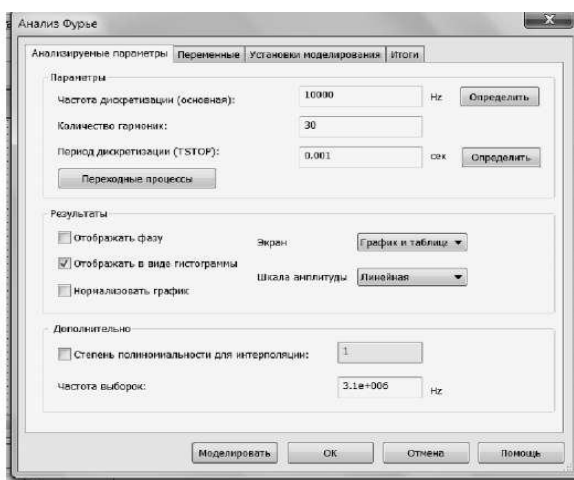


Рисунок 14.20 – Установка данных анализа Фурье

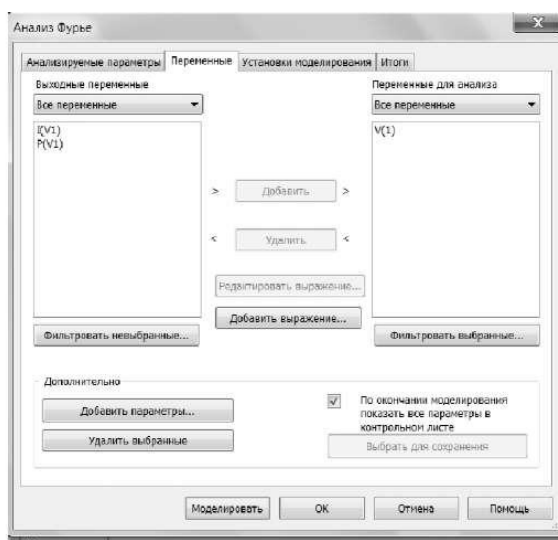


Рисунок 14.21 – Выбор точки анализа

В левой колонке найдите символ, где собираетесь проводить анализ. Выделите его и нажмите кнопку «Добавить». Выделенный символ переместится направо. Нажмите кнопку «Simulate» (Моделирование). Появится окно результатов, показанное на рисунке 14.22. Для анализа полученных результатов желательно воспользоваться маркерами, для чего щелкнуть по значку «Показать (скрыть) маркеры». При совпадении метки маркера с частотой гармоники изменяется цвет маркера, а в дополнительном окне отображаются абсолютные и относительные значения выбранных точек по координатам «у» и «х» (рисунок 14.23).

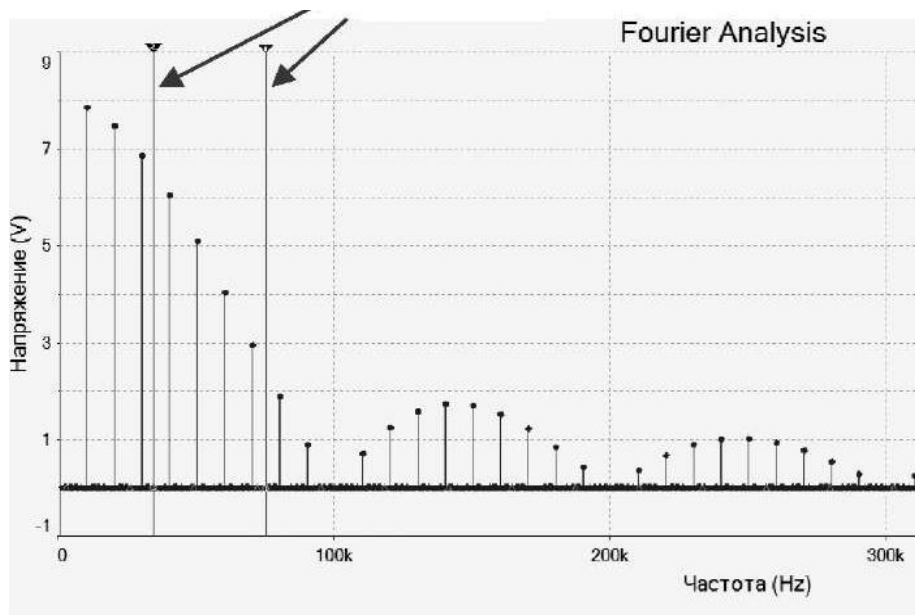


Рисунок 14.22 – Амплитудный спектр сигнала

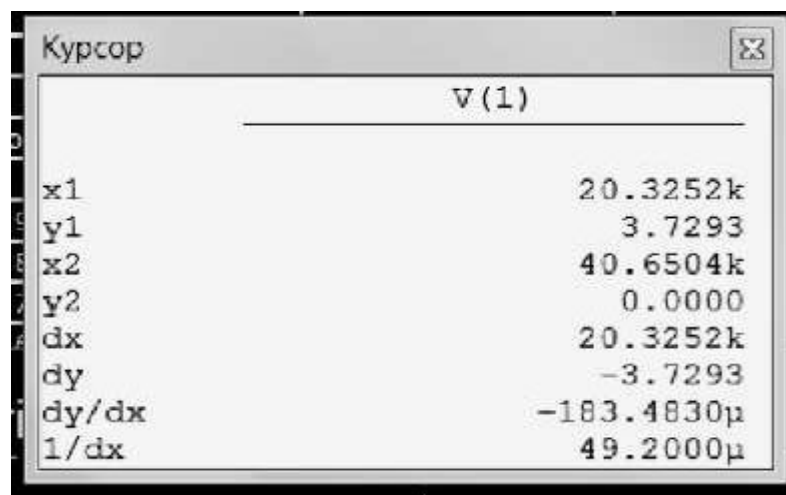


Рисунок 14.23 – Показания курсоров

### **Задание 7**

Определить спектральные характеристики сигналов исследуемых выше генераторов.

**ВНИМАНИЕ!** Этот анализ необходимо проводить при выполнении соответствующих пунктов заданий 2-5.

### **Приборы и оборудование**

Персональный компьютер. Средство программной разработки, моделирования и отладки электрических цепей Multisim.

### **Содержание отчета**

1. Схему исследуемого устройства;
2. Осциллограммы исследуемых сигналов;
3. Амплитудные и фазовые спектры сигналов;
4. Выводы по результатам проделанной работы.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные свойства программы Multisim.
2. Как задаются параметры основных элементов цепей?
3. Как задаются параметры радиосигналов с АМ и ЧМ?
4. Как смоделировать импульсный радиосигнал с АМ?
5. Как получить числовые значения спектральных характеристик?
6. Как измерить параметры сигналов по осциллограмме виртуального осциллографа?
7. Как принято определять длительность импульсных сигналов?
8. Объясните понятие занимаемой и необходимой полосы частот.
9. Приведите классификацию сигналов.
10. Объясните необходимость модуляции как основного радиотехнического процесса.

## *Лабораторная работа №15.*

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

**Цель работы:** Освоение практических навыков работы с моделями основных простейших пассивных звеньев радиотехнических цепей и изучение их импульсных и частотных характеристик.

## **Теоретические сведения**

### **Система условных обозначений и маркировки конденсаторов**

Условное обозначение конденсаторов может быть сокращенным и полным. Сокращенное условное обозначение состоит из букв и цифр.

Полное обозначение номинальных емкостей состоит из цифровой значения номинальной емкости и обозначения единицы измерения (пФ - пикофарады, мкФ - микрофарады, нФ - нанофарады).

Кодированное обозначение номинальных емкостей состоит из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква кода из русского или латинского алфавита обозначает множитель, определяющий значение емкости и положение запятой десятичного знака.

Буквы П(р), Н(п), М( $\mu$ ), Мк(м) Ф(F) обозначают множители  $10^{-12}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-3}$  соответственно для значения емкости, выраженной в фарадах. Например, 2,2 пФ обозначается 2п2 (2р2), 1500 пФ - 1н5 (1п5), 0,1 мкФ - М1 ( $\mu$ 1), 10 мкФ - 10М (10), 1 Ф - 1Ф0 (1F0).

Допускаемые отклонения емкости (в процентах или в пикофарадах) маркируются после номинального значения цифрами или кодом

Цветовое кодирование применяется для маркировки номинальной емкости, номинального напряжения до 63В (таблица 4.1) Маркировку наносят в виде цветных точек или полосок.

Таблица 15.1

## Цветовые коды для маркировки конденсаторов

Цветовой код	Номинальная емкость		Допускаемое отклонение емкости	Номинальное напряжение, В
	Первая и вторая цифры	Множитель		
Серый	—	—	—	3,2
Черный	10	1	±20 %	4
Коричне	12	10	±1 %	6,3
Красный	15	10 <sup>2</sup>	±2 %	10
Оранжев	18	10 <sup>3</sup>	±0.25пФ	16
Желтый	22	10 <sup>4</sup>	±0.5пФ	40
Зеленый	27	10 <sup>5</sup>	±5 %	25 или 20
Голубой	33	10 <sup>6</sup>	±1 %	32 или 30
Фиолето	39	10 <sup>7</sup>	-20...+50 %	50
Синий	47	10 <sup>-2</sup>	-20... + 80 %	
Белый	56	10 <sup>-1</sup>	±10%	63
Серебря	62	—	—	2,5
Золотой	82	—	—	1.6

В последнее время широкое применение находят конденсаторы, у которых в качестве диэлектрика используется фарфор или другая керамическая масса. Они состоят из фарфорового диска или трубки, на обеих сторонах которых нанесен металлический слой. Изготавливаются они на небольшие емкости - от 1 до 500 пФ. Они занимают мало места, очень удобны для монтажа и обладают хорошими электрическими качествами. Область их применения та же, что и слюдяных конденсаторов. Типы керамических конденсаторов приведены на рисунок 4.1.

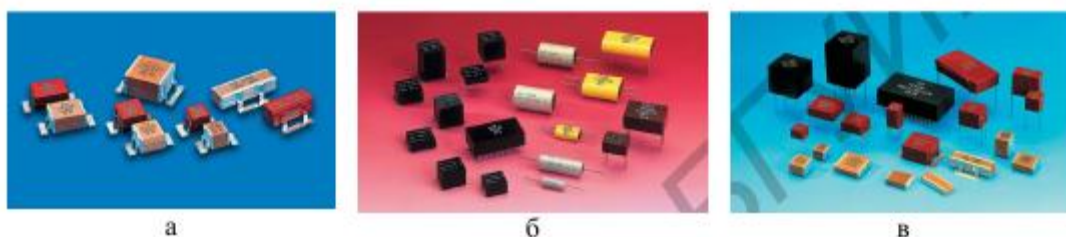


Рисунок 15.1. Типы керамических конденсаторов: а - для поверхностного монтажа; б, в - для монтажа в отверстия платы

Отличительная черта электролитических конденсаторов - их большая емкость, достигающая до нескольких десятков и даже сотен микрофарад. Электролитические конденсаторы обладают полярностью. Это значит, что присоединять их в схему надо определенным образом; вывод, отмеченный значком плюс, присоединяется к плюсовому концу электрической цепи, например к плюсовому проводу выпрямителя, если конденсатор используется в

фильтре выпрямителя; другой вывод присоединяется к минусовому или заземленному проводу. По величине рабочей напряжению электролитические конденсаторы могут быть разбиты на две группы: высоковольтные конденсаторы с рабочим напряжением 250 ... 450 В и низковольтные конденсаторы с рабочим напряжением 6 ... 40 В. Отклонение фактической емкости от номинала может достигать до 20 % в ту или другую сторону. Типы электролитических конденсаторов представлены на рисунке 15.2.



Рисунок 15.2. Электролитические конденсаторы для объемного и печатного монтажа

Емкости конденсаторов, необходимых для сборки по выбранной схеме, обычно указываются или на самой схеме, или в описании данного устройства. Иногда может не оказаться конденсаторов нужной емкости, даже при учете допустимых отклонений. В том случае необходимо подобрать нужную величину, соединяя два или несколько конденсаторов параллельно или последовательно.

При параллельном соединении нескольких конденсаторов общая емкость соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (15.1)$$

При вычислениях все емкости должны быть выражены в одинаковых единицах, т.е. в пикофарадах или же в микрофарадах

При последовательном соединении двух конденсаторов общая емкость их будет меньше емкости меньшего из двух конденсаторов. Этим свойством можно воспользоваться для получения малых емкостей. Если обозначим через  $C_1$  емкость одного из конденсаторов, а через  $C_2$ : емкость другого, то общая емкость их будет равна

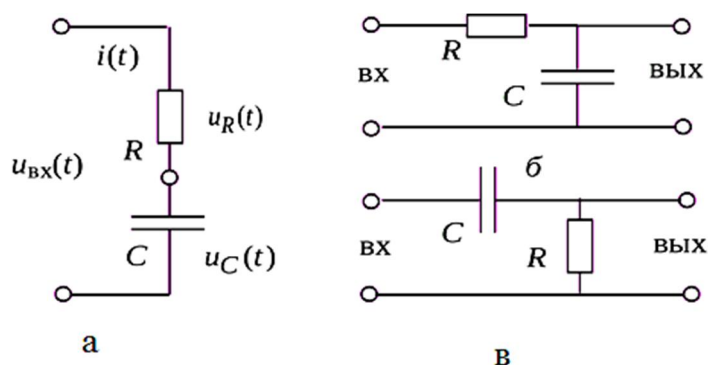
$$C = C_1 * C_2 / (C_1 + C_2). \quad (15.2)$$

### Пример

Имеются два конденсатора емкостью в 200 и 300 мкФ. которые соединяются последовательно. Общая емкость их равна

$$C=200*300/(200+300)=60000/500=120 \text{ мкФ}$$

В состав радиоэлектронных блоков включаются фильтры, которые служат для выделения полезных сигналов на фоне различных помех и используются при обработке информации. Назначение электрического фильтра состоит в пропускании без затухания или с малым затуханием составляющих сложного сигнала, частоты которых лежат в заданном диапазоне частот, называемом полосой пропускания, и с большим затуханием составляющих с частотами в полосе задержки. Граничную частоту юс между полосой пропускания и полосой задержки называют частотой среза. Простейшая  $RC$ -цепь, содержащая только резистор ( $R$ ) и конденсатор ( $C$ ), представлен на рис 15.3, а.



а – простейшая  $RC$ -цепь, б, в – сложные  $RC$ -цепи.  
Рисунок 15.3. применение  $RC$ -цепей

В зависимости от того, с какого элемента снимается выходное напряжение,  $RC$ -цепи могут применяться как фильтры нижних частот (ФНЧ – рисунок 15.3, б) или как фильтры верхних частот (ФВЧ – рисунок 15.3, в), кроме того, как интегрирующие (рисунок 15.3, б) и дифференцирующие (рисунок 15.3, в) цепи.

Коэффициентом передачи называется отношение  $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  (точнее, это модуль, или абсолютная величина коэффициента передачи).

**Фильтр нижних частот.** Если выходное напряжение снимать с емкости (рисунок 15.3, б), то  $RC$ -цепь может служить в качестве ФНЧ, а если с резистора (рисунок 15.3, в) – то в качестве ФВЧ.

На рисунке 15.4 изображена принципиальная схема  $RC$ -фильтра нижних частот.

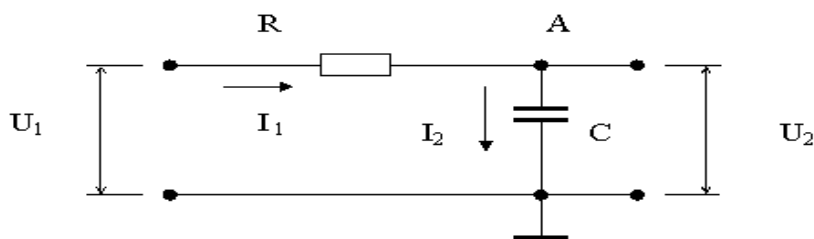


Рисунок 15.4 – Принципиальная схема  $RC$  – фильтра нижних частот

На рисунках 15.5 и 15.6 представлены графики АЧХ и ФЧХ для данного ФНЧ. Графики нормированы относительно частоты среза. Оси частот градуированы в логарифмическом масштабе. Коэффициент передачи ФНЧ (ось ординат на АЧХ) указан в децибелах. Фазовый сдвиг на ФЧХ – в градусах. логарифмическая Шкала, соседние деления которой соответствуют одинаковому изменению отношения двух значений величины.

Как следует из рисунка 15.5, на частотах много больших частоты среза, коэффициент передачи обратно пропорционален частоте. При увеличении частоты в 10 раз коэффициент передачи уменьшается в 10 раз, т. е. он уменьшается на 20 дБ на декаду или на 6 дБ на октаву. Коэффициент передачи фильтра на частоте среза равен -3 дБ.

Как следует из рисунка 15.6, на частотах много больших частоты среза фазовый сдвиг данного фильтра стремится к  $-90^\circ$  и не превышает эту величину. Фазовый сдвиг на частоте среза равен  $-45^\circ$ .

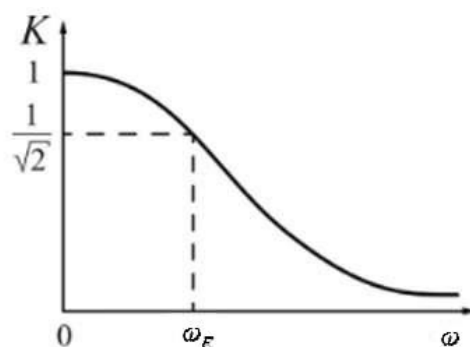


Рисунок 15.5 – АЧХ дифференцирующей цепи

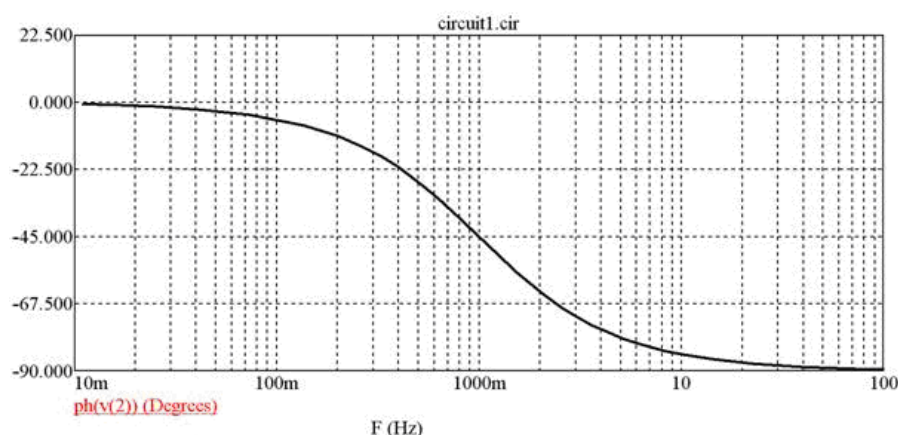


Рисунок 15.6 – Фазочастотная характеристика фильтра нижних частот

**Фильтр верхних частот.** Фильтр верхних частот – это схема, которая передает без изменений сигналы высоких частот, а на низких частотах обеспечивает затухание сигналов и опережение их по фазе относительно входных сигналов. Схема простого  $RC$  – фильтра верхних частот приведена на

рисунке 15.7.

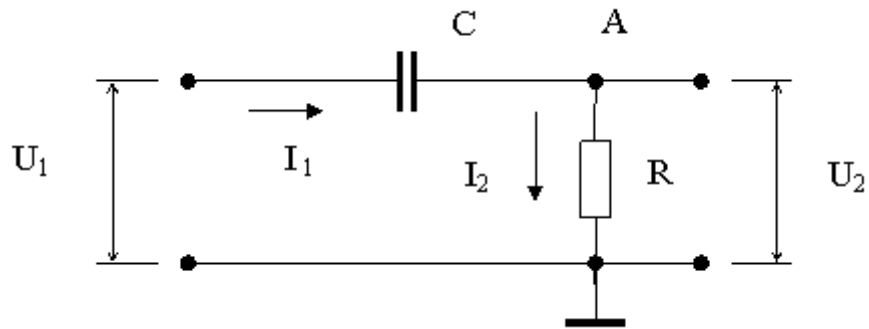


Рисунок 15.7 – Принципиальная схема  $RC$  – фильтра верхних частот

Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики получим аналогично методике анализа фильтра нижних частот.

Графики АЧХ и ФЧХ  $RC$ –фильтра верхних частот приведены на рисунках 15.8 и 15.9 соответственно.

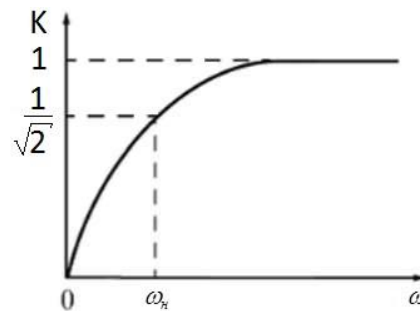


Рисунок 15.8 – АЧХ интегрирующей цепи.

Выражение для частоты среза совпадает с соответствующим выражением для фильтра нижних частот:

$$f_{CP} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (15.3)$$

Фазовый сдвиг на этой частоте составляет  $+45^\circ$ .

Как следует из рисунка 15.8, на частотах много меньших частоты среза, коэффициент передачи прямо пропорционален частоте. При увеличении частоты в 10 раз коэффициент передачи увеличивается в 10 раз, т. е. он увеличивается на 20 дБ на декаду или на 6 дБ на октаву. Коэффициент передачи фильтра на частоте среза равен -3 дБ.

Как следует из рисунка 15.9, на частотах много меньших частоты среза фазовый сдвиг данного фильтра стремится к  $+90^\circ$  и не превышает эту величину. Фазовый сдвиг на частоте среза равен  $+45^\circ$ .

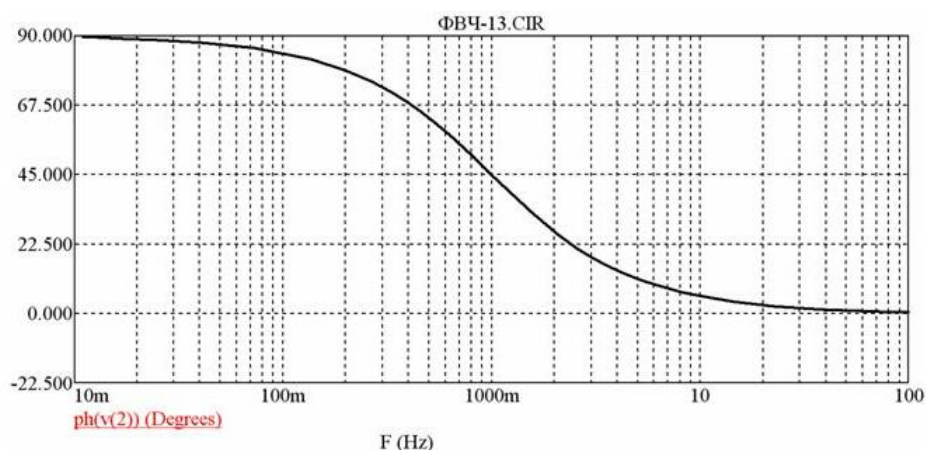


Рисунок 15.9 – Фазочастотная характеристика фильтра верхних частот

Электрическая цепь – это совокупность соединенных определенным образом элементов, устройств и объектов, образующих путь для прохождения электрического тока.

Электрические цепи, применяемые в радиотехнике называются радиотехническими электрическими цепями.

Активная цепь – это электрическая цепь, содержащая электронные элементы, способные усиливать подводимые к ней колебания.

Апериодическая цепь – это электрическая цепь, частотная характеристика которой не имеет явно выраженных максимумов (резонансов).

Пассивная цепь – это электрическая цепь, не содержащая источников электрической энергии.

Входная цепь – это электрическая цепь на входе узла, блока, устройства или системы, воспринимающая входной сигнал.

Входная цепь радиоприёмника – это электрическая цепь, предназначенная для передачи радиочастотного сигнала от антенны в последующие цепи радиоприёмника и предварительного ослабления помех.

Дифференцирующая цепь – это электрическая цепь, сигнал на выходе которой равен (или пропорционален) производной от входного сигнала.

Интегрирующая цепь – это электрическая цепь, сигнал на выходе которой равен (или пропорционален) интегралу от входного сигнала.

Четырёхполюсник – часть электрической цепи, имеющая две пары зажимов (или полюсов), которые могут быть входными или выходными.

Активный четырёхполюсник – это четырёхполюсник, имеющий в своих ветвях усилительные электронные приборы.

Все пропускающий – это четырёхполюсник, модуль коэффициента передачи которого постоянен и не зависит от частоты.

Линейный – это четырёхполюсник, у которого существует прямая пропорциональность между входным и выходным напряжениями, а также между выходным током и входным напряжением.

Пассивный – это четырехполюсник, не содержащий в своих ветвях источников энергии.

Симметричный – это четырехполюсник, параметры которого не изменяются при перемене местами его входных или выходных зажимов.

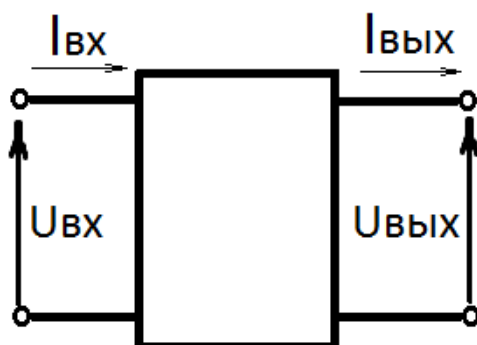


Рисунок 15.10 – Электрическая цепь: Четырёхполюсник

Электрические цепи состоят из активных и пассивных элементов. *Активные элементы* способны усиливать мощность колебаний, подводимых к ним. *Пассивные элементы* могут лишь изменить форму электрических сигналов.

К пассивным элементам относятся резисторы (сопротивление, измеряется в омах - Ом), катушки индуктивности (индуктивности, измеряются в генри, Гн), конденсаторы (ёмкости, измеряются в фарадах - Ф).

Мгновенные значения напряжений  $u(t)$  и токов  $i(t)$  в этих элементах связаны следующими соотношениями:

$$u_R = iR \quad (15.4)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (15.5)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \quad (15.6)$$

Аргумент  $t$  в функциях напряжения и тока здесь опущен - для удобства восприятия.

Свойства линейных цепей (линейных четырёхполюсников) можно определить с помощью такого параметра, как *частотный коэффициент передачи*, который равен отношению амплитуды напряжения на выходе четырёхполюсника к амплитуде напряжения на входе:

$$K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} \quad (15.7)$$

Здесь используются понятия комплексных амплитуд входного  $U_{BX}$  и выходного гармонических напряжений. Комплексные амплитуды зависят от угловой частоты  $\omega$ , поэтому их часто записывают через общепринятые обозначения:

$$U_{BX} = \dot{U}_{BX}(\omega) \quad (15.8)$$

$$U_{BЫX} = \dot{U}_{BЫX}(\omega) \quad (15.9)$$

Частотный коэффициент передачи (чаще просто *коэффициент передачи*) линейной цепи (линейного четырёхполюсника) определяется следующим образом:

$$K(\omega) = \dot{K}(\omega) = \frac{U_{BЫX}}{U_{BX}} = |K(\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (15.10)$$

Модуль коэффициента передачи  $|K(\omega)|$  называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а аргумент  $\varphi(\omega)$  - фазово-частотной характеристикой (ФЧХ) линейного четырёхполюсника. Как правило, АЧХ имеет один максимум, а ФЧХ изменяется монотонно при изменении частоты (рисунок 15.11).

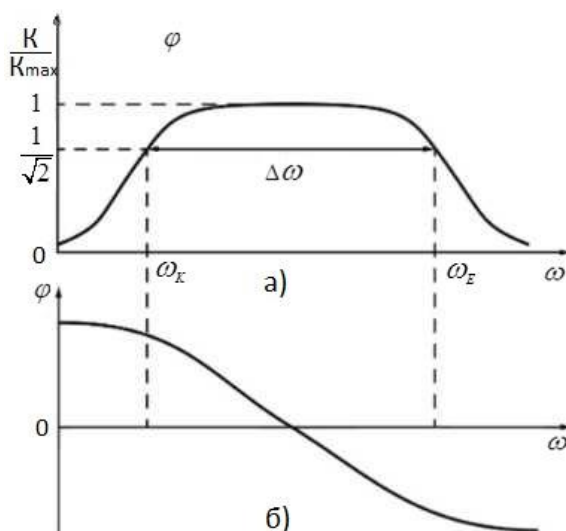


Рисунок 15.11 – Характеристики линейной цепи: а) - амплитудно-частотная (АЧХ), б) - фазово-частотная (ФЧХ)

В области некоторой полосы частот отклик линейной цепи на входное воздействие начинает уменьшаться. В связи с этим используют понятие полосы пропускания (рабочей полосы) - области частот, где модуль коэффициента передачи  $|K(\omega)|$  имеет не менее  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  от своего максимального значения. Часто, при практических расчётах используют нормированный модуль коэффициента передачи  $K/K_{max}$ , максимальное значение которого равно единице. Значение  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ , по которому определяют полосу пропускания линейной цепи, введено не случайно. Дело в том, что на границах полосы пропускания модуль коэффициента передачи по мощности, равный отношению выходной и входной мощностей, уменьшается в два раза.

На рисунке 4.11 полоса пропускания линейной цепи заключена в области от нижней  $\omega_k$  до верхней  $\omega_E$  круговой частоты, и поэтому её ширина определяется как  $D\omega = \omega_E - \omega_k$ . При практических расчётах часто пользуются не круговой, а циклической частотой  $f = \omega / (2\pi)$ . В этом случае полоса пропускания цепи

$$Df = f_H - f_B \quad (15.11)$$

где  $f_H$  - нижняя, и  $f_B$  - верхняя граничные частоты.

### **Дифференцирование и интегрирование сигналов**

В различных радиоэлектронных устройствах и системах передачи информации часто встречается необходимость в преобразовании сигналов, имеющем характер дифференцирования или интегрирования. Поскольку дифференцирование и интегрирование - это линейные математические операции, такие преобразования возможны в линейных цепях. При определённых условиях для этого пригодны простейшие цепочки, содержащие обычные резисторы и конденсаторы.

#### **Дифференцирующие цепи**

Рассмотрим одну из схем простейшего линейного четырёхполюсника последовательную электрическую RC-цепь (рисунок 15.12).

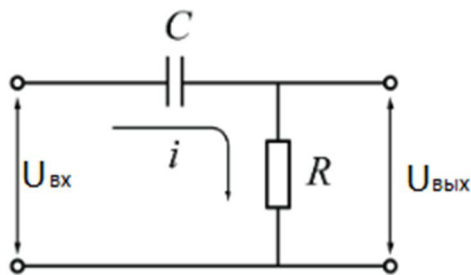
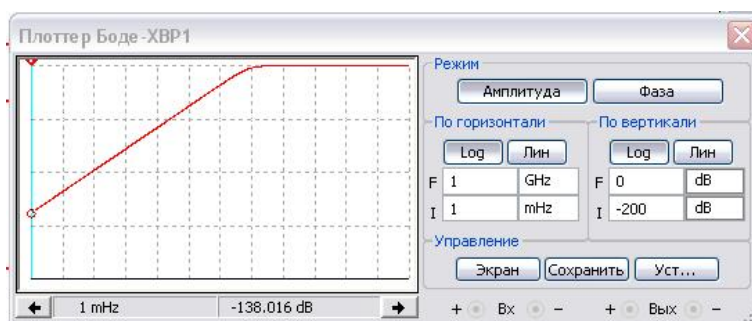
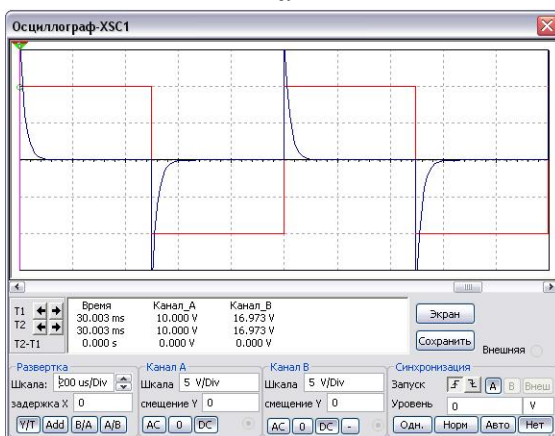


Рисунок 15.12 – Дифференцирующая цепь

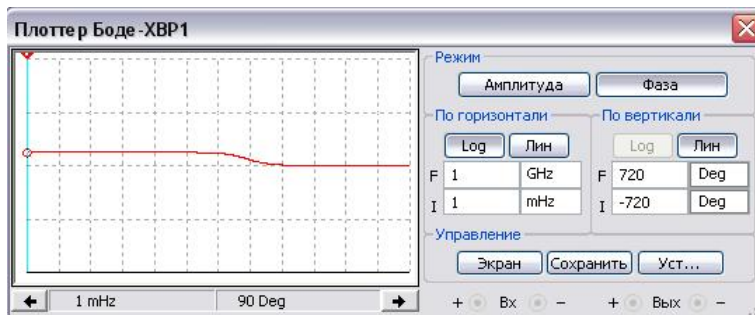
На рисунке 15.13 приведён график АЧХ дифференцирующей цепи. Верхнюю граничную частоту полосы пропускания интегрирующей цепи можно определить,



а



б



в

Рисунок 15.13 – Фильтр верхних частот: а - амплитудно-частотная характеристика; б – временные диаграммы; в - фазочастотная характеристика.

Из графика АЧХ (рисунок 15.13) видно, что дифференцирующая цепь пропускает высокие частоты, задерживая низкие, т.е. является *фильтром верхних частот* (ФВЧ). Полоса пропускания дифференцирующей цепи ограничена только со стороны низких частот. Приравняв правую часть (15.11) к  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , вычислим граничную частоту пропускания:

$$\omega_n = \frac{1}{t} \quad (15.12)$$

Применительно к фильтрам, граничные частоты полосы пропускания называют *частотами среза* фильтра.

### ***Интегрирующие цепи***

RC-цепь, в которой выходной сигнал снимается с конденсатора С (рисунок 15.14).

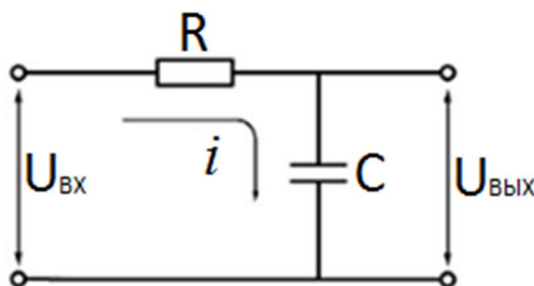
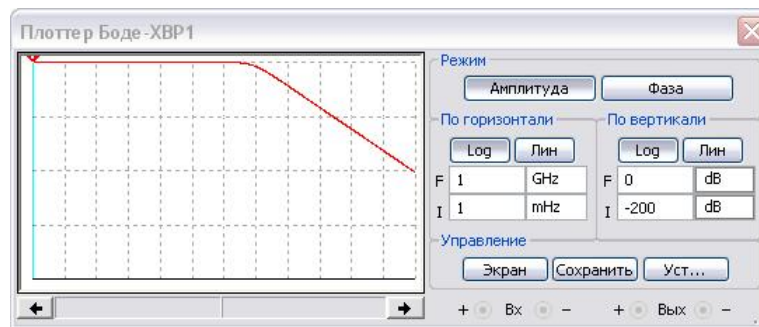
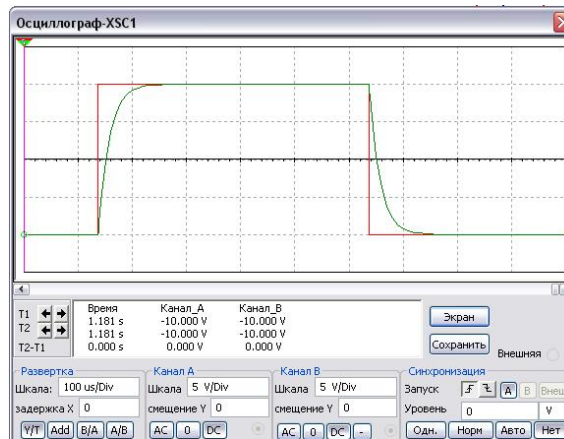


Рисунок 15.14 – Интегрирующая цепь

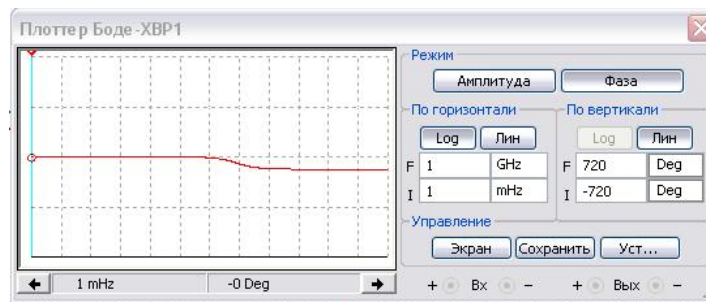
График АЧХ интегрирующей цепи приведён на рисунке 15.15.



а



б



в

Рисунок 15.15 – Фильтр нижних частот: а - амплитудно-частотная характеристика; б – временные диаграммы; в - фазочастотная характеристика

Из рисунка 15.15 следует, что интегрирующая цепь пропускает низкие частоты, задерживая высокие, т.е. является **фильтром нижних частот** (ФНЧ). Верхнюю граничную частоту полосы пропускания интегрирующей цепи можно определить, из формулы :

$$\omega_E = \frac{1}{t}$$

В радиоэлектронных устройствах такие цепи используют в качестве так называемых *сглаживающих (smoothing)*, или *низкочастотных фильтров*.

## Мост Вина.

Если полоса пропускания ( $\Delta f = f_B - f_H$ ) широка и сравнима со средней геометрической частотой  $f_{CP}^2 = f_B \cdot f_H$ , или если  $\frac{f_B}{f_H} > 2$ , то полосовой фильтр может быть составлен из последовательно соединенных ФНЧ и ФВЧ, у которых имеется перекрывающийся участок характеристики  $K(\omega)$ . При этом необходимо разделять ФНЧ и ФВЧ повторителем, чтобы избежать взаимного влияния.

Если же  $\frac{f_B}{f_H} > 1$ , то применяют специальные полосовые фильтры.

Простейший пассивный полосовой фильтр – это мост Вина (рисунок 15.16).

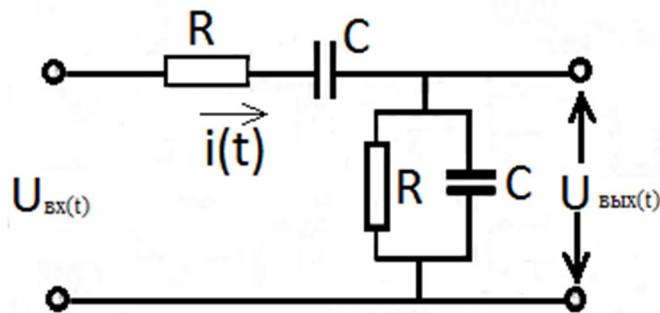


Рисунок 15.16 – Мост Вина

Особенность моста Вина (которая позволяет использовать его как полосовой фильтр) в том, что на определенной частоте  $\omega_p$  (которая называется частотой квазирезонансная) АЧХ моста имеет максимум.

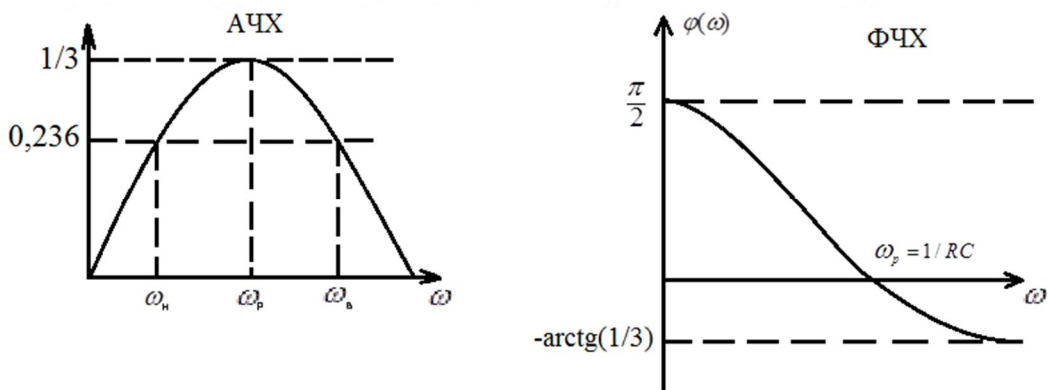


Рисунок 15.17 – Нижняя и верхняя частоты среза АЧХ и ФЧХ

Мост Вина может использоваться как фильтр. Однако данный фильтр (по сравнению с большинством других полосно-пропускающих) имеет широкую

полосу пропускания что является его большим недостатком, но ему всё же находится применение т.к. он не содержит катушек индуктивности и микросхем в связи с чем может иметь малые размеры) и прост в изготовлении. Также мост Вина применяется в цепях обратных связей генераторов синусоидальных (или точнее псевдосинусоидальных (нелинейные искажения велики)) колебаний. Например, мосты Вина могут использоваться в звуковых синтезаторах.

### ***Объект исследования***

Схемы радиотехнических цепей, используемые в лабораторной работе, приведены на рисунках 15.12, 15.14, 15.16.

### ***Назначение схемных элементов***

VI – источник переменного напряжения,  
R1 – резистор, входящий в состав RC-цепи,  
C1 – конденсатор, входящий в состав RC-цепи.

### ***Измерительные приборы:***

XSC1 – осциллограф; используется для контроля формы сигнала на выходе генератора переменного напряжения;

### **Экспериментальное исследование**

В данной лабораторной работе рассматриваются RC-цепи разных видов:

1. Дифференцирующая цепь;
2. Интегрирующая цепь;
3. Сложная цепь (мост Вина).

#### **Задание 1**

Рассчитать и построить амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики дифференцирующей и интегрирующей цепей. Для этого воспользоваться приложением 2, следующими формулами и величинами:

$\tau$  – Постоянная времени цепи:

$$t = RC.$$

#### **Задание 2**

Расчёт постоянной времени цепи провести для величин сопротивления и ёмкости, соответствующих варианту – номер варианта соответствует номеру лабораторной подгруппы (указывается преподавателем).

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики рассчитываются по формулам:

– для *дифференцирующей* цепи:

$$\text{частотный коэффициент передачи } K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{j\omega\tau}{1+j\omega\tau},$$

$$\text{амплитудно-частотная характеристика } K(\omega) = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}},$$

$$\text{фазочастотная характеристика } \arg K(j\omega) = \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg \omega\tau.$$

– для *интегрирующей* цепи:

$$\text{частотный коэффициент передачи } K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{1+j\omega\tau},$$

$$\text{амплитудно-частотная характеристика } K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}},$$

$$\text{фазочастотная характеристика } \arg K(j\omega) = \varphi(\omega) = -\arctg \omega\tau.$$

### Экспериментальные задания

#### Задание 1

Снять амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики дифференцирующей и интегрирующей цепей. Сравнить их с расчётными характеристиками.

#### Задание 2

Снять амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристику сложной цепи (моста Вина).

#### Задание 3

Просмотреть и зарисовать эпюры напряжения на выходе дифференцирующей, интегрирующей и сложной цепей при подаче на вход периодической последовательности прямоугольных импульсов. Сравнить их с расчётными переходными характеристиками.

#### Задание 4

Просмотреть и зарисовать эпюры напряжения на выходе сложной цепи при подаче на вход периодической последовательности прямоугольных импульсов.

#### Задание 5

Исследование дифференцирующей RC-цепи.

5.1. Собрать схему дифференцирующей RC-цепи (рисунок 3.19).

Номиналы сопротивления и ёмкости во всех последующих схемах установить в соответствии с вариантом задания.

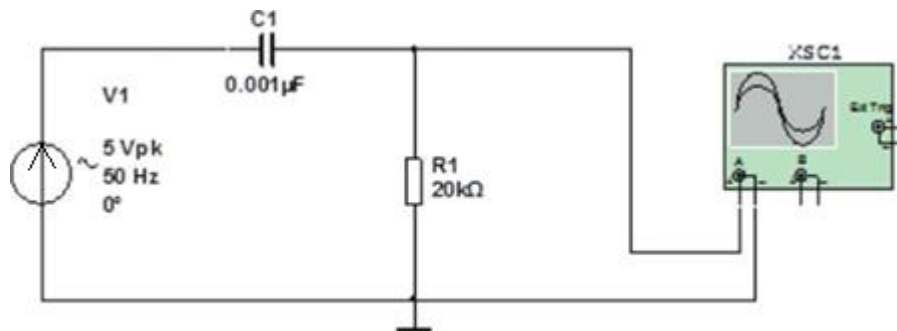


Рисунок 15.18 – Схема дифференцирующей RC-цепи

Установить параметры генератора:

– амплитуда сигнала 5 В.

Меняя частоту сигнала от 50 Гц до 20 кГц, снять амплитудно-частотную характеристику цепи. Шаг изменения частоты выбирать в соответствии с характером и скоростью изменения коэффициента передачи.

**Важно!** Сохранить схему (она понадобится в дальнейшем).

5.2. Заменить в схеме осциллограф на плоттер Воде (рисунок 3.20).

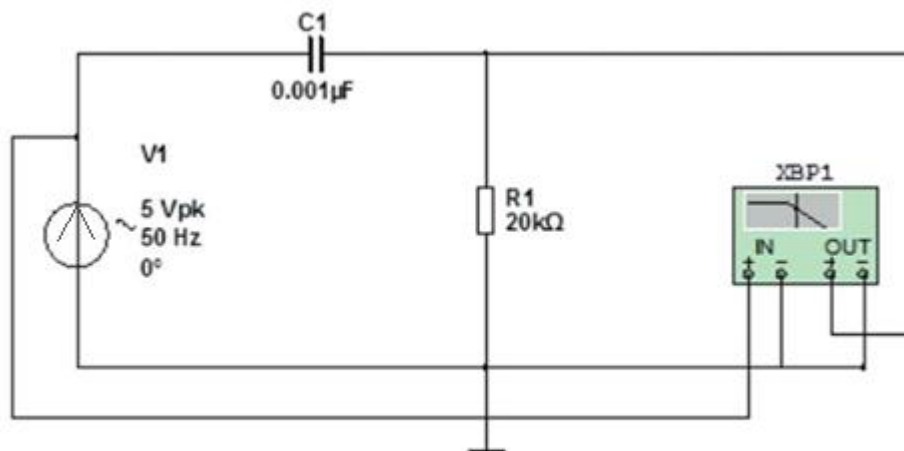


Рисунок 15.19 – схема для измерения частотных характеристик дифференцирующей RC-цепи при помощи плоттера Боде

Снять амплитудно-частотную характеристику цепи. Сравнить её с характеристикой, полученной в п. 5.1.

5.3. Переключить плоттер Боде в режим измерения фазы. Снять фазово-частотную характеристику дифференцирующей цепи.

Результаты представить в виде графиков.

## Задание 6

### Исследование интегрирующей RC-цепи

6.1 Собрать схему интегрирующей RC-цепи (рисунок 15.21).

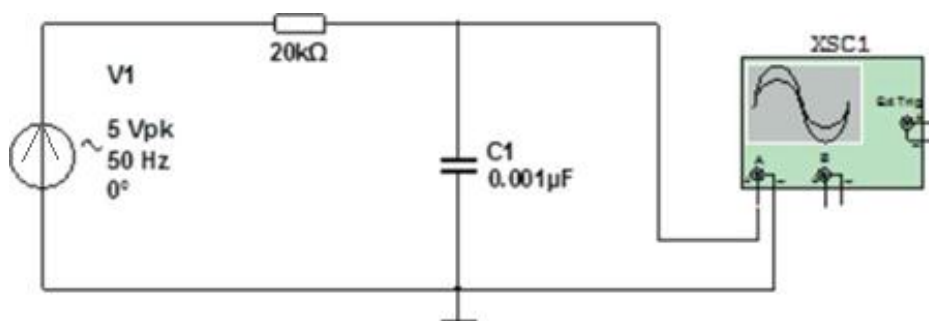


Рисунок 15.20 – Схема интегрирующей RC-цепи

Установить параметры генератора:

– амплитуда сигнала 5 В.

Повторить измерения, сделанные в п. 5.1, п. 5.2 и п. 5.3. Для выполнения п. 6.2 и п. 6.3 необходимо изменить схему согласно рисунку 4.12.

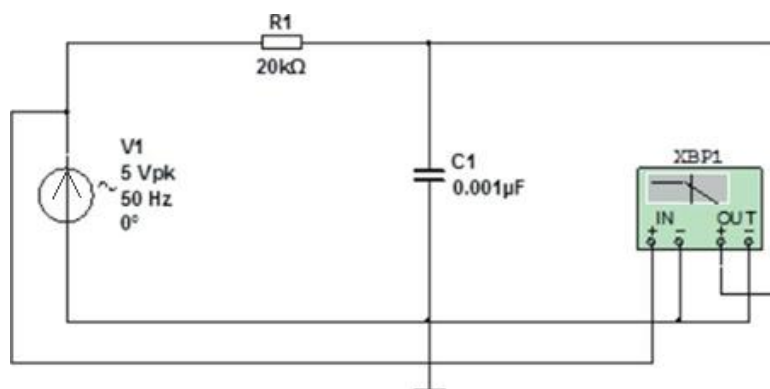


Рисунок 15.21 – Схема для измерения частотных характеристик интегрирующей RC-цепи при помощи плоттера Боде

**Важно!** Сохранить схему (она понадобится в дальнейшем). Полученные результаты представить в виде графиков.

## Задание №7

Исследование сложной RC-цепи (моста Вина)

7.1. Собрать схему сложной RC-цепи (моста Вина) (рисунок 15.13).

Провести наблюдение эюр напряжения на выходе цепи при трёх значениях длительности импульсов:

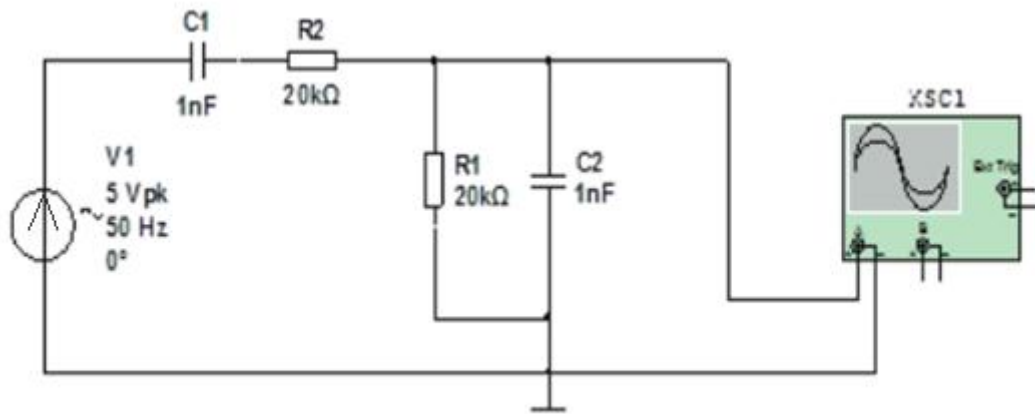


Рисунок 15.22 – Схема сложной RC-цепи (моста Вина)

Установить параметры генератора:

– амплитуда сигнала 5 В.

Повторить измерения, сделанные в п. 5.1, п. 5.2 и п. 5.3.

**Важно!** Сохранить схему (она понадобится в дальнейшем). Полученные результаты представить в виде графиков.

### Задание №8

Наблюдение эюр напряжений на выходе RC-цепей

#### 8.1. Дифференцирующая RC-цепь.

Собрать схему для наблюдения эюр напряжения. Для этого загрузить схему, сохраненную в п. 5.1.

Вместо генератора синусоидального напряжения включить в схему генератор импульсов.

Рассчитав для RC-цепи постоянную времени  $t = RC$ .

Провести наблюдение эюр напряжения на выходе цепи при трех значениях длительности импульсов:

1)  $t_{имп} = 0,1t$  ;

2)  $t_{имп} = t$  ;

3)  $t_{имп} = 10t$  .

Частоту повторения импульсов установить равной  $2,5t_{имп}$  .

Зарисовать эюры напряжения.

Исходя из теории RC-цепей выяснить, при каком соотношении между  $t_{имп}$  и  $t$  RC-цепь осуществляет удовлетворительное дифференцирование прямоугольных импульсов. Установить, какое из трех соотношений этому соответствует.

#### 8.2. Интегрирующая RC-цепь.

Повторить измерения п. 8.1.

Зарисовать эюры напряжения

Таблица 15.2. Варианты заданий параметров линейной RC-цепь

Номер варианта	Сопротивление $R$ , кОм	Ёмкость $C$ , пФ
1.	20	1000
2.	15	1400
3.	25	800
4.	30	600
5.	22	900
6.	35	500
7.	18	1100
8.	16	1200
9.	10	1800
10.	28	700

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы для исследования характеристик LC-цепей.
3. Расчетные данные (постоянная времени, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика), данные привести для двух RC-цепей – дифференцирующей и интегрирующей.
4. Экспериментальные графики (амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика) для *трех RC-цепей* – дифференцирующей, интегрирующей и сложной цепи – при возбуждении колебаний генератором переменного (гармонического) напряжения.
5. Экспериментальные графики откликов *трех RC-цепей* на возбуждение генератором прямоугольных импульсов.

### Контрольные вопросы.

1. Начертить схемы дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей.
2. Объяснить амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей.
3. Объяснить переходные характеристики дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей показать вид переходного процесса для дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей в случае подачи на их вход импульсов разной длительности.
4. Определение моста Вина.

## Приложение 1

### Техника осциллографических измерений.

Осциллограф является универсальным измерительным прибором широкого применения.

Осциллограф предназначен для работы в составе любой сертифицированной ПЭВМ типа IBM PC со следующими характеристиками:

- процессор типа Pentium 166 и выше;
- объем оперативной памяти не менее 32 Мбайт;
- тип монитора VGA, SVGA;
- операционная система Windows 9X/2K/NT/XP.

На лицевой панели осциллографа В-421 имеются четыре стандартных разъема типа СР-50.73Ф (BNC-J) (рисунок 1.4),:

- ⊕ «КАНАЛ 1» — сигнальный вход канала 1 для подключения пробника;
- ⊕ «КАНАЛ 2» — сигнальный вход канала 2 для подключения пробника;
- ⊕ «СИНХР» — вход синхронизации для подключения кабеля внешней синхронизации;
- ⊕ «ЦАП» — сигнальный выход канала цифро-аналогового преобразователя (генератора сигналов).



Рисунок 1 – Лицевая панель осциллографа В-421

На лицевой панели осциллографов также расположен индикаторный светодиод, который имеет цвет свечения: красный — при включенном питании (внешний сетевой адаптер включен в сеть), желтый — в рабочем режиме (после запуска программы).

На задней панели осциллографов находятся разъем для подключения соединительного кабеля интерфейса USB, с помощью которого осуществляется связь с компьютером, и разъем для подключения питания от внешнего сетевого адаптера.

При загрузке программного пакета на мониторе появляется картинка *лицевой*

панели осциллографа с экраном и органами управления в виде элементов графического пользовательского интерфейса.

На лицевой панели (рисунок 1.5), присутствуют следующие элементы. Верхние три линии занимают (последовательно сверху вниз) *заголовок окна*, *строка меню* и *панель инструментов*. Ниже расположен *рабочий экран* осциллографа, слева от которого расположена *экранная панель*, справа — *панель регулировки уровней нуля и синхронизации*. Под экраном находится *панель информации курсоров*. Замыкает лицевую панель расположенная в самом низу *строка состояния*.

Заголовок окна и строка меню — стандартный элемент любого приложения Windows. В заголовке окна присутствуют названия программы и текущих данных.

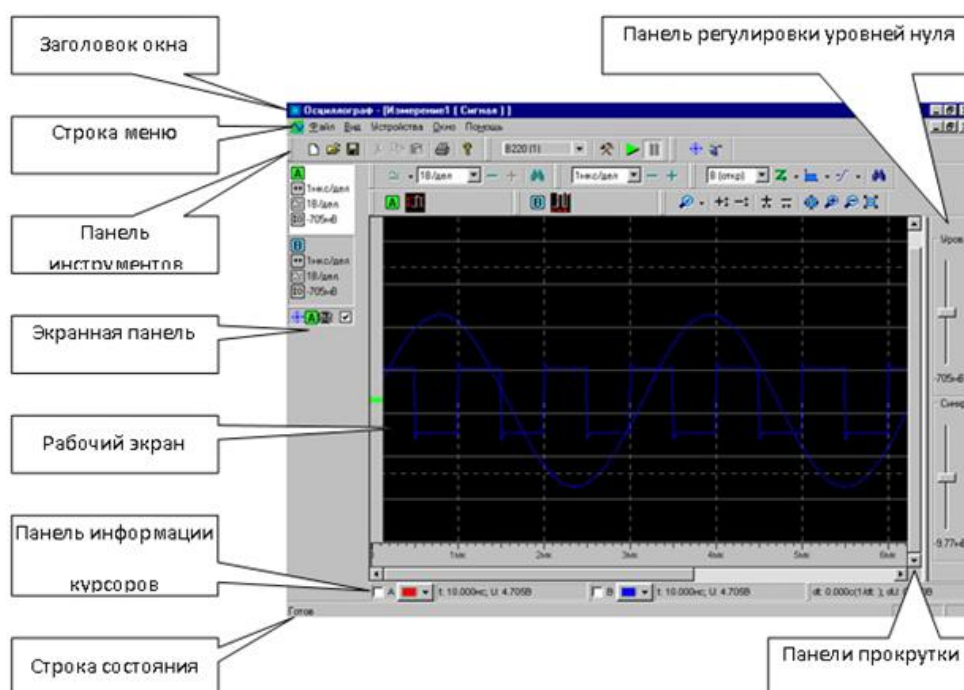


Рисунок 2 – Лицевая панель осциллографа на экране монитора

Из каналов, отображаемых на экране монитора, только для одного могут быть проведены курсорные измерения, изменение уровня нуля и развертки по амплитуде. Канал, для которого в данный момент могут производиться вышеперечисленные действия, называют активным. Выбор конкретного канала производится с помощью «мыши». Для этого необходимо поместить маркер в окно канала на **Экранной панели** и щелкнуть левой клавишей «мыши». Окно активного канала подсвечено белым цветом.

Осциллограф позволяет автоматически «находить» сигнал, то есть устанавливать режимы измерения таким образом, что сигнал на экране монитора

принимает удобный для работы размах по вертикали для обоих каналов и по горизонтали для активного канала. Для включения режима **Автопоиск** необходимо:

1. Установить в активное состояние тот канал, к которому подключен источник сигнала (Канал А или В).
2. Установить источник синхронизации — внутренний (Канал А или В).
3. Нажать на кнопку **«Поиск сигнала»** на **Панели инструментов** или выполнить команду меню Устройства / Поиск сигнала.

Осциллограф позволяет автоматически производить измерение 22 параметров регистрируемого сигнала.

Выбор измеряемого параметра осуществляется в диалоговом окне **Параметры**, открываемом при нажатии на **Панель параметров** соответствующего канала.

В разделе **Область измерения** выбирается область сигнала, в рамках которой будет вычисляться параметр (рисунок 1.6),:

- *Память* — весь регистрируемый сигнал в пределах длины развертки;
- *Между курсорами* — область между двумя курсорами, поставленными пользователем;
- *Период* — вычисление за один период сигнала (для периодических сигналов).

В поле **Усреднение** задается число циклов измерений, по которым будет усредняться вычисляемый параметр сигнала.

В поле **Канал** выбирается входной канал, для сигнала по которому будут вычисляться параметры.

После выбора параметра, задания области сигнала и числа усреднений надо нажать на кнопку **«ОК»**.

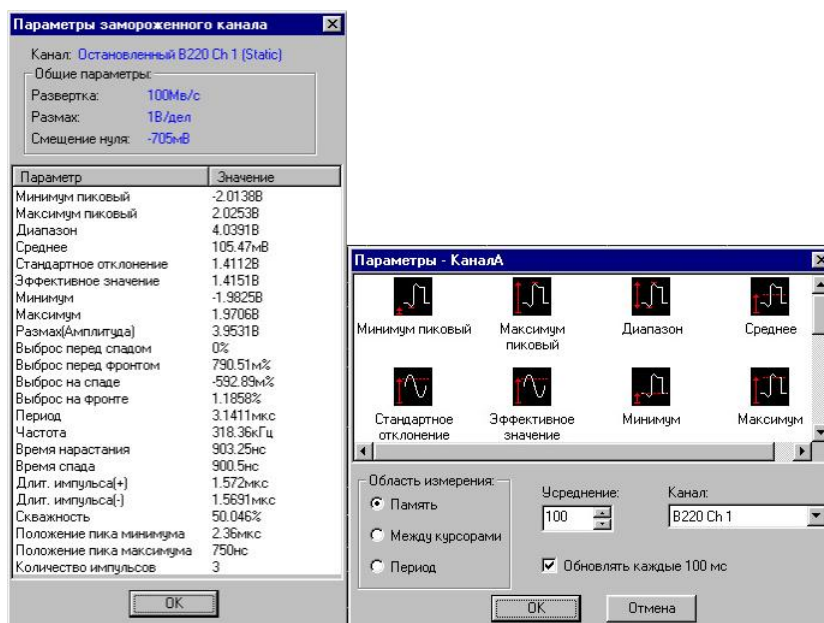


Рисунок 3 – Параметры каналов

Величина параметров регистрируемых сигналов отображается на панели инструментов (см. рисунок 1.5).

Для просмотра параметров «замороженного» канала необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по окну соответствующего «замороженного» канала на **Экранной панели**. После этого на экране откроется окно **Параметры замороженного канала**, которое содержит результаты автоматического измерения параметров данного сигнала, а также **Общие параметры** — *Развертка*, *Размах*, *Смещение нуля*. на **Панели инструментов**. Запоминается сигнал активного канала.

### Режим анализатора спектра

Для работы в режиме анализатора спектра необходимо после запуска программы или при создании нового «документа» в открывшемся диалоговом окне **Выбор и настройка каналов** (рисунок 1.7), выбрать форму представления регистрируемого сигнала — БПФ (в окне *Тип*).

В разделе **Свойства преобразования** необходимо задать требуемые параметры:

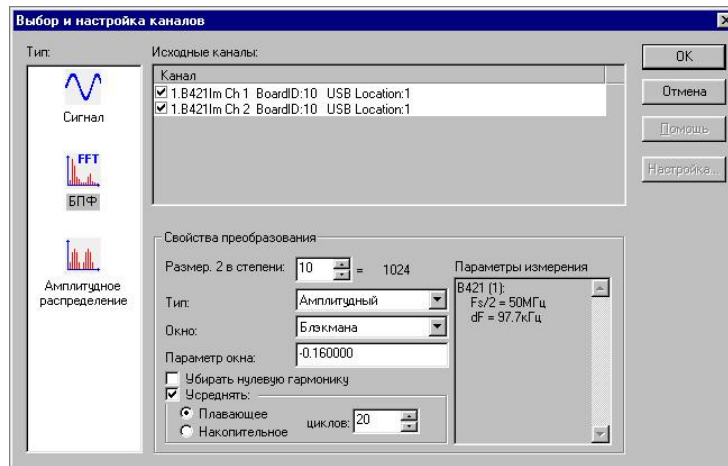


Рисунок 4 – Выбор и настройка каналов

- **Размер 2 в степени** — количество точек для преобразования Фурье;
- **Тип** — выбор типа спектра:  
*Амплитудный* — спектр амплитуды;  
*Амплитудный dBV* — спектр амплитуды в децибелах относительно 1В;  
*Мощности* — спектр мощности;  
*Мощности dBm* — спектр мощности относительно 1 мВт;  
*Фазовый [-pi; +pi]* — фазово-частотный спектр в диапазоне от -p до +p;
- **Окно** — тип весового окна:  
*Прямоугольное*;

$$\text{Треугольное: } W(i) = \begin{cases} \frac{2i+1}{N}, & 0 < i < \frac{N}{2} \\ \frac{2N-2i-1}{N}, & \frac{N}{2} \leq i < N \end{cases}$$

где  $N$  — длина окна в отсчетах;

$$\text{Бартлетта: } W(i) = \begin{cases} \frac{2i}{N-1}, & 0 \leq i \leq \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2i}{N-1}, & \frac{N-1}{2} < i \leq N-1 \end{cases};$$

$$\text{Блэкмана: } W(i) = \frac{a+1}{2} - 0.5 \times \cos\left(\frac{2\pi \times i}{N-1}\right) - \frac{a}{2} \times \cos\left(\frac{4\pi \times i}{N-1}\right) \quad 0 \leq i < N,$$

где  $a$  — параметр окна. По умолчанию (при загрузке окна) значение параметра  $a = -0,16$ ;

$$\text{Хэмминга: } W(i) = 0.54 - 0.46 \times \cos\left(\frac{2\pi \times i}{N-1}\right) \quad 0 \leq i < N;$$

$$\text{Ханна: } W(i) = 0.5 - 0.5 \cos \frac{2\pi i}{N-1}, \quad 0 \leq i < N;$$

$$\text{Кайзера: } W(i) = \frac{I_0\left(\frac{b}{2} \sqrt{\left(i - \frac{N-1}{2}\right)^2 / \frac{N-1}{2}}\right)}{I_0(b)}, \quad 0 \leq i < N,$$

где  $b$  — параметр окна.

По умолчанию (при загрузке окна) значение параметра  $b = 2$ .  $I_0$  — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка первого рода;

$$\text{Гаусса: } W(i) = \exp\left(-\frac{0.5 \times a \times (2i - N + 1)^2}{N}\right), \quad 0 \leq i < N,$$

где  $a$  — параметр окна. По умолчанию (при загрузке окна) значение параметра  $a = 0,5$ .

- **Параметр окна** — параметр окна;
- **Убирать нулевую гармонику** — позволяет убирать постоянную составляющую в спектре;
- **Усреднять** — вид усреднения.

В программе реализовано два вида усреднения:

- **Плавающее** — усреднение проводится по последним  $n$  циклам измерения, указанным в окне *циклов* (по принципу очереди — последнее вычисленное данное вытаскивает первое). Сигнал на экране обновляется после каждого цикла измерения;
- **Накопительное** — усреднение проводится по каждым  $n$  циклам измерения, указанным в окне *циклов*. Сигнал на экране обновляется после  $n$  циклов измерения.

Следует учесть значительно меньшую динамику отображения при больших  $n$ .

В окне **Параметры измерения** отображаются значения  $F_s/2$  (частота Найквиста) и  $dF$  (шаг квантования по частоте). В случае превышения размера БПФ количества отсчетов, выбранных в сегменте данных, выводится сообщение: **«Размер БПФ превышает размер сегмента данных!»**. Если размер БПФ превышает размер сегмента данных, данные дополняются нулями до размера БПФ.

## Универсальная лабораторная установка IDL-800 DigitalLab

Лабораторная установка IDL-800 (рисунок 1.8) предназначена для физического макетирования и исследования функционирования цифровых логических устройств, а также может быть использована для исследования аналоговых устройств.

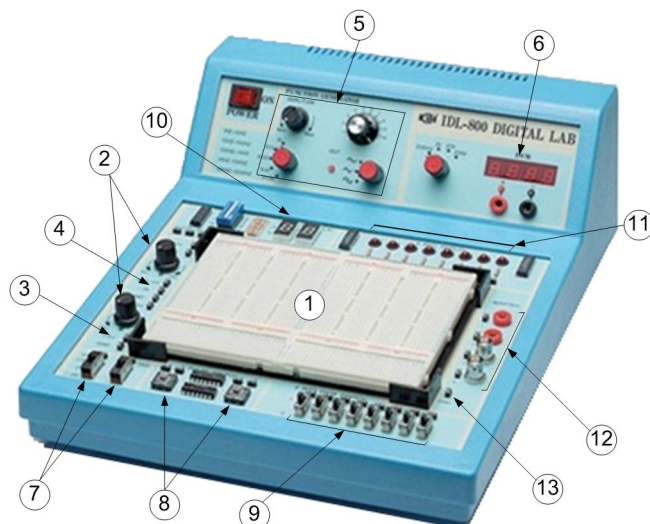


Рисунок 5 – Лабораторная установка IDL-800 DigitalLab.

Лабораторная установка содержит источники постоянного напряжения, функциональный генератор, цифровой вольтметр, восьмиразрядный светодиодный дисплей, два семисегментных индикатора и логические переключатели. В лабораторную установку входит наборная плата AD-200, на которой собираются исследуемые устройства. Детализация лабораторной установки показана на рисунке 1.8:

1. Наборная плата AD-200 (рисунок 1.9) для моделирования исследуемых устройств имеет 1896 контактов. Расстояния между контактами и размер контактов позволяют вставлять в плату DIP компоненты, а также транзисторы, резисторы, конденсаторы и т.п. Соединения между компонентами осуществляются с помощью проводов диаметром 0,3 – 0,8 мм.

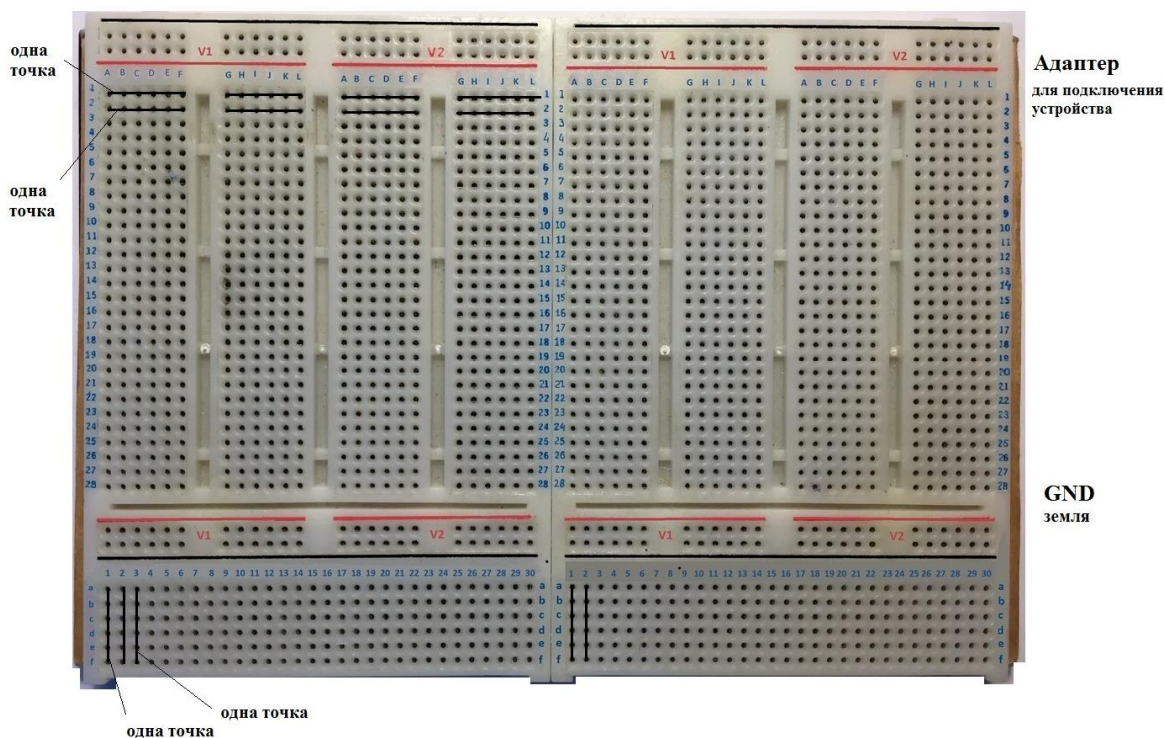


Рисунок 6 – Наборная плата AD-200.

2. Регулируемые источники электропитания 0... +15V и 0... -15V с максимальным выходным током - 300 мА.

3. Нерегулируемый источник электропитания +5 V с максимальным выходным током 1 А.

4. Нерегулируемый источник электропитания -5 V с максимальным выходным током 100 мА. Все источники электропитания имеют защиту от короткого замыкания.

5. Функциональный генератор, формирующий синусоидальный, или треугольный, или меандровый сигнал в диапазонах частот: 1 – 10 Гц, 10 – 100 Гц, 100 Гц - 1КГц, 1 – 10 КГц, 10 КГц – 100 КГц с плавной регулировкой частоты внутри диапазонов. Амплитуда синусоидального сигнала регулируется в пределах от 0 до 4V. Амплитуда двуполярного треугольного сигнала регулируется в пределах от 0 до 3V. Амплитуда двуполярного меандрового сигнала регулируется в пределах от 0 до 4V.

6. Цифровой вольтметр имеет 4 диапазона измерений:

- 0 – 199,9 V;
- 0 – 19,99 V;
- 0 – 1,999 V;
- 0 – 199,9 mV.

Входное сопротивление: 10 МОм в любом диапазоне.

*Внимание.* Цифровой вольтметр не имеет защиты от перегрузки.

7. Два функциональных переключателя – 5V/OV/+5V.

8. Две антидребезговые кнопки для генерирования одиночных импульсов с прямым и инверсным выходами.

9. 8 переключателей логических уровней «0»/ «1».

10. Два семисегментных индикатора, включенных по схеме с общим катодом.

11. Дисплей на восьми буферизированных светодиодах.

12. Четырехточечный адаптер для подключения измерительных приборов.

13. Контакты общей шины лабораторной установки.

Лабораторная установка IDL-800 DigitalLab вместе с контрольно-измерительными приборами образует рабочее место в исследовательской лаборатории и позволяет проводить физические эксперименты с цифровыми и аналоговыми устройствами.

Определить частоту и амплитуду сигналов с помощью осциллографа, выполнить математическую обработку результатов эксперимента.

## Приложение 2

### ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ МУЛЬТИМЕТРА Ц43104



Рисунок 1 – Мультиметр Ц43104

#### ***Шкалы, элементы управления и разъемы мультиметра:***

1 – Шкалы, предназначенные для снятия измерений. (Красная шкала применяется для измерения переменной составляющей);

2 – Переключатель режимов измерений. Имеет три положения:

- нижнее положение (значок  $r_x$ ) предназначено для измерения сопротивления;

- среднее положение (значок =) используется для измерения **постоянной составляющей**;
- верхнее положение (значок ~) предназначено для измерения **переменной составляющей**.

3, 6, 9 – Шкалы, для измерения постоянной составляющей или сопротивления:

- 3 – для напряжения;
- 6 – для тока;
- 9 – для сопротивления.

4, 7 – Шкалы для измерения переменной составляющей:

- 4 – для напряжения;
- 7 – для тока.

5 – Многопозиционный переключатель. Используется для выбора шкалы измерений. Белая точка на переключателе указывает на выбранную позицию.

8 – Встроенный генератор частоты (1 кГц и 465 кГц). Используется для тестирования радиоаппаратуры.

10 – Подстроечный резистор (находится сбоку устройства). Предназначен для установки нуля мультиметра, что, в свою очередь, обеспечивает точность измерений.

11, 12, 14 – Гнёзда для подключения красного провода:

- 12 – для измерения напряжения, тока и сопротивления;
- 14 – для более точного измерения сопротивления (в этом случае, необходимо установит переключатель (5) в положение  $\Omega$ ; результат измерений, соответственно, смотреть по шкале со значком  $\Omega$ ).

13 – Гнездо для подключения черного провода.

### *Техника безопасности при работе с мультиметром*

1. Будьте особенно осторожны при работе с **напряжением свыше 30В АС СКВ, 42В АС пикового или 60 В ДС**. Эти напряжения представляют серьезную опасность поражения током. Высоковольтные цепи как постоянного, так и переменного тока являются очень опасными, поэтому изменения на них должны выполняться с особой осторожностью. Не работайте в одиночку.

2. Не подключайте прибор к напряжению, **превышающему 600 В переменного или постоянного тока относительно заземления**. Это может

привести к повреждению мультиметра и поражению оператора электрическим током.

3. Работая со щупами, **держите пальцы за защитными ограничителями** на щупах. Это поможет уменьшить риск поражения электрическим током.

4. **Никогда не заземляйте себя** при выполнении электрических измерений. Не прикасайтесь к открытым металлическим трубам, штепсельным розеткам, приборам и т. д., которые могут иметь потенциал заземления. Изолируйте ваше тело от земли с помощью соответствующих мер.

### *Проведение измерений*

**Перед началом измерения необходимо откалибровать устройство.** Для этого замыкаем щупы и смотрим на шкалу: если стрелка находится на нуле, то калибровка не требуется, в противном же случае, используем подстроечный резистор (10) и стараемся выставить стрелку на ноль.

**Для обеспечения достаточной точности, калибровку необходимо производить перед каждым измерением!**

#### *1) Измерение сопротивления*

Для измерения сопротивления в кОм (МОм), а также для измерения напряжения (в В) и тока (в мА) вставляем черный провод в гнездо (13) (значок \*), а красный провод – в гнездо (12). Далее необходимо установить переключатель (5) на шкалу (9) (кОм) и проводить необходимые измерения. Результат измерений будет отображаться стрелкой на шкале со значком кΩ, МΩ. Множители **X1, X10, X100** указывают на то, на сколько необходимо умножить показатель шкалы, чтобы получить верный результат измерений.

Мультиметр также позволяет измерить сопротивление тела человека. Для этого необходимо установить переключатель (5) в положение X100 и зажать два щупа пальцами разных рук.

Для измерения сопротивления в Ом необходимо переключить красный провод в гнездо (14) (значок -Ω) и установить переключатель (5) в положение Ω. В таком случае, результат измерений будет показан на шкале со значком Ω.

#### *2) Измерение напряжения*

Для измерения **постоянного** напряжения красный провод необходимо подключить в гнездо (12) и переключатель (5) установить в соответствующее положение по шкале (3). Результаты измерений будут указываться стрелкой на шкале (1) (черная шкала со значком V, mA). При проведении измерений необходимо обратить внимание на следующее: если Вы установили переключатель (5) в положение 3, то максимально значение на шкале (1) будет 3, а не 30 (как показано на рисунке). То есть  $30/3=10$ , значит, всю шкалу надо

разделить на 10. Вместо 5 будет 0,5.

Для измерения **переменного** напряжения переключатель (5) необходимо установить в соответствующее положение по шкале (4). Результаты измерений будут указываться стрелкой на шкале (1) (красная шкала со значком V, mA).

### **3) Измерение тока**

Для измерения **постоянного** тока красный провод необходимо подключить в гнездо (12) и переключатель (5) установить в соответствующее положение по шкале (6). Результаты измерений будут указываться стрелкой на шкале (1) (черная шкала со значком V, mA). При проведении измерений необходимо обратить внимание на следующее: если Вы установили переключатель (5) в положение 6, то максимально значение на шкале (1) будет 6, а не 30 (как показано на рисунке). То есть  $30/6=5$ , значит, всю шкалу надо разделить на 5.

Для измерения **переменного** тока переключатель (5) необходимо установить в соответствующее положение по шкале (7). Результаты измерений будут указываться стрелкой на шкале (1) (красная шкала со значком V, mA).

## Приложение 3

### МУЛЬТИМЕТР DV-830B

#### РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

#### 1 Описание внешнего вида и назначения органов управления мультиметра

##### 1.1 Назначение мультиметра

Приборы типа **DV-83\*** – это серия компактных, карманного размера электрических мультиметров, для измерения DC и AC напряжения, DC тока, сопротивления и проверки диодов. Некоторые из них так же используются для измерения температуры, hFE. Данные приборы являются идеальными инструментами для использования в лабораториях, мастерских цехах.

##### 1.2 Органы управления, подключения и индикации



Рисунок 1 – Схема расположения управления, индикации мультиметра

Переключение режимов происходит при помощи центрального поворотного переключателя, стрелка рукоятки переключателя указывает на текущий режим работы мультиметра. Режимы работы мультиметра разделена на несколько областей (рис. 1):

OFF — прибор отключен (чтобы батарейки прибора не разрядились, устанавливайте переключатель в это положение после измерений);

ACV — измерение переменного U;

DCV — измерение постоянного U;

DCA — измерение постоянного тока;

$\Omega$  — замер сопротивления;

hFE — замер характеристик транзисторов;

«значок диода» — прозвонка или проверка диодов.

Функция и область применения выключателя.

Выключатель используется для выбора нужной функции и области действия, а также для того, чтобы включить прибор. Переключение пределов и режимов производится вращением относительно центра переключателя, за его ручку.

**ВНИМАНИЕ:** Чтобы батарейка прослужила как можно дольше, нужно, чтобы выключатель находился в позиции «OFF», когда прибор не используется!



Рисунок 2 – поворотный переключатель

#### ЖК дисплей.

Жидкокристаллический дисплей представляет собой семисегментный индикатор, на которой выводятся результаты текущей измерений.

#### Гнезда для подключения щупов.

Мультиметр имеет несколько разъемов для подключения щупов. Поэтому важно **правильно** подключать щупы для измерения определённых параметров, иначе при неправильном подключении, возможен выход мультиметра из строя.

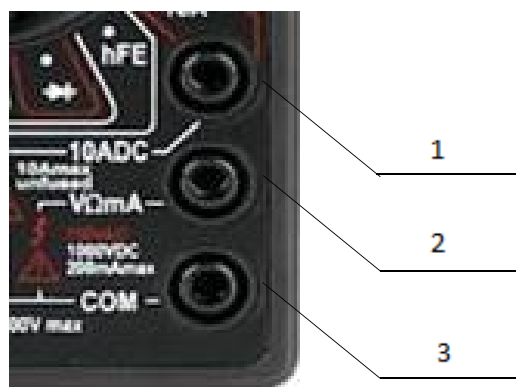


Рисунок 3 – Разъемы для подключения щупов

Черный щуп необходимо к разъему 3 рисунок 4. Красный щуп подключается к 1 разъему при измерении тока превышающее значение 200 мА, но не более 10 А, в остальных случаях используется разъем 2.

#### Разъем для проверки транзисторов.

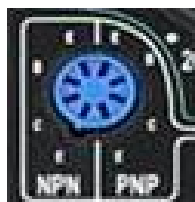


Рисунок 4 – Разъемов для проверки транзисторов  
2 Проверки измерений

### 2.1 Подготовка к проведению измерений

Перед началом проведения измерений необходимо осмотреть измерительный на предмет внешних повреждений (повреждений дисплей, переключатель режимов, измерительные щупы). В случае обнаружения дефектов необходимо обратиться к преподавателю.

Если внешних дефектов не обнаружено, то необходимо проверить измерительный щупы на наличие обрыва, для этого подключить красный и черный щупы к разъемам 2 и 3 соответственно. Далее установить режим «проверка диодов» (рисунок 1) и замкнуть щупы, на дисплее должно отобразиться значение в диапазоне «000-005», если этого не произошло, то необходимо обратиться к преподавателю.

Прибор готов к проведению измерений.

### 2.2 Общие сведения о проведении измерений

Начинайте измерение с максимального значения на приборе (750В для переменного напряжения, 1000В для постоянного напряжения, 10А для постоянного тока и 2000кОм для сопротивления). Полярность щупов при этом абсолютно не имеет значения (в случае обратного подключения на дисплее рядом с измеренным значением будем стоять знак «-»). Если на экране высветится значение гораздо меньше, а перед ним будем стоять цифра «0» (например, 020), это означает, что для более точного замера можно переключиться в другой режим, с меньшей шкалой уровня напряжения, которую позволяет измерять ваш мультиметр.

### 2.3 Измерение постоянного напряжения

Для замеров постоянного напряжения черный щуп необходимо подключать к разъему 3, красный щуп подключается к разъему 2 (рисунок 3). К измеряемой цепи подключать щупы нужно параллельно, при этом измерительные щупы необходимо держать только за изолированную часть.

При замере постоянного напряжения необходимо установить переключатель в положение 1000 режима DVC (измерение постоянного напряжения, рисунок 1). Используя пункт 2.2 подобрать необходимый предел измерения.

**ВНИМАНИЕ:** при замерах в обязательном порядке проверяйте, что выбран правильный режим работы мультиметра. Если начать замерять напряжение при включенном положении переключателя DCA, т.е. на замер тока, то это приведет к короткому замыканию и выведет прибор из строя!

## 2.4 Измерение постоянного напряжения

Для замеров переменного напряжения подключать щупы нужно параллельно измеряемой цепи, при этом измерительные щупы необходимо держать только за изолированную часть.

При замере необходимо установить переключатель положение 750В режима ACV (измерение постоянного напряжения, рисунок 1). Полярность щупов в этом случае абсолютно не имеет значения, Используя пункт 2.2 подобрать необходимый предел измерения.

**ВНИМАНИЕ:** при замерах в обязательном порядке проверяйте, что выбран правильный режим работы мультиметра. Если начать замерять напряжение при включенном положении переключателя DCA, т.е. на замер тока, то это приведет к короткому замыканию и выведет прибор из строя!

## 2.5 Измерение силы постоянного тока

Прибором можно замерять только силу постоянного тока. Переключатель должен быть в положении – DCA либо в положении 10A.

**ВНИМАНИЕ:** При измерении тока, если вы не знаете, примерно в каких пределах находится измеряемое значение силы тока, лучше начать измерения, вставив щуп в разъем 1 (рисунок 3) и включив режим «10A», иначе замеряя ток более 200мА на разъеме 2 (рисунок 3), можно вывести из строя внутренний предохранитель либо микросхему мультиметра.

В отличие от замеров напряжения, измерительные щупы нужно подключать последовательно в измеряемую цепь. То есть вам придется разрывать цепь и после этого в образовавшийся разрыв подключить щупы, при этом измерительные щупы необходимо держать только за изолированную часть. Делать это можно в любом удобном месте (в начале, середине, конце цепи).

## 2.6 Измерение сопротивления

Для замеров сопротивления, черный щуп необходимо подключать к разъёму 3, красный щуп подключается к разъёму 2 (рисунок 3). К измеряемой цепи элементу подключать щупы нужно параллельно, при этом измерительные щупы необходимо держать только за изолированную часть. Начинайте

измерение с максимальной значения на приборе 2000. Полярность щупов при этом абсолютно не имеет значения. Если на экране высветиться значение гораздо меньше, а перед ним будет стоять цифра «0» (например, 020), это означает, что для более точного замера можно переключиться в другом режиме, с меньшей ценой «деления».


*ВНИМАНИЕ: При измерение сопротивления. Исследуемая цепь должна быть обесточена (отключена от сети блока питания), иначе можно вывести из строя микросхему мультиметра.*

## 2.7 Проверка и измерения параметра $hFE$

Для включения режима проверки транзистора необходимо перевести переключатель режимов в положение « $hFE$ ». Проверяются транзисторов обеих  $n-p-n$  и  $p-n-p$  проводимостей на пробой, обрыв. Для проверки и измерения статического коэффициента передачи тока (только кремниевые — КТ) транзисторов имеется панель (рисунок 4) с указанием, в какое гнездо, какой вывод транзистора помещать (Е – эмиттер, С – коллектор, В – база).

*Коэффициент  $hFE/h_{21e}$  транзистора – это коэффициент усиления транзистора по току. Показывает во сколько раз ток коллектора больше тока базы. Для согласованной работы нескольких транзисторов в каскадах, их подбор часто начинают по коэффициенту усиления.*

## 2.8 Измерения падения напряжения на элементе участке цепи («прозвонка»)

Для включения режима «прозвонки» необходимо перевести переключатель режимов в положение «», черный щуп необходимо подключать к разъему 3, красный щуп подключается к разъему 2 (рисунок 3). К измеряемой цепи элементу подключать щупы нужно параллельно, при этом измерительные щупы необходимо держать только за изолированную часть.

Мультиметр, при «прозвонке», показывает вычисленную им величину падения напряжения в милливольтгах в этой цепи. Создаваемый же тестером ток, на проверяемом участке, величиной около 1 миллиампера, так как падение напряжения в милливольтгах в таком случае соответствуют сопротивлению в Омах (Закон Ома для участка цепи).

Другими словами, при «прозвонке» электрических цепей или электроматериалов нам показывается величина падения напряжения, которая равна сопротивлению этого участка в Омах. Если показания при замерах на экране будут отличные от единицы – то электрическая связь на проверяемом участке есть.

*ВНИМАНИЕ: При «прозвонке», исследуемая цепь должна быть обесточена (отключена от сети блока питания), иначе можно вывести из строя микросхему*

мультиметра.

3. По окончании проведения измерений, перевести вращающийся переключатель режимов в положение «OFF», отсоединить измерительные щупы.

## Приложение 4

### ОСЦИЛЛОГРАФ С8-46

### РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ

#### 1.1. Использование осциллографов

##### 1.1 Органы управления, подключения и индикации

Органы управления, подключения и индикации для удобства работы сгруппированы по зонам. Схема их расположения приведена на рисунке 1.

В левой части передней панели расположен экран ЖКИ. На верхней части корпуса расположен кнопочный переключатель **СЕТЬ**, при нажатии которого осциллограф подключается к сети питания, при этом загорается кнопка **RUN/STOP** красным цветом. При отжатии кнопки осциллограф отключается.

Снизу под ЖКИ расположен порт USB. На выходе внутреннего генератора «3 V 1 kHz» присутствуют импульсы положительной полярности типа «меандр» частотой 1 кГц и амплитудой 3В.

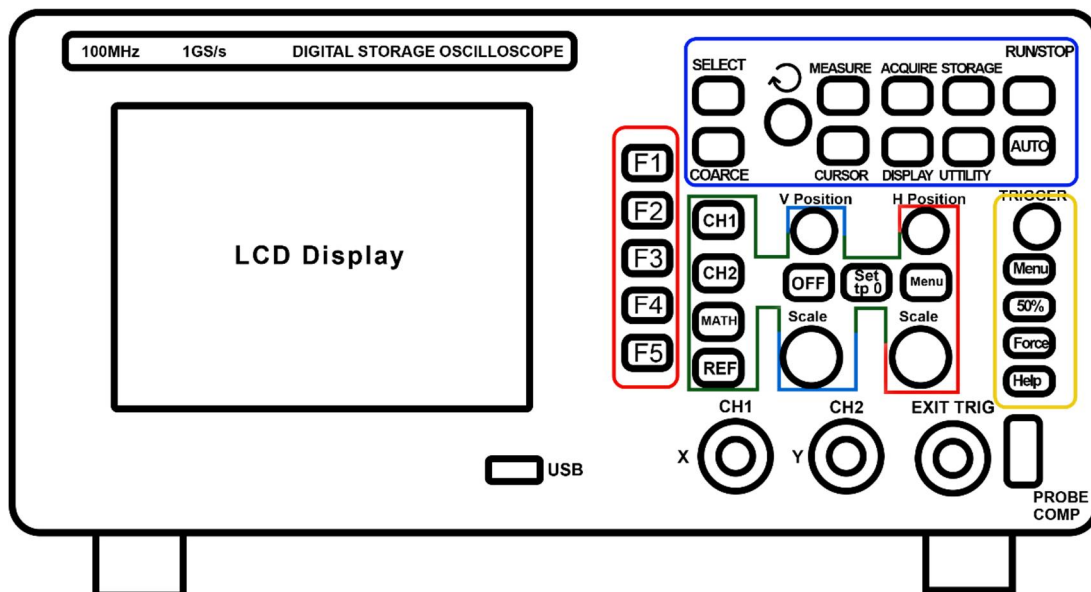


Рисунок 1 – Схема расположения органов управления, индикации и присоединения осциллографов

Справа от ЖКИ расположен ряд из пяти функциональных кнопок, которые являются операционными кнопками меню (обозначенные **F1-F5**, красная область, рисунок 1). Этими кнопками можно установить различные опции текущего меню.

Назначение остальных органов управления, подключения и индикации, расположенных на передней панели осциллографов, указаны в таблице 1.

Маркировка	Назначение
<b>SELECT</b>	Кнопка выбора курсора
<b>COARSE</b>	Кнопка переключения быстрого/плавного перемещения курсоров
	Ручка многофункционального контроля
<b>MEASURE</b>	Вход в меню измерений
<b>CURSOR</b>	Вход в меню курсорных измерений
<b>ACQUIRE</b>	Вход в меню сбора информации
<b>DISPLAY</b>	Вход в меню настроек параметров отображения
<b>STORAGE</b>	Вход в меню записи сигнала либо записи/вызова пользовательских установок
<b>UTILITY</b>	Вход в меню дополнительных функций
<b>RUN/STOP</b>	Запуск/остановка отображения информации на экране
<b>AUTO</b>	Включение функции автопоиска сигнала
<b>CH1</b>	Включение канала 1
<b>CH2</b>	Включение канала 2
<b>MATH</b>	Вход в меню математических функций
<b>REF</b>	Вход в меню работы с сохраненными сигналами
<b>POSITION</b>	Ручка для перемещения по вертикали изображений сигналов в каналах CH1 или CH2
<b>POSITION</b>	Ручка для перемещения по горизонтали изображений сигналов
<b>LEVEL</b>	Ручка уровня синхронизации
<b>OFF</b>	Выключение CH1, CH2, MATH или REF
<b>SET TOZERO</b>	Установка смещения луча в нулевое положение
<b>MENU(HORIZONTAL)</b>	Вход в меню для работы с выделенным окном
<b>SCALE VOLTS/DIV</b>	Установка коэффициентов отклонения каналов
<b>SCALE SEC/DIV</b>	Установка коэффициентов развертки
<b>MENU (TRIGGER)</b>	Вход в меню установок режимов тракта синхронизации
<b>50%</b>	Установка уровня синхронизации на середину сигнала
<b>FORCE</b>	Форсированный запуск синхронизации

<b>HELP</b>	Вызов помощи
<b>X/CH1</b>	Вход канала CH1
<b>Y/CH2</b>	Вход канала CH2
<b>EXT TRIG</b>	Вход внешней синхронизации
<b>PROBE COMP</b>	Выход внутреннего генератора

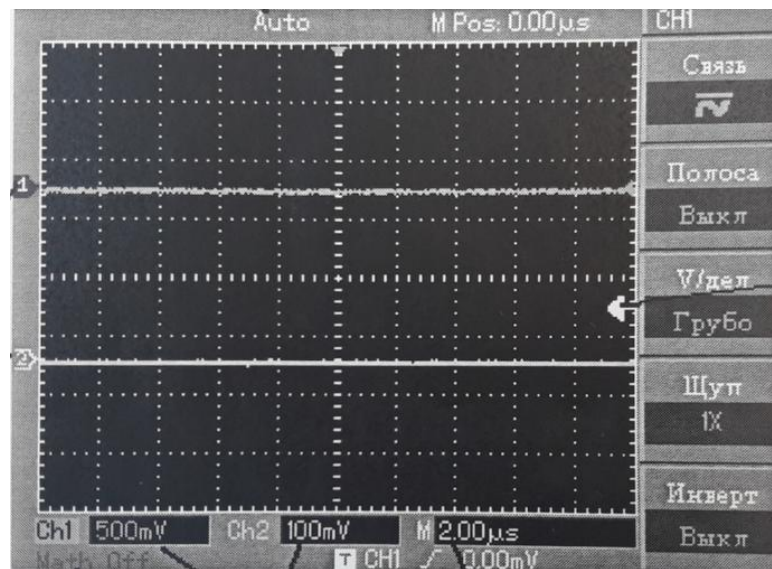


Рисунок 2 – Расположение знаковой информации и элементов на экране

1.2 Описание функционального назначения органов управления, настройки, подключения и проверки функционирования.

1.2.1 Подключить вилку шнура питания к розетке сети питания, нажать кнопку **СЕТЬ** осциллографа. Осциллографы обеспечивают метрологические характеристики через 15 минут после включения.

1.2.2 После включения осциллографов и прогрева в течение 15 мин необходимо провести их калибровку. Для этого следует нажать последовательно кнопки **UTILITY** и **F1** для входа в меню калибровки. Нажать повторно **F1** для запуска калибровки.

1.2.3 После проведения калибровки нажать кнопку **CH1**, чтобы войти в меню канала **CH1**.

1.2.4 Для проверки функционирования подать сигнал на входы следующим образом:

- подсоединить щуп осциллографа к входу **CH1** и установить переключатель щупа в положение 10X;

- установить коэффициент деления внешнего щупа нажатием кнопки **F4** в меню **CH1**. На экране появится надпись – «Щуп: 10X»;

- подсоединить наконечник щупа и заземляющую клемму к соответствующим разъемам внешнего генератора. Нажать кнопку **AUTO** и через несколько секунд

на экране появится сигнал амплитудой 3 В и частотой 1 кГц;

-нажать функциональную кнопку Off, для завершения работы с каналом **CH1**. Для работы с каналом **CH2** нажать кнопку **CH2**.

#### 1.2.5 Режим автоматического поиска сигнала «**АВТОПОИСК**».

Осциллографы имеют функцию автопоиска. Они могут автоматически установить коэффициент отклонения, коэффициент развертки и уровень синхронизации. Осциллографы обеспечивают автоматическую установку размеров изображения сигналов частотой от 50 Гц до 100 МГц. Кнопка **AUTO** располагается в области синим цветом, рисунок 1.

Использование функции автопоиска.

-подать измеряемый сигнал на вход осциллографа.

-нажать кнопку **AUTO**. Осциллограф автоматически установит коэффициент отклонения, коэффициент развертки и уровень синхронизации. После автопоиска можно менять режимы вручную, до получения оптимальной формы выводимого на экран сигнала.

#### 1.2.6 Тракт вертикального отклонения (бирюзовая область, рисунок 1)

Ручка «**POSITION**» позволяет выбирать величину смещения в каналах. При вращении ручки по направлению часовой стрелки производится смещение сигнала вверх, при вращении против часовой стрелки – вниз экрана. Знак индикации канала (поз. 7 рисунок 2) будет двигаться вверх и вниз вместе с сигналом.

Кнопка **SET TO ZERO** (зеленая область, рисунок 1) устанавливает вертикальный сдвиг, горизонтальный сдвиг и задержку сигнала в нулевое положение (центральная точка). Любые изменения установок вертикального отклонения луча отображаются в колонке статуса на экране в нижнем углу экрана.

**VOLTS/DIV** – ручка переключения коэффициентов отклонения каналов. Значение коэффициента отклонения отображаются на экране осциллографа (поз. 4, рисунок 2).

При нажатии **MATH** на экране выводиться меню работы с математическими функциями. При нажатии кнопки **REF** на экран выводиться меню работы с сохраненными сигналами.

#### 1.2.7 Тракт горизонтального отклонения (фиолетовая область, рисунок 1)

Для изменения коэффициента развертки используется ручка «**SEC/DIV**». Информация об изменении коэффициента развертки отображается на экране (поз. 3, рисунок 2). Значения коэффициентов развертки устанавливаются калиброванными ступенями соответственно ряду чисел 1, 2, 5 в диапазоне от 5 ns/дел до 50 s/дел.

Используя ручку «**POSITION**» можно изменить расположение изображения формы сигнала на экране осциллографа по горизонтали.

Кнопка **MENU** – для выведения на экран меню «**ZOOM**». Нажать **F3**, чтобы активировать функцию выделения окна. Для выхода из режима нажать кнопку **F1**. Вращая ручку «**↻**» в меню «**ZOOM**» можно установить время задержки.

### 1.2.8 Тракт синхронизации (оранжевая область, рисунок 1)

Ручка «**LEVEL**» позволяет установить уровень сигнала запуска развертки.

Изменение уровня синхронизации отображается на экране (поз. 2, рисунок 2).

Установка уровня синхронизации через меню:

- открыть меню «**MENU TRIGGER**»;

- нажатие кнопки **F1** позволяет выбрать вид синхронизации: **Фронт** (синхронизация по фронту); **ТВ** (ТВ-синхронизация) или **Импульс** (по длительности импульса);

- нажатие кнопки **F2** позволяет выбирать источник синхронизации: «Источник: **CH1** (синхронизация от канала 1), **CH2** (от канала 2), **EXT** (от внешнего сигнала), **EXT/5** (от внешнего сигнала с делителем 1:5), **Сеть** (от сети) или **Альтерн** (альтернативная)»;

- нажатие кнопки **F3** позволяет установить полярность запуска развертки: «Фронт: (нарастающим фронтом), (спадающим фронтом);

- нажатие кнопки **F4** позволяет выбирать режим запуска развертки: «Режим: **Авто** (автоматический режим синхронизации), **Ждущ** (ждущий режим развертки) или **Однокр** (однократный)»;

- нажатие кнопки **F5** позволяет выбирать различные типы входа тракта синхронизации: «Связь:  $\simeq$  (открытый вход),  $\sim$  (закрытый вход), **НЧ** (подключение фильтра нижних частот), **ВЧ** (подключение фильтра верхних частот)»;

- нажатием кнопки «**50%**» уровень синхронизации устанавливается в центре амплитуды синхронизируемого сигнала;

- нажатие кнопки **FORCE** позволяет сгенерировать принудительный сигнал синхронизации (используется в ждущем и однократном режимах запуска

развертки).

### 1.3 Подготовка к проведению измерений

#### 1.3.1 Установка канала вертикального отклонения

Канал включается нажатием кнопки **CH1** или **CH2** для канала **CH1** или **CH2** соответственно, при этом в левой части экрана появляются курсоры с номером канала. Выключение канала осуществляется нажатием кнопки **OFF**.

Каждый канал имеет собственное меню (таблица 2). Все режимы устанавливаются для каждого канала индивидуально.

Таблица 2 – Назначение элементов меню настройки канала

Функциональное меню	Установка	Пояснение
«Связь»	~	Закрытый вход
	≈	Открытый вход
	↗	Отсоединяет входной сигнал
«Полоса»	<b>Выкл</b>	Ограничение полосы пропускания
	<b>Вкл</b>	Полная полоса пропускания
«V/дел»	<b>Грубо</b>	Грубая установка коэффициентов отклонения
	<b>Плавно</b>	Плавная регулировка коэффициентов отклонения
«Щуп»	<b>IX – 1000X</b>	Установка коэффициента сигнала включения
«Инверт»	<b>Выкл</b>	Функция инвертирования сигнала включения
	<b>Вкл</b>	Функция инвертирования сигнала выключения

##### 1.3.1.1 Установка вида связи с источником сигнала:

Переключение вида связи с источником сигнала осуществляется последовательным нажатием кнопки **F1**.

Режим «~» следует использовать для устранения постоянной составляющей сигнала, режим «≈» – для отображения всех частотных составляющей сигнала.

Режим «↗» следует использовать для отключения сигнала внутри прибора от канала вертикального отклонения. На экране при этом отображается нулевой уровень сигнала.

### 1.3.1.2 Выбор ширины полосы пропускания канала:

Нажатием кнопки **F2** можно включить («Вкл») или выключить («Выкл») ограничение ширины пропускания канала. При включении ограничения полосы все шумы и ВЧ составляющие свыше 20 МГц измеряемого сигнала будут отфильтрованы.

1.3.1.3 Установка коэффициентов отклонения производится с помощью переключателя **V/дел.** Устанавливать коэффициенты отклонения можно в режиме грубой настройки или плавно регулировать. В режиме грубой настройки изменение возможно с шагом 1-2-5. В режиме плавной регулировки коэффициент отклонения устанавливается с меньшим шагом. Значение установленного коэффициента отображается на экране. Переключение режимов осуществляется кнопкой **F3**.

### 1.3.1.4 Установка коэффициента деления внешнего делителя:

При использовании в работе внешнего делителя необходимо установить соответствующий коэффициент деления в меню канала. Установка коэффициента делителя осуществляется нажатием кнопки **F4**. Возможны четыре значения – «**1X**», «**10X**», «**100X**», или «**1000X**».

### 1.3.1.5 Установка инверсии сигнала:

Нажатием кнопки **F5** можно включить («Вкл») режим инвертирования сигнала или выключить («Выкл»).

### 1.3.2 Функции математической обработки:

Кнопкой **MATH** выключается меню работы с математическими функциями и «**FFT**» с каналами **CH1** и **CH2** (таблица 3). По умолчанию функция отключена (поз. 5 рисунок 2).

Таблица 3 – Назначение элементов меню «MATH»

Функциональное меню	Установка	Пояснение
«Источ1»	CH1	В качестве первого сигнала выбран сигнал, поданный в канал 1
	CH2	В качестве первого сигнала выбран сигнал, поданный в канал 2
«Оператор»	+	Сумма
	-	Вычитание
	×	Умножение
	/	Деление

«Источ2»	CH1	В качестве второго сигнала выбран сигнал, поданный в канал 1
	CH2	В качестве второго сигнала выбран сигнал, поданный в канал 2

Выключается режим «MATH» кнопкой **OFF**

### 1.3.3 Установки тракта горизонтального отклонения

Перемещение сигнала по горизонтали осуществляется ручкой «**POSITION**». Переключателем **SEC/DIV** производится изменение коэффициента развертки. При повороте переключателя **SEC/DIV** в сторону «50 s» происходит увеличение коэффициента развертки, в сторону «5 ns» – уменьшение коэффициента развертки. Если сигнал остановлен (путем нажатия кнопки **RUN/STOP**) переключая коэффициенты развертки можно растянуть или сжать сигнал.

Нажатием кнопки **MENU** на передней панели в области «**HORIZONTAL**» открывается меню «**ZOOM**» в котором находятся пункты «**Основное**», «**Выдел-е**» и «**Задержка**».

При коэффициентах развертки 100 ms/дел и медленнее, прибор работает в режиме медленного сканирования, при этом на экране в режиме запуска развертки «**Auto**» будет индицироваться «**Scan**». В этом режиме рекомендуется устанавливать вид связи канала «~».

Функция выделения окна (рисунок 3) может быть использована для увеличения изображения сигнала. Коэффициент развертки выделенного окна не может быть медленнее, чем коэффициент развертки основного окна.

Установка задержки («**Задержка**») приведена в 1.3.3.

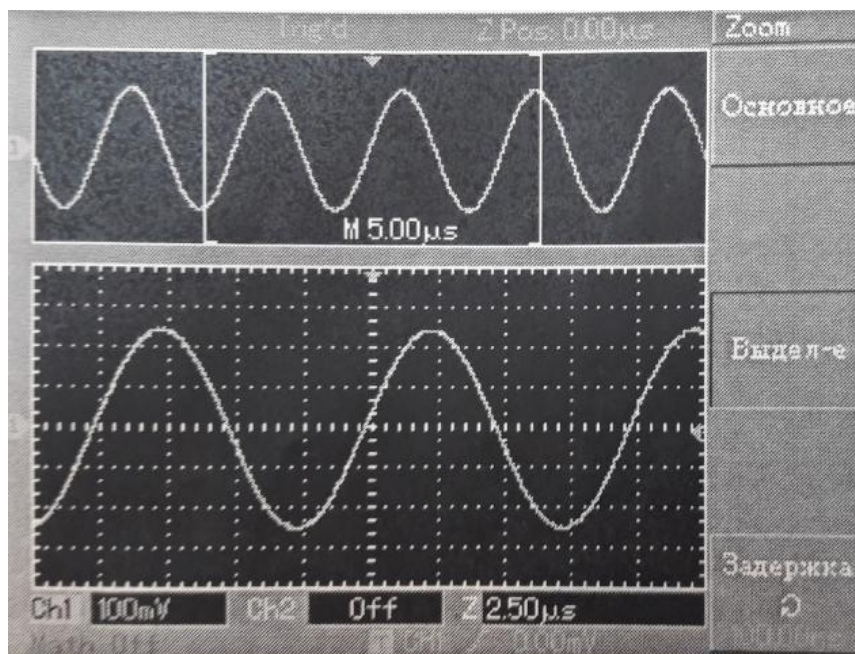


Рисунок 3 – Функция выделения окна

В режиме выделения окна экран делится на две зоны, как показано на рисунке 3. Верхняя часть показывает оригинальный сигнал. Вы можете двигать эту зону влево – вправо, используя ручку «**POSITION**», или увеличивать и уменьшать выбранную зону в размере поворачивая ручку **SEC/DIV**. Нижняя часть отражает сигнал, расширенный по времени на выбранном участке первоначального сигнала.

#### 1.3.4 Установки тракта синхронизации

Режим синхронизации:

- синхронизация по фронту (таблица 4): когда фронт сигнала синхронизации достигает заданного уровня, включается синхронизация.
- импульсная синхронизация: когда длительность импульса сигнала синхронизации, происходит синхронизация.
- ТВ-синхронизация: синхронизация по строен или по полю.
- альтернативная синхронизация: применима к сигналам с разной частотой.

Таблица 4 – Назначение элементов меню синхронизации по фронту

Функциональное меню	Установка	Пояснение
«Вид»	<b>Фронт</b>	
«Источник»	<b>CH1</b>	Синхронизация от

		канала 1
	<b>CH2</b>	Синхронизация от канала 2
	<b>EXT</b>	Синхронизация от внешнего сигнала
	<b>EXT/5</b>	Синхронизация от внешнего сигнала, деленного на 5
	<b>Сеть</b>	Синхронизация от сети
	<b>Альтерн</b>	Синхронизация двух сигналов альтернативно
«Фронт»		Синхронизация по фронту
		Синхронизация по спаду
		Установите синхронизацию по фронту/спаду сигнала
«Режим»	<b>Авто</b>	Сигнал отображается на экране постоянно
	<b>Ждуц</b>	Сигнал отображается на экране только при наличии синхронизации
	<b>Однокр</b>	При наличии синхронизации сигнал прорисовывается на экране один раз
«Связь»	~	Удаление постоянной составляющей тока входного сигнала
	≈	Пропускание постоянной и переменной составляющей тока входного сигнала
	<b>НЧ</b>	Удаление ВЧ составляющей ВХ.

		сигнала (свыше 80 кГц)
	<b>ВЧ</b>	Удаление НЧ составляющей вх. сигнала (ниже 80 кГц)

Меню синхронизации по длительности импульса представлено в таблице 6.

Таблица 6 – Назначение элементов меню импульсной синхронизации

Функциональное меню	Установка	Пояснение
«Вид»	Импульс	
«Источник»		Также как в таблице 5
«Когда»	>	Синхронизировать, когда длительность импульса больше, чем заданный уровень
	<	Синхронизировать, когда длительность импульса меньше, чем заданный уровень
	=	Синхронизировать, когда длительность импульса равна заданному уровню
«Установка»		Установить длительность импульса от 20 нс до 10 с путем поворота «↷»
«Полярн»	+	Установить положительную полярность импульса
	-	Установить отрицательную полярность импульса
«Режим»		Также как в таблице 5
«Связь»		Также как в таблице 5

Выбирая режим ТВ-синхронизации, можно синхронизироваться по полю или по строкам с помощью стандартных видеосигналов NTSC или PAL.

Меню ТВ-синхронизации в таблице 7.

Таблица 7 – Назначение элементов меню ТВ-синхронизации

Функциональное	Установка	Пояснение
----------------	-----------	-----------

меню		
«Вид»	<b>ТВ</b>	
«Источник»		Также как в таблице 5
«Стандарт»	<b>PAL</b>	Применима к сигналам PAL
	<b>NTSC</b>	Применима к сигналам NTSC
«Синхр»	<b>Строки</b>	Синхронизация по строкам
	<b>№ строки</b>	Синхронизация по номеру строки
	<b>НечПоле</b>	Синхронизация по нечетному полю
	<b>ЧетПоле</b>	Синхронизация по четному полю

Режим альтернативной синхронизации используется для наблюдения за двумя сигналами с разной частотой.

Режим «**EXT**» используется в пределах амплитуд синхронизации от минус 3 В до +3 В. В режиме «**EXT/5**» сигнал уменьшается в 5 раз. В результате, можно синхронизироваться сигналом размахом от минус 15 В до +15 В, позволяя осциллографам синхронизировать сигналы с большой амплитудой.

### 1.3.5 Регулировка времени задержки.

Для наблюдения за сигналом сложной формы, необходимо установить время задержки (пункт «**Задержка**» в меню «**ZOOM**»). Время задержки означает время ожидания перед повторным запуском сигнала синхронизации. В течении этого времени осциллограф не будет проводить синхронизацию. Например, если Вы хотите синхронизировать группу импульсов по первому импульсу, установите время задержки равное длительности этой серии импульсов.

1.3.6 Установки меню «**DISPLAY**» (синяя область, рисунок 1) на передней панели для вывода установочного меню, показанного в таблице 8.

При векторном типе отображения пространство между точками на экране заполняется, а при точечном – выводится только точки.

Время накопления. Время накопления представляет собой количество обновлений сигналов на экране в секунду. Скорость обновления влияет на возможность своевременного наблюдения изменений в сигнале.

Таблица 8 – Назначение элементов меню «**DISPLAY**»

Функциональное меню	Установка	Пояснение
---------------------	-----------	-----------

«Отображ»	<b>Вектор</b>	Режим векторного отображения сигнала
	<b>Точка</b>	Режим точечного отображения сигнала
«Режим»	<b>YТ</b>	Рабочий режим осциллографа
	<b>XУ</b>	Режим вывода, при котором CH1 – вход X, а CH2 – вход Y
«Накопл»	<b>Откл</b>	Форма сигнала на экране обновляется в режиме реального времени
	<b>Неогр</b>	Удерживается первоначальная форма сигнала. Новые данные добавляются постоянно, пока не приведут к изменению функции
«ЯркЛуча»	<b>1-100%</b>	Установка яркости луча

#### 1.4 Автоматические измерения («MEASURE»)

1.4.1 Осциллографы обеспечивают полный диапазон автоматических измерений необходимых для исследования входного сигнала.

Всего представляется возможным автоматически произвести измерения одновременно 5 параметров входного сигнала. Чтобы войти в меню параметров измерений необходимо нажать кнопку **MEASURE** (синяя область, рисунок 1). Меню состоит из 5 окон для одновременного выведения значений измерений в соответствии с функциональными клавишами F1-F5 (таблица 9).

Таблица 9 – Назначение элементов меню «MEASURE»

Функциональное меню	Установка	Пояснение
«Назад»	-	Возврат в меню измерений
«Источник»	<b>CH1/CH2</b>	Выбор канала в котором будет производиться измерение
«Напряж-е»		Выбор амплитудных параметров
«Время»		Выбор временных

		параметров
«Парам-ы»		Вывод на экран всех параметров

При выборе любой зоны измерений, нажав соответствующую функциональную клавишу, откроется следующее меню. Для возврата в меню измерений необходимо нажать кнопку **F1** (Back).

#### 1.4.2 Автоматические измерения амплитудных параметров

Осциллографы могут автоматически измерять следующие параметры напряжения:

- «Пик-Пик» - измерение сигнала от пика до пика;
- «Vmax» - значение напряжения от наибольшего положительного пика до земли (GND) сигнала;
- «Vmin» - значение напряжения от наименьшего отрицательного пика до земли (GND) сигнала;
- «Ампл-да» - измерение амплитуды (размаха) сигнала;
- «Vrms» - измерение среднеквадратического значения;
- «+Выброс» - измерение выброса на фронте;
- «-Выброс» - измерение выброса на спаде;
- «Среднее» - измерение среднего значения сигнала за один экран;
- «Vhi» - напряжение на плоской вершине сигнала. Полезно при работе с прямоугольными и импульсными сигналами;
- «Vlo» - напряжение на плоском основании сигнала. Полезно при работе с прямоугольными и импульсными сигналами;
- «Vmid» - измерение среднего значения.

#### 1.4.3 Автоматическое измерение временных параметров

Осциллографы могут автоматически измерять частоту, период, время нарастания, время спада, длительность импульса, положительную и отрицательную скважность;

- «Частота» - измерение частоты выходного сигнала;
- «Период» - измерение периода сигнала;
- «VpНараст» - измерение времени нарастания;
- «VpСпада» - измерение времени спада;
- «+Длит» - измерение длительности положительного импульса. Измеряется на 50% амплитуде сигнала
- «-Длит» - измерение длительности отрицательного импульса. Измеряется на 50% амплитуде сигнала
- «+Скважн» - положительная скважность: отношение длительности положительного импульса к периоду.
- «-Скважн» - отрицательная скважность: отношение длительности отрицательного импульса к периоду.

#### 1.4.4 Курсорные измерения

Осциллографы обеспечивают возможность различных измерений с помощью

курсоров: с помощью вертикальных курсоров можно производить измерения временных параметров, с помощью горизонтальных – амплитудных параметров. Для обоих курсоров, вертикальных и горизонтальных ( $V_a$  и  $V_b$ ,  $T_a$  и  $T_b$ ), результат измерения отображается в абсолютных единицах измерения, амплитуды или времени, а так же результат относительных измерений, отображаемых символом  $\Delta$ .

Режим курсорных измерений включается нажатием кнопки **CURSOR** (синяя область, рисунок 1). Далее последовательным нажатием кнопки **F1** необходимо выбрать тип курсорных измерений: «Напряж-е», «Время», «Слежение» или установить «Закрыть» для выключения режима курсорных измерений. Значения измерений автоматически выводятся в правом верхнем углу. Выбор активного курсора осуществляется кнопкой **Select** на передней панели, а скорость перемещения – кнопкой **Coarse**. Перемещаются курсоры ручкой «↶».

Если вы хотите, чтобы осциллограф принимал сигнал постоянно, нажмите кнопку **RUN/STOP** один раз. Нажмите второй раз и поступление данных прекратится. В режиме «**RUN**» кнопка подсвечивается зеленым цветом и слово «**AUTO**» на экране, а в режиме «**STOP**» кнопка подсвечивается красным цветом и слово «**STOP**» на экране.

#### 1.5 Порядок выключения осциллографов

После окончания работы необходимо отключить исследуемый сигнал от входа осциллографа, отжать кнопку **СЕТЬ** и отсоединить сетевой шнур осциллографа от сети питания.