

**Министерство образования и науки Республики Казахстан**  
**Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова**  
**Кафедра электроэнергетики и физики**

# **ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА**

**Учебно-методический комплекс дисциплины**  
**Специальность 5В080600 – Аграрная техника и**  
**технологии**

**Костанай, 2013**

**Составитель:**

Сапа Владимир Юрьевич, старший преподаватель кафедры  
электроэнергетики и физики

Пересмотрен и рекомендован на заседании кафедры электроэнергетики и  
физики от 23. 05. 2013 г. протокол № 5

Зав. кафедрой электроэнергетики и физики \_\_\_\_\_ И.Кошкин.

Одобрено методическим советом инженерно-технического факультета  
от 12. 06. 2013 г. протокол № 6

Председатель Методического совета \_\_\_\_\_ А.Дик.

## Содержание УМКД

№ п/п	Перечень документов	Примечание
1	Типовая учебная программа	- Номенклатурная папка № ____, сборник типовых программ по специальности, стр. ____
2	Рабочая учебная программа дисциплины	- Номенклатурная папка № ____, сборник типовых программ по специальности, стр. ____
3	Программа обучения по дисциплине (Syllabus) для обучающегося	+
4	Карта учебно-методической обеспеченности дисциплины	+
5	Лекционный комплекс	+
6	Планы практических (семинарских) занятий	+
7	Методические рекомендации по изучению дисциплины	-
8	Методические рекомендации и указания по типовым расчетам, выполнению лабораторных работ, расчетно-графических работ, курсовых проектов (работ)	-
9	Материалы для самостоятельной работы обучающихся (наборы текстов домашних заданий, материалы самоконтроля, задания по выполнению текущих видов работ, рефератов и других домашних заданий с указанием трудоемкости и литературы)	+
10	Материалы по контролю и оценке учебных достижений обучающихся (письменные контрольные задания, тестовые задания, вопросы к рубежным контролям, вопросы к экзаменам и др.)	+
11	Программное и мультимедийное сопровождение учебных занятий	-
12	Перечень специализированных аудиторий, кабинетов, лабораторий	ауд.210/3

**Приложение к рабочей учебной программе  
Программа обучения (Syllabus) для обучающегося  
на 2013-2014 учебный год дисциплина  
Электроника и микропроцессорная техника**

<b>1. Основная информация</b>							
Факультет	Инженерно-технический						
Специальность	5В080600 – Аграрная техника и технологии						
Курс	2	Семестр	3	Форма об.	очная	Прогр. об.	Основная
Цикл дисциплины	ПД		Компонент			ОК	
Кол-во кредитов	2		Количество часов			90	
Место проведения занятий	Инженерно-технический факультет						
Лектор	Сапа Владимир Юрьевич						
Преподаватель	Сапа Владимир Юрьевич						
Время консультаций (СРОП инд.)	1-я неделя		2-я неделя		3-я неделя		
					14 <sup>00</sup> - 15 <sup>00</sup>		
<b>2 Пререквизиты и постреквизиты</b>							
Пререквизиты	Высшая математика, физика, теория основ электротехники.						
Постреквизиты	Электрические машины, электропривод.						
ы							
<b>3 Цель и задачи дисциплины</b>							
Цель	Изучение принципов построения и применения электронных устройств в различной функциональной сложности, освоение основных сведений по полупроводниковым приборам, интегральным микросхемам и характеристикам наиболее распространенных электронных элементов.						
Задачи	- освоение принципов построения, методов расчета и применения электронных устройств; - приобретение студентами навыков решения технических задач по их проектированию.						
<b>4 Распределение академических часов</b>							
Всего		Практ.	Лаб.	СРОП	СРО	Форма контроля	
2 кредита 90 часов		20	20	14	36	Экзамен	
<b>5 Содержание дисциплины</b>							
Дисциплина «Электроника и микропроцессорная техника» является обязательной профилирующей дисциплиной. Данный курс представляет собой научные теоретические и практические основы дисциплины «Электроника и микропроцессорная техника». При изучении дисциплины студенты изучат устройство электронных приборов, устройства информационной электроники и преобразовательной техники.							
<b>6 Политика курса</b>							
Для успешного усвоения курса и получения высоких итоговых оценок необходимы: - <b>посещаемость</b> без опозданий; при отсутствии по уважительной причине необходимо своевременно предоставлять справки; - <b>дисциплина на занятиях</b> : не разговаривать без разрешения преподавателя, не пользоваться сотовым телефоном и др. техникой без необходимости для учебного процесса, не находиться в аудитории в верхней одежде; - <b>активное участие</b> в учебном процессе: до начала каждого занятия изучить основные моменты темы лекций, практики, СРС, точно и в срок выполнять индивидуальные и групповые задания (не в срок выполненные задания оцениваются в рейтинговых баллах ниже установленного - с коэффициентом 0,8); - <b>готовность к контролю</b> полученных знаний, умений и навыков (контроль может проводиться без предварительного предупреждения, полученные оценки включаются в итоговую оценку); - <b>отработка</b> пропущенных занятий в течение семестра в установленное преподавателем время.							
<b>7 Список рекомендуемой литературы</b>							
Основная	1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пособие для ВУЗов. М.Высшая школа. 1982 г. 2. Основы промышленной электроники. Под ред. Исакова Ю.М.,Платонова А.П. и других. Киев. Издательство «Техника» 1976 г. 3. Лачин В., Савелов Н. Электроника. Ростов-на-Дону. 2002 г.						
Дополнительная	1. Кучумов А. Электроника и схемотехника. М., 2002 г. 2. Электротехника и электроника. Под ред. В. Герасимова. Книга 3. Электрические измерения и основы электроники. М. 1998 г. 3. Жеребцов И.П. Основы электроники Л. Энергоатомиздат. 1985 г.						

### 8 Календарно-тематический план

№ недели	Темы практических занятий	Часы	Темы лабораторных занятий	Часы	Темы СРОП (поточных)	Часы	Темы СРОП (групповых), виды контроля	Часы
1	Определение параметров каскада усиления графическим методом	2	Выпрямительные диоды	2	Введение. Основные понятия. Полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры полупроводникового диода. Разновидности полупроводниковых диодов.	1	Основные понятия.	1
2	Определение параметров каскада усиления графическим методом	2	Стабилитроны	2				
3								
4	Расчет транзисторного генератора	2	Диоды с особыми свойствами	2	Биполярные транзисторы. Полевые транзисторы. Тиристоры. Оптоэлектронные приборы. Интегральные микросхемы.	1	Вольт-амперная характеристика диода	1
5	Расчет транзисторного генератора	2	Биполярные транзисторы	2				
6								
7	Расчет транзисторного ключа.	2	Униполярные полевые транзисторы	2	Цифровые интегральные схемы. Аналоговые интегральные микросхемы. Усилители. Операционный усилитель (ОУ). Импульсные и цифровые устройства.	1	Фотоприборы полупроводниковые.	1
8	Расчет транзисторного ключа.	2	Тиристоры	2				
9								
10	Логические элементы и схемы.	2	Тиристоры	2	Электронный ключ. Основные логические операции и схемная реализация. Триггеры. Преобразовательные устройства. АЦП и ЦАП.	1	Различные усилители на биполярных транзисторах.	1
11	Логические элементы и схемы.	2	Логические элементы	2				
12								
13	Расчет выпрямителя.	2	Логические элементы	2			Электрические генераторы импульсов	1
14	Расчет выпрямителя.	2	Операционные усилители	2				
15								
	<b>Итого часов</b>	<b>20</b>		<b>20</b>		<b>4</b>		<b>5</b>

### 9 График выполнения и сдачи заданий по дисциплине

Виды занятий	Виды контроля	Форма контроля	Баллы	Недели															Рейтинг			
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	семестр.	итогов.	общий	
Ауди-торная работа	ТК	Решение задач, сдача лабораторных работ	100	*			*			*			*			*						
		Реферат, доклад, презентация	100		*			*			*			*			*					
СРО	ТК	Контрольная работа	100					*							*							
			100																			
			100																			
Ауд., СРО	ПК	Контрольная работа	100															*				
			100																			
	ИК	Экзамен	40																		40	
		Всего																	60	40	100	

**Примечание 1.** Обучающийся, набравший по итогам семестра не менее 50% максимального сем. рейтинга и набравший по всем видам контроля положительные оценки, допускается к сдаче экзамена. Для получения положительной оценки необходимо на экзамене набрать не менее 50% максимального итогового рейтинга.

**Примечание 2.** При наличии пропусков лабораторных, практических занятий действует система отработок через выполнение и защиту работ по пропущенным занятиям.

#### Критерии оценки

Традиционная оценка	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
Баллы (max = 100 баллов))	90-100	75-89	50-74	0-49

\*\*Все учебные достижения обучающегося оцениваются по 100 балльной шкале за каждое выполненное задание (ответ на занятиях, сдача домашнего задания, выполнение контрольной работы и др.), окончательный итог по аттестации подводится расчетом среднеарифметической суммы всех оценок по видам работы.

## 10 Задания на СРО

№ п/п	Тема, задание, виды работ	Кол-во часов		Лит-ра	Форма отчетности	Сроки сдачи, неделя
		Осн.	Сокр.			
1	Изучить тему «Режимы работы диода»	1		1, 2	Доклад на СРСП ауд.	3
2	Изучить тему «Схемы включения транзисторов»	1		1, 2	Конспект в тетради	5
3	Изучить тему «Характеристики, параметры, режимы работы усилительных каскадов.»	1		1,2	Конспект в тетради	7
4	Изучить тему «Усилители на основе ОУ»	1		7	Выполнение в тетради, защита	8
5	ИДЗ. «Определение значения динамических параметров усилительного каскада»	1		1, 2, 7	Выполнение в тетради, защита	10
6	ИДЗ. «Расчет RLC фильтра и преобразователя с самовозбуждением»	1		1, 2, 7	Выполнение в тетради, защита	13
<b>Другие виды работ по СРО</b>						
	Подготовка к лекционным занятиям	2				
	Подготовка к практическим занятиям	10				
	Подготовка к лабораторным занятиям	10				
	Подготовка к текущим контрольным мероприятиям	6				
	Подготовка к рубежному контролю	2				
	<b>Итого часов по СРС</b>	<b>36</b>				

Программа составлена Сапа В.Ю., к.т.н., ст. преподаватель  
14.06.2012 г.

Рассмотрена и утверждена на заседании кафедры электроэнергетики  
протокол от 15.06.2012 г. № 6

Зав. кафедрой

И. Кошкин

## 9 График выполнения и сдачи заданий по дисциплине

Виды занятий	Виды контроля	Форма контроля	Баллы	Недели															Рейтинг			
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	семестр.	итогов.	общий	
Ауди-торная работа	ТК	Решение задач, сдача лабораторных работ	100	*			*			*			*			*						
		Реферат, доклад, презентация	100		*			*			*			*			*					
СРО	ТК	Контрольная работа	100					*							*							
			100																			
			100																			
Ауд., СРО	ПК	Контрольная работа	100															*				
			100																			
	ИК	Экзамен	40																	40		
		Всего																	60	40	100	

**Примечание 1.** Обучающийся, набравший по итогам семестра не менее 50% максимального сем. рейтинга и набравший по всем видам контроля положительные оценки, допускается к сдаче экзамена. Для получения положительной оценки необходимо на экзамене набрать не менее 50% максимального итогового рейтинга.

**Примечание 2.** При наличии пропусков лабораторных, практических занятий действует система отработок через выполнение и защиту работ по пропущенным занятиям.

### Критерии оценки

Традиционная оценка	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
Баллы (max = 100 баллов))	90-100	75-89	50-74	0-49

\*\*Все учебные достижения обучающегося оцениваются по 100 балльной шкале за каждое выполненное задание (ответ на занятиях, сдача домашнего задания, выполнение контрольной работы и др.), окончательный итог по аттестации подводится расчетом среднеарифметической суммы всех оценок по видам работы.



УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой

И.Кошкин

23.05.2013 г.

**Карта учебно-методической обеспеченности дисциплины ЭиМТ  
на 2013 - 2014 учебный год**

Спец-ть	Кол-во студентов		Библиография (автор, название, место, год издания, кол-во стр.)	Вид изд.	Носитель	Кол-во экз.		Нахожд. в сети	Примечание	
	Неч. сем.	Чет. сем.				Библ.	Каф.			
5В080600			<b>1. Учебники, учебные пособия, электронные учебные издания</b>							
			<b>Основная</b>							
			1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пособие для ВУЗов. М. Высшая школа. 1982 г.	учебник	бумажный	20	1			
			2. Основы промышленной электроники. Под ред. Исакова Ю.М., Платонова А.П. и других. Киев. Издательство «Техника» 1976 г.	учебник	бумажный	20	1			
			3. Лачин В., Савелов Н. Электроника. Ростов-на-Дону. 2002 г.	учебник	бумажный	20	1			
			<b>Дополнительная</b>							
			1. Кучумов А. Электроника и схемотехника. М., 2002 г.	учебник	бумажный	20	1			
			2. Электротехника и электроника. Под ред. В. Герасимова. Книга 3. Электрические измерения и основы электроники. М. 1998 г.	учебник	бумажный	20	1			
			3. Жеребцов И.П. Основы электроники Л. Энергоатомиздат. 1985 г.	учебник	бумажный	20	1			
			4. Быстров Ю. Оптоэлектронные приборы и их устройства. М., 2001 г.	учебник	бумажный	20	1			
			<b>Всего экземпляров</b>				140	7	0	
			<b>2. Методические разработки кафедры</b>							
			УМК			бумажный	50	1	1	
			<b>Всего экземпляров</b>				50	1	1	
<b>Итого</b>	0	0	<b>Итого экземпляров</b>				198	1		

Составитель: В.Сапа

Должность: старший преподаватель



Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Костанайский государственный университет им. А.Байтурсынова  
Кафедра электроэнергетики

**В.Ю. Сапа**

# **ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА**

Конспект лекций для студентов специальности 5В080600 «Аграрная техника  
и технологии »

**Костанай, 2010**

Составитель:

Сапа Владимир Юрьевич, к.т.н., ст. преподаватель кафедры  
электроэнергетики

Рассмотрено на заседании кафедры электроэнергетики, протокол от  
\_\_\_\_. \_\_\_\_ 2010г. № \_\_\_\_

Зав. кафедрой

В.Ткаченко

Утверждено Методическим советом Инженерно-технического  
факультета, протокол от \_\_\_\_ \_\_ 2010 г. № \_\_\_\_

Председатель МС ИТФ

А.Дик

## Содержание

1. Введение. Основные понятия. Полупроводниковые диоды. ....	4
2. Характеристики и параметров полупроводникового диода.....	8
3. Разновидности полупроводниковых диодов.....	12
4. Биполярные транзисторы.....	16
5. Полевые транзисторы.....	25
6. Тиристоры.....	29
7. Оптоэлектронные приборы.....	33
8. Интегральные микросхемы.....	36
9. Цифровые интегральные схемы. Аналоговые интегральные микросхемы.....	44
10. Усилители.....	48
11. Операционный усилитель (ОУ).....	55
12. Импульсные и цифровые устройства. Электронный ключ.....	58
13. Основные логические операции и схемная реализация. Триггеры.....	64
14. Преобразовательные устройства.....	68
15. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП).....	75
Список использованной литературы.....	86

**Тема 1:** Введение. Основные понятия. Полупроводниковые диоды

**Цель:** Разъяснение устройства и принципа действия полупроводниковых диодов

**План:**

1. Краткое описание полупроводниковых диодов.
2. Устройство полупроводниковых диодов.
3. Структура p-n перехода
4. Задачи автоматического управления (алгоритмы функционирования).

1. Полупроводниковые материалы (германий, кремний) по своему удельному электрическому сопротивлению занимают место между проводниками и диэлектриками. Разная величина проводимости у металлов, полупроводников и диэлектриков обусловлена разной величиной энергии, которую надо затратить на то, чтобы освободить валентный электрон от связей с атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки, причем проводимость полупроводников в значительной степени зависит от наличия примесей и температуры.

В полупроводниках присутствуют подвижные носители заряда двух типов: отрицательные электроны и положительные дырки.

Если валентный электрон разорвал ковалентную связь и стал свободным, то в том месте, где он находился, будет преобладать положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона. Эти вакантные места, появляющиеся в валентных связях, называются *дырками*. Процесс возникновения свободного электрона и дырки называется *генерацией*. Свободный электрон может занять дырку и вновь стать валентным. Процесс, приводящий к исчезновению свободного электрона и дырки, называется *рекомбинацией*.

Если в кристаллическую решетку 4-валентного кремния ввести примесь 5-валентного элемента (фосфора P, сурьмы Sb, мышьяка As), то четыре валентных электрона каждого примесного атома примут участие в образовании ковалентных связей с четырьмя соседними атомами кремния, а пятый валентный электрон окажется избыточным. Он слабо связан с атомом и легко превращается в свободный. При этом атом примеси превращается в положительный неподвижный ион. Увеличение концентрации свободных электронов увеличивает вероятность рекомбинации, поэтому концентрация дырок уменьшается. При нормальной температуре практически все атомы примеси превращаются в положительные неподвижные ионы, а число свободных электронов значительно превышает число дырок. Основными носителями заряда в таких полупроводниках являются электроны, поэтому такой полупроводник называется полупроводником n-типа (электронного типа). Неосновными носителями заряда в нем являются дырки. Примеси, атомы которых отдают электроны, называют донорами.

При введении примеси 3-валентного элемента (бора B, индия In, алюминия Al) три валентных электрона каждого атома примеси принимают участие в образовании только трех ковалентных связей, а для четвертой связи атом примеси забирает электрон из какой-либо другой связи между атомами кремния,

образуя при этом дырку. Атом примеси превращается в отрицательный неподвижный ион. Таким образом, 3-валентная примесь увеличивает концентрацию дырок, что в свою очередь уменьшает концентрацию электронов. Основными носителями заряда таких полупроводников являются дырки, поэтому полупроводник называется полупроводником р-типа (дырочного типа). Неосновными носителями заряда являются электроны. Примеси, отбирающие электроны, называются акцепторами.

Чтобы примесная проводимость преобладала над собственной, концентрация атомов примеси  $N$  должна превышать концентрацию электронов  $n_i$  и дырок  $p_i$  в собственном полупроводнике ( $n=p$ ). Практически всегда  $N$  гораздо больше  $n_i$  и  $p_i$ .

Концентрация неосновных носителей уменьшается во столько раз, во сколько раз увеличивается концентрация основных носителей. Это объясняется увеличением вероятности рекомбинации. Для примесного полупроводника справедливо равенство

$$np = n_i p_i = n_i^2 = p_i^2, \quad (1.1)$$

где  $n, p$  - концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике.

Концентрация основных носителей определяется концентрацией примеси и практически не зависит от температуры, так как уже при комнатной температуре все атомы примеси ионизированы, а число основных носителей, возникающих за счет генерации пар электрон-дырка, пренебрежимо мало по сравнению с общим числом основных носителей. В то же время концентрация неосновных носителей мала и сильно зависит от температуры, увеличиваясь в 2—3 раза при увеличении температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$ .

2. Полупроводниковым диодом называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющий два вывода.

Структура полупроводникового диода с электронно-дырочным переходом и его условное графическое обозначение приведены на рисунке 1.1, а, б.

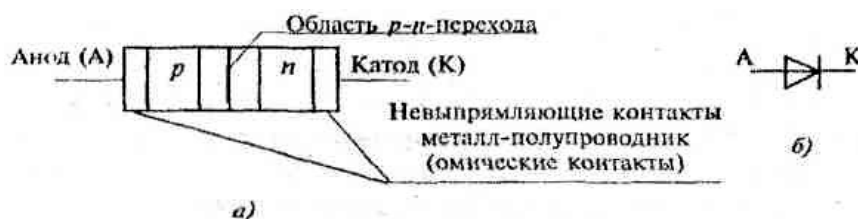


Рисунок 1.1

Структура полупроводникового диода.

Буквами  $p$  и  $n$  обозначены слои полупроводника с проводимостями соответственно  $p$ -типа и  $n$ -типа.

Обычно концентрации основных носителей заряда (дырок в слое  $p$  и электронов в слое  $n$ ) сильно различаются. Слой полупроводника, имеющий большую концентрацию, называют *эмиттером*, а имеющий меньшую концентрацию, *базой*.

Далее рассмотрим основные элементы диода (р-п-переход и невыпрямляющий контакт металл-полупроводник), физические явления, лежащие в основе работы диода, а также важные понятия, используемые для описания диода. Глубокое понимание физических явлений и владение указанными понятиями необходимо не только для того, чтобы правильно выбирать конкретные типы диодов, но и для того, чтобы определять режимы работы соответствующих схем при выполнении традиционных расчетов по той или иной методике. В связи с быстрым внедрением в практику инженерной работы современных систем схемотехнического моделирования эти явления и понятия приходится постоянно иметь в виду при выполнении математического моделирования. Системы моделирования быстро совершенствуются, и математические модели элементов электронных схем все более оперативно учитывают самые «тонкие» физические явления. Это делает весьма желательным постоянное углубление знаний в описываемой области и необходимым – понимание основных физических явлений, а также правильное использование основных понятий.

### 3. Структура р-п-перехода

Вначале рассмотрим изолированные друг от друга слои полупроводника (см. рисунок 1.2). Изобразим соответствующие зонные диаграммы (см. рисунок 1.3).

Пары электрон-дырка, возникшие в результате термогенерации

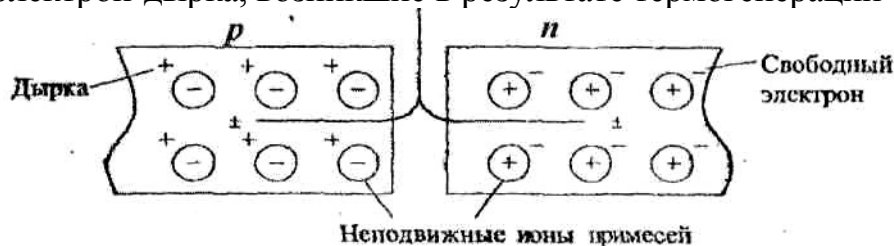


Рисунок 1.2

Изолированные друг от друга слои полупроводника.

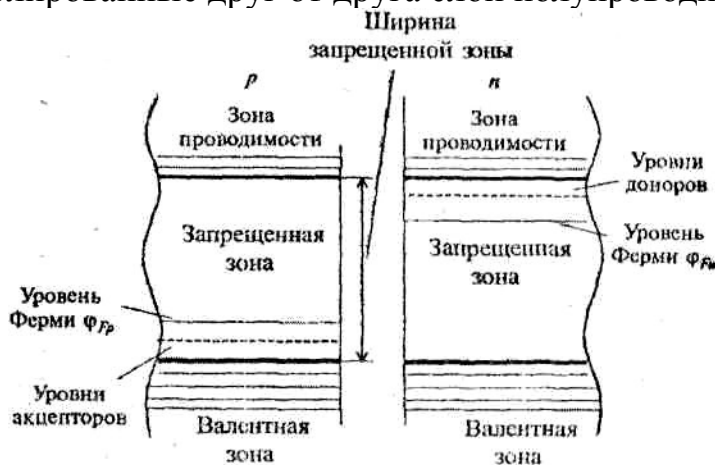




Рисунок 1.3  
 Диаграмма изолированных слоёв.

Уровни зонных диаграмм и разности этих уровней часто характеризуют потенциалами и разностями потенциалов, измеряя их в вольтах (В), например, указывают, что ширина запрещенной зоны  $\gamma$  для кремния равна 1,11 В.

Теперь рассмотрим контактирующие слои полупроводника (см. рисунок 1.4),

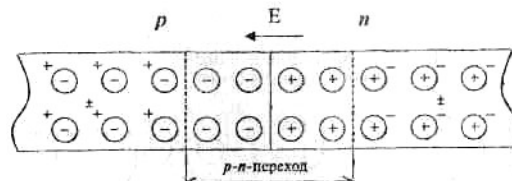


Рисунок 1.4  
 Контактующие слои полупроводника.

В контактирующих слоях полупроводника имеет место диффузия дырок из слоя  $p$  в слой  $n$ , причиной которой является их значительно большая концентрация в слое  $p$ . Аналогичная причина обеспечивает диффузию электронов из слоя  $n$  в слой  $p$ . Диффузия дырок из слоя  $p$  в слой  $n$ , во-первых, уменьшает их концентрацию в приграничной области слоя  $p$  и, во-вторых, уменьшает концентрацию свободных электронов в приграничной области слоя  $n$  вследствие рекомбинации. К аналогичным результатам приводит и диффузия электронов из слоя  $n$  в слой  $p$ .

В итоге в приграничных областях слоя  $p$  и слоя  $n$  возникает обедненный слой, в котором мала концентрация подвижных носителей заряда (электронов и дырок). Обедненный слой имеет большое удельное сопротивление. Ионы примесей обедненного слоя не компенсированы дырками или электронами. В совокупности ионы образуют нескомпенсированные объемные заряды, создающие электрическое поле с напряженностью  $\mathcal{E}$  (см. рисунок 1.4). Это поле препятствует переходу дырок из слоя  $p$  в слой  $n$  и переходу электронов из слоя  $n$  в слой  $p$ . Оно создает дрейфовый поток подвижных неосновных носителей заряда: дырок из слоя  $n$  в слой  $p$  и электронов из слоя  $p$  в слой  $n$ . В установившемся режиме дрейфовый поток равен диффузионному. В несимметричном  $p$ - $n$ -переходе более протяженным является заряд в слое с меньшей концентрацией примеси, т. е. в базе.

Изобразим зонную диаграмму для контактирующих слоев (см. рисунок 1.5), учитывая, что уровень Ферми для них является единым.



Рисунок 1.5

## Структура p-n - перехода и изучение зонной диаграммы.

Рассмотрение структуры p-n - перехода и изучение зонной диаграммы (см. рисунок 1.5) показывают, что в области перехода возникает потенциальный барьер.

### Контрольные вопросы:

1. Что такое p- проводимость и n- проводимость?
2. Что такое единая область?
3. Что такое потенциальный барьер?

**Литература:** . 1.стр. 5-17., 2. стр.7-9.

**Тема 2:** Характеристики и параметры полупроводникового диода.

**Цель:** Использование ВАХ п/п для определения режимов работы и параметров.

### План:

1. График ВАХ диода.
2. Временные диаграммы тока и напряжения.
3. Параметры п/п диодов.

1. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода на постоянном токе (статическая характеристика). Вольт-амперная характеристика - это зависимость тока  $i$ , протекающего через диод, от напряжения  $u$ , приложенного к диоду (см. рисунок 2.1). Вольт-амперной  $j$  характеристикой называют и график этой зависимости.

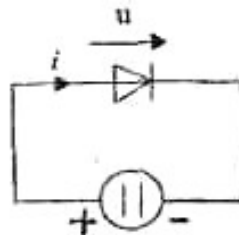


Рисунок 2.1

Схема подключения диода

Вначале предположим (см. рисунок 2.1), что обратное напряжение ( $u < 0$ )

$$\text{по } i = i_s \cdot \left( e^{\frac{u}{\Phi_T}} - 1 \right).$$

Тепловой ток  $i_s$  обусловлен генерацией неосновных носителей в областях, прилегающих к области p-n-перехода. Однако часто это идеализированное описание дает неприемлемую погрешность. Особенно большая погрешность возникает при вычислении тока диода, включенного в

обратном направлении ( $u < 0$ , КО). Вычисленный по рассматриваемому выражению ток для кремниевых диодов оказывается на несколько порядков меньше реального. Основные причины этого: термогенерация носителей непосредственно в области р-п-перехода; поверхностные утечки.

Термогенерация в области р-п-перехода оказывает существенное влияние на ток потому, что область перехода обеднена подвижными носителями заряда, и процесс рекомбинации (обратный процессу генерации и в определенном смысле уравновешивающий его) здесь замедлен.

При комнатной температуре для кремниевых приборов ток термогенерации обычно существенно превышает тепловой ток  $I$ .

Для ориентировочных расчетов можно считать, что с повышением температуры ток  $I$  удваивается примерно на каждые  $5^\circ\text{C}$ , а ток термогенерации удваивается примерно на каждые  $10^\circ\text{C}$ . При температуре около  $100^\circ\text{C}$  ток  $I_s$  сравнивается с током термогенерации.

Поверхностные утечки часто составляют подавляющую долю обратного тока. Их причинами являются: поверхностные энергетические уровни, обеспечивающие активные процессы генерации и рекомбинации; молекулярные и ионные пленки, шунтирующие р-п-переход.

При увеличении модуля обратного напряжения ток утечки вначале изменяется линейно, а затем более быстро. Ток утечки характеризуется "ползучестью" - изменением в течение времени от нескольких секунд до нескольких часов.

При практических ориентировочных расчетах иногда принимают, что общий обратный ток кремниевого диода увеличивается в 2 раза или в 2,5 раза на каждые  $10^\circ\text{C}$ .

Для примера изобразим характеристики выпрямительного кремниевого диода Д229А при различных температурах (максимальный средний прямой ток - 400 мА, максимальное импульсное обратное напряжение - 200 В). Прямые ветви характеристик представлены на рисунке 2.2, а обратные (до режима пробоя) - на рисунке 2.3.

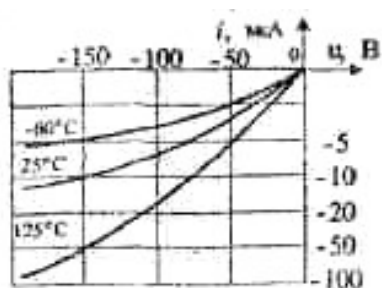


Рисунок 2.2

Прямые ветви характеристик

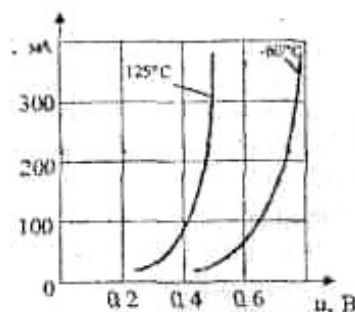


Рисунок – 2.3

Обратные ветви характеристик

Обратимся к режиму пробоя полупроводникового диода и соответствующему участку обратной ветви вольт-амперной характеристики (на рис. 2.3 этот участок не показан).

Диоды многих конкретных типоминалов не предназначены для работы в режиме пробоя. Для них этот режим работы - аварийный. Если при пробое ток в цепи не ограничивается (например, внешним сопротивлением), то диод выходит из строя. В таких приборах при чрезмерном увеличении обратного напряжения (по модулю) практически сразу же начинается тепловой пробой (участок электрического пробоя практически отсутствует).

Напряжение начала пробоя для рассматриваемых диодов - величина нестабильная (пробой начинается при  $u = -u_n < u_{MS}$ , где  $u_{проб}$  - напряжение пробоя (положительная величина)). Изобразим соответствующую вольт-амперную характеристику (см. рисунок 2.4).

Диоды некоторых конкретных типов спроектированы с расчетом на работу в режиме лавинного пробоя в течение некоторого короткого времени. Такие диоды называют лавинными. Если отрезок времени, в течение которого диод находится в режиме лавинного пробоя, невелик, то его p-n-переход не успевает перегреться и диод не выходит из строя.

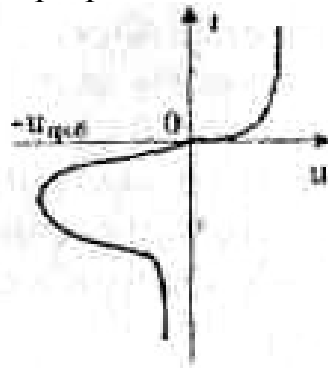


Рисунок 2.4

Вольт-амперная характеристика диода

Иначе лавинный пробой перейдет в тепловой и диод выйдет из строя. Изобразим вольт-амперную характеристику для лавинного диода (см. рисунок 2.5).

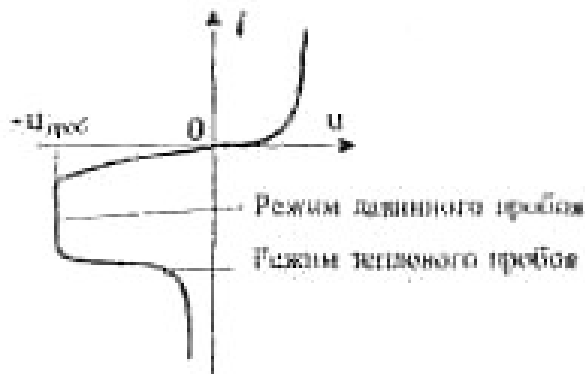


Рисунок 2.5

Вольт-амперная характеристика диода

Лавинные диоды, как правило, более надежны в сравнении с обычными (кратковременные перенапряжения не выводят лавинный диод из строя). Для

некоторых конкретных типов диодов режим пробоя является основным рабочим режимом. Это стабилитроны, рассматриваемые ниже.

2. Временные диаграммы тока и напряжения диода при его переключении. Обратимся к схеме на рисунке 2.6. Предполагается, что вначале ключ К подключает источник напряжения  $u_1$  а затем, в момент времени  $t = t_1$  - источник напряжения  $u_2$

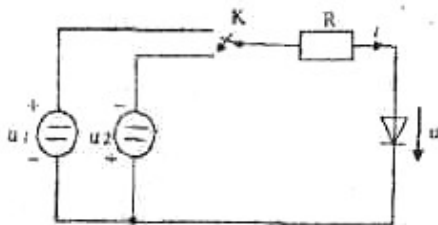


Рисунок 2.6  
Схема подключения диода

Предполагается также, что напряжения  $u_1$  и  $u_2$  значительно больше прямого падения напряжения на диоде. Изобразим соответствующие временные диаграммы (см. рисунок 2.7).

До момента времени  $t = 0$  протекает ток  $i_1$ , который с учетом принятого условия  $u_1 \gg u_D$  определяется выражением  $i = U/r$

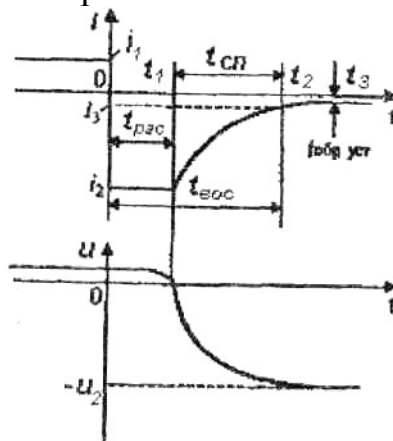


Рисунок 2.7  
Временные диаграммы напряжения диода

Сразу после переключения ключа К и в течение времени рассасывания  $t_{рас}$  протекает ток  $i_2$ , который ограничивается практически только сопротивлением R, т. е.  $I_2 = U_2/r$

В этот отрезок времени в базе диода уменьшается (рассасывается) заряд накопленных при протекании тока I неравновесных носителей. Заряд уменьшается в результате рекомбинации и перехода неосновных носителей в эмиттер.

По истечении времени  $t_{рас}$  концентрация неосновных носителей в базе на границе р-п-перехода становится равной равновесной. В глубине же базы неравновесный заряд еще существует. Длительность времени рассасывания прямо пропорциональна среднему времени жизни

неосновных носителей в базе и зависит от соотношения токов  $I$  и  $I_r$  (чем больше по модулю ток  $i_2$ , тем меньше при заданном токе  $I$  время рассасывания).

В момент времени  $t_1$  напряжение на диоде начинает быстро возрастать по модулю, а ток  $I$  уменьшаться по модулю (спадать). Соответствующий интервал времени  $t_{cn}$  называют временем спада. Время спада отсчитывают до того момента  $t_2$ , которому соответствует достаточно малое (по модулю) значение тока  $i_2$ . Время спада зависит от времени жизни носителей, а также от барьерной емкости диода и от сопротивления  $R$  схемы. Чем больше указанные емкость и сопротивление  $R$ , тем медленнее спадает ток.

Отрезок времени  $t - t_{ac} + t_{cn}$  называется временем восстановления (временем обратного восстановления). После завершения переходного процесса (момент времени  $t_3$ ) через диод течет ток  $I_{об ст}$  - обратный ток в установившемся режиме (определяемый по статической вольт-амперной характеристике диода).

3. Параметры диодов. Для того чтобы количественно охарактеризовать диоды, используют большое количество (измеряемое десятками) различных параметров. Некоторые параметры характеризуют диоды самых различных подклассов. Другие же характеризуют специфические свойства диодов только конкретных подклассов.

Укажем наиболее широко используемые параметры, применяемые к диодам различных подклассов:  $I$  - максимально допустимый постоянный прямой ток;  $U$  - постоянное прямое напряжение, соответствующее заданному току;  $U_r$  - максимально допустимое обратное напряжение диода (положительная величина);  $I_r$  - максимально допустимый постоянный обратный ток диода (положительная величина; если реальный ток больше, чем  $I_{обр макс}$ , то диод считается непригодным к использованию);  $r$  - дифференциальное сопротивление диода (при заданном режиме работы).

В настоящее время существуют диоды, предназначенные для работы в очень широком диапазоне токов и напряжений. Для наиболее мощных диодов  $I$  составляет килоамперы, а  $U$  - киловольты.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое ВАХ?
2. Как определяются параметры диодов по ВАХ?
3. Что такое ток утечки?

**Литература:** 1. стр.36., 2. стр.9-14

**Тема 3:** Разновидности полупроводниковых диодов.

**Цель:** Разъяснение особенностей конструкции различных полупроводниковых диодов.

**План:**

1. Стабилитрон.
2. Варикап.
3. Туннельный диод.
4. Обращенный диод.
5. Стабистор.
6. Диод Шоттки.

1. Стабилитрон - это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рисунке 3.1,а.



Рисунок 3.1

Условные графические обозначения

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно. Говорят, что стабилитрон стабилизирует напряжение. Изобразим для примера вольт-амперные характеристики кремниевого стабилитрона Д814Д (см. рисунок 3.2).

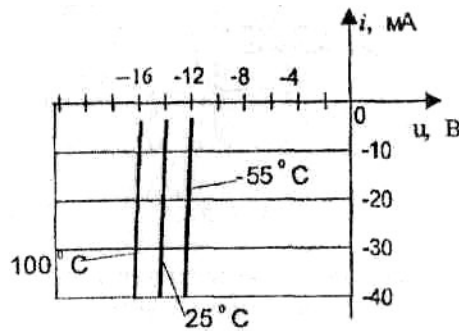


Рисунок 3.2

ВАХ кремниевого стабилитрона

В стабилитронах может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой в зависимости от удельного сопротивления базы. В стабилитронах с низкоомной базой (низковольтных, до 5,7 В) имеет место туннельный пробой, а в стабилитронах с высокоомной базой (высоковольтных) - лавинный пробой.

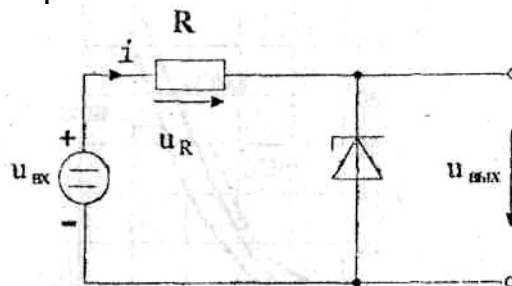


Рисунок 3.3  
Схема подключения стабилитрона

Для примера применения стабилитрона обратимся к схеме параметрического стабилизатора напряжения (см. рисунок 3.3). Если напряжение  $U_T$  настолько велико, что стабилитрон находится в режиме пробоя, то изменения этого напряжения практически не вызывают изменения напряжения  $U_{\text{вых}}$  (при изменении напряжения  $U_{\text{вх}}$  изменяется только ток, а также напряжение  $U_R$ :  $U_R = i \cdot R$ ). Стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

2. Варикап. Это полупроводниковый диод, предназначенный для работы в качестве конденсатора, емкость которого управляется напряжением. Условное графическое обозначение варикапа представлено на рисунке 3.1в.

На варикап подают обратное напряжение. Барьерная емкость варикапа уменьшается при увеличении (по модулю) обратного напряжения. Характер изменения емкости у варикапа такой же, как и у обычного диода.

3. Туннельный диод. Это полупроводниковый диод, в котором используется явление туннельного пробоя при включении в прямом направлении. Характерной особенностью туннельного диода является наличие на прямой ветви вольт-амперной характеристики участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Условное графическое обозначение туннельного диода представлено на рисунке 3.1г.

Для примера изобразим (см. рисунок 3.4) прямую ветвь вольт-амперной характеристики германиевого туннельного усилительного диода 1И104А, предназначенного для усиления в диапазоне волн 2-10 см (это соответствует частоте более 1ГГц).

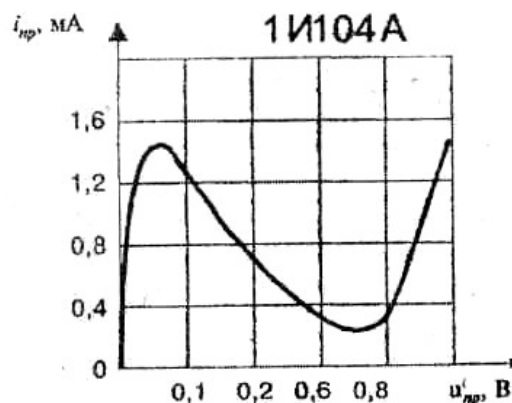


Рисунок 3.4

Вольт-амперная характеристика германиевого туннельного усилительного диода

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обеспечивает возможность использования туннельных диодов в качестве усилительного элемента и в качестве основного элемента генераторов. В настоящее время туннельные диоды используются именно в этом качестве в области сверхвысоких частот.



4. Обращенный диод. Это полупроводниковый диод, физические явления в котором подобны физическим явлениям в туннельном диоде, поэтому зачастую обращенный диод рассматривают как вариант туннельного диода. При этом участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольт-амперной характеристике обращенного диода отсутствует или очень слабо выражен.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики обращенного диода (отличающаяся очень малым падением напряжения) используется в качестве прямой ветви "обычного" диода, а прямая ветвь - в качестве обратной ветви. Отсюда и название - обращенный диод.

5. Стабистор. Это полупроводниковый диод, напряжение на котором при прямом включении (около 0,7 В) мало зависит от тока (прямая ветвь на соответствующем участке почти вертикальная). Стабистор предназначен для стабилизации малых напряжений.

6. Диод Шоттки. В диоде Шоттки используется не р-л-переход, а выпрямляющий контакт металл-полупроводник. Условное графическое обозначение диода Шоттки представлено на рис. 3.1,д. При работе диода Шоттки отсутствуют инжекция неосновных носителей и соответствующие явления накопления и рассасывания, поэтому диоды Шоттки – очень быстродействующие приборы, они могут работать на частотах до десятков гигагерц. У диода Шоттки может быть малый обратный ток и малое прямое напряжение (при малых прямых токах) - около 0,5 В, что меньше, чем у кремниевых приборов. Максимально допустимый прямой ток может составлять десятки и сотни ампер, а максимально допустимое напряжение - сотни вольт.

Для примера изобразим прямые ветви вольт-амперных характеристик (см. рисунок 3.5) кремниевого диода КД923А с барьером Шоттки (диода Шоттки), предназначенного для работы в импульсных устройствах.

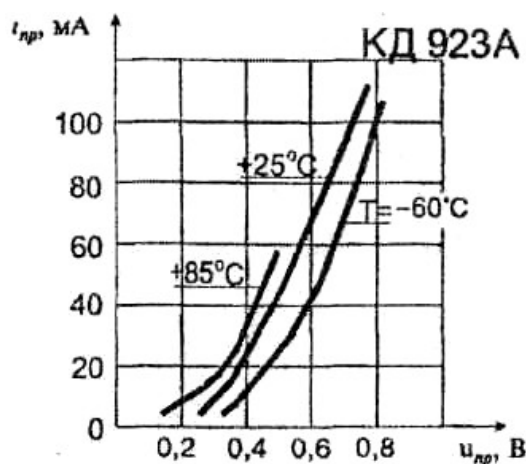


Рисунок 3.5

Вольт-амперная характеристик кремниевого диода КД923А

### Контрольные вопросы:

1. В каком режиме работает стабилитрон?
2. Почему диод Шоттки может работать на сверхвысоких частотах?

Какая характерная особенность ВАХ туннельного диода позволяет работать основным элементом в усилителях и генераторах?

**Литература:** 2. стр.17-25.

**Тема 4:** Биполярные транзисторы.

**Цель:** Разъяснить устройства основных физических процессов биполярных транзисторов.

**План:**

1. Определение биполярного транзистора.
2. Устройство транзистора.
3. Основные физические процессы.
4. Три схемы включения транзисторов.
5. Входные и выходные характеристики.
6.  $h$ -параметры транзисторов.

1. Биполярный транзистор - это полупроводниковый прибор с двумя р-п-переходами, имеющий три вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока. Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором.

2. Устройство транзистора. Биполярный транзистор в своей основе содержит 1-й слой полупроводника (р-п-р или п-р-п) и соответственно два р-п-перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, а другой крайний слой и соответствующий вывод - коллектором.

Дадим схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора типа п-р-п (см. рисунок 4.1,а) и два допустимых варианта условного графического обозначения (см. рисунок 4.1,б).

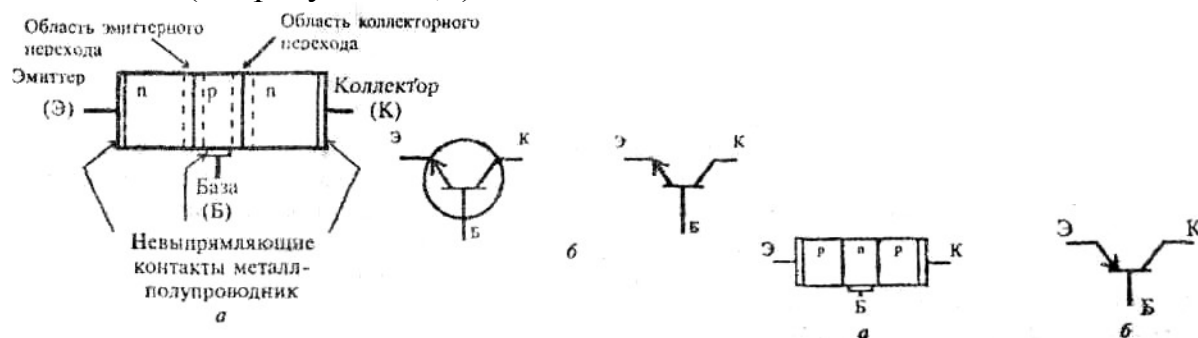


Рисунок 4.1

Схематическое, упрощенное изображение структуры транзистора

Транзистор типа р-п-р устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рисунке 4.1,а, более простой вариант условного графического обозначения - на рисунке 4.1,д.

Транзисторы типа п-р-п более распространены в сравнении с транзисторами типа р-п-р, так как обычно имеют лучшие параметры. Это объясняется следующим образом: основную роль в электрических процессах в транзисторах типа п-р-п играют электроны, а в транзисторах типа р-п-р - дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

Реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода, так как такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

Для определенности обратимся к транзистору типа п-р-п. Основными элементами транзистора являются два соединенных р-п-перехода. Это позволяет дать формальное представление структуры транзистора, представленное на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2  
Структура транзистора

Для понимания принципа работы транзистора исключительно важно учитывать, что р-п-переходы транзистора сильно взаимодействуют. Это означает, что ток одного перехода сильно влияет на ток другого, и наоборот. Именно это взаимодействие радикально отличает транзистор от схемы с двумя диодами (см. рисунок 4.3).



Рисунок 4.3  
Представление транзистора двумя диодами

В схеме с диодами ток каждого диода зависит только от напряжения на нем самом и никак не зависит от тока другого диода. Указанное взаимодействие имеет простую причину: очень малое расстояние между переходами транзистора (от 20—30 мкм до 1 мкм и менее). Это расстояние называют толщиной базы. Именно эта количественная особенность структуры создает качественное своеобразие транзистора.

3. Основные физические процессы. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в эмиттере сравнительно велика, поэтому этот слой

низкоомный. Концентрация атомов примеси (и дырок) в базе сравнительно низка, поэтому этот слой высокоомный. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в коллекторе может быть как больше концентрации атомов примеси в базе, так и меньше ее.

С помощью источников напряжения сместим эмиттерный переход в прямом, а коллекторный - в обратном направлении (см. рисунок 4.4). Тогда через эмиттерный переход потечет ток  $I_э$ , который будет обеспечиваться главным образом инжекцией электронов из эмиттера в базу. Инжекция дырок из базы в эмиттер будет незначительной вследствие указанного выше различия в концентрациях атомов примесей.

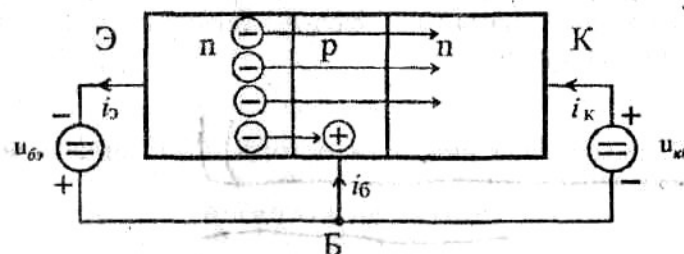


Рисунок 4.4

Смещения в p-n-переходах транзистора

Из-за малой толщины базы почти все электроны, пройдя базу, достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Убыль этих дырок компенсируется протеканием тока базы  $i_б$ . Из изложенного следует, что  $I_б \ll I_э$ .

Обратное; смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. В то же время это поле препятствует переходу электронов из коллектора в базу.

Ток коллектора  $i_к$  лишь незначительно меньше тока эмиттера. Более точно:

$i_к = \alpha_{ст} \cdot i_э + I_{ко}$ , где  $\alpha_{ст}$  - статический коэффициент передачи эмиттерного тока (термин статический подчеркивает тот факт, что этот коэффициент связывает постоянные токи);  $I_{ко}$  - обратный ток коллектора.

Природа обратного тока коллектора такая же, как и у обратного тока диода (т. е. тока диода, включенного в обратном направлении). Ток  $I_{ко}$  протекает и тогда, когда ток эмиттера равен нулю.

Различают диффузионные (бездрейфовые) и дрейфовые транзисторы. В диффузионных транзисторах концентрация атомов примесей в базе примерно одинакова во всех ее частях, поэтому ионы атомов примесей не создают в базе дополнительное электрическое поле, которое влияло бы на движение носителей электричества через базу. При этом движение этих носителей проходит главным образом в форме диффузии. В дрейфовых транзисторах указанная концентрация различна в различных точках базы. Это приводит к появлению дополнительного электрического поля, которое оказывает существенное влияние на движение носителей через базу (говорят, что носители

дрейфуют под действием этого поля). Дрейф ускоряет движение носителей через базу, поэтому дрейфовые транзисторы часто отличаются высоким быстродействием.

4. Схемы включения транзистора и их характеристики Схема с общей базой. Схема включения транзистора в электрическую цепь, изображенная на рис. 1.50, называется схемой с общей базой, так как база является общим электродом для источников напряжения.

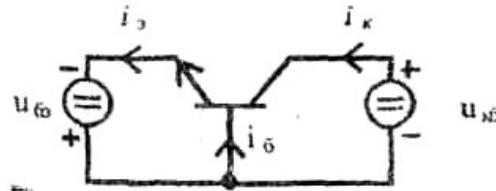


Рисунок 4.5

### Подключение транзисторных p-n-переходов

Транзисторы традиционно характеризуются их входными и выходными характеристиками. Для схемы с общей базой входной характеристикой называют зависимость тока  $I_э$  от напряжения  $u_{бэ}$  при заданном напряжении  $u_{кб}$ , т. е. зависимость вида  $i_э = f(u_{бэ})_{u_{кб} = const}$ , где  $f \sim$  некоторая функция.

Входной характеристикой называют и график соответствующей зависимости (это справедливо и для других характеристик). Выходной характеристикой для схемы с общей базой называют зависимость тока  $i_к$  от напряжения  $u_{кб}$  при заданном токе  $I_э$ , т. е. зависимость вида  $i_к = f(u_{кб})_{i_э = const}$ , где  $f$  - некоторая функция.

Входные характеристики для схемы с общей базой. Каждая входная характеристика в значительной степени определяется характеристикой эмиттерного перехода и поэтому аналогична характеристике диода.

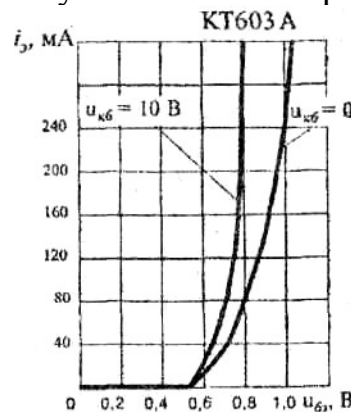


Рисунок 4.6

### Входные характеристики кремниевого транзистора КТ603А

Изобразим входные характеристики кремниевого транзистора КТ603А (максимальный постоянный ток коллектора - 300 мА,

максимальное постоянное напряжение коллектор-база - 30 В при  $t < 70^\circ \text{C}$ ) (см. рисунок 4.6). Сдвиг характеристик влево при увеличении напряжения  $u_{кб}$  объясняется проявлением эффекта Эрли (эффекта модуляции толщины базы).

Указанный эффект состоит в том, что при увеличении напряжения  $u_{кб}$  коллекторный переход расширяется (как и всякий обратно смещенный р-п-переход). Если концентрация атомов примеси в базе меньше концентрации атомов примеси в коллекторе, то расширение коллекторного перехода осуществляется в основном за счет базы, в любом случае толщина базы уменьшается. Уменьшение толщины базы и соответствующее уменьшение ее сопротивления приводят к тому, что при неизменном токе  $I_3$  напряжение  $u_{бэ}$  уменьшается. Как было отмечено при рассмотрении диода, при малом по модулю обратном напряжении на р-п-переходе это напряжение влияет на ширину перехода больше, чем при большом напряжении. Поэтому различные входные характеристики, соответствующие различным напряжениям  $u_{кб}$ , независимо от типа транзистора практически сливаются, если  $u_{кб} > 5 \text{ В}$  (или даже если  $u_{кб} > 2 \text{ В}$ ). Входные характеристики часто характеризуются дифференциальным сопротивлением  $r$ , определяемым аналогично дифференциальному сопротивлению диода.

Теперь

$$r_{\text{диф}} = \left. \frac{du_{бэ}}{di_3} \right|_{\substack{i_3 - \text{заданный} \\ u_{кб} = \text{const}}} \quad (4.1)$$

Выходные характеристики для схемы с общей базой. Изобразим выходные характеристики для транзистора КТ603А (см. рисунок 4.7).

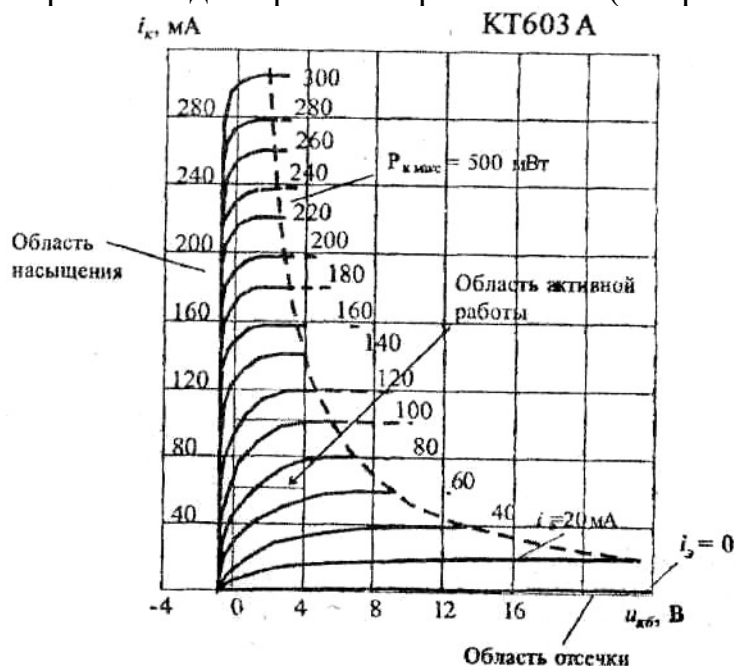


Рисунок 4.6

Выходные характеристики кремниевого транзистора КТ603А

Как уже отмечалось, если коллекторный переход смещен в обратном направлении ( $u_{кб} > 0$ ), то ток коллектора примерно равен току эмиттера. Это соотношение сохраняется даже при  $u_{кб} = 0$  (если ток эмиттера достаточно велик), так как и в этом случае большинство электронов, инжектированных в базу, захватывается электрическим полем коллекторного перехода и переносится в коллектор.

Только если коллекторный переход смещают в прямом направлении ( $u_{кб} < 0$ ), ток коллектора становится равным нулю, так как при этом начинается инжекция электронов из коллектора в базу (или дырок из базы в коллектор). Эта инжекция компенсирует переход из базы в коллектор тех электронов, которые были инжектированы эмиттером. Ток коллектора становится равным нулю при выполнении условия  $u_{кб} < 0,75 В$ .

Режим, соответствующий первому квадранту характеристик ( $u_{кб} > 0, I_c > 0$ , причем ток эмиттера достаточно велик), называют активным режимом работы транзистора. На координатной плоскости ему соответствует область активной работы.

Режим, соответствующий второму квадранту ( $u_{кб} < 0$ ), называют режимом насыщения. Ему соответствует область насыщения. При увеличении температуры ток  $I_{к0}$  возрастает (для КТ603  $I_{ш} = 100$  мкА при  $t < 85^\circ C$ ) и все выходные характеристики несколько смещаются вверх.

Режим работы транзистора, соответствующий токам коллектора, сравнимым с током  $I_{к0}$ , называют режимом отсечки. Соответствующую область характеристик вблизи оси напряжений называют областью отсечки.

В активном режиме напряжение  $u_{кб}$  и мощность  $P_k = I_c \cdot u_{кб}$ , выделяющаяся в виде тепла в коллекторном переходе, могут быть значительны. Чтобы транзистор не перегрелся, должно выполняться, неравенство  $P_k \leq P_{k \text{ макс.}}$  где  $P$  - максимально допустимая мощность (для КТ603А  $P = 500$  мВт при  $K = 50^\circ C$ ). График зависимости  $I_c = P_{\text{гагр}}/u_{кб}$  (гипербола) изображен на выходных характеристиках пунктиром.

Таким образом, в активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном. В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, в режиме отсечки коллекторный переход смещен в обратном направлении, а эмиттерный или смещен в обратном направлении, или находится под очень малым прямым напряжением.

Транзистор часто характеризуют дифференциальным коэффициентом передачи эмиттерного тока  $\alpha$ , который определяется выражением

$$\alpha = \left. \frac{di_c}{di_e} \right|_{I_c = \text{заданный}, u_{кб} = \text{const}}$$

Для приращения тока коллектора  $\Delta i_c$  и приращения тока эмиттера можно записать:  $\Delta i_c \approx \alpha \cdot \Delta i_e$ .

Коэффициент  $\alpha$  несколько изменяется при изменении режима работы транзистора. Важно учитывать, что у различных (вполне годных) экземпляров транзистора одного и того же типа коэффициент  $\alpha$  может заметно отличаться. Для транзистора КТ603А при  $t = 25^\circ \text{C}$   $\alpha = 0,909\dots 0,988$ .

Наличие наклона выходных характеристик, отражающее факт увеличения тока коллектора при заданном токе эмиттера, при увеличении напряжения  $u_{кб}$ , объясняется проявлением эффекта Эрли: при уменьшении толщины базы все большее количество электронов, инжектированных эмиттером, переходит в коллектор.

Наклон выходных характеристик численно определяют дифференциальным сопротивлением коллекторного перехода

$$r_k = \left. \frac{du_{кб}}{di_k} \right|_{\substack{u_{кб} = \text{заданное} \\ i_b = \text{const}}} \quad (4.2)$$

С учетом эффекта Эрли

$$i_k = \alpha_{ст} \cdot i_b + I_{к0} + \frac{1}{r_k} \cdot u_{кб}. \quad (4.3)$$

Схема с общим эмиттером

Значительно чаще, чем схема с общей базой, применяется схема, представленная на рисунке 4.7. Ее называют схемой с общим эмиттером, так как эмиттер является общим электродом для источников напряжения.

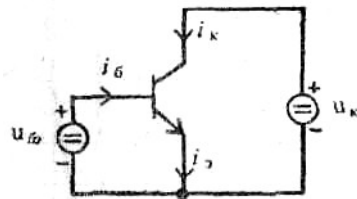


Рисунок 4.7

Схема подключения транзистора

Для этой схемы входной характеристикой называют зависимость тока  $I_b$  от напряжения  $u_{бэ}$  при заданном напряжении  $u_{кэ}$ , т. е. зависимость вида  $i_b = f(u_{бэ})|_{u_{кэ} = \text{const}}$ , где  $f$  - некоторая функция. Выходной характеристикой называют зависимость тока  $i_k$  от напряжения  $u_{кэ}$  и при заданном токе  $I_b$ , т.е. зависимость вида  $i_k = f(u_{кэ})|_{i_b = \text{const}}$ , где  $f$  - некоторая функция. Очень важно уяснить следующие два факта.

1. Характеристики для схемы с общим эмиттером не отражают никакие новые физические эффекты по сравнению с характеристиками для схемы с общей базой и не несут никакой принципиально новой информации о свойствах транзистора. Для объяснения особенностей характеристик с общим эмиттером не нужна никакая информация, кроме той, что необходима для объяснения особенностей характеристик схемы с общей базой. Тем не менее характеристики для схемы с общим эмиттером очень широко используют на практике (и приводят в справочниках), так как ими удобно пользоваться.



2. При расчетах на компьютерах моделирующие программы вообще никак не учитывают то, по какой схеме включен транзистор. Программы используют математические модели транзисторов, являющиеся едиными для всевозможных схем включения. Однако очень полезно уметь определить тип схемы включения транзистора. Это облегчает понимание принципа работы схемы.

Входные характеристики для схемы с общим эмиттером. Изобразим характеристики уже рассмотренного транзистора КТ603А (см. рисунок 4.8).

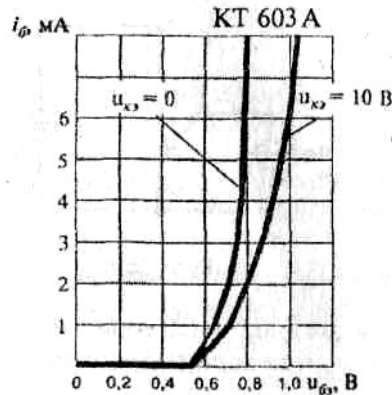


Рисунок 4.8

Входные характеристики для схемы с общим эмиттером

Теперь эффект Эрли проявляется в том, что при увеличении напряжения  $u_{кэ}$  характеристики сдвигаются вправо. Дифференциальное

$$r_{диф} = \left. \frac{du_{бэ}}{di_{б}} \right|_{i_{б} = \text{заданный}}^{u_{кэ} = \text{const}}$$

сопротивление в этом случае определяется выражением

Выходные характеристики для схемы с общим эмиттером. Изобразим эти характеристики для транзистора КТ603А (см. рисунок 4.9).



Рисунок 4.9

Выходные характеристики для схемы с общим эмиттером

Обратимся к ранее полученному выражению  $i_{к} = \alpha_{ст} \cdot i_{э} + I_{к0}$

В соответствии с первым  $i_{э} = i_{к} + i_{б}$  и с учетом предыдущего

$$i_{к} = \alpha_{ст} \cdot (i_{к} + i_{б}) + I_{к0}, \quad \text{откуда} \quad i_{к} = \frac{\alpha_{ст}}{1 - \alpha_{ст}} \cdot i_{б} + \frac{1}{1 - \alpha_{ст}} \cdot I_{к0}.$$

$$\beta_{ст} \equiv \frac{\alpha_{ст}}{1 - \alpha_{ст}}$$

Введем обозначение: Коэффициент  $\beta_{ст}$  называют статическим коэффициентом передачи базового тока. Его величина обычно составляет десятки или сотни (это безразмерный коэффициент).

Легко заметить, что  $\frac{1}{1 - \alpha_{ст}} = \beta_{ст} + 1$ .

Для учета наклона выражение записывают в виде

$$r_k = \left. \frac{du_{кэ}}{di_k} \right|_{\substack{u_{кэ} = \text{заданное} \\ u_{бэ} = \text{const}}} \quad (4.4)$$

где  $i_k = \beta_{ст} \cdot i_b + I_{к0} + \frac{1}{r_k} u_{кэ}$ , В первом приближении  $r_k = (1 + \beta_{ст}) r_k$   $r_k$  сопротивление  $r$  определено выше).

Часто пользуются дифференциальным коэффициентом передачи базового тока. По определению

$$\beta = \left. \frac{di_k}{di_b} \right|_{\substack{i_k = \text{заданный} \\ u_{кэ} = \text{const}}} \quad (4.5)$$

Для приращения тока коллектора  $\Delta i_k$  и тока базы  $\Delta i_b$  можно записать  $\Delta i_k \approx \beta \cdot \Delta i_b$ .

Для транзистора КТ603А при  $t = 25^\circ\text{C}$   $\beta = 10 \dots 80$ . Величина  $\beta$  зависит от режима работы транзистора. Приведем типичный график зависимости  $\beta$  от тока эмиттера (он практически равен току коллектора) для  $u_{кб} = 2\text{ В}$  (см. рисунок 4.10).

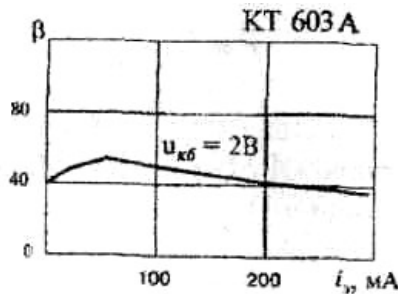


Рисунок 4.10  
Зависимости мощности от тока эмиттера

Инверсное включение транзистора. Иногда транзистор работает в таком режиме, что коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный - в обратном. При этом коллектор играет роль эмиттера, а эмиттер - роль коллектора. Это инверсный режим. Ему соответствует инверсный коэффициент передачи базового тока  $\beta_r$ . Из-за отмеченных выше несимметрии структуры транзистора и различия в концентрациях примесей в слоях полупроводника обычно  $\beta_r \ll \beta$ . Часто  $\beta_r \sim 1$ . Изобразим выходные характеристики для схемы с общим эмиттером и для прямого, и для инверсного включения (см. рисунок 4.11).

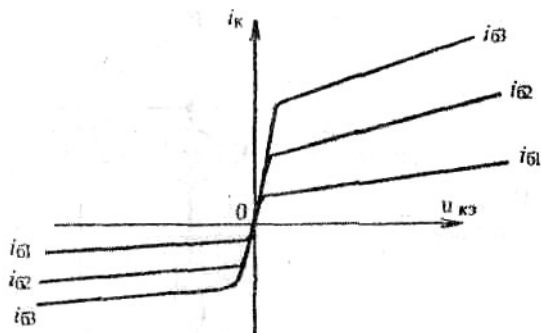


Рисунок 4.11

Выходные характеристики для схемы с общим эмиттером

Эквивалентная схема транзистора. Упрощенные математические модели принято называть эквивалентными схемами. Рассмотрим эквивалентную схему, которую можно использовать только при прямом (не инверсном) включении в режиме активной работы и в режиме отсечки (в режиме насыщения ее использовать нельзя), и в случае, когда амплитуда переменной составляющей тока коллектора, а также амплитуда переменной составляющей напряжения  $u_{кэ}$  невелики. При выполнении этих условий в первом приближении выходные и входные характеристики транзистора можно считать линейными.

#### Контрольные вопросы:

1. Почему транзистор называется биполярным?
2. Что значит включение транзистора с ОБ, ОЭ, ОК?
3. определите входные и выходные характеристики для всех схем включения?
3. Какой режим работы транзистора называют активным, режимом насыщения, режимом отсечки.
4. определите  $h$ -параметры для всех схем включения?

**Литература:** 1. стр.63., 2. стр.27-31. стр.39.

#### Тема 5: Полевые транзисторы.

**Цель:** Разъяснить устройства основных физических процессов, определение области применения различных полевых транзисторов.

#### План:

1. Определение полевого транзистора.
2. Устройство транзистора.
3. Основные физические процессы.
4. Схемы включения транзистора.

1. Полевые транзисторы. Полевой транзистор является очень широко используемым активным (т. е. способным усиливать сигналы) полупроводниковым прибором. Впервые он был предложен в 1930 г.

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля (в биполярных транзисторах выходной ток управляется входным током).

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители.

Различают два вида полевых транзисторов: с управляющим переходом и с изолированным затвором. Для определенности вначале обратимся к полевому транзистору с управляющим p-n-переходом с каналом p-типа.

2. Устройство транзистора. Дадим схематическое изображение структуры полевого транзистора с управляющим переходом и каналом p-типа (см. рисунок 5.1) и условное графическое обозначение этого транзистора (см. рисунок 5.2,а). Стрелка указывает направление от слоя p к слою л как и стрелка в изображении эмиттера биполярного транзистора. В интегральных микросхемах линейные размеры транзисторов могут быть меньше 1 мкм.

Удельное сопротивление слоя л (затвора) намного меньше удельного сопротивления слоя p (канала), поэтому область p-n-перехода, обедненная подвижными носителями заряда и имеющая очень большое удельное сопротивление, расположена главным образом в слое p.

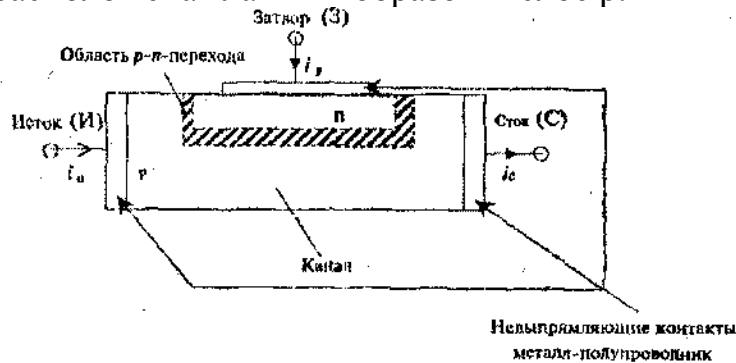


Рисунок 5.1

Структура полевого транзистора

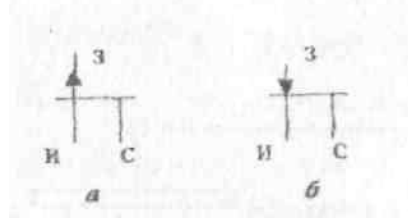


Рисунок 5.2

Условное графическое обозначение

Если типы проводимости слоев полупроводника в рассмотренном транзисторе изменить на противоположные, то получим полевой транзистор с управляющим p-n-переходом и каналом, n-типа, его условное графическое обозначение представлено на рисунке 5.2,б.

3. Основные физические процессы. Подадим положительное напряжение между затвором и истоком транзистора с каналом р-типа:  $U_{зи} > 0$ . Оно сместит р-n-переход в обратном направлении.

При увеличении обратного напряжения на р-n-переходе он расширяется в основном за счет канала (в силу указанного выше различия в удельных сопротивлениях). Увеличение ширины р-n-перехода уменьшает толщину канала и, следовательно, увеличивает его сопротивление. Это приводит к уменьшению тока между истоком и стоком. Именно это явление позволяет управлять током с помощью напряжения и соответствующего ему электрического поля. Если напряжение  $U_{зи}$  достаточно велико, то при некотором напряжении отсечки  $U_{зи.отс}$  канал полностью перекрывается областью р-n-перехода.

В рабочем (не аварийном) режиме р-n-переход должен находиться под обратным или нулевым напряжением. Поэтому в рабочем режиме ток затвора примерно равен нулю, а ток стока  $i_c$  примерно равен току истока  $i_i$  ( $i_c \approx i_i$ ).

Важно учитывать, что на ширину р-n-перехода и толщину канала прямое влияние может оказывать напряжение между истоком и стоком  $U_{ис}$ .

Пусть  $U_{из} = 0$  (между истоком и затвором включена накоротко) и подано положительное напряжение  $U_{ис}$  (см. рисунок 5.3). Это напряжение через закоротку окажется поданным на промежуток затвор - сток, т. е. окажется, что  $U_{из} = U_{ис}$  и что р-n-переход находится под обратным напряжением.

Обычно считают, что напряжение в канале от истока к стоку увеличивается линейно.

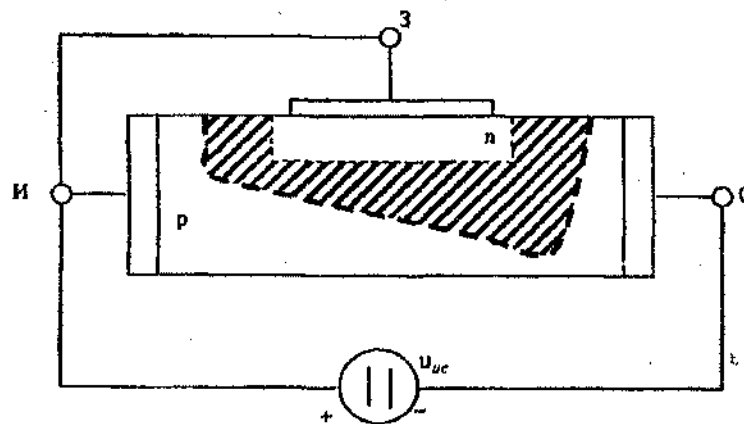


Рисунок 5.3

Схема включения полевого транзистора

Обратное напряжение в различных областях р-n-перехода различно. В областях вблизи истока это напряжение практически равно нулю, а в областях вблизи стока это напряжение равно величине  $U_{ис}$ . Поэтому р-n-переход, будет шире в тех областях, которые ближе к стоку.

Можно утверждать, что при  $U_{ж} = U_{ного}$  канал полностью перекрывается вблизи стока. При дальнейшем увеличении напряжения  $U_{ис}$  та область канала, в которой он перекрыт, будет расширяться.

4. Схемы включения транзистора. Для полевого транзистора, как и для биполярного, выделяют три схемы включения. Для полевого транзистора это схемы с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее часто используются схемы с общим истоком.

При объяснении влияния напряжения  $u_{ж}$  на ширину p-n-перехода фактически использовалась схема с общим истоком (см. рисунок 5.4). Выходные (стоковые) характеристики. Выходной характеристикой называют зависимость вида  $i_c = f(U_{uc})|_{U_{зи} = \text{const}}$ , где  $f$  - некоторая функция.

Рассмотрим характеристики, соответствующие этой схеме (что общепринято).

Так как в рабочем режиме  $i_3 \approx 0$ ,  $i_{и} \approx i_c$ , входными характеристиками обычно не пользуются.

Изобразим схему с общим истоком (см. рисунок 5.4).

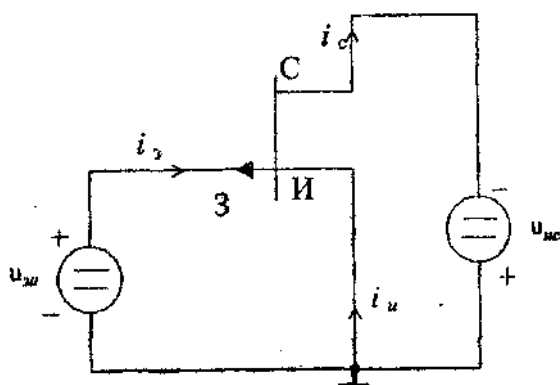


Рисунок 5.4

Схема включения полевого транзистора

Изобразим выходные характеристики для кремниевого транзистора типа КП103Л с p-n-переходом и каналом p-типа (см. рисунок 5.5).

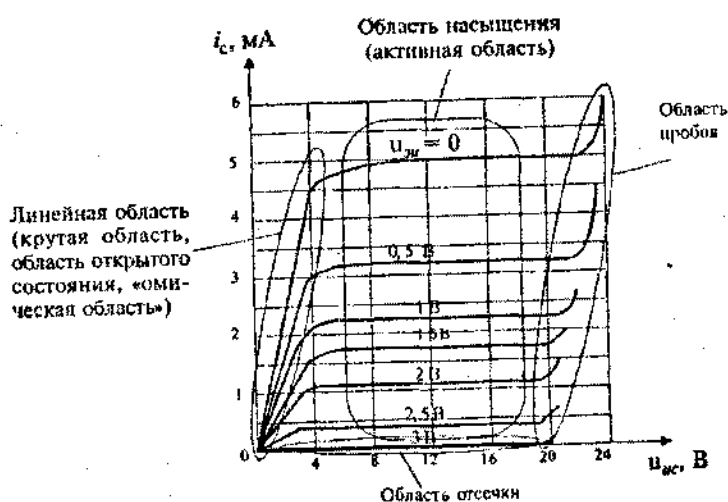


Рисунок 5.5

Выходные характеристики для кремниевого транзистора

Обратимся к характеристике, соответствующей условию  $i_{ж} = 0$ . В линейной области ( $U_{ис} < 4В$ ) характеристика почти линейна (все характеристики этой области представляют собой почти прямые линии, веерообразно выходящие из начала координат). Она определяется сопротивлением канала. Транзистор, работающий в линейной области, можно использовать в качестве линейного управляемого сопротивления.

При  $U_{ис}$  в канал в области стока перекрывается. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к очень незначительному росту тока, так как с увеличением напряжения область, в которой канал перекрыт (характеризующаяся очень большим удельным сопротивлением), расширяется. При этом сопротивление на постоянном токе промежутка исток-сток увеличивается, а ток  $I_c$  практически не изменяется.

Ток стока в области насыщения при  $U_{зи} = 0$  и при заданном напряжении  $U_{ис}$  называют начальным током стока и обозначают через  $i_{снач}$ . Для рассматриваемых характеристик  $i_{снач} = 5$  мА при  $U_{ис} = 10$  В. При  $U_{ис} > 22$  В возникает пробой р-п-перехода и начинается быстрый рост тока.

### **Контрольные вопросы:**

1. Почему транзистор называется униполярным?
2. Какие вы знаете схемы включения транзистора?
3. Что такое стоковая характеристика.
4. Что такое стокоотворная характеристика?
5. Определите по стоковой характеристике области отсечки, насыщения, активную и линейную области.
6. Что такое МДП- и МОП-транзисторы

**Литература: 1. стр.72., 2. стр.50**

### **Тема 6. Тиристоры.**

**Цель:** Разъяснение структуры тиристора, определение его, режимов работы, применения в схемах преобразовательных и слаботочных импульсных устройствах.

#### **План:**

1. Определение тиристора.
2. Принцип действия.
3. Включенное и выключенное состояние тиристора.
4. ВАХ тиристора.
5. Области применения тиристорov.

1. Тиристорами называют полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми режимами работы (включен, выключен), имеющие три или более р-п-переходов.

Тиристор по своему принципу - прибор ключевого действия. Во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, а в выключенном -

разомкнутому ключу. Те тиристоры, которые не имеют специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния, а имеют только два силовых электрода (анод и катод), называют неуправляемыми, или диодными тиристорами (динисторами). Иначе тиристоры называют управляемыми тиристорами или просто тиристорами.

Они являются основными элементами в силовых устройствах электроники, которые называют также устройствами преобразовательной техники. Типичными представителями таких устройств являются управляемые выпрямители (преобразуют переменное напряжение в однонаправленное) и инверторы (преобразуют постоянное напряжение в переменное). Динисторы, как правило, используются в слаботочных импульсных устройствах.

2. Существует большое количество различных тиристоров. Для определенности обратимся к управляемому по катоду незапираемому тиристор с тремя выводами (два силовых и один управляющий), который проводит ток только в одном направлении.

Дадим упрощенное изображение структуры тиристора (см. рисунок 6.1) и его условное графическое обозначение (см. рисунок 6.2).

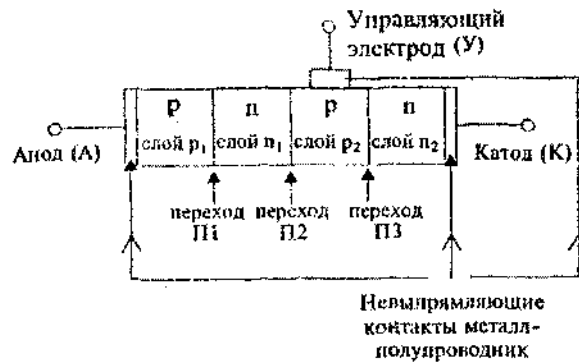


Рисунок 6.1  
Структура тиристора

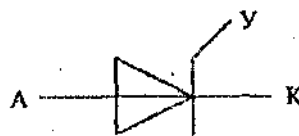


Рисунок 6.2  
Условное обозначение тиристора

Обратимся к простейшей схеме с тиристором (см. рисунок 6.3), где использованы следующие обозначения:

$i_a$  - ток анода (силовой ток в цепи анод-катод тиристора);

$U_{ак}$  - напряжение между анодом и катодом;

$i_y$  - ток управляющего электрода (в реальных схемах используют импульсы тока);

$U_{ук}$  - напряжение между управляющим электродом и катодом;



$U_{\text{пит}}$  - напряжение питания.

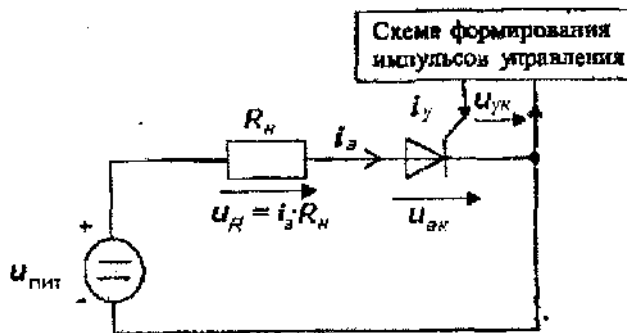


Рисунок 6.3  
Схема включения тиристора

Предположим, что напряжение питания меньше напряжения переключения  $U_{\text{пер}}$  ( $U_{\text{пит}} < U_{\text{пер}}$ ) и что после подключения источника питания импульс управления на тиристор не подавался. Тогда тиристор будет находиться в закрытом (выключенном) состоянии. При этом р-п-переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  будут смещены в прямом направлении, а переход  $\Pi_2$  - в обратном направлении (см. рис. 1.85), поэтому ток тиристора будет малым ( $i_a \ll 0$ ) и будут выполняться соотношения  $U_{\text{ак}} \approx U_{\text{пит}}$ ,  $U_R \approx 0$  (нагрузка отключена от источника питания).

Если предположить, что выполняется соотношение  $U_{\text{пит}} > U_{\text{пер}}$  или что после подключения источника питания (даже при выполнении условия  $U_{\text{пит}} < U_{\text{пер}}$ ) был подан импульс управления достаточной величины, то тиристор будет находиться в открытом (включенном) состоянии. При этом все три перехода будут смещены в прямом направлении и будут выполняться соотношения  $U_{\text{ак}} \approx 1\text{В}$ ,  $i_a \approx U_{\text{пит}}/R_R$ ,  $U_R \approx U_{\text{пит}}$  (т.е. нагрузка оказалась подключенной к источнику питания).

3. Характерной особенностью рассматриваемого незапираемого тиристора, который очень широко используется на практике, является то, что его нельзя выключить с помощью тока управления.

Для выключения тиристора на практике на него подают обратное напряжение  $U_{\text{ак}} < 0$  и поддерживают это напряжение в течение времени, большего времени выключения  $t_{\text{выкл}}$ . Оно обычно составляет единицы или десятки микросекунд. За это время избыточные заряды в слоях  $p_1$  и  $p_2$  исчезают. Для выключения тиристора напряжение питания  $U_{\text{пит}}$  в приведенной выше схеме (см. рисунок 6.3) должно изменить полярность.

После указанной выдержки времени на тиристор вновь можно подать прямое напряжение ( $U_{\text{ак}} > 0$ ), но он останется выключенным до подачи импульса управления.

Тиристор выключается также в случае, когда обратное напряжение не подается, но ток  $I_a$  уменьшается до некоторой малой величины, называемой током удержания. При этом напряжение на тиристоре увеличивается скачкообразно. Такой способ выключения на практике используется редко, так как время выключения при этом оказывается значительным.

Существуют запираемые тиристоры, которые могут быть выключены с помощью тока управления. Если на тиристор подано обратное напряжение  $U_{ак} < 0$ , то переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  смещаются в обратном направлении и через тиристор протекает малый обратный ток.

Широко используются симметричные тиристоры (симисторы, триаки). Каждый симистор подобен паре рассмотренных тиристоров, включенных встречно-параллельно (см. рисунок 6.4). Дадим условное графическое обозначение симистора (см. рисунок 6.4).

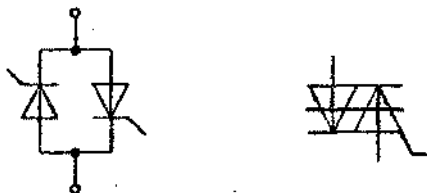


Рисунок 6.4

Обозначение симистора

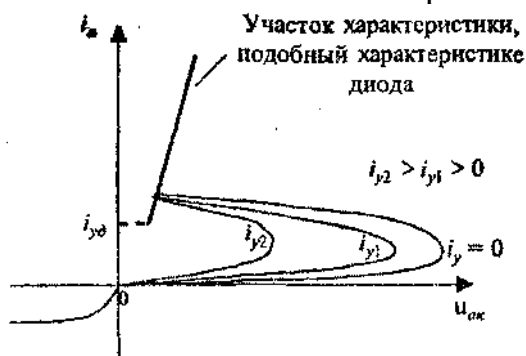


Рисунок 6.5

Семейство статических выходных вольтамперных характеристик тиристора

Изобразим семейство статических выходных вольтамперных характеристик тиристора (см. рисунок 6.5).

Различные характеристики соответствуют различным значениям постоянного тока управления. Но важно помнить, что на практике тиристор обычно включают не постоянным, а импульсным током управления.

### Контрольные вопросы:

1. Как называется диодный тиристор?
2. Как называется управляемый тиристор?
3. Как определяются параметры тиристора?
4. Что значит “запираемый тиристор”?
5. Чем отличается ВАХ тиристора от ВАХ плоскостного полупроводникового диода?
6. Определите область применения различных тиристоров?

**Литература:** 1. стр.66., 2. стр.56-68.

## **Тема 7. Оптоэлектронные приборы.**

**Цель:** Дать общую характеристику приборов, классификацию, область применения.

### **План:**

1. Определение оптоэлектроники.
2. Определение оптоэлектронных приборов.
3. Классификация приборов.
4. Физические эффекты, лежащие в основе работы оптоэлектронных приборов.
5. Излучательный диод.
6. Фотодиод, фототранзистор.
7. Область применения оптоэлектронных приборов.

1. Оптоэлектроника - это раздел электроники, связанный главным образом с изучением эффектов взаимодействия между электромагнитными волнами оптического диапазона и электронами вещества (преимущественно твердых тел) и охватывающий проблемы создания оптоэлектронных приборов (в основном методами микроэлектронной технологии), в которых эти эффекты используются для генерации, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

Согласно этому определению оптоэлектронику как научно-техническое направление характеризуют три отличительные черты.

1. Физическую основу оптоэлектроники составляют явления, методы, средства, для которых принципиально сочетание и неразрывность оптических и электронных процессов.

2. Техническую основу оптоэлектроники определяют конструктивно-технологические концепции современной микроэлектроники: миниатюризация элементов; предпочтительное развитие твердотельных плоскостных конструкций; интеграция элементов и функций; ориентация на специальные сверхчистые материалы; применение методов групповой обработки изделий.

3. Функциональное назначение оптоэлектроники состоит в решении следующих задач: генерации, переносе, преобразовании, хранении и отображении информации.

Для решения перечисленных задач в оптоэлектронных приборах используются информационные сигналы в оптической и электрической формах, но определяющими являются оптические сигналы - именно этим достигается то качественно новое, что отличает оптоэлектронику.

4. Оптоэлектронными называют приборы, чувствительные к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях, а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

В конкретном оптоэлектронном приборе наличие всех трех составляющих данного выше определения является обязательным, но

перечисленные отличительные признаки могут быть воплощены в большей или меньшей степени. Это позволяет разделить опто- и фотоэлектронные приборы (фотоэлектронные умножители, электроннолучевые приборы).

На практике широко используются источники излучения (излучатели), приемники излучения (фотоприемники) и оптроны (оптопары).

Излучатель - источник, световой поток или яркость которого является функцией электрического сигнала, поступающего на его вход.

Из источников излучения нашли широкое применение светодиоды и лазеры, а из приемников - фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры. Широко используются оптроны, в которых применяются пары светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор.

По виду используемого излучателя выделяют приборы когерентной (с лазерами) и некогерентной (со светоизлучающими диодами) оптоэлектроники.

Как отдельные приборы, так и сложные оптоэлектронные системы создаются из отдельных элементов. Основными оптоэлектронными элементами являются:

- источники когерентного оптического излучения (полупроводниковый лазер);
- источники некогерентного оптического излучения (светоизлучающий диод);
- активные и пассивные оптические среды;
- приемники оптического излучения (фотодиод);
- оптические элементы (линза);
- волоконно-оптические элементы (волоконно-оптический жгут);
- интегрально-оптические элементы (интегрально-оптическое зеркало).

Из обобщенной структурной схемы оптоэлектронного прибора (ОЭП) наряду с фотоприемниками и излучателями важным компонентом ОЭП являются входные и выходные согласующие электрические схемы, предназначенные для формирования и обработки оптического сигнала. Особенностью этих достаточно сложных, в основном интегральных, схем является компенсация потерь энергии при преобразованиях "электричество-свет" и "свет-электричество", а также обеспечение высокой стабильности и устойчивости работы ОЭП при воздействии внешних факторов.

По функциональному назначению в классе оптоэлектронных приборов, кроме миниатюрных источников излучения и одно- и многоэлементных приемников излучения, следует выделить следующие приборы.

Оптопарой называют оптоэлектронный прибор, в котором конструктивно объединены в общем корпусе излучатель на входе и фотоприемник на выходе, взаимодействующие друг с другом оптически и электрически.

Оптопары широко используются в микроэлектронной и электротехнической аппаратуре для обеспечения электрической развязки при передаче информационных сигналов, бесконтактной коммутации

сильноточных и высоковольтных цепей и создания перестраиваемых фотоприемников в устройствах контроля и регулирования.

Оптоэлектронные датчики - приборы, преобразующие внешние физические воздействия: температуру, давление, влажность, ускорение, магнитное поле и другие, - в электрические сигналы. Действие этих приборов основано на различных принципах. К датчикам относятся формирователи сигналов изображения и оптопары с открытым оптическим каналом. Особенно интенсивное развитие этого направления связано с появлением волоконно-оптических датчиков, в которых внешние воздействия изменяют характеристики оптического сигнала, распространяющегося по волокну.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) - устройства и системы, содержащие гибкий волоконно-оптический световод (в виде кабеля), сочлененный с излучателем на одном (передающем) конце и с фотоприемником на другом (приемном).

Физическую основу ВОЛС определяют процессы распространения оптических сигналов по волоконному световоду, а также светогенерационные и фотоэлектрические явления в излучателе и приёмнике. Индикаторы - электрически управляемые приборы для систем визуального отображения информации. Они находят широчайшее применение, начиная от электронных часов и микрокалькуляторов, табло и приборных щитов и кончая дисплеями в системе "человек - ЭВМ". Физическую основу приборов индикаторного типа составляют разные виды электролюминесценции (для приборов с активным светящимся растром) и электрооптические явления (для приборов с пассивным светоотражающим растром).

В соответствии с классификацией изделий некогерентной оптоэлектроники ОЭП разделяются: по виду оптоэлектронного преобразования сигналов (принцип преобразования "электричество - свет" реализуется в излучающих приборах), уровню интеграции, функциональному применению и конструктивному исполнению. Каждая из выделенных групп ОЭП, по-видимому, будет в дальнейшем пополняться новыми приборами и устройствами.

Перечислим основные достоинства оптоэлектронных приборов:

- Высокая пропускная способность оптического канала. Частота колебаний на три – пять порядков выше, чем в освоенном радиотехническом диапазоне. Это значит, что во столько же раз возрастает и пропускная способность оптического канала передачи информации.

- Идеальная электрическая развязка входа и выхода. Использование в качестве носителя информации электрически нейтральных фотонов обуславливает бесконтактность оптической связи. Отсюда следуют идеальная электрическая развязка входа и выхода; однонаправленность потока информации и отсутствие обратной реакции приемника на источник; помехозащищенность оптических каналов связи; скрытность передачи информации по оптическому каналу связи.

Как недостатки можно выделить следующие особенности ОЭП:

• Малый коэффициент полезного действия. Коэффициент полезного действия преобразований вида  $E$  ('освещенность')  $> L$  (яркость) и  $L > E$  в лучших современных приборах (лазеры, светодиоды, p-i-n фотодиоды), как правило, не превышает 10...20%. Поэтому если в устройстве осуществляются такие преобразования лишь дважды (на входе и на выходе), как, например, в оптопарах или волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), то общий КПД падает до единиц процентов. Введение каждого дополнительного акта преобразования информационных сигналов из одной формы в другую ведет к уменьшению КПД еще на порядок или более. Малое значение КПД вызывает рост энергопотребления, что недопустимо из-за ограниченных возможностей источников питания; затрудняет миниатюризацию, поскольку практически не удается отвести выделяющуюся теплоту; снижает эффективность и надежность большинства оптоэлектронных приборов.

• Наличие разнородных материалов, применяемых в оптоэлектронных приборах и системах, обуславливает: малый общий КПД устройства из-за поглощения излучения в пассивных областях структур, отражения и рассеяния на оптических границах; снижение надежности из-за различия температурных коэффициентов расширения материалов; сложность общей герметизации устройства; технологическую сложность и высокую стоимость.

Литература: 1. стр.93., 2. стр.85

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое внутренний фотоэффект?
2. Дайте определение оптоэлектроники?
3. Что такое оптопара?
4. Какие характеристики и параметры используют для излучающих диодов?
5. Что относится к приемникам оптического излучения?

### **Тема 8: Интегральные микросхемы.**

**Цель:** Изучение особенностей микросхем, устройств интегральных микросхем, разновидностей интегральных микросхем.

#### **План:**

1. Общие сведения о микросхемах.
2. Полупроводниковые интегральные микросхемы.
3. Пленочные и гибридные интегральные микросхемы.

1. Интегральная схема (ИС) - микросистемное изделие (т.е. изделие с высокой степенью миниатюризации), выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое рассматривается как единое целое.

Элемент интегральной схемы - часть интегральной схемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента (резистора, диода, транзистора

и т. д.), причем эта часть выполнена нераздельно от других частей и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Компонент интегральной схемы в отличие от элемента может быть выделен как самостоятельное изделие с указанной выше точки зрения.

По конструктивно-технологическим признакам интегральные схемы обычно разделяют на:

- полупроводниковые;
- гибридные;
- пленочные.

В полупроводниковой схеме все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме или на поверхности полупроводника. В таких схемах нет компонентов. Это наиболее распространенная разновидность интегральных схем.

Интегральную схему называют гибридной, если она содержит компоненты и (или) отдельные кристаллы полупроводника.

В пленочных интегральных схемах отдельные элементы и межэлементные соединения выполняются на поверхности диэлектрика (обычно используется керамика). При этом применяются различные технологии нанесения пленок из соответствующих материалов.

Интегральные схемы подразделяют на аналоговые (операционные усилители, источники вторичного электропитания и др.) и цифровые (логические элементы, триггеры и т. п.).

Одним из признаков классификации ИС как физико-технологического и схемотехнического продукта является степень сложности.

Степень интеграции ИС - показатель степени сложности, который вычисляют по формуле  $K = \lg N$ , где  $K$  - коэффициент, определяющий степень интеграции, знамение которого округляют до ближайшего большего целого числа;  $N$  - число элементов ИС, под которым подразумевают часть ИС, реализующую функции какого-либо электрорадиоэлемента.

Интегральная микросхема  $K$ -й степени интеграции. Такой является ИС, содержащая от  $10^{K-1}$  до  $10^K$  элементов.

Малая интегральная микросхема (МИС) - ИС, содержащая до 100 элементов и (или) компонентов включительно.

Средняя интегральная микросхема (СИС) - ИС, содержащая выше 100, но не более 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 100, но не более 500 - для аналоговых ИС.

Большая интегральная микросхема (БИС) - ИС, содержащая выше 1000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС и свыше 500 - для аналоговых ИС.

Сверхбольшая интегральная микросхема (СБИС) - ИС, содержащая свыше 100 000 элементов и (или) компонентов для цифровых ИС с регулярной (однородной) структурой, свыше 50 000 - для цифровых ИС с нерегулярной структурой и свыше 10 000 - для аналоговых ИС.

Первые опыты по созданию полупроводниковых интегральных схем были осуществлены в 1953 г., а промышленное производство интегральных схем началось в 1959 г.

В 1966 г. был начат выпуск интегральных схем средней степени интеграции (число элементов в одном кристалле до 1000). В 1969 г. были созданы интегральные схемы большой степени интеграции (БИС), содержащие до 10 000 элементов в одном кристалле.

В 1971 г. были разработаны микропроцессоры, а в 1975 г. - интегральные схемы сверхбольшой степени интеграции (СБИС), содержащие более 10 000 элементов в одном кристалле. Микропроцессором называют построенное на одной или нескольких СБИС программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки информации и управление им. Микропроцессор является Центральным элементом микропроцессорной системы (микро-ЭВМ), в которую также входит память и устройства ввода/вывода (внешние Устройства).

Интегральные микросхемы выпускаются промышленностью в виде серий, включающих микросхемы, предназначенные для совместного использования в радиоэлектронной аппаратуре. Все микросхемы, входящие в одну серию, имеют один тип корпуса, одинаковые напряжения питания, ресурс, надежность, допустимые уровни воздействия.

При выборе микросхем для аппаратуры определенного типа необходимо руководствоваться не только функциональным назначением микросхемы, но и их характеристиками и параметрами, т. е. величинами, определяющими свойства микросхемы, режим и условия ее работы. Обычно это:

- функциональные параметры микросхемы, определяющие ее возможности;
- параметры рабочего режима, определяющие совокупность условий, необходимых для правильного функционирования микросхемы;
- эксплуатационные характеристики, определяющие уровни воздействий факторов окружающей среды (механических, климатических), не нарушающие нормального функционирования микросхемы в пределах гарантированного ресурса при заданной надежности;
- конструктивные параметры, характеризующие габаритные и присоединительные размеры.

Что касается эксплуатационных характеристик, то они являются общими для всех изделий электронной техники. Конкретные численные значения параметров и указания по применению приводятся в нормативно-технической документации на изделие и в справочниках. При решении вопроса о применении той или иной микросхемы в проектируемой аппаратуре необходимо исходить из ее параметров и указаний по применению, приведенных в данной документации.

2. Полупроводниковые интегральные микросхемы. Полупроводниковые интегральные микросхемы получили наибольшее распространение. У них все



элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

Для изготовления полупроводниковых микросхем используются кремниевые монокристаллические пластины диаметром 30-60 мм с толщиной 0,25-0,4 мм. Элементы (микросхемы) - биполярные и полевые транзисторы, диоды, резисторы и конденсаторы - формируют в полупроводниковой пластине методами, известными из технологии дискретных полупроводниковых приборов (селективная диффузия, эпитаксия и др.), но получившими в интегральной технологии дальнейшее развитие.. Межсоединения выполняют путем напыления узких проводящих дорожек алюминия на окисленную (т.е. электрически изолированную) поверхность кремния, имеющую окна в пленке окисла в тех местах, где должен осуществляться контакт дорожек с кремнием (в области эмиттера, базы, коллектора транзисторов и т.д.). Для соединения элементов с выводами микросхемы на проводящих дорожках создаются расширенные участки - контактные площадки. Методом напыления иногда изготавливают также резисторы и конденсаторы.

Основные части микросхемы даны на рисунке 8.1. Изготовление полупроводниковых микросхем осуществляется групповым методом, при котором на одной пластине 1 (см. рисунок 8.2) одновременно создается большое число (до 300-500) одинаковых функциональных структур (набор элементов и межсоединений). Одновременной обработке подвергается до 20 пластин. После выполнения всех операций по формированию элементов и межсоединений пластину разрезают на части 2, называемые кристаллами (интегральной микросхемы). Каждый кристалл содержит одну функциональную структуру. Его закрепляют на основании корпуса 3: контактные площадки кристалла соединяют с траверсами (выводами) корпуса с помощью тонких проводников; на основание надевается крышка корпуса 4, и корпус герметизируют для обеспечения защиты микросхемы от воздействия окружающей среды.

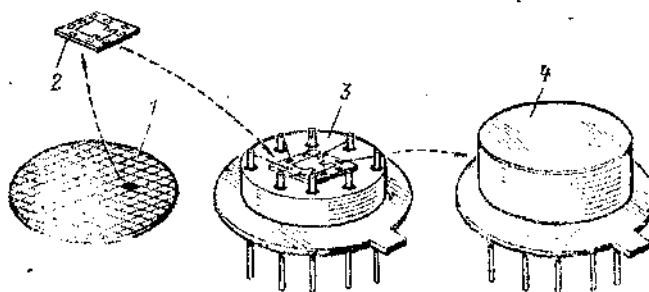


Рисунок 8.1

#### Основные части микросхемы

Рассмотрим теперь некоторые особенности элементов полупроводниковых микросхем, обусловленные необходимостью изоляции элементов от тела кристалла, обладающего заметной электрической проводимостью. Изоляция элементов осуществляется либо с помощью Дополнительного электронно-дырочного перехода, находящегося под

напряжением обратного смещения, либо с помощью тонкого слоя Диэлектрика, например двуокиси кремния. Первый способ сравнительно прост и дешев и поэтому является наиболее распространенным, но при этом токи утечки на тело кристалла оказываются не менее 10 нА, а емкость элемента по отношению к телу кристалла не менее 2 пФ. Второй способ более сложен и дорог, но обеспечивает снижение тока утечки в тысячи раз, а емкости - в десятки раз.

**Биполярные транзисторы.** Структура интегрального биполярного транзистора, изолированного электронно-дырочным переходом, показана на рис. 3.2. Электрод коллектора К расположен в интегральных транзисторах в приповерхностной части кристалла, там же, где находятся другие электроды - эмиттер Э и база Б. Чтобы в этих условиях обеспечить низкоомный путь для тока коллектора к электроду коллектора К, под область «коллектора» создают скрытый слой  $n^+$ , обладающий повышенной проводимостью. Изолирующий переход образуется вдоль линии, разделяющей область  $n$  коллектора и область  $n^+$  его скрытого слоя от областей  $p^+$  и  $p$  тела кристалла.

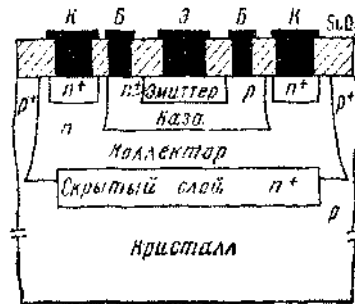


Рисунок 8.2

### Изготовление полупроводниковых микросхем

Транзисторы полупроводниковых микросхем в ряде случаев могут иметь несколько отдельных эмиттеров при общей для всех их базе и общем коллекторе. Такие транзисторы называются многоэмиттерными. Параметры интегрального биполярного транзистора определяются концентрационным профилем структуры, площадью переходов, электрофизическими свойствами материала. Максимальный ток коллектора может достигать 50 мА, коэффициент передачи тока базы от 20 до 50, обратные токи переходов - менее 10 нА, максимальное напряжение на коллекторе - 40 В, предельная рабочая частота - 1000 МГц.

3. Пленочные и гибридные интегральные микросхемы. Второй разновидностью микросхем являются пленочные (интегральные) микросхемы, подразделяемые на тонкопленочные и толстопленочные. Более совершенными и более распространенными являются тонкопленочные микросхемы. Они выполняются на диэлектрической подложке (из стекла, керамики), элементами их являются резисторы и конденсаторы. Иногда используют индуктивные элементы.

Резисторы изготавливают путем напыления на подложку 3 через трафарет тонкой пленки высокоомного материала (нихром, тантал) нужной

конфигурации (см. рисунок 8.3). Концы полученного резистивного элемента 1 соединяют ситленочными контактными площадками 2, выполняемыми из металла, обладающего высокой электропроводимостью (алюминий, медь, золото).

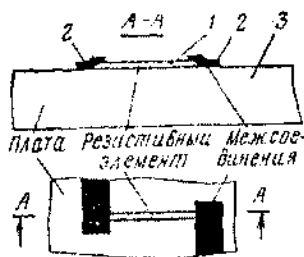


Рисунок 8.3.  
Интегральный пленочный резистор

Электрическое сопротивление тонкопленочных резисторов может быть от 10 Ом до 1 МОм в зависимости от толщины, ширины и длины резистивной полоски, а также удельного сопротивления материала. Отклонение сопротивления от номинального - 5-10%, применяя подгонку, можно получить отклонение менее 0,1%. Благодаря малой собственной индуктивности тонкопленочные резисторы имеют частотный диапазон до 1000 МГц.

Конденсаторы выполняют на диэлектрической подложке 1 путем последовательного напыления трех слоев: металл-диэлектрик-металл (см. рисунок 8.4). Металлические слои 3, образующие обкладки конденсатора, напыляют обычно из алюминия, в качестве диэлектрика 2 используют окись кремния, окись алюминия, боросиликатное стекло и др. Емкость такого конденсатора в зависимости от площади обкладок, толщины и диэлектрической проницаемости диэлектрика составляет от 100 до 500 пФ при рабочем напряжении до 60 В.



Рисунок 8.4  
Интегральный пленочный конденсатор

Индуктивные элементы могут быть выполнены в виде однослойных многовитковых спиралей, однако индуктивность их не превышает 20мкГ, поэтому подобные элементы находят малое применение в микросхемах.

На базе пленочной технологии до сих пор не удалось создать достаточно надежные транзисторы или другие усилительные элементы, поэтому пленочные микросхемы имеют ограниченное самостоятельное применение и большей частью составляют пассивную основу гибридных (интегральных) микросхем.

Гибридные микросхемы изготавливаются на диэлектрической подложке. Пассивные элементы Я, С, L межсоединения и контактные площадки выполняются методом пленочной технологии. Применяется групповой метод обработки, при котором на одну подложку наносится до 16-18 идентичных групп элементов и межсоединений, затем подложка разрезается на части - платы, каждая из которых содержит элементы и межсоединения одного функционального узла.

Транзисторы для гибридных микросхем изготавливают отдельно, поэтому их называют не элементами, а компонентами микросхемы. В целях экономии объема транзисторы применяют в бескорпусном оформлении, иногда в виде сборки. На рисунке 8.5 представлен монтаж бескорпусного транзистора в гибридной микросхеме. Защита бескорпусного транзистора от воздействия внешней среды осуществляется с помощью специального влагостойкого покрытия.

Транзистор 1 укрепляют на плате 4 термокомпрессионной сваркой шариковых 3 или балочных 5 выводов с контактными площадками 2 либо с помощью проволочных выводов.

Общий вид платы гибридной интегральной микросхемы показан на рисунке 8.6,а. На диэлектрическую подложку наносятся через трафарет резистивные полосы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  из высокоомного материала; затем через другой трафарет распылением металла, имеющего высокую электропроводность, наносятся нижняя обкладка О, конденсатора С, межсоединения и контактные площадки 1-5; далее через третий трафарет наносится пленка диэлектрика конденсатора Д; через четвертый трафарет наносится последний слой - верхняя обкладка конденсатора  $O_1$ . Транзистор Т приклеивается к подложке и проволочными выводами присоединяется к соответствующим контактными площадкам.

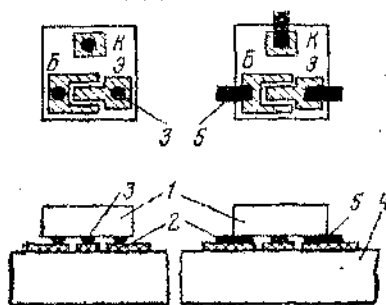


Рисунок 8.5  
Бескорпусный транзистор в гибридной микросхеме

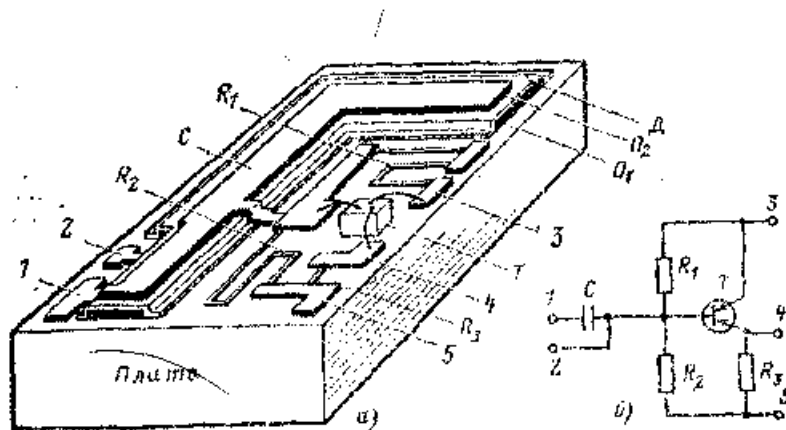


Рисунок 8.6

Общий вид платы гибридной интегральной микросхемы

На рисунке 8.6,б показана принципиальная схема рассмотренного устройства. Оно не является функционально завершенным, поскольку может быть использовано лишь при подключении к нему ряда внешних элементов. Такая функциональная незавершенность обычно возникает из-за трудностей выполнения некоторых элементов (например, катушек) в виде, пригодном для монтажа внутри микросхемы. Иногда микросхему специально делают функционально незавершенной, чтобы расширить возможности ее использования.

Рассмотренная простейшая микросхема имеет один компонент (транзистор) и четыре элемента (конденсатор и три резистора). Выпускаемые промышленностью гибридные интегральные микросхемы; во многих случаях являются значительно более сложными, число их компонентов и элементов может достигать нескольких сотен.

Гибридные микросхемы могут выполняться и на основе толстопленочной технологии, которая является более дешевой, но менее совершенной. Подложка для толстопленочной микросхемы, как правило, имеет размеры 16x10x1 мм или 10x10x1 мм и выполняется из высокоглиноземистой керамики. Элементами пассивной толстопленочной микросхемы являются резисторы и конденсаторы, их выполняют так же, как и межсоединения, путем нанесения на поверхность подложки через сетчатый трафарет специальных проводящих, резистивных и диэлектрических паст, подвергаемых затем термической обработке. Получаемые таким образом резисторы могут иметь сопротивление от 5 Ом до 70 кОм. Конденсаторы имеют емкость от 60 до 350 пФ. Компоненты толстопленочных гибридных микросхем - бескорпусные транзисторы и диоды, монтируются обычным способом.

### Контрольные вопросы:

1. Что называется интегральной схемой?
2. Что называется степенью интеграции ИС?

3. Дайте определение гибридной и пленочной ИС?
4. Что значит “запираемый тиристор”?
5. Чем отличается биполярный транзистор от интегрального?
6. Дайте определение интегральному МДП-транзистору?

Литература: 1.стр.33., 2. стр.74-75, стр.334.

**Тема 9:** Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы.

**Цель:** Изучение характеристик и параметров микросхем.

**План:**

1. Общая характеристика цифровых микросхем.
2. Параметры цифровых микросхем.
3. Аналоговые интегральные микросхемы.

1. Цифровые микросхемы предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной, например двоичной функции. Они применяются для построения цифровых вычислительных машин, а также цифровых узлов измерительных приборов, аппаратуры автоматического управления, связи и т. д.

По функциональному назначению цифровые микросхемы подразделяют на подгруппы: логические микросхемы, триггеры, элементу арифметических и дискретных устройств и др. Внутри каждой подгруппы по функциональному признаку микросхемы подразделяют на виды. Сведения о подгруппе и виде микросхемы содержатся в ее условного обозначении.

Большинство цифровых микросхем относится к потенциальным микросхемам: сигнал на их входе и выходе представляется высоким и низким уровнями напряжений. Этим двум состояниям сигнала ставятся в соответствие логические значения 1 и 0. В зависимости от кодирования состояний сигнала различают положительную и отрицательную логику. Логические операции, выполняемые микросхемами, обычно указываются для положительной логики. Длительность потенциального сигнала определяется сменой информации, например, длительность сигнала на выходе микросхемы определяется временным интервалом между двумя входными сигналами. Иногда применительно к потенциальным микросхемам говорят, что они управляются положительными или отрицательными импульсами. В таких случаях речь идет о том, что для изменения состояния микросхемы необходимо на заданное время изменить уровень входного сигнала с 1 на 0 (отрицательный импульс) либо с 0 на 1 (положительный импульс).

Цифровые микросхемы выпускаются сериями. В состав каждой серии входят микросхемы, имеющие единое конструктивно-технологическое исполнение, но относящиеся к различным подгруппам и видам. В серии может быть несколько микросхем одного вида, различающихся, например, числом входов или нагрузочной способностью. Чем шире функциональный состав серии, тем в большей степени она удовлетворит требованиям к

микроэлектронной аппаратуре в отношении компактности, надежности и экономичности, поскольку применение микросхем одной серии исключает необходимость в дополнительных, например согласующих, устройствах.

В некоторых сериях цифровых и аналоговых микросхем имеются микросхемы, которые могут выполнять различные функции. Такие микросхемы получили название многофункциональных схем. Цифровые многофункциональные схемы выполняют, как правило, логические функции. Такие микросхемы имеют различную структуру. Одни состоят из многих логических элементов, из которых путем внешней коммутации выводов можно получить требуемое устройство. Другие многофункциональные схемы представляют собой сложное логическое устройство, которое можно настраивать с помощью внешних сигналов на выполнение требуемой логической операции.

2. Параметры цифровых микросхем. Для удобства рассмотрения разделим параметры цифровых микросхем на статические и динамические. Статические параметры характеризуют микросхему в статическом режиме. К ним относятся:

- напряжение источника питания;
- входное и выходное напряжения логического нуля;
- входное и выходное напряжения логической единицы;
- входной и выходной токи логического нуля и логической единицы;
- коэффициент разветвления по выходу, определяющий число входов микросхем - нагрузок, которые можно одновременно подключить к выходу данной микросхемы; в этом смысле часто употребляют термин "нагрузочная способность" микросхемы;
- коэффициент объединения по входу, определяющий число входов микросхемы, по которым реализуется логическая функция;

• допустимое напряжение статической помехи, которое характеризует статическую помехоустойчивость микросхемы, т.е. ее способность противостоять воздействию мешающего сигнала, длительность которого значительно превосходит время переключения микросхемы. Такая помеха и названа статической. Напряжение допустимой статической помехи обычно определяется как разность выходного и входного напряжений, соответствующих уровню логической единицы либо уровню логического нуля.

• средняя потребляемая мощность. Средняя потребляемая мощность определяется выражением:  $P_{ном,ср} = (P_{ном}^0 + P_{ном}^1) / 2$ , где  $P_{пот}^0$ ,  $P_{пот}^1$  - потребляемая микросхемой мощность в состоянии логического 0 и 1 на выходе. Общепринятое усреднение потребляемой мощности оправдано тем, что обычно во время работы в составе цифрового устройства логические микросхемы половину времени находятся в открытом состоянии, а другую половину - в закрытом.

Потребляемая мощность тесно связана с быстродействием микросхемы (ее временем переключения или рабочей частотой переключения): чем

больше потребляемая мощность, тем с большей частотой может переключаться микросхема. Учитывая это, следует при расчетах реального энергопотребления цифрового устройства ориентироваться на мощность, потребляемую микросхемами в режиме переключения с заданной частотой.

Динамические параметры характеризуют свойства микросхемы в режиме переключения. В основном это временные параметры микросхемы:

- время перехода из состояния логического 0 в состояние логической 1;
- время задержки распространения сигнала при выключении микросхемы;
- время перехода из состояния логической 1 в состояние логического 0;
- « время задержки распространения сигнала при включении микросхемы;
- среднее время задержки распространения сигнала.

Среднее время задержки служит усредненным параметром быстродействия и определяется как полусумма задержек при выключении и при включении микросхемы. Этот параметр часто является основным при расчете рабочей частоты сложных логических устройств.

Среднее время задержки зависит от многих факторов: принципа построения логических элементов, наличия или отсутствия режима насыщения у входящих в схему транзисторов, величины переключающих токов и т.д. Кроме того, на среднее время задержки оказывают существенное влияние и условия работы микросхемы: температура окружающей среды, изменения питающих напряжений, емкость нагрузки и т.д.

К числу динамических параметров следует отнести также динамическую помехоустойчивость, характеризующую способность микросхемы противостоять воздействию импульсной помехи, длительность которой соизмерима со средним временем задержки передачи сигнала через микросхему. Количественно динамическая помехоустойчивость определяется амплитудой и длительностью импульса помехи. На рисунке 9.1 дана характеристика динамической помехоустойчивости логической микросхемы.

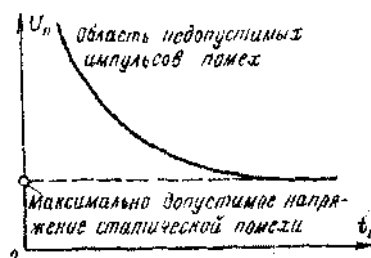


Рисунок 8.1

Характеристика динамической помехоустойчивости логической микросхемы

Эксплуатационные параметры характеризуют работоспособность интегральных микросхем в условиях воздействий окружающей среды. К ним относятся: диапазон рабочих температур, допустимые механические нагрузки (вибрация, удары, линейные ускорения), границы допустимого



изменения атмосферного давления, наибольшая влажность и некоторые другие.

3. Аналоговые интегральные микросхемы. Аналоговые интегральные микросхемы находят применение в аппаратуре связи, телевидения и телеуправления, в аналоговых вычислительных машинах, магнитофонах, в медицинском оборудовании, в измерительных приборах, системах контроля. Благодаря совершенствованию технологии и методов проектирования номенклатура интегральных микросхем постоянно расширяется. В настоящее время в интегральном исполнении реализуются самые различные аналоговые функциональные элементы и устройства. В большом количестве выпускаются интегральные микросхемы для различных по назначению и функциональным возможностям генераторов, детекторов, модуляторов, преобразователей, усилителей, коммутаторов, ключей, фильтров, вторичных источников питания, схем селекции и сравнения, а также многофункциональные микросхемы и микросхемы, представляющие собой наборы элементов.

Аналоговые микросхемы, так же как и цифровые, выпускаются сериями. Серии существенно различаются по областям преимущественного применения, функциональному составу и количеству входящих в них интегральных микросхем.

Большая группа серий предназначена в основном для создания приемопередающей аппаратуры радиосвязи, выпускаются серии для телевизионной аппаратуры, магнитофонов, электрофонов и линейно-импульсных устройств. Все эти серии условно можно подразделить на функционально полные и функционально неполные. Функционально полные состоят из широкого круга специализированных микросхем, относящихся к разным функциональным подгруппам. Каждая из этих серий позволяет создать практически все реализуемые сейчас в микроэлектронном исполнении узлы таких устройств, как радиоприемники, телевизоры и подобные им по сложности.

Функционально неполные серии состоят из небольшого числа специализированных микросхем. Они предназначены в основном для создания отдельных трактов аналоговой аппаратуры.

Кроме серий специализированного назначения промышленность выпускает широкий круг серий, микросхемы которых одинаково успешно могут применяться для создания отдельных узлов; аппаратуры различных классов.

Для характеристики микросхем различных серий и для сравнительной оценки микросхем, относящихся к одному виду, в основном используют совокупности функциональных параметров. Однако в инженерной и радиолобительской практике важную роль играют и такие факторы, как напряжение питания, конструктивное оформление, масса, предельно допустимые условия эксплуатации микросхем. В ряде случаев именно они имеют решающее значение при выборе элементной базы для конкретной аппаратуры.

Для питания микросхем используется широкая градация номинальных значений напряжений положительной и отрицательной полярности. При этом допуск в большинстве случаев составляет +10%. Различие по величине питающих напряжений во многих практических случаях затрудняет или делает невозможным использование в одном устройстве микросхем различных серий, даже если они отвечают требованиям по основным функциональным параметрам.

Разнообразно конструктивное оформление микросхем различных серий. Они отличаются по форме, размерам, материалу корпусов, количеству и типу выводов, массе и т.д.

По предельно допустимым условиям эксплуатации микросхемы Разных серий существенно отличаются друг от друга.

Имеется существенное различие по температурному диапазону применения аналоговых микросхем. Очевидно, что микросхемы, характеризуемые нижним пределом температурного диапазона -10 или -25°C, не могут быть рекомендованы для применения в аппаратуре, предназначенной для работы в зимних условиях. В отдельных случаях серьезные ограничения накладывает верхняя граница +50 или +55°C. По устойчивости к механическим нагрузкам микросхемы различных серий близки друг к другу. Большинство микросхем выдерживает вибрационную нагрузку в диапазоне от 1 до 600 Гц с ускорением 10g.

### **Контрольные вопросы:**

1. Назначение цифровых микросхем?
2. Какие параметры микросхем относятся к статическим?
3. Перечислите динамические параметры?
4. Где применяются аналоговые интегральные микросхемы?
5. Что характеризуют эксплуатационные параметры интегральных микросхем?

**Литература:** 1. стр.34-35., 2. стр.78-84;стр.342.

### **Тема 10. Усилители.**

**Цель:** Изучение построения схем усилителей, основных параметров и характеристик, классификации усилителей.

#### **План:**

1. Определение и классификация усилителей.
2. Схема подключения усилителя.
3. Основные параметры и характеристики усилителей.

1 Усилитель - это электронное устройство (четырёхполюсник), управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке.

2 Мощность, требующаяся для управления, как правило, намного

меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а формы входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузке) сигналов совпадают (см. рисунок 10.1).

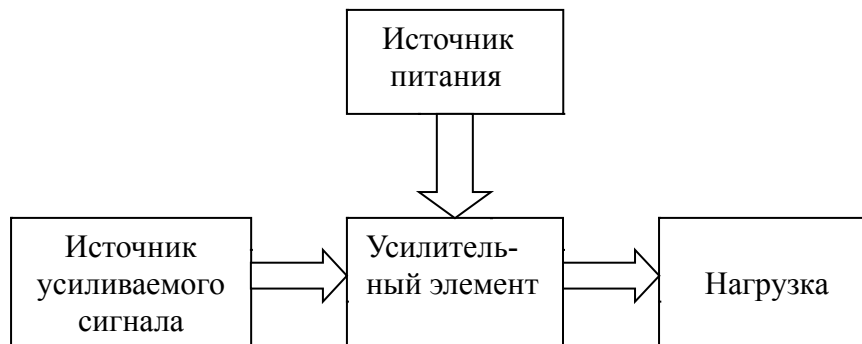


Рисунок 10.1  
Схема подключения усилителя

Усилители используются для компенсации потерь при передаче информационных сигналов на большие расстояния, для обеспечения работы регистрирующих устройств, для создания нормальных условий восприятия информации человеком и т. д. Например, для обеспечения работы громкоговорителей мультимедиа-компьютера, как правило, требуется усилитель, так как поступающие от источников звуковые сигналы имеют недостаточную мощность.

По усиливаемой электрической величине различают *усилители мощности, напряжения и тока*. Коэффициент передачи усилителя по одному из указанных электрических параметров, как правило, много больше единицы. По другим параметрам коэффициент передачи усилителя может быть меньше единицы. Однако у всех усилителей по определению коэффициент передачи по мощности должен быть больше единицы. Поэтому, например, повышающий трансформатор, у которого коэффициент передачи по напряжению может быть больше единицы, к усилителям не относится.

По диапазону усиливаемых частот усилители делятся на *усилители постоянного тока (УПТ), усилители низкой (звуковой) частоты (УНЧ), усилители высокой частоты (УВЧ) и СВЧ-усилители (сверхвысокой частоты)*. В компьютерах, например, УПТ используются в источниках питания, УНЧ в звуковых платах, УВЧ и СВЧ-усилители - в приемниках радио- и телевизионных сигналов.

По используемым элементам различают усилители на транзисторах, микросхемах, электронных лампах и т.д. Ниже рассматриваются усилители только на транзисторах и микросхемах. Такие усилители широко используются в компьютерах.

По режимам работы различают *линейные и нелинейные усилители*. В линейных усилителях уровни входных и выходных сигналов малы, и поэтому все элементы усилителя при воздействии малых переменных: сигналов

характеризуются линейной зависимостью между токами и приложенными напряжениями. Если амплитуда сигнала велика, то линейная зависимость между токами и напряжениями нарушается - возникает нелинейный режим работы усилителя.

Усилители классифицируют также по числу каскадов, по назначению, по полосе усиливаемых частот, по характеру усиливаемого сигнала и т. д.

### 3 Основные параметры и характеристики усилителей.

Основным количественным параметром усилителя является коэффициент усиления. В зависимости от функционального назначения усилителя различают коэффициенты усиления по напряжению  $K_u$ , току  $K_i$  или мощности  $K_p$ :

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}, \quad K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}, \quad K_p = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}, \quad (10.1)$$

где  $U_{вх}$ ,  $I_{вх}$  – амплитудные значения напряжения и тока на входе усилителя;

$U_{вых}$ ,  $I_{вых}$  – амплитудные значения переменных составляющих соответственно напряжения и тока на выходе;

$P_{вх}$ ,  $P_{вых}$  – мощности соответственно на входе и выходе.

Коэффициенты усиления часто, выражают в логарифмических единицах - децибелах:  $K_u(\text{дБ}) = 20 \lg K_u$ ;  $K_i(\text{дБ}) = 20 \lg K_i$ ;  $K_p(\text{дБ}) = 10 \lg K_p$ .

Усилитель может состоять из одного или нескольких каскадов.

Для многокаскадных усилителей коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных его каскадов:  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$ . Если коэффициенты усиления каскадов выражены в децибелах, то общий коэффициент усиления равен сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов:  $K(\text{дБ}) = K_1(\text{дБ}) + K_2(\text{дБ}) + \dots + K_n(\text{дБ})$ .

Обычно в усилителе содержатся реактивные элементы, в том числе ,и «паразитные», а используемые усилительные элементы обладают инерционностью. В силу этого коэффициент усиления является комплексной величиной:

$$K_U = K_U \cdot e^{j\varphi}, \quad (10.2)$$

где  $K_u = U_{вых}/U_{вх}$  - модуль коэффициента усиления;  $\varphi$  -сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями с амплитудами  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$ .

Помимо коэффициента усиления, важным количественным показателем является коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}, \quad (10.3)$$

где  $P_{вх}$  - мощность, потребляемая усилителем от источника питания.

Роль этого показателя особенно возрастает для мощных, как правило, выходных каскадов усилителя.

К количественным показателям усилителя относятся также входное  $R_{вх}$  и выходное  $R_{вых}$  сопротивления усилителя:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}; \quad R_{\text{вых}} = \frac{|\Delta U_{\text{вых}}|}{|\Delta I_{\text{вых}}|}; \quad (10.4)$$

где  $\Delta U_{\text{вых}}$  и  $\Delta I_{\text{вых}}$  - приращение амплитудных значений напряжения и тока на выходе усилителя.

Рассмотрим теперь основные характеристики усилителей.

Амплитудная характеристика усилителя - это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) от амплитуды входного напряжения (тока) (см. рисунок 10.2).

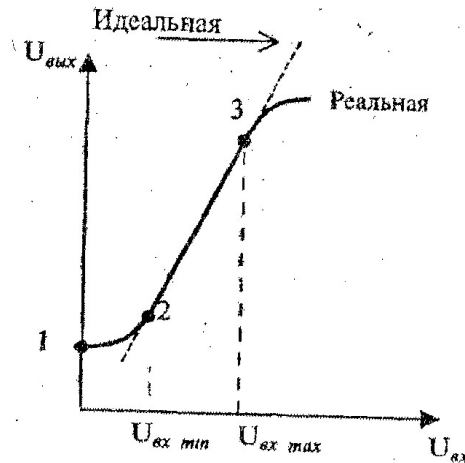


Рисунок 10.2

Амплитудная характеристика усилителя

Точка 1 соответствует напряжению шумов, измеряемому при  $U_{\text{вх}}=0$ , точка 2 - минимальному входному напряжению, при котором на выходе усилителя можно различать сигнал на фоне шумов. Участок 2-3 - это рабочий участок, на котором сохраняется пропорциональность между входным и выходным напряжениями усилителя. После точки 3 наблюдаются нелинейные искажения входного сигнала. Степень нелинейных искажений оценивается коэффициентом нелинейных искажений (или коэффициентом гармоник):

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}}{U_{1m}} \quad (10.5)$$

где  $U_{1m}$ ,  $U_{2m}$ ,  $U_{3m}$ ,  $U_{nm}$  - амплитуды 1-й (основной), 2-й, 3-й и n-й гармоник выходного напряжения соответственно.

Величина  $D = U_{\text{вх.max}} / U_{\text{вх.min}}$  характеризует динамический диапазон усилителя.

Рассмотрим пример возникновения нелинейных искажений (см. рисунок 10.3).

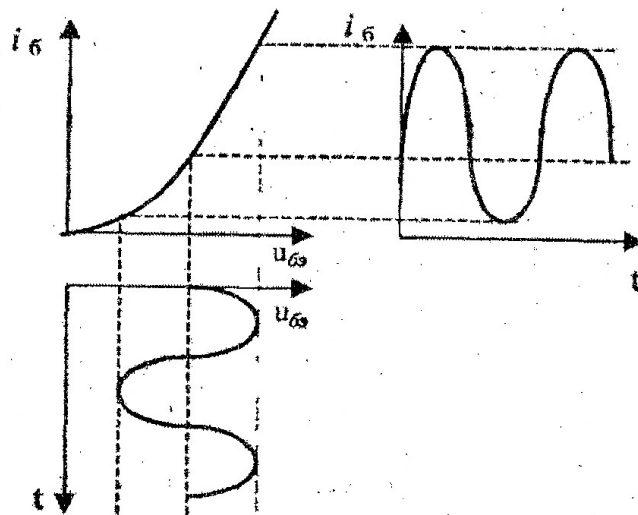


Рисунок 10.3

Возникновение нелинейных искажений

При подаче на базу транзистора относительно эмиттера напряжения синусоидальной формы  $u_{бэ}$  в силу нелинейности входной характеристики транзистора  $i_бэ = f(u_{бэ})$  входной ток транзистора  $i_бэ$  (а следовательно, и выходной - ток коллектора) отличен от синусоиды, т.е. в нем появляется ряд высших гармоник. Из приведенного примера видно, что нелинейные искажения зависят от амплитуды входного сигнала и положения рабочей точки транзистора и не связаны с частотой входного сигнала, т.е. для уменьшения искажения формы выходного сигнала входной должен быть низкоуровневым. Поэтому в многокаскадных усилителях нелинейные искажения в основном появляются в оконечных каскадах, на вход которых поступают сигналы с большой амплитудой.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) усилителя - это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты.

Типовая АЧХ приведена на рисунке 10.4. Частоты  $f_n$  и  $f_v$  называются нижней и верхней граничными частотами, а их разность  $(f_v - f_n)$  - полосой пропускания усилителя.

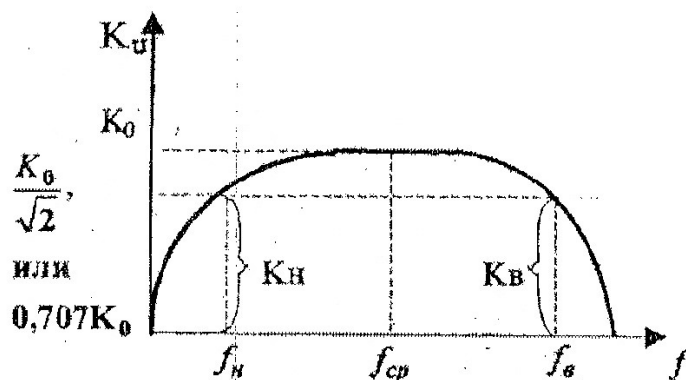


Рисунок 10.4

АЧХ усилителя

При усилении гармонического сигнала достаточно малой амплитуды искажения формы усиленного сигнала не возникает. При усилении сложного входного сигнала, содержащего ряд гармоник, эти гармоники усиливаются усилителем неодинаково, так как реактивные сопротивления схемы по-разному зависят от частоты, и в результате это приводит к искажению формы усиленного сигнала. Такие искажения называются частотными и характеризуются коэффициентом частотных искажений:  $M = K_0 / K_1$ , где  $K_1$  - модуль коэффициента усиления усилителя на заданной частоте,  $K_0$  - модуль коэффициента усиления усилителя на частоте среза.

Коэффициенты частотных искажений  $M_H = K_0 / K_H$  и  $M_B = K_0 / K_B$  называются соответственно коэффициентами искажений на нижней и верхней граничных частотах.

АЧХ может быть построена и в логарифмическом масштабе. В этом случае она называется ЛАЧХ (см. рисунок 10.5), коэффициент усиления усилителя выражают в децибелах, а по оси абсцисс откладывают частоты через декаду (интервал частот между  $10f$  и  $f$ ). Обычно в качестве точек отсчета выбирают частоты, соответствующие  $f = 10^n$ . Кривые ЛАЧХ имеют в каждой частотной области определенный наклон. Его измеряют в децибелах на декаду.

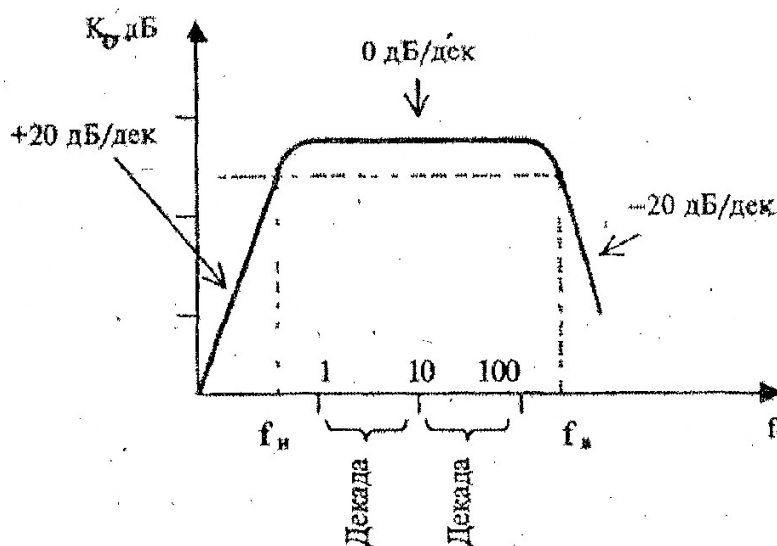


Рисунок 10.5  
ЛАЧХ усилителя.

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) усилителя - это зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты.

Типовая ФЧХ приведена на рисунке 10.6. Она также может быть построена в логарифмическом масштабе. В области средних частот дополнительные фазовые искажения минимальны. ФЧХ позволяет оценить фазовые искажения, возникающие в усилителях по тем же причинам, что и частотные.

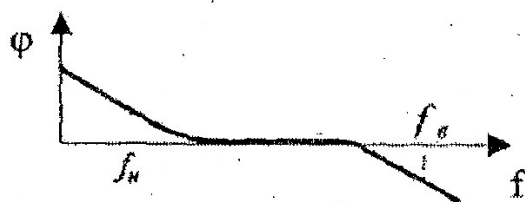


Рисунок 10.6  
ФЧХ усилителя

Пример возникновения фазовых искажений приведен на рисунок 10.7, где показано усиление входного сигнала, состоящего из двух гармоник (пунктир), которые при усилении претерпевают неодинаковые фазовые сдвиги.

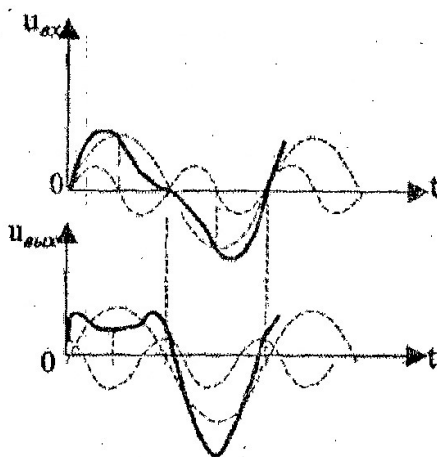


Рисунок 10.7  
Возникновение фазовых искажений

Переходная характеристика усилителя - это зависимость выходного сигнала (тока, напряжения) от времени при скачкообразном входном воздействии (см. рисунок 10.8).

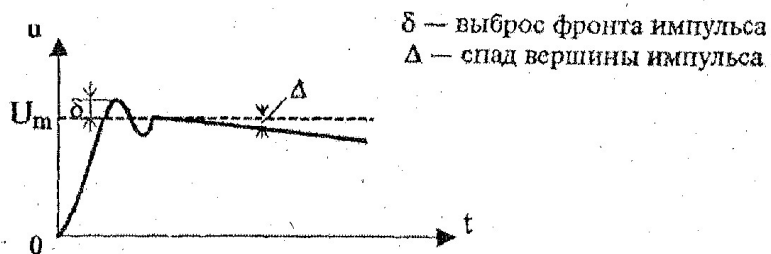


Рисунок 10.8  
Переходная характеристика усилителя

Частотная, фазовая и переходная характеристики усилителя однозначно связаны друг с другом. Области верхних частот соответствует переходная характеристика в области малых значений времени, области нижних частот, - переходная характеристика в области больших значений времени.



### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое усилитель?
2. В чем заключается принцип усиления?
3. Что такое коэффициент усиления?
4. Что такое частотные характеристики?
5. Дайте определение полосе пропускания частот усилителя?

**Литература:** 1 стр.120-128., 2. стр.121-130.

### **Тема 11. Операционный усилитель.**

**Цель:** Изучение построения схемы ОУ, свойств электрических параметров идеального ОУ.

#### **План:**

1. Определение ОУ.
2. Интегральные схемы ОУ.
3. Реальный ОУ.
4. Идеальный ОУ.
5. Применение операционных усилителей

В настоящее время одним из основных видов усилительных устройств, применяемых в различных устройствах техники, является операционный усилитель.

1. Операционный усилитель (**ОУ**) — усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, выполненный по интегральной технологии.

Первоначально эти усилители предназначались для выполнения различных математических операций - сложения, умножения, интегрирования и т. д. При создании ОУ на дискретных элементах они оказывались очень громоздкими и дорогостоящими, так как для выполнения заданных операций требовались сложнейшие схемы, состоящие из десятков усилительных элементов, диодов, и поэтому они применялись довольно редко.

2. Внедрение интегральных схем (ИС) позволило построить на их базе ОУ, обладающие теми же функциональными возможностями, но имеющие меньшие габаритные размеры и большую надежность в эксплуатации.

3. Реальный операционный усилитель - это усилитель с большим коэффициентом усиления и непосредственными связями, применяемый в основном в качестве активного элемента в схемах с обратными связями.

Помимо выполнения с помощью ОУ традиционных математических операций, таких, как суммирование, вычитание, интегрирование и дифференцирование, на ОУ реализуют всевозможные усилители постоянного тока, усилители переменного напряжения и тока, логарифмические усилители, видеоусилители, усилители-ограничители, повторители напряжений (буферные схемы), активные фильтры, модуляторы (амплитудные, частотные, широтно-импульсные) и демодуляторы,

аналоговые умножители и делители, функциональные преобразователи, компараторы, генераторы гармонических колебаний, генераторы колебаний прямоугольной и треугольной формы, ждущие мультивибраторы, формирователи напряжений, схемы задержек, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи и др.

Условное обозначение ОУ (см. рисунок 11.1, слева) — треугольник, у которого слева показаны два входа, а справа — 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, при подаче сигнала на этот вход на выходе его полярность меняется на противоположную. Для экономии места в дальнейшем мы будем называть инвертирующий вход И-входом, а неинвертирующий — Н-входом. В современной литературе используется обозначение ОУ в виде прямоугольника (см. рисунок 11.1, справа).

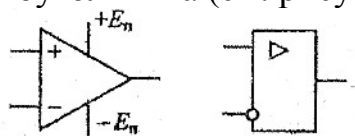


Рисунок 11.1  
Условное обозначение ОУ

Разность напряжений на входах ОУ ( $e_+ - e_-$ ) называют дифференциальным (разностным) входным сигналом ОУ, а полусумму этих напряжений  $(e_+ + e_-)/2$  - синфазным входным сигналом. Синфазный входной сигнал определяет ту составляющую входных сигналов, которая является общей для обоих входов 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.

*Коэффициент усиления ОУ (К)* — отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению дифференциального входного напряжения при работе усилителя на линейном участке характеристики:

$$K = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}, \text{ где } \Delta U_{\text{вх}} = e_+ - e_- .$$

Интегральные ОУ имеют коэффициент усиления, лежащий в диапазоне  $10^3 - 10^6$ .

4. Идеальный ОУ. Операционный усилитель тем точнее будет реализовать заданную для него конкретной схемой включения аналоговую функцию, чем больше его параметры будут приближаться к параметрам идеального операционного усилителя.

Идеальный ОУ характеризуется следующими свойствами электрических параметров:

- Коэффициент усиления напряжения со стороны неинвертирующего входа положителен.

- Коэффициент усиления напряжения со стороны инвертирующего входа отрицателен.

- В частном случае один из входных зажимов усилителя может быть заземлен.

- Входное сопротивление  $R_{вх}$  неограниченно велико.

- Выходное сопротивление  $R_{вых}$  равно нулю.

- Коэффициент усиления напряжения  $K$  неограниченно велик.

- Ширина полосы пропускания бесконечно велика.

-  $U_{вых} = -K \cdot U_{вх}$ ,

-  $U_{вых} = 0$ , если  $U_{вх.нелин} = U_{вх.лин}$

- Характеристики прибора не зависят от температуры.

- Ненасыщенное состояние восстанавливается мгновенно.

- Выходная характеристика ( $U_{вых} = f(U_{вх})$ ) линейна и симметрична относительно нулевого уровня.

Обобщая, можно дать следующее определение идеального операционного усилителя.

Идеальный операционный усилитель — операционный усилитель, имеющий коэффициент усиления  $K = \infty$ , входное сопротивление  $R_{вх} = \infty$ , выходное сопротивление  $R_{вых} = 0$ .

Достижение этих показателей и есть основное требование к ОУ.

Реально идеальных ОУ не существует; например, создать усилитель с бесконечной полосой пропускания даже при конечном коэффициенте усиления невозможно.

Большое  $R_{вх}$  свидетельствует о том, что на входе ОУ практически не потребляется энергии от источника сигнала и ко входу ОУ может быть подключен источник сигнала с любым внутренним сопротивлением. Очень малое сопротивление  $R_{вых}$  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.

5. Применение операционных усилителей. Операционный усилитель является устройством, которое можно широко использовать в электронной аппаратуре, в частности в аппаратуре связи. ОУ относится к линейным усилителям. Верхний предел напряжения  $U_{вых}$  ограничен величиной постоянного напряжения источника питания  $E$ . При больших значениях  $U_{вх}$ , при которых  $U_{вых} = KU_{вх} \approx E$ , произойдет ограничение выходного сигнала по максимуму и возникнут нелинейные искажения. При напряжениях  $U$ , меньших  $E$  на 1...2 В, возникает опасность попадания в режим насыщения транзисторов ОУ, что также приведет к ограничению и нелинейным искажениям.

При напряжениях  $E = \pm(10...15)$ В и коэффициенте усиления ОУ десятки и сотни тысяч на вход ОУ подаются напряжения в сотни и даже десятки микровольт.

Таким образом, большой коэффициент усиления ОУ обеспечивает их большую чувствительность, т. е. способность усиливать очень слабые сигналы. Большой коэффициент усиления способствует усилению наряду с полезными сигналами различных помех на входе — шумов, наводок фона переменного тока. Однако, несмотря на это, в ОУ стремятся получить как можно больший коэффициент усиления.

Главное достоинство ОУ с большим коэффициентом усиления — возможность применения ООС. Благодаря большому коэффициенту усиления на основе ОУ можно строить схемы, свойства которых будут практически определяться особенностями схем ООС.

Практические схемы ОУ строят на основе охвата ОУ внешними цепями ООС, которые определяют возможности применения данной схемы в целом — усилителем, генератором, множителем и т. д. Все это обусловило большое разнообразие схем, созданных на основе ОУ. Рассмотрим ряд схем усилителей, которые находят широкое применение.

### **Контрольные вопросы:**

1. Условное обозначение ОУ?
2. Дайте определение реального ОУ?
3. Перечислите различные усилители построенные на базе ОУ?
4. Дайте определение идеального ОУ?
5. Какими свойствами электрических параметров характеризуется идеальный ОУ?

**Литература: 1. стр.233., 2. стр.251-257.**

### **Тема 12. Импульсные и цифровые устройства.**

**Цель:** изучение параметров импульсного сигнала и назначение параметров, схем электронного ключа.

#### **План:**

1. Определение импульсных устройств.
2. Определение и формы импульсов.
3. Параметры периодически повторяющихся импульсов.
4. Определение электронного ключа.
5. Схемы и режимы работы.

1. Импульсными называются устройства, предназначенные для генерирования, формирования, преобразования и неискаженной передачи импульсных сигналов (импульсов).

Электрическим импульсом называют напряжение или ток, отличающиеся от нуля или постоянного значения только в течение короткого промежутка времени, который меньше или сравним с длительностью установления процессов в электрической системе, в которой они действуют. В случае следующих друг за другом импульсов обычно предполагается, что

интервал между ними существенно превышает длительность процессов установления. В противном случае этот сигнал называют *несинусоидальным* напряжением или током. Такое определение не отличается строгостью, ибо переходные процессы протекают, как известно, бесконечно долго. Однако оно позволяет отличать импульсы в общепринятом смысле от напряжения сложной формы.

2. Все многообразие электрических импульсов принято подразделять на *видеоимпульсы* (см. рисунок 12.1, а) и *радиоимпульсы* (см. рисунок 12.1, б). Связь между этими двумя типами импульсов состоит в том, что огибающая радиоимпульса представляет собой видеоимпульс. Частота синусоиды, которой заполнен видеоимпульс, называется *частотой заполнения*. Обычно рассматривают только видеоимпульсы и их преобразования, так как радиоимпульсы, с помощью которых ведут передачу информации в радиотехнических трактах, после детектирования становятся видеоимпульсами. Поэтому в дальнейшем рассматриваются только видеоимпульсы, которые названы просто импульсами.

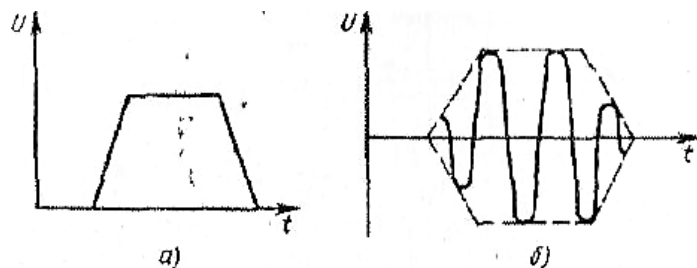


Рисунок 12.1  
Видеоимпульс (а) и радиоимпульс (б)

Формы импульсов, используемых в импульсных устройствах различного назначения, разнообразны. Наиболее распространенные из них приведены на рисунке 12.2.

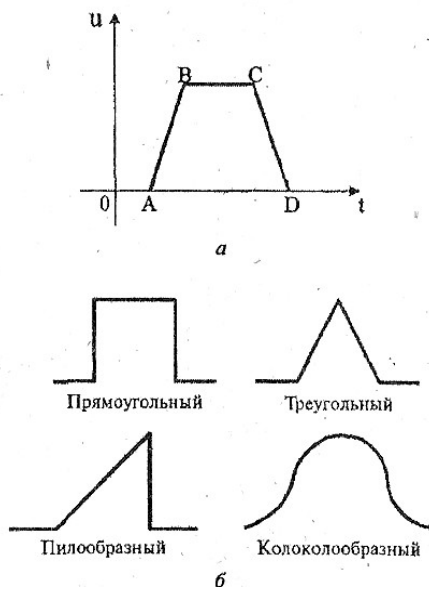


Рисунок 12.2  
Формы идеализированных импульсов

Обратимся для примера к идеализированному импульсу, который называют трапецеидальным (см. рисунок 12.2, а). Участок импульса АВ называют *фронтом*, участок ВС — *вершиной*, участок CD — *срезом*; отрезок времени AD — *основанием*. Иногда участок АВ называют *передним фронтом*, а участок CD — *задним фронтом*.

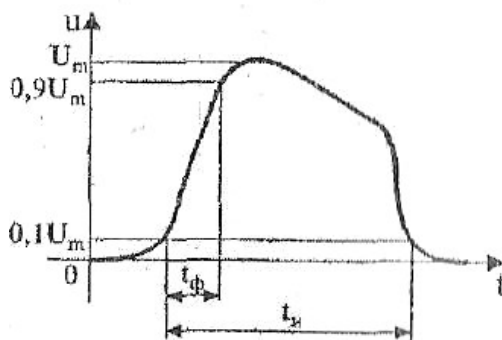
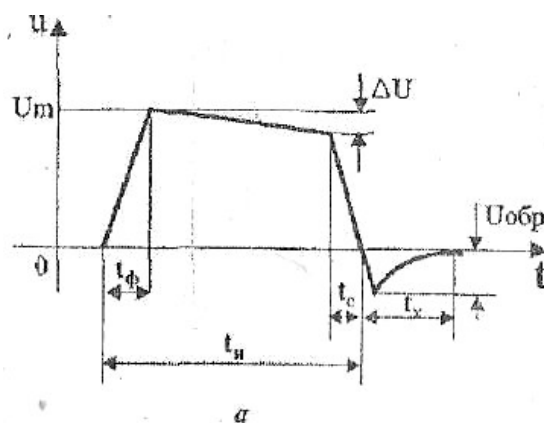


Рисунок 12.3

Более сложный идеализированный импульс

На рисунке 12.2, б приведены другие идеализированные импульсы характерных форм и даны их названия.

Обратимся к идеализированному, но более сложному по форме импульсу (см. рисунок 12.3, а).

Участок импульса, соответствующий отрицательному напряжению, называется *хвостом* импульса, или *обратным выбросом*.

Для величин, указанных на рисунке, обычно используют следующие названия:

- $t_u$  - длительность импульса;
- $t_\phi$  - длительность фронта импульса;
- $t_c$  - длительность среза импульса;
- $t_x$  - длительность хвоста импульса;
- $U_m$  - амплитуда (высота) импульса;
- $\Delta U$  - спад вершины импульса;
- $\Delta U_{обр}$  - амплитуда обратного выброса.

При определении параметров реальных импульсов обычно нет возможности однозначно разделить импульс на характерные участки,

поэтому в этих случаях параметры импульсов определяют исходя из тех или иных соглашений. Например, длительности импульса и фронта импульса часто определяют так, как это показано на рисунке 12.3, б.

Обратимся к периодически повторяющимся импульсам (см. рисунок 12.4).

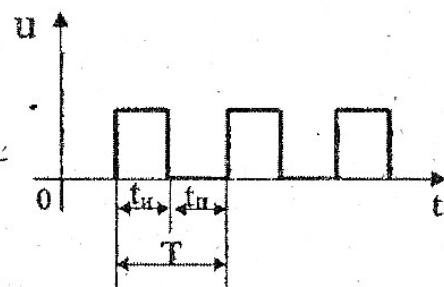


Рисунок 12.4

### Периодически повторяющиеся импульсы

В этом случае используются следующие параметры:

$T$  — период повторения импульсов;

$f = \frac{1}{T}$  — частота повторения импульсов;

$t_n$  — длительность паузы;

$Q = \frac{T}{t_n}$  — скважность импульсов;

$K_3 = \frac{1}{Q} = \frac{t_n}{T}$  — коэффициент заполнения.

4. Электронный ключ (ЭК) — это устройство, предназначенное для коммутации электрических сигналов.

Электронный ключ является основным элементом устройств цифровой электроники и очень многих устройств силовой электроники. Параметры и характеристики ЭК в очень большой степени, определяют свойства соответствующих схем. Качественное улучшение параметров и характеристик ЭК приводит к радикальному улучшению электронных устройств и часто сопровождается пересмотром используемых схемотехнических решений.

Знание основных особенностей ЭК является обязательным условием при разработке импульсных силовых устройств. Эти знания оказывают существенную помощь и при конструировании устройств цифровой электроники.

5. В зависимости от характера коммутируемого сигнала электронные ключи разделяют на цифровые и аналоговые. *Цифровые* ключи коммутируют напряжения или токи источника питания и обеспечивают получение двух уровней сигнала на выходе. Один уровень соответствует открытому состоянию ключа, другой — закрытому, *Аналоговые* ключи обеспечивают подключение или отключение источников аналоговых информационных сигналов, имеющих произвольную форму напряжений. Причем

характеристики измерительных устройств, в которых они используются, во многом зависят от качества передачи сигнала аналоговым ключом и помех в цепи, появляющихся при его коммутации.

При анализе работы ключей и их практическом использовании необходимо знать следующие параметры: 1) *быстродействие*, характеризуемое временем переключения ключа; 2) *пороговое напряжение*, в окрестностях которого сопротивление ключа резко меняется; 3) *чувствительность*, под которой обычно понимают минимальный перепад сигнала, в результате действия которого происходит бесперебойное переключение ключа; 4) *помехоустойчивость*, характеризуемую чувствительностью электронного ключа к воздействиям импульсов помехи; 5) *падение напряжения на ключе* в открытом состоянии и токи утечек - в закрытом; 6) *сопротивлению ключа* в открытом и закрытом состояниях.

В информационных маломощных устройствах ЭК выполняют на полупроводниковых диодах, а также на биполярных и полевых транзисторах. Ключи на биполярных транзисторах. *Транзисторные ключи* (ТК) являются одним из наиболее распространенных элементов импульсных устройств. На их основе создаются триггеры, мультивибраторы, коммутаторы, блокинг-генераторы и т. д.

Транзисторный ключ по своей схеме подобен транзисторному усилителю с ОЭ. Однако по выполняемым функциям и соответственно режимам работы активного элемента он существенно отличается от усилительного каскада,

В зависимости от целевого назначения ТК и особенностей его работы схема ТК может несколько видоизменяться. Но, несмотря на это, в основе всех модификаций лежит изображенная на рисунке 12.5, а транзисторная ключевая схема.

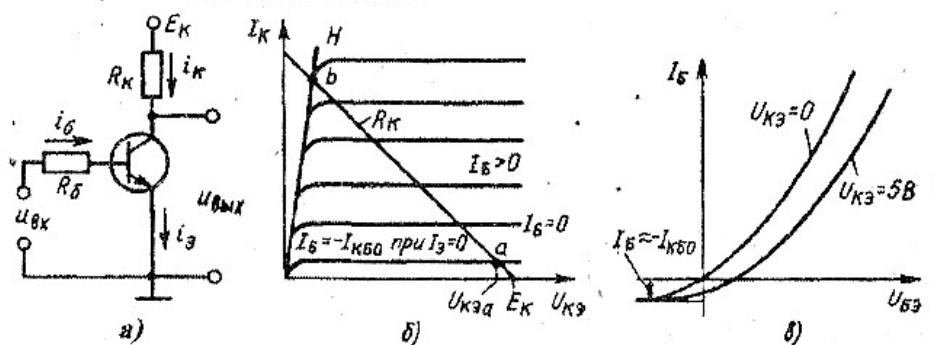


Рисунок 12.5

Схема простейшего ключа (а), его выходные (б) и входные характеристики (в)

В ТК транзисторы работают в нескольких качественно различных режимах, которые характеризуются полярностями напряжений на переходах транзистора. Принято различать следующие режимы работы ключа: *режим отсечки*; *нормальный активный*; *инверсный активный*; *режим насыщения*.



ТК выполняет функции быстродействующего ключа и имеет два основных состояния: разомкнутое, которому соответствует режим отсечки транзистора (транзистор заперт), и замкнутое, которое характеризуется режимом насыщения транзистора или режимом, близким к нему. В течение процесса переключения транзистор работает в активном режиме. Процессы в ключевом каскаде носят нелинейный характер.

На основе рассмотренного простейшего ключа можно создавать ключевую цепь (см. рисунок 12.6, а), которая будет коммутировать аналоговые, в том числе и разнополярные, сигналы.

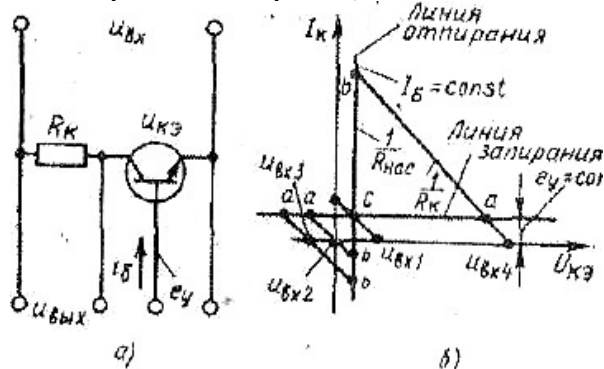


Рисунок 12.6

Схема ключа, коммутирующего аналоговые сигналы (а), и его выходные характеристики (б) при нормальном включении транзистора

Роль источника напряжения выполняет коммутируемое напряжение  $U_{вх}$ . Для того, чтобы переходы транзистора оставались запертыми при любых изменениях полярности и значения  $U_{вх}$ , необходимо, чтобы при подаче запирающего напряжения управления  $e_y$  выполнялось условие:

$$|e_y| > |U_{вх, \max}| \quad (12.1)$$

Пусть ключ, изображенный на рисунке 12.6, а, заперт по цепи базы управляющим напряжением -  $e_y$ . Тогда при всех значениях напряжения, при которых  $|U_{кэ}| < |e_y|$ , в выходной цепи протекает ток, близкий к  $I_{кб0}$ , и характеристика  $I_k(U_{кэ})$  идет почти горизонтально (рисунок 12.6, б). Назовем линию, по которой перемещается точка а, *линией запирания*.

При изменении полярности напряжения  $e$  транзистор откроется. Пусть ток в цепи базы  $i_b = I_B = \text{const}$  и  $I_B > I_{Б \text{ нас}}$ . Тогда падение напряжения на транзисторе мало и характеристика  $I_k(U_{кэ})$  идет почти вертикально. Назовем эту линию *линией отпирания*.

В идеальном аналоговом ключе линий отпирания и запирания, совпадают с осями координат. В транзисторном ключе эти линии имеют небольшой наклон, а их точка пересечения не совпадает с началом координат. В итоге при конечном сигнале  $U_{вх1}$  получается нулевое напряжение на выходе, а при нулевом сигнале  $U_{вх2}$  - соответственно конечное выходное напряжение.

Таким образом, транзисторному ключу свойственны два вида погрешностей: сдвига и наклона. Влияние этих погрешностей уменьшается с увеличением входного сигнала. Если  $|U_{вх}| \gg U_{вх1}$ , то общая погрешность

невелика и, как видно из выходных характеристик, имеет разный знак в зависимости от полярности входного сигнала.

**Контрольные вопросы:**

1. Объясните различие между видеоимпульсом и радиоимпульсом?
2. Как называются участки трапецеидального импульса?
3. Перечислите параметры периодически повторяющихся импульсов?
4. Объясните работу электронного ключа на транзисторах?
5. Назовите режимы работы электронного ключа.

**Литература:** 1. стр.318;346., 2. стр.238; 251

**Тема 13** Основные логические операции и их схемная реализация

**Цель:** Изучение классов логических элементов и их электронных схем, работы RS-триггера.

**План:**

1. Базовые логические элементы.
2. Классы логических элементов.
3. Определение и назначение триггера.
2. Схема простейшего RS-триггера.

1. Базовые логические элементы — это схемы, содержащие электронные ключи и выполняющие основные логические операции. Базовые логические элементы составляют основу для проектирования сложных цифровых устройств, выполняющих различные логические функции. Из алгебры логики известно, что сложные логические функции можно выразить через совокупность конечного числа *базисных логических функций*. Такие совокупности образуют:

- базисные логические функции НЕ (инверсия), И (конъюнкция), ИЛИ (дизъюнкция);
- логические функции НЕ, И;
- логические функции НЕ, ИЛИ и др.

Основные логические функции реализуются в базовых логических элементах.

Таблица 13.1

Основные логические функции

НЕ		И			ИЛИ		
X	Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	0	1	0	1	0	1
		1	0	0	0	1	1
		0	0	0	1	1	1

Базовые логические элементы могут изготавливаться в виде отдельных интегральных микросхем. Условные обозначения и таблицы истинности (таблицы состояний) наиболее часто используемых базовых элементов НЕ, И, ИЛИ приведены в таблице 13.1.

2. В зависимости от применяемых элементов и схемотехники выделяются следующие классы логических элементов (так называемые логики):

- резисторно-транзисторная логика (РТЛ);
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
- транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа p (p-МДП);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа n (n-МДП);
- логика на основе комплементарных ключей на МДП-транзисторах (КМДП, ШОП);
- интегральная инжекционная логика  $I^2L$ ;
- логика на основе полупроводника из арсенида галлия GaAs.

В настоящее время наиболее широко используются следующие логики: ТТЛ, ТТЛШ, КМОП, ЭСЛ. Устарела и практически не используется РТЛ. Для разрабатываемых в настоящее время устройств можно рекомендовать использовать КМОП-логику, а также логику на основе GaAs.

Логические элементы и другие цифровые электронные устройства выпускаются в составе серий микросхем. Серия микросхем — это совокупность микросхем, характеризуемых общими технологическими и схемотехническими решениями, а также уровнями электрических сигналов и напряжения питания.

Приведем примеры серии микросхем: ТТЛ — К155, КМ155, К133, КМ133; ТТЛШ - К530, КР531, КМ531, КР1531, 533, К555, КМ555, 1533, КР1533; ЭСЛ - К500, К1500; КМОП - 564, К561, 1564, КР1554; GaAs -К6500.

Каждая серия микросхем, несмотря на то, что она обычно содержит самые разнообразные цифровые устройства, характеризуется некоторым набором параметров, дающих достаточно подробное представление об этой серии. При определении этих параметров ориентируются именно на логические элементы — простейшие устройства серии микросхем. В соответствии с этим говорят о параметрах не серии микросхем, а о параметрах логических элементов данной серии.

### 3. Определение и назначение триггера

Триггер — это устройство с двумя устойчивыми состояниями — логический ноль и логическая единица, которое может переходить из одного состояния в другое под воздействием входных сигналов. Эти состояния триггера при бесперебойном питании и при отсутствии существенных помех и наводок могут сохраняться сколь угодно долго. Основное назначение триггера — хранение двоичной информации. Например, в персональных компьютерах на триггерах собрана кэш-память первого и второго уровня.

Триггер, в отличие от комбинационных схем, относится к новому виду цифровых устройств — *цифровым автоматам*. Цифровые автоматы, кроме комбинационных схем, содержат элементы памяти. Если выходные сигналы цифрового автомата зависят как от входных сигналов, так и от состояния запоминающего устройства, то такие автоматы называют *автоматами Мили*. Если выходные сигналы определяются только состояниями запоминающего устройства, то получим *автомат Мура*. Триггер в соответствии с этой классификацией относят к автоматам Мура.

Различают несколько разновидностей триггеров; RS-триггер, D-триггер, JK-триггер, T-триггер. Если для изменения состояния триггера используется синхронизирующий сигнал, то триггер называется *синхронным* (синхронизируемым). Если синхронизирующие сигналы не используются, то триггер называется *асинхронным*.

4. Схема простейшего *асинхронного RS-триггера* приведена на рисунке 13.1. В триггере использованы схемы ИЛИ-НЕ (стрелка Пирса) с перекрестными обратными связями. На рисунке введены следующие обозначения:  $R$  - вход установки триггера в 0,  $S$  - вход установки триггера в 1,  $Q'$  - прямой выход триггера;  $\bar{Q}$  - вспомогательный (инверсный) выход триггера, сигнал на котором инвертирован относительно прямого выхода. Отметим, что такие же обозначения используются для наименования сигналов на соответствующих контактах триггера.

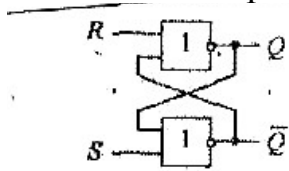


Рисунок 13.1  
Схема RS-триггера

Рассмотрим работу RS-триггера. Пусть в нулевой момент времени при нулевых сигналах на входах  $R$  и  $S$  на триггер подано напряжение питания. Однако на выходах триггера в этот момент времени оба выходных сигнала будут равны нулю:  $Q = \bar{Q} = 0$ . Мгновенно эти сигналы увеличиться не могут, так как в реальных схемах всегда имеются паразитные емкости, а напряжение на конденсаторе скачкообразно измениться не может.

Из свойств элемента ИЛИ-НЕ следует, что при нулевых сигналах на его входах напряжение на его выходе должно возрасти до значения логической единицы. На практике, из-за не идентичности двух элементов ИЛИ-НЕ на одном из выходов:  $Q$  или  $\bar{Q}$ , напряжение возрастает быстрее. Пусть более быстро напряжение возрастает на выходе  $Q$ . Это напряжение поступает на второй логический элемент и начинает уменьшать напряжение на его выходе  $\bar{Q}$ , устремляя его к нулю. В свою очередь уменьшающееся напряжение на выходе  $\bar{Q}$ , попадая на первый логический элемент, еще больше ускоряет увеличение напряжения на выходе  $Q$ . Таким образом, благодаря

положительной обратной связи быстро устанавливается единичное состояние триггера:  $Q=1, \bar{Q}=0$ .

Подавая на вход R логическую единицу при  $S=0$  и используя свойства схемы ИЛИ-НЕ, получим:  $Q=0; \bar{Q}=1$ . Так производится операция установки триггера в нулевое состояние. Если после этого сигнал на входе R сделать равным 0, то новое состояние триггера сохраняется. При подаче единицы на вход S и при  $R=0$  триггер устанавливается в единичное состояние:  $Q=1$ .

Если  $R=S=1$ , то на обоих выходах  $Q$  и  $\bar{Q}$  возникают нули, что противоречит определению выходов триггера. Такая комбинация управляющих сигналов запрещена (отметим, что после этого работоспособность триггера не теряется).

Таблица состояний RS-триггера приведена на рисунке 13.2.

R	S	Q
0	0	хранение
1	0	0
0	1	1
1	1	запрещено

Рисунок 13.2

Таблица состояний RS-триггера

При хранении состояние триггера в данный момент времени определяется его состоянием в предыдущий момент времени:

$Q(n)=Q(n-1)$ , где n - номер временного отсчета. Условное обозначение RS-триггера приведено на рисунке 13.3.

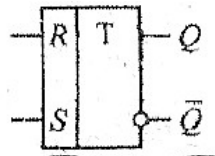


Рисунок 13.3

Условное обозначение RS-триггера

### Контрольные вопросы:

1. Назовите основные логические функции?
2. Дайте определение серии микросхем?
3. Что такое триггер?
4. Объясните работу триггера?
5. Дайте схему RS-триггера на элементах «ИЛИ-НЕ».

**Литература:** 1. стр.417., 2. стр.322-325;270.

## Тема 14. Преобразовательные устройства.

**Цель:** изучение устройства, структурных и принципиальных электрических схем, основных параметров выпрямителей, сглаживающих фильтров, стабилизаторов.

### План:

1. Вторичные источники питания. Общие положения.
2. Выпрямители. Схемы и параметры.
3. Сглаживающие фильтры. Схемы и параметры.
4. Стабилизаторы. Основные параметры.

1. Вторичные источники питания - устройства, предназначенные для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электронных и других устройств. Предполагается, что вторичные источники в свою очередь получают энергию от первичных источников питания, вырабатывающих электричество — от генераторов, аккумуляторов и т. д. Питая электронные устройства непосредственно от первичных источников обычно нельзя.

Вторичные источники питания являются одними из наиболее важных устройств электроники. Например, часто надежность того или иного устройства электроники существенно зависит от того, насколько надежен его вторичный источник питания. Общепринято вторичные источники называть источниками питания.

Рассмотрим типичные структурные схемы источников питания, получающих энергию от промышленной сети с частотой 50 Гц.

Рассмотрим вначале источник питания без преобразователя частоты, структурная схема которого представлена на рисунке 14.1.

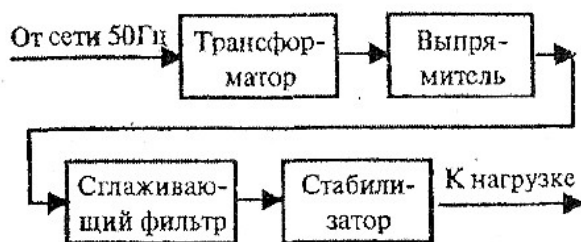


Рисунок 14.1

Структурная схема источника питания без преобразователя частоты

Трансформатор предназначен для гальванической развязки питающей сети и нагрузки и изменения уровня переменного напряжения. Обычно трансформатор является понижающим.

**Выпрямитель** - устройство, которое преобразует переменное напряжение в напряжение одной полярности (пульсирующее). **Сглаживающий фильтр** - устройство, которое уменьшает пульсации напряжения на выходе выпрямителя. **Стабилизатор** - устройство, которое уменьшает изменения напряжения на нагрузке (стабилизирует напряжение), вызванные изменением напряжения сети и изменением тока, потребляемого нагрузкой.

Напряжение в сети обычно может изменяться в диапазоне +15...-20% от номинального значения.

Рассмотренный источник питания является источником питания без преобразования частоты. Такие источники питания ранее использовались широко, однако в последнее время вместо них все чаще используют источники с преобразованием частоты. Причиной этого является то, что в источниках без преобразования частоты вес и габариты трансформатора, работающего на частоте 50 Гц, а также сглаживающего фильтра оказываются довольно большими. Тем не менее, рассматриваемые источники питания используются и в настоящее время.

Рассмотрим источник питания с преобразователем частоты (см. рисунок 14.2).



Рисунок 14.2

Структурная схема источника питания с преобразователем частоты

В этих источниках напряжение от сети подается непосредственно на выпрямитель 1. На выходе сглаживающего фильтра 1 создается постоянное напряжение, которое вновь преобразуется в переменное с помощью *инвертора*. Полученное переменное напряжение имеет частоту, значительно превышающую 50 Гц (обычно используют частоты в десятки килогерц), затем напряжение передается через трансформатор, выпрямляется и фильтруется. Так как трансформатор в этой схеме работает на повышенной частоте, то его вес и габариты, а также вес и габариты сглаживающего фильтра 2 оказываются очень незначительными. Как и в предыдущей схеме, основная роль трансформатора состоит в гальванической развязке сети и нагрузки. Инвертор, трансформатор и выпрямитель 2 образуют *конвертор* — устройство для изменения уровня постоянного напряжения.

Необходимо отметить, что в такой схеме инвертор выполняет роль стабилизатора напряжения. В качестве активных приборов в инверторе используются транзисторы (биполярные или полевые). Иногда применяются тиристоры. В любом случае активные приборы работают в ключевом режиме (например, транзистор или включен и находится в режиме насыщения, или выключен и находится в режиме отсечки), поэтому источники питания с преобразованием частоты называют также импульсными. Однако следует иметь в виду, что и в источниках без преобразования частоты могут

использоваться импульсные стабилизаторы, в которых транзисторы работают в ключевом режиме.

Рассматриваемые источники питания широко используются в современных устройствах электроники, в частности в компьютерах. Они обладают, как правило, значительно лучшими технико-экономическими показателями в сравнении с рассмотренными выше источниками без преобразования частоты.

Перейдем теперь к рассмотрению отдельных элементов структурных схем источников питания.

2. Выпрямители. В маломощных источниках питания (до нескольких сотен ватт) обычно используют *однофазные* выпрямители. В мощных источниках' целесообразно применять *трехфазные* выпрямители.

Выпрямители имеют следующие основные параметры:

а) среднее значение выходного напряжения  $u_{вых}$ :

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{вых} dt, \quad (14.1)$$

где  $T$  — период напряжения сети (для промышленной сети - 20 мс);

б) среднее значение выходного тока  $i_{вых}$ :

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{вых} dt, \quad (14.2)$$

в) коэффициент пульсаций выходного напряжения:

$$\varepsilon = \frac{U_m}{U_{cp}}, \quad (14.3)$$

где  $U_m$ , — амплитуда низшей (основной) гармоники выходного напряжения.

Часто коэффициент пульсаций измеряют в процентах. Обозначим его через  $\varepsilon$  %:

$$\varepsilon \% = \frac{U_m}{U_{cp}} \cdot 100\% \quad (14.4)$$

Указанные параметры являются наиболее важными при использовании выпрямителя.

При проектировании выпрямителя широко применяются также следующие параметры, характеризующие его внутренние особенности:

а) действующее значение  $U_{вх}$  входного напряжения выпрямителя;

б) максимальное обратное напряжение  $U_{обр. макс}$  на отдельном диоде или тиристоре (т.е. на вентиле). Это напряжение принято выражать через напряжение  $U_{cp}$ ;

в) среднее значение  $I_{д.ср}$  тока отдельного вентиля;

г) максимальное (амплитудное) значение  $I_{д.макс}$  тока отдельного вентиля.

Токи  $I_{д.ср}$  и  $I_{д.макс}$ , принято выражать через  $I_{ср}$ . Значение  $U_{обр. макс}$  используется для выбора вентиля по напряжению. Значения  $I_{д.ср}$  и  $I_{д.макс}$  используются для выбора вентиля по току. Здесь следует иметь в виду, что вследствие малой тепловой инерционности полупроводникового вентиля он



может выйти из строя даже в том случае, когда его средний ток  $I_{д.ср}$  мал, но велик максимальный ток  $I_{д.макс}$ .

3. Сглаживающие фильтры Выпрямленное напряжение имеет существенные пульсации, поэтому широко используют *сглаживающие фильтры* - устройства, уменьшающие эти пульсации. Важнейшим параметром сглаживающего фильтра является коэффициент сглаживания  $S$ . По определению  $S = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$ , причем  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  определяют как коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра соответственно.

Для емкостного фильтра, у которого вход и выход фактически совпадают, под  $\varepsilon_1$  понимают коэффициент пульсаций до подключения фильтра, а под  $\varepsilon_2$  — коэффициент пульсаций после его подключения. Коэффициент сглаживания показывает, во сколько раз фильтр уменьшает пульсации. На выходе фильтра напряжение оказывается хорошо сглаженным, а коэффициент пульсаций может иметь значения в диапазоне 0,001 ... 0,00003.

Простейшим фильтром является емкостной фильтр (С-фильтр). Рассмотрим его работу на примере однофазного однополупериодного выпрямителя (см. рисунок 14.3). Емкостной фильтр подключают параллельно нагрузке (см. рисунок 14.3, а).

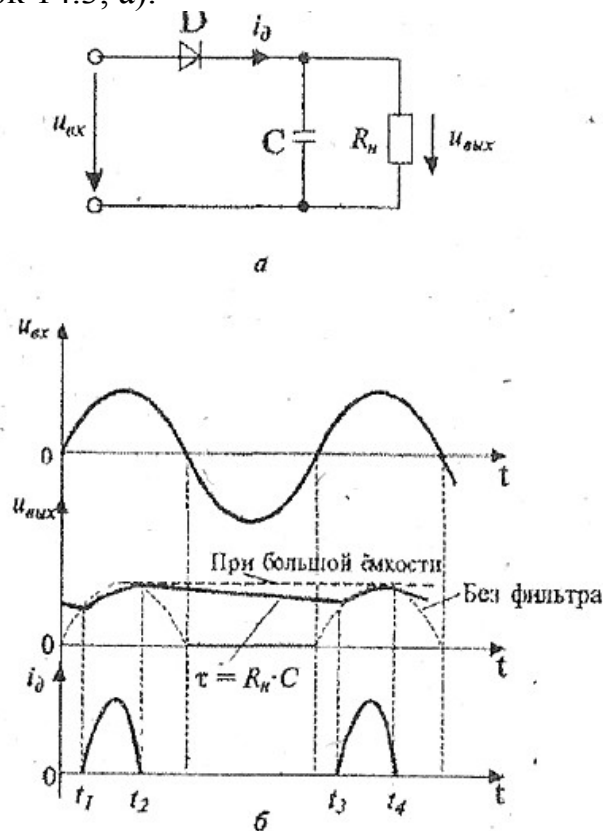


Рисунок 14.3

### Применение емкостного фильтра

На отрезке времени  $t_1...t_2$  диод открыт, и конденсатор заряжается (см. рисунок 14.3, б). На отрезке  $t_2...t_3$  диод закрыт, источник входного напряжения отключен от конденсатора и нагрузки. Разряд конденсатора

характеризуется экспонентой с постоянной времени  $\phi = R_H \cdot C$ . Ток через диод протекает только часть полупериода (отрезок  $t_1...t_2$ ). Чем короче отрезок  $t_1...t_2$ , тем больше амплитуда тока диода при заданном среднем токе нагрузки. Если емкость  $C$  очень велика, то отрезок  $t_1...t_2$  оказывается очень малым, а амплитуда тока диода очень большой, и диод может выйти из строя. Такой фильтр широко используется в маломощных выпрямителях; в мощных выпрямителях он используется редко, так как режим работы диода и соответствующих электрических цепей (к примеру, обмоток трансформатора) достаточно тяжел.

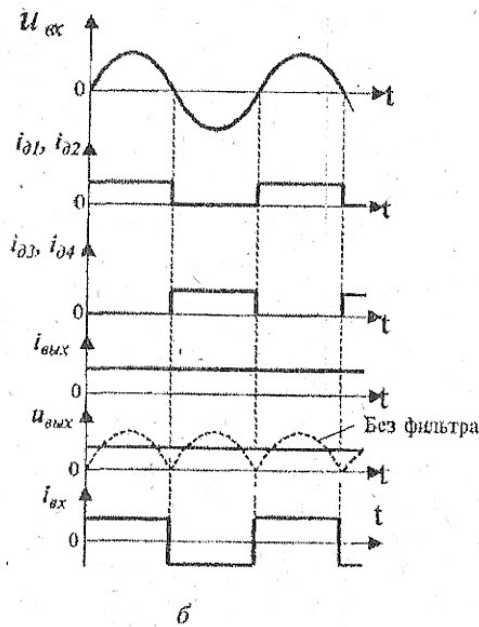
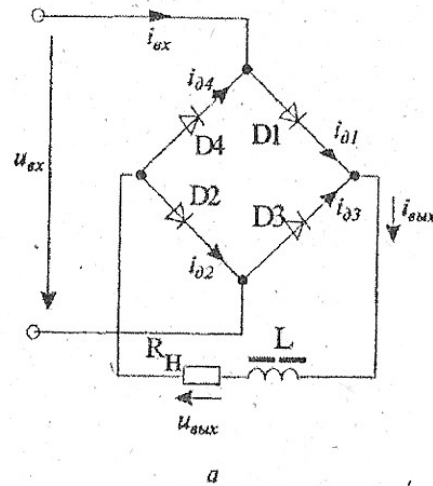


Рисунок 14.4

### Применение индуктивного фильтра

В качестве фильтра можно использовать и индуктивность, Легко доказать, что индуктивный фильтр (L-фильтр) практически не дает полезного эффекта в однофазном однополупериодном выпрямителе. Рассмотрим работу индуктивного фильтра на примере однофазного мостового выпрямителя. Индуктивный фильтр включают последовательно с нагрузкой (рис. 14.4, а).

Часто используют катушку индуктивности (реактор) на магнитном сердечнике с зазором.

Предположим, что постоянная времени  $\tau$ , определяемая выражением  $\tau = L/R_H$ , достаточно велика (как это обычно бывает на практике). Тогда ток нагрузки оказывается практически постоянным (рис 14.4, в). Такой фильтр широко используется в выпрямителях, особенно мощных. Режим работы диодов (и соответствующих электрических цепей) не является тяжелым.

На практике используют также следующие типы фильтров (рис. 14.5): индуктивно-емкостной или Г-образный LC-фильтр (а), Г-образный RC-фильтр (б), П-образный LC-фильтр (в), П-образный RC-фильтр (г).

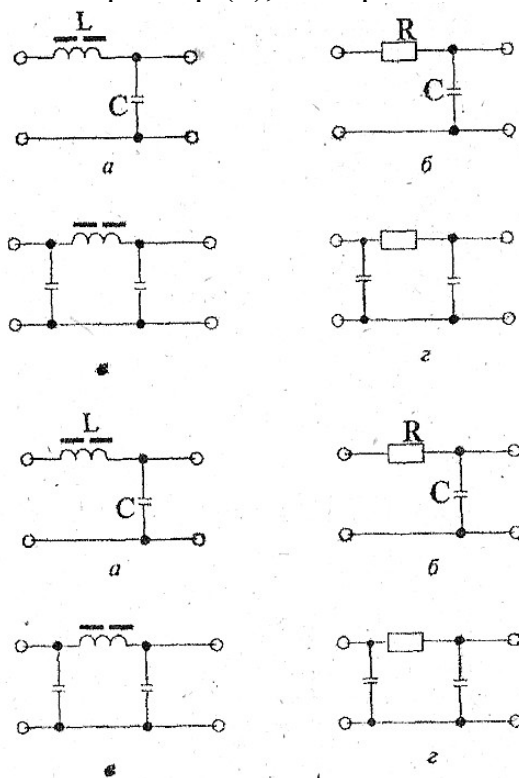


Рисунок 14.5

Типы сглаживающих фильтров

Обычно Г- и П-образные RC-фильтры применяются только маломощных схемах, так как они потребляют значительную доли энергии. На практике применяют и другие, более сложные фильтры.

Рассмотрим внешние характеристики выпрямителей с фильтрами. *Внешняя характеристика* — это зависимость среднего значения выходного напряжения (напряжения на нагрузке) от среднего значения выходного тока (тока нагрузки).

Рассмотрим типичные внешние характеристики (см. рисунок 14.6), которые получают, изменяя сопротивление нагрузки, подключенное к выходу фильтра.

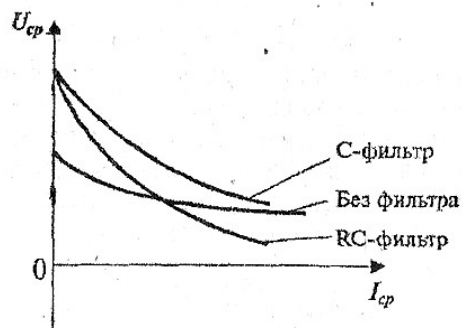


Рисунок 14.6

### Внешние характеристики сглаживающих фильтров

Наклон внешней характеристики при том или ином токе  $I_{cp}$  характеризуют выходным сопротивлением  $R_{вых}$ , которое определяется выражением:  $R_{вых} = \left| \frac{dU_{cp}}{dI_{cp}} \right|$ ,  $I_{cp}$  — заданный.

Чем меньше величина  $R_{вых}$ , тем меньше выходное напряжение зависит от выходного тока, что обычно и требуется.

Как следует из рисунка 14.6, выпрямитель с RC-фильтром характеризуется повышенным выходным сопротивлением. Здесь отрицательную роль играет резистор фильтра.

4. Стабилизаторы напряжения. Важнейшими параметрами стабилизатора напряжения являются коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ , выходное сопротивление  $R_{вых}$ , и коэффициент полезного действия  $\eta_{ст}$ .

Коэффициент стабилизации определяют из выражения:

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta u_{вх}}{u_{вх}}}{\frac{\Delta u_{вых}}{u_{вых}}}, \quad (14.5)$$

где  $u_{вх}$ ,  $u_{вых}$  — постоянные напряжения соответственно на входе и выходе стабилизатора;

$\Delta u_{вх}$  — изменение напряжения  $u_{вх}$ .

$\Delta u_{вых}$  — изменение напряжения  $u_{вых}$ , соответствующее изменению напряжения  $\Delta u_{вх}$ .

Таким образом, коэффициент стабилизации — это отношение относительного изменения напряжения на входе к соответствующему относительному изменению напряжения на выходе стабилизатора. Чем больше коэффициент стабилизации, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении входного. У простейших стабилизаторов величина  $K_{ст}$  составляет единицы, а у более сложных — сотни и тысячи.

Выходное сопротивление стабилизатора определяется выражением:

$$R_{вых} = \left| \frac{\Delta u_{вых}}{\Delta i_{вых}} \right|, \quad (14.6)$$

где  $\Delta u_{вых}$  — изменение постоянного напряжения на выходе стабилизатора;

$\Delta i_{\text{вых}}$  - изменение постоянного выходного тока стабилизатора, которое вызвало изменение выходного напряжения.

Выходное сопротивление стабилизатора является величиной, аналогичной выходному сопротивлению выпрямителя с фильтром. Чем меньше выходное сопротивление, тем меньше изменяется выходное напряжение при изменении тока нагрузки. У простейших стабилизаторов величина  $R_{\text{вых}}$  составляет единицы Ом, а у более совершенных — сотые и тысячные доли Ома. Необходимо отметить, что стабилизатор напряжения обычно резко уменьшает пульсации напряжения.

*Коэффициент полезного действия стабилизатора  $\eta_{\text{см}}$*  — это отношение мощности, отдаваемой в нагрузку  $P_{\text{н}}$ , к мощности, потребляемой от входного источника напряжения  $P_{\text{вх}}$ :

$$\eta_{\text{см}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (14.7)$$

Традиционно стабилизаторы разделяют на параметрические и компенсационные.

### **Контрольные вопросы:**

1. Чем отличаются выпрямители однофазный мостовой от выпрямителя со средней точкой?
2. Дайте определение угла управления управляемого выпрямителя?
3. Изобразите схемы (простейшие) фильтров LC, RS?
4. Что такое внешняя характеристика выпрямителя?
5. Перечислите основные параметры стабилизатора напряжения.

**Литература:** 2. стр.351;391.

**Тема 15.** Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи  
Цифро-аналоговые преобразователи.

**Цель:** изучение принципа построения схем ЦАП и АЦП, разъяснение основных параметров.

**План:**

1. Цифро-аналоговые преобразователи. Простейшая схема. Основные параметры.
2. Аналого-цифровые преобразователи.
3. Дискретизация аналогового сигнала по времени.
4. Квантование (дискретизации) сигнала по уровню.
5. Структурная схема АЦП со следящей связью.

1. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) - устройства, предназначенные для преобразования цифровых сигналов в аналоговые. Такое преобразование необходимо, например, при восстановлении аналогового сигнала, предварительно преобразованного в цифровой для передачи на большое расстояние или хранения (таким сигналом, в частности,

может быть звук). Другой пример использования такого преобразования — получение управляющего сигнала при цифровом управлении устройствами, режим работы которых определяется непосредственно аналоговым сигналом (что, в частности, имеет место при управлении двигателями).

К основным параметрам ЦАП относят разрешающую способность, время установления, погрешность нелинейности и др.

*Разрешающая способность* — величина, обратная максимальному числу шагов квантования выходного аналогового сигнала.

*Время установления*  $t_{уст}$  — интервал времени от подачи кода на вход до момента, когда выходной сигнал войдет в заданные пределы, определяемые погрешностью.

*Погрешность нелинейности* характеризует идентичность минимальных приращений выходного сигнала во всем диапазоне преобразования и определяется как наибольшее отклонение выходного сигнала от прямой пинии абсолютной точности, проведенной через нуль и точку максимального значения выходного сигнала.

Как и аналого-цифровые преобразователи, ЦАП являются «связующим звеном» между аналоговой и цифровой электроникой. Существуют различные принципы построения ЦАП.

Рассмотрим наиболее используемые из них. На рисунке 15.1 приведена схема ЦАП с суммированием весовых токов.

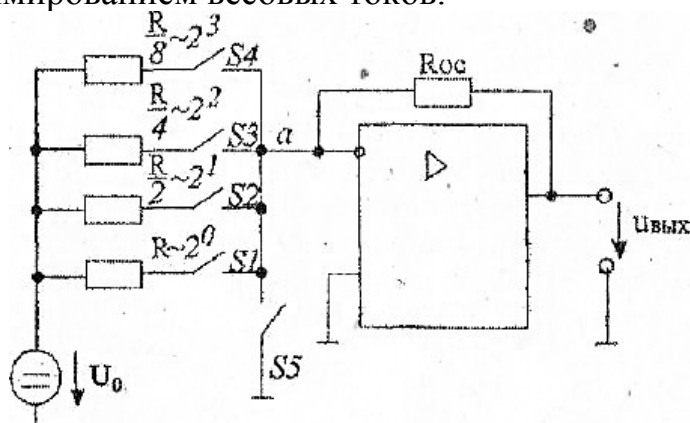


Рисунок 15.1

ЦАП с суммированием весовых токов

Входной цифровой сигнал управляет состоянием ключей  $S1-S4$ . Каждый ключ соответствует определенному разряду двоичного числа. При логической «1» в двоичном разряде соответствующий ключ разомкнут, при «0» - замкнут. Ключ  $S5$  замкнут только тогда, когда разомкнуты все ключи  $S1...S4$  (при этом  $u_{вых}=0$ ).  $U_0$  — опорное напряжение.

По существу, этот ЦАП — инвертирующий усилитель на основе операционного усилителя. Анализ такой схемы не представляет затруднений. Так, если замкнут один ключ  $S1$ , то:

$$u_{вых} = -U_0 \frac{R_{oc}}{R}, \quad (15.1)$$

что соответствует единице в первом и нулям в остальных разрядах.

Из анализа схемы, следует, что модуль выходного напряжения пропорционален числу, двоичный код которого определяется состоянием ключей  $S_1...S_4$ . Токи ключей  $S_1...S_4$  суммируются в точке «а», причем токи различных ключей различны (имеют разный «вес»). Это и определяет название схемы.

Из вышеизложенного следует, что:

$$u_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{oc}}{R} \cdot S_1 - U_0 \frac{R_{oc}}{R/2} \cdot S_2 - U_0 \frac{R_{oc}}{R/4} \cdot S_3 - U_0 \frac{R_{oc}}{R/8} \cdot S_4, \quad (15.2)$$

т.е.

$$u_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{oc}}{R} (8S_4 + 4S_3 + 2S_2 + S_1), \quad (15.3)$$

где  $S_i$  - 1,2,3,4-принимает значение 1, если соответствующий ключ замкнут, и 0, если ключ разомкнут.

Состояние ключей определяется входным преобразуемым кодом. Схема проста, но имеет недостатки: значительные изменения напряжения на ключах и использование резисторов с сильно отличающимися сопротивлениями. Требуемую точность этих сопротивлений обеспечить затруднительно.

Рассмотрим ЦАП на основе резистивной матрицы R-2R (матрицы постоянного сопротивления) (см. рисунок 15.2).

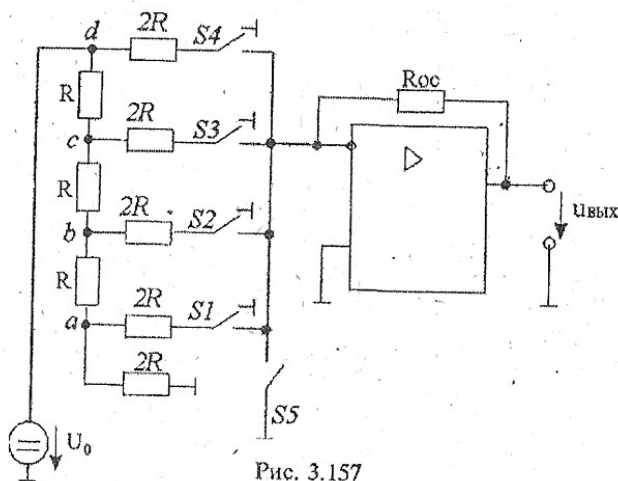


Рис. 3.157

Рисунок 15.2

### ЦАП на основе резистивной матрицы R-2R

В схеме использованы так называемые перекидные ключи  $S_1...S_4$ , каждый из которых в одном из состояний подключен к общей точке, поэтому напряжения на ключах невелики. Ключ  $S_5$  замкнут только тогда, когда все ключи  $S_1...S_4$  подключены к общей точке. Во входной цепи использованы резисторы всего с двумя различными значениями сопротивлений.

Из анализа схемы можно увидеть, что и для нее модуль выходного напряжения пропорционален числу, двоичный код которого определяется состоянием ключей  $S_1...S_4$ . Анализ легко выполнить, учитывая следующее. Пусть каждый из ключей  $S_1...S_4$  подключен к общей точке. Тогда, как легко заметить, напряжение относительно общей точки в каждой следующей из

точек «а»...«d» в 2 раза больше, чем в предыдущей. К примеру, напряжение в точке «b» в 2 раза больше, чем в точке «а» (напряжения  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  и  $U_d$  в указанных точках определяются следующим образом:  $U_d=U_0$ ;  $U_c=U_0/2$ ;  $U_b=U_0/4$ ;  $U_a=U_0/8$ ;) Допустим, что состояние указанных ключей изменилось. Тогда напряжения в точках «а»...«d» не изменятся, так как напряжение между входами операционного усилителя практически нулевое.

Из вышеизложенного следует, что:

$$u_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{oc}}{2R} \cdot S_4 - \frac{U_0}{2} \cdot \frac{R_{oc}}{2R} \cdot S_3 - \frac{U_0}{4} \cdot \frac{R_{oc}}{2R} \cdot S_2 - \frac{U_0}{8} \cdot \frac{R_{oc}}{2R} \cdot S_1, \quad (15.4)$$

$$u_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_{oc}}{16R} (8S_4 + 4S_3 + 2S_2 + S_1), \quad (15.5)$$

где  $S_i$ ,  $i=1,2,3,4$  принимает значение 1, если соответствующий ключ замкнут, и 0, если ключ разомкнут.

2. Аналого-цифровые преобразователи. Цифровой сигнал может быть получен из аналогового путем его дискретизации по времени (выполняется на основании теоремы отсчетов), квантования по уровню (выполняется с учетом динамического диапазона исходного аналогового сигнала) и кодирования.

3. Дискретизация аналогового сигнала по времени — процесс формирования выборки аналогового сигнала в моменты времени, кратные периоду дискретизирующей последовательности  $\Delta t$ .

*Дискретизирующая последовательность* — периодическая последовательность импульсов, задающая сетку дискретного времени (используется для управления аналоговыми ключами).

*Период дискретизации  $\Delta t$*  — параметр, характеризующий процесс дискретизации аналогового сигнала (задает сетку дискретного времени).

При выборе частоты дискретизации по времени можно воспользоваться теоремой В.А. Котельникова.

Теорема отсчетов (теорема Котельникова) — теорема, определяющая выбор периода дискретизации  $\Delta t$  аналогового сигнала в соответствии с его спектральной характеристикой: *всякий непрерывный сигнал, имеющий ограниченный частотный спектр, полностью определяется своими дискретными значениями в моменты отсчета, отстоящие друг от друга на интервалы времени  $\Delta t = 1/(2F_{\text{max}})$ , где  $F_{\text{max}}$  — максимальная частота в спектре сигнала.* Иначе говоря, дискретизация по времени не связана с потерей информации, если частота дискретизации  $f_{\text{дискр}} = 1/\Delta t$  в два раза выше указанной верхней частоты сигнала  $F_{\text{max}}$ .

Согласно теореме Котельникова, нет необходимости передавать бесконечное множество всех значений непрерывного сигнала  $x(t)$ , достаточно передавать лишь те его значения (см. рисунок 15.3), которые отстоят друг от друга на расстоянии  $\Delta t = 1/(2F_{\text{max}})$ . Для восстановления сигнала  $x(t)$  на вход идеального фильтра низких частот, имеющего полосу пропускания частот от 0 до  $F_{\text{max}}$  необходимо подать последовательность узких импульсов с амплитудой, соответствующей дискретным отсчетам сигнала  $x(t_i)$  в моменты времени  $t_i = i \Delta t$ .



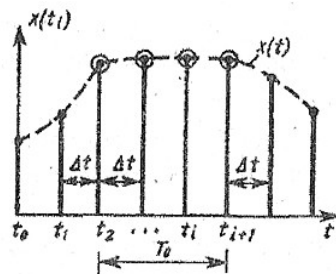


Рисунок 15.3  
Дискретные отсчеты сигнала

Поскольку теорема отсчетов (теорема Котельникова) сформулирована для сигнала с ограниченным спектром, а реальные\* сигналы имеют неограниченную спектральную плотность, то при расчетах  $\Delta t = 1/(2F_{\max})$  используют приближенное значение  $F_{\max}$  (например, активную ширину спектра, определенную по амплитудному критерию; по критерию 90%-ного содержания энергии или средней мощности сигнала). Кроме того, и идеальный фильтр низких частот, необходимый для восстановления сигнала в соответствии с теоремой, является физически нереализуемым, так как предъявляемые к нему требования (идеально прямоугольная форма амплитудно-частотной характеристики, отсутствие фазового сдвига в рассматриваемой полосе частот от 0 до  $F_{\max}$ ) оказываются противоречивыми и могут выполняться лишь с определенной погрешностью. Учитывая сказанное, частоту дискретизации по времени обычно принимают в 1,5-2,5 раза больше значения, рассчитанного по теореме Котельникова, т.е.:

$$f_{\text{дискр}} = (3-5)F_{\max}. \quad (15.6)$$

4. Квантование (дискретизация) сигнала по уровню — процесс отображения бесконечного множества значений аналогового сигнала на некоторое конечное множество (определяемое числом уровней квантования).

Отличительной особенностью дискретизации по уровню является замена непрерывной шкалы уровней сигнала  $x(t)$  дискретной шкалой  $x_{д,i}$  ( $i=1,2,\dots,m$ ), в которой различные значения сигнала отличаются между собой не менее чем на некоторое фиксированное (или выбираемое в процессе квантования) значение  $\Delta x$ , называемое шагом квантования.

*Шаг квантования* - величина, равная интервалам уровней квантования (определена только для случая равномерного квантования).

Необходимость квантования вызвана тем, что цифровые вычислительные устройства могут оперировать только с числами, имеющими конечное число разрядов. Таким образом, квантование представляет собой округление передаваемых значений с заданной точностью. При равномерном квантовании ( $\Delta x = \text{const}$ ) число разрешенных дискретных уровней  $x_i$ , составляет:

$$m = (x_{\max} - x_{\min}) / \Delta x,$$

где  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  — соответственно верхняя и нижняя границы диапазона изменения сигнала.

*Ошибка квантования* — величина, определяемая как  $\xi(x) = x - x_{д.i}$ , где  $x$  — кодируемая дискретная величина,  $x_{д.i}$  — дискретизированный сигнал.

Чем меньше значение  $\Delta x$ , тем меньше получаемая ошибка. Если в результате квантования любое из значений сигнала  $x(t)$ , попавшее в интервал  $(x_{д.i} - \Delta x/2; x_{д.i} + \Delta x/2)$ , округляется до  $x_{д.i}$  то возникающая при этом ошибка  $\xi(x)$  не превышает половины шага квантования, т.е.  $\max|\xi(x)| = 0,5 \Delta x$ . На практике шаг квантования  $\Delta x$  выбирают, исходя из уровня помех, в той или иной форме присутствующих при измерении, передаче и обработке реальных сигналов.

Процесс преобразования дискретного сигнала в цифровой называют *кодированием* информации, а множество различных кодовых комбинаций, получаемых при данном правиле кодирования, — *кодом*. Важной характеристикой кода является основание (или значность) кода  $m$ , т. е. число возможных значений, которые могут принимать элементы кодовой комбинации. Пусть требуется передать сигнал, уровень которого изменяется от 0 до 10 В. Если погрешность представления данных составляет 10 мВ, то каждый отсчет сигнала можно рассматривать как одно из 1000 возможных сообщений. Для передачи этой информации, можно предложить различные способы:

а) каждому сообщению поставить в соответствие определенный уровень напряжения, при этом основание кода  $m=1000$ , а длина кодовой комбинации (слова) принимает минимальное значение  $n=1$ ;

б) можно воспользоваться двоичным (бинарным) сигналом с  $m=2$ , но тогда потребуется комбинация длины  $n=10$  ( $2^{10}=1024$ , так что некоторые комбинации здесь не использованы).

Примером двоичного кода является запись натурального числа  $A$  в позиционной двоичной системе счисления, осуществляемая по следующему правилу:

$$A = (a_1 a_2 \dots a_n)_2 = a_1 \cdot 2^{n-1} + a_2 \cdot 2^{n-2} + \dots + a_n \cdot 2^0. \quad (15.5)$$

Здесь символы  $a_1, a_2, \dots, a_n$  принимают значения 0 или 1,  $n$  — число разрядов в коде. Предполагается, что символ  $a_1$ , расположенный в старшем разряде кодовой комбинации, имеет наибольший вес  $2^{n-1}$  тогда как вес символа  $a_n$  в младшем разряде является минимальным и равен  $2^0=1$ .

Для представления дробных чисел, значения которых не превышают единицы, обычно используют запись в следующем виде:

$$A = (a_1 a_2 \dots a_n)_2 = \sum_{i=1}^n a_i 2^{-i}, \quad (15.6)$$

т.е. веса разрядов кодовой комбинации  $a_1, a_2, \dots, a_n$  здесь равны  $2^{-1}, 2^{-2}, \dots, 2^{-n}$ . В тех случаях, когда число  $A$  может принимать очень большие или же очень малые значения, удобнее использовать представление числа в форме с плавающей запятой. При этом каждое десятичное число определяется мантиссой, принимающей дробные значения от 0,1 до 1, и порядком - показателем степени числа 10. Например, число 50 представляется как  $0,5 \cdot 10^2$ , а число 0,00105 записывается в виде  $0,105 \cdot 10^{-2}$ . Соответственно

представление в двоичном коде для числа  $A$  должно производиться отдельно - для мантиссы и для порядка числа  $A$ .

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) - это устройства, предназначенные для преобразования аналоговых сигналов в цифровые.

К основным характеристикам АЦП относят число разрядов, время преобразования, нелинейность и др.

*Число разрядов* — количество разрядов кода, связанного с аналоговой величиной, которое может вырабатывать АЦП. Часто говорят о *разрешающей способности* АЦП, которую определяют величиной, обратной максимальному числу кодовых комбинаций на выходе АЦП. Так, 10-разрядный АЦП имеет разрешающую способность  $(2^{10} = 1024)^{-1}$ , т. е. при шкале АЦП, соответствующей 10 В, абсолютное значение шага квантования не превышает 10 мВ.

*Время преобразования*  $t_{пр}$  — интервал времени от момента заданного изменения сигнала на входе АЦП до появления на его выходе соответствующего устойчивого кода.

Характерными методами преобразования являются следующие: параллельного преобразования аналоговой величины и последовательного преобразования.

Рассмотрим АЦП с параллельным преобразованием входного аналогового сигнала. По параллельному методу входное напряжение одновременно сравнивают с  $n$  опорными напряжениями и определяют, между какими двумя опорными напряжениями оно лежит. При этом результат получают быстро, но схема оказывается достаточно сложной.

Рассмотрим принцип действия такого АЦП (рис. 15.4). При  $U_{ex}=0$ , поскольку для всех ОУ разность напряжений  $(U_+ - U_-) < 0$  ( $U_+$ ,  $U_-$  — напряжения относительно общей точки соответственно неинвертирующего и инвертирующего входа), напряжения на выходе всех ОУ равны  $-E_{пит}$ , а на выходах кодирующего преобразователя (КП)  $Z_0, Z_1, Z_2$  устанавливаются нули. Если  $U_{ex} > 0,5U$ , но меньше  $3/2 U$ , лишь для нижнего ОУ  $(U_+ - U_-) > 0$  и лишь на его выходе появляется напряжение  $+ E_{пит}$ , что приводит к появлению на выходах КП следующих сигналов:  $Z_0 = 1, Z_2 = Z_1 = 0$ . Если  $U_{вх} > 3/2 U$ , но меньше  $5/2 U$ , то на выходе двух нижних ОУ появляется напряжение  $+ E_{пит}$ , что приводит к появлению на выходах КП кода 010, и т. д.

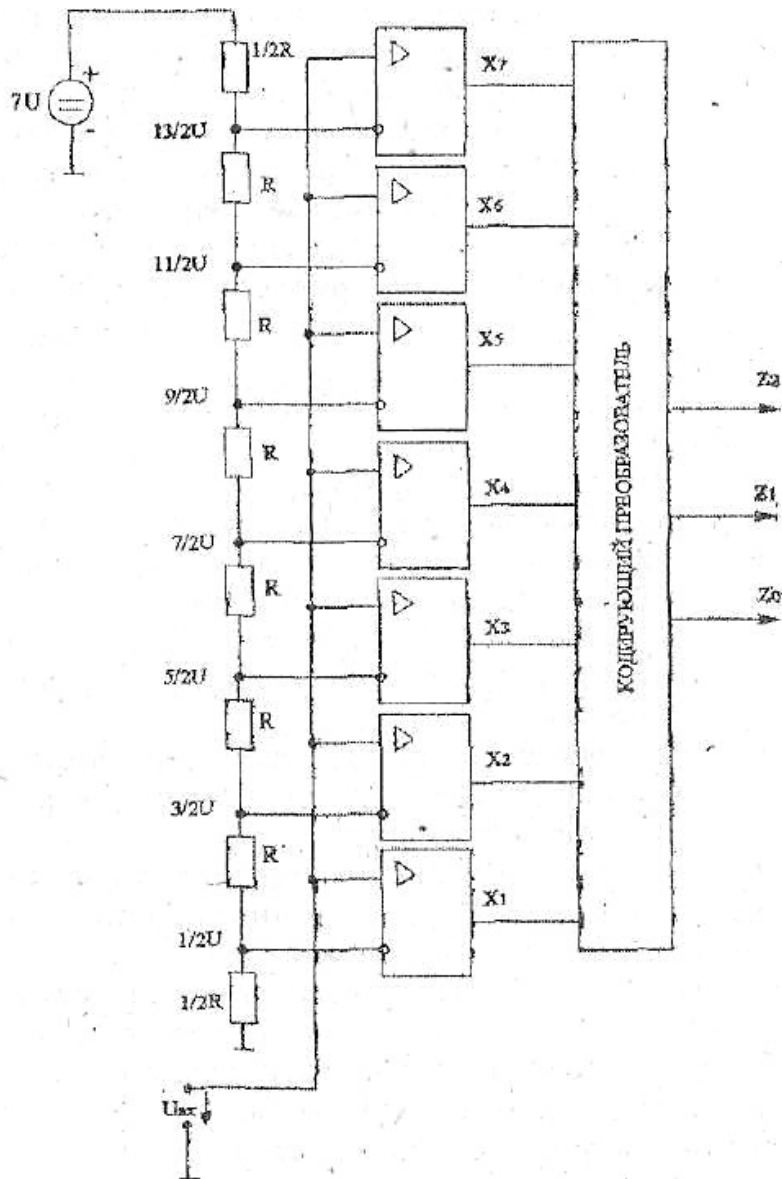


Рисунок 15.4  
АЦП с параллельным преобразованием

5. Рассмотрим конкретный вариант АЦП с последовательным преобразованием входного сигнала (последовательного счета), который называют АЦП со следящей связью (см. рисунок 15.5). В АЦП рассматриваемого типа используются ЦАП и реверсивный счетчик, сигнал с которого обеспечивает изменение напряжения на выходе ЦАП. Настройка схемы такова, что обеспечивается примерное равенство, напряжений на входе  $U_{вх}$  и на выходе ЦАП —  $U$ . Если входное напряжение  $U_{вх}$  больше напряжения  $U$  на выходе ЦАП, то счетчик переводится в режим прямого счета и код на его выходе увеличивается, обеспечивая увеличение напряжения на выходе ЦАП. В момент равенства  $U_{вх}$  и  $U$  счет прекращается и с выхода реверсивного счетчика снимается код, соответствующий входному напряжению.

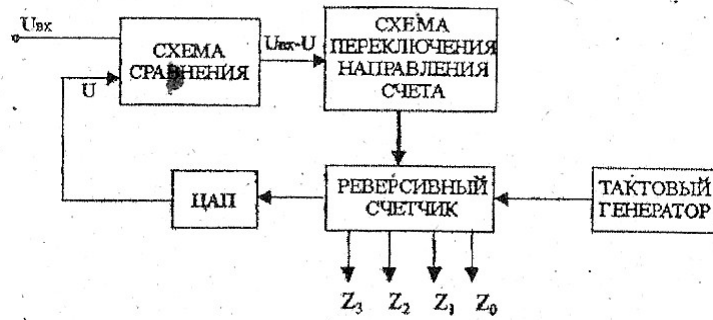


Рисунок 15.5  
АЦП со следящей связью

Метод последовательного преобразования реализуется в АЦП время-импульсного преобразования (АЦП с генератором линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН)). Принцип действия рассматриваемого АЦП (см. рисунок 15.6) основан на подсчете числа импульсов в отрезке времени, в течение которого линейно изменяющееся напряжение (ЛИН), увеличиваясь от нулевого значения, достигает уровня входного напряжения  $U_{ex}$ . Используются следующие обозначения: СС - схема сравнения, ГИ - генератор импульсов, Кл - электронный ключ, Сч - счетчик импульсов.

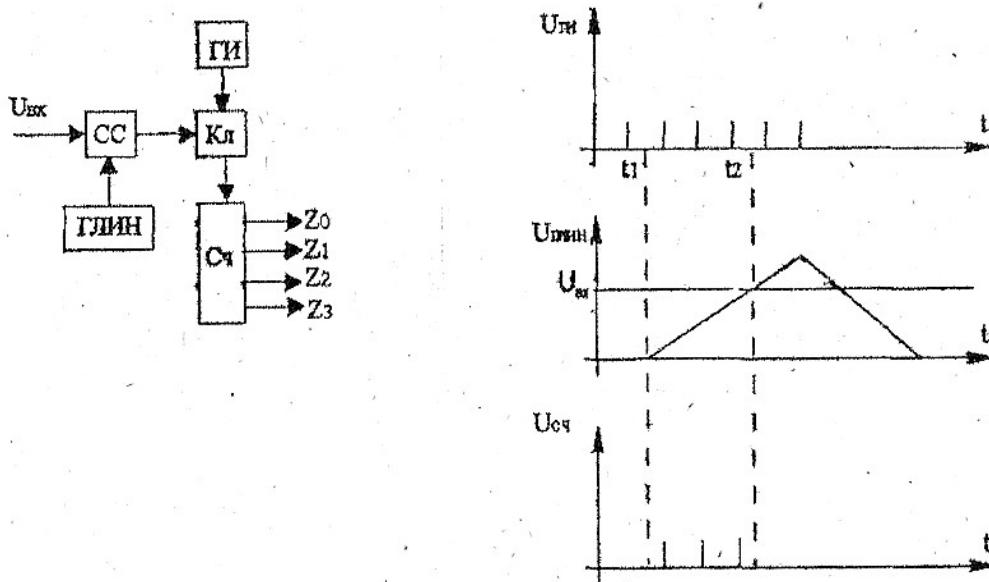


Рисунок 15.6  
АЦП время-импульсного преобразования

Отмеченный во временной диаграмме момент времени  $t_1$  соответствует началу измерения входного напряжения, а момент времени  $t_2$  соответствует равенству входного напряжения и напряжения ГЛИН. Погрешность измерения определяется шагом квантования времени. Ключ Кл подключает к счетчику генератор импульсов от момента начала измерения до момента равенства  $U_{ex}$  и  $U_{ГЛИН}$ . Через  $U_{сч}$  обозначено напряжение на входе счетчика. Код на выходе счетчика пропорционален входному напряжению. Одним из недостатков этой схемы является невысокое быстродействие.

Рассмотрим АЦП с двойным интегрированием, который также реализует метод последовательного преобразования входного сигнала (см. рисунок 15.7). Используются следующие обозначения: СУ — система управления, ГИ — генератор импульсов, Сч — счетчик импульсов.

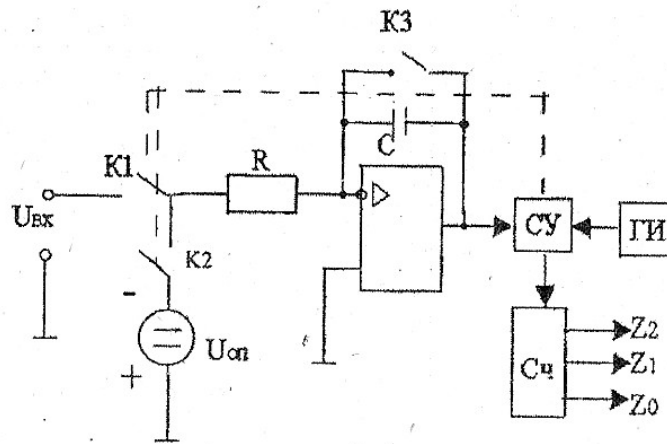


Рисунок 15.7  
АЦП с двойным интегрированием

Принцип действия АЦП состоит в определении отношения двух отрезков времени, в течение одного из которых выполняется интегрирование входного напряжения  $U_{вх}$  интегратором на основе ОУ (напряжение  $U_{И}$  на выходе интегратора изменяется от нуля до максимальной по модулю величины), а в течение следующего — интегрирование опорного напряжения  $U_{оп}$  ( $U_{И}$  меняется от максимальной по модулю величины до нуля) (см. рисунок 15.8).

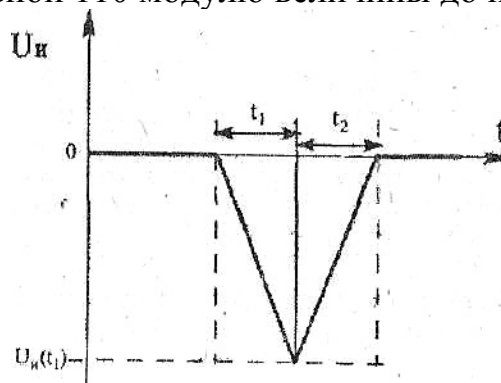


Рисунок 15.8  
Изменение напряжения на выходе интегратора

Пусть время  $t_1$  интегрирования входного сигнала постоянно, тогда чем больше второй отрезок времени  $t_2$  (отрезок времени, в течение которого интегрируется опорное напряжение), тем больше входное напряжение. Ключ КЗ предназначен для установки интегратора в исходное нулевое состояние. В первый из указанных отрезков времени ключ К1 замкнут, ключ К2 разомкнут, а во второй отрезок времени их состояние является обратным по отношению к указанному. Одновременно с замыканием ключа К2 импульсы с генератора импульсов ГИ начинают поступать через схему управления СУ

на счетчик Сч. Поступление этих импульсов заканчивается тогда, когда напряжение на выходе интегратора оказывается равным нулю.

Напряжение на выходе интегратора по истечении отрезка времени  $t_1$  определяется выражением:

$$U_u(t_1) = - (1/RC) \cdot \int_0^{t_1} U_{ex} dt = - (U_{ex} \cdot t_1) / RC. \quad (15.7)$$

Используя аналогичное выражение для отрезка времени  $t_2$ , получим:

$$t_2 = - (RC / U_{оп}) \cdot U_H(t_1). \quad (15.8)$$

Подставив сюда выражение для  $U_H(t_1)$ , получим:

$$t_2 = (U_{ex} / U_{оп}) t_1, \quad (15.9)$$

откуда:

$$U_{ex} = U_{оп} \frac{t_2}{t_1}. \quad (15.10)$$

Код на выходе счетчика определяет величину входного напряжения, Одним из основных преимуществ АЦП рассматриваемого типа является высокая помехозащищенность. Случайные выбросы входного напряжения, имеющие место в течение короткого времени, практически не оказывают влияния на погрешность преобразования. Недостаток такого АЦП — малое быстродействие.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Перечислите параметры ЦАП?
2. Дайте схему ЦАП с суммированием весовых токов?
3. Что такое квантование сигнала по уровню?
4. Дайте определение ЦАП?
5. Дайте определение АЦП.

**Литература:** 2. стр.423;442.

## Список использованной литературы

### Основная:

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пособие для ВУЗов. М. Высшая школа. 1982 г.
2. Основы промышленной электроники. Под ред. Исакова Ю.М., Платонова А.П. и других. Киев. Издательство «Техника» 1976 г.

### Дополнительная:

3. Лачин В., Савелов Н. Электроника. Ростов-на-Дону. 2002 г.
4. Кучумов А. Электроника и схемотехника. М., 2002 г.
5. Электротехника и электроника. Под ред. В. Герасимова. Книга 3. Электрические измерения и основы электроники. М. 1998 г.
6. Жеребцов И.П. Основы электроники Л. Энергоатомиздат. 1985 г.
7. Быстров Ю. Оптоэлектронные приборы и их устройства. М., 2001 г.



## ПЛАНЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Тема 1: Определение параметров каскада усиления графическим методом

Цель: ознакомление с методикой определения параметров каскада усиления графическим методом

План:

1 Краткие теоретические сведения об усилителях

2 Решение задачи

1. Краткие теоретические сведения об усилителях

Усилитель – это электронное устройство (четырёхполюсник), управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке.

Мощность, требующаяся для управления, как правило, намного меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а формы входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузке) сигналов совпадают (см рисунок 1.1).

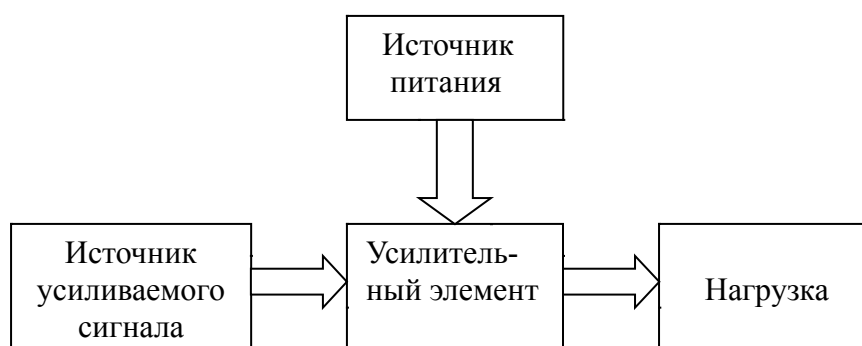


Рисунок 1.1

Схема подключения усилителя

Усилители используются для компенсации потерь при передаче информационных сигналов на большие расстояния, для обеспечения работы регистрирующих устройств, для создания нормальных условий восприятия информации человеком и т. д. Например, для обеспечения работы громкоговорителей мультимедиа-компьютера, как правило, требуется усилитель, так как поступающие от источников звуковые сигналы имеют недостаточную мощность.

По усиливаемой электрической величине различают усилители мощности, напряжения и тока. Коэффициент передачи усилителя по одному из указанных электрических параметров, как правило, много больше единицы. По другим параметрам коэффициент передачи усилителя может быть меньше единицы. Однако у всех усилителей по определению коэффициент передачи по мощности должен быть больше единицы. Поэтому, например, повышающий трансформатор, у которого коэффициент

передачи по напряжению может быть больше единицы, к усилителям не относится.

По диапазону усиливаемых частот усилители делятся на усилители постоянного тока (УПТ), усилители низкой (звуковой) частоты (УНЧ), усилители высокой частоты (УВЧ) и СВЧ-усилители (сверхвысокой частоты). В компьютерах, например, УПТ используются в источниках питания, УНЧ в звуковых платах, УВЧ и СВЧ-усилители - в приемниках радио- и телевизионных сигналов.

По используемым элементам различают усилители на транзисторах, микросхемах, электронных лампах и т.д. Ниже рассматриваются усилители только на транзисторах и микросхемах. Такие усилители широко используются в компьютерах.

По режимам работы различают линейные и нелинейные усилители. В линейных усилителях уровни входных и выходных сигналов малы, и поэтому все элементы усилителя при воздействии малых переменных сигналов характеризуются линейной зависимостью между токами и приложенными напряжениями. Если амплитуда сигнала велика, то линейная зависимость между токами и напряжениями нарушается – возникает нелинейный режим работы усилителя.

Усилители классифицируют также по числу каскадов, по назначению, по полосе усиливаемых частот, по характеру усиливаемого сигнала и т. д.

2 Пример решение задачи приведен в литературе [2] стр. 140 – 141

Контрольные вопросы:

1. Что такое усилитель?
2. В чем заключается принцип усиления?
3. Что такое коэффициент усиления?
4. Что такое частотные характеристики?
5. Дайте определение полосе пропускания частот усилителя?

Тема 2: Расчет транзисторного генератора

Цель: ознакомление с методикой расчета транзисторного генератора

План:

- 1 Краткие теоретические сведения о генераторах
- 2 Решение задачи

### 1. Краткие теоретические сведения о генераторах

Электронными генераторами называют устройства, преобразующие с помощью усилительных приборов энергию источника питания в энергию электрических колебаний заданной частоты и формы.

Внутренним классификационным признаком генераторов является принцип управления режимом их работы. По этому признаку различают генераторы с независимым возбуждением, режимом работы которых

управляют от внешнего источника переменного напряжения, и генераторы с самовозбуждением – автогенераторы.

По форме выходных колебаний различают генераторы гармонических (синусоидальных) колебаний и генераторы колебаний несинусоидальной формы (прямоугольной, пилообразной и др.), которые называют релаксационными импульсными. Работа последних характеризуется специфическими особенностями.

Гармонические колебания в генераторах поддерживаются резонансными контурами либо другими резонирующими элементами или с помощью фазирующих RC-цепей, включаемых в цепь обратной связи усилителей. Первые называются LC- а вторые RC- генераторами гармонических колебаний. Маломощные LC-генераторы применяются в измерительных и регулирующих устройствах, а также служат в качестве задающих генераторов в радиопередатчиках. LC- генераторы средней и большой мощностей используются для питания технологических установок ультразвуковой обработки материалов, установок индукционного нагрева металлов и диэлектриков, электронных микроскопов. RC- генераторы применяются как задающие устройства в системах преобразования постоянного тока в переменный, а также различного рода измерительных приборах и системах.

2 Пример решение задачи приведен в литературе [2] стр. 224 – 226.

Контрольные вопросы:

- 1 Чем отличается генератор от усилителя?
- 2 Определите назначение обратной связи.
- 3 Что такое автогенератор?
- 4 Дайте схему генератора на туннельных диодах.
- 5 Как выполняется стабилизация частоты автогенераторов?

Тема 3: Расчет транзисторного ключа

Цель: ознакомление с методикой расчета транзисторного ключа, областью его применения.

План

- 1 Краткие теоретические сведения о транзисторном ключе
- 2 Решение задачи

1 В информационных маломощных устройствах ЭК выполняют на полупроводниковых диодах, а также на биполярных и полевых транзисторах. Ключи на биполярных транзисторах. Транзисторные ключи (ТК) являются одним из наиболее распространенных элементов импульсных устройств. На их основе создаются триггеры, мультивибраторы, коммутаторы, блокинг-генераторы и т.д.

Транзисторный ключ по своей схеме подобен транзисторному усилителю с ОЭ. Однако по выполняемым функциям и соответственно

режимам работы активного элемента он существенно отличается от усилительного каскада.

В зависимости от целевого назначения ТК и особенностей его работы схема ТК может несколько видоизменяться. Но, несмотря на это, в основе всех модификаций лежит изображенная на рисунке 3.1,а транзисторная ключевая схема.

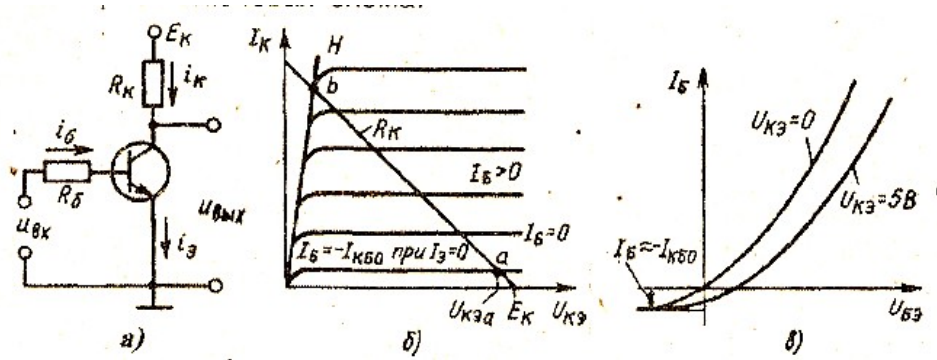


Рисунок 3.1

Схема простейшего ключа (а),  
его выходные (б) и входные характеристики (в)

В ТК транзисторы работают в нескольких качественно различных режимах, которые характеризуются полярностями напряжений на переходах транзистора. Принято различать следующие режимы работы ключа: режим отсечки; нормальный активный; инверсный активный; режим насыщения.

ТК выполняет функции быстродействующего ключа и имеет два основных состояния: разомкнутое, которому соответствует режим отсечки транзистора (транзистор заперт), и замкнутое, которое характеризуется режимом насыщения транзистора или режимом, близким к нему.

В течение процесса переключения транзистор работает в активном режиме. Процессы в ключевом каскаде носят нелинейный характер. На основе рассмотренного простейшего ключа можно создавать ключевую цепь (см. рисунок 3.2,а), которая будет коммутировать аналоговые, в том числе и разнополярные, сигналы.

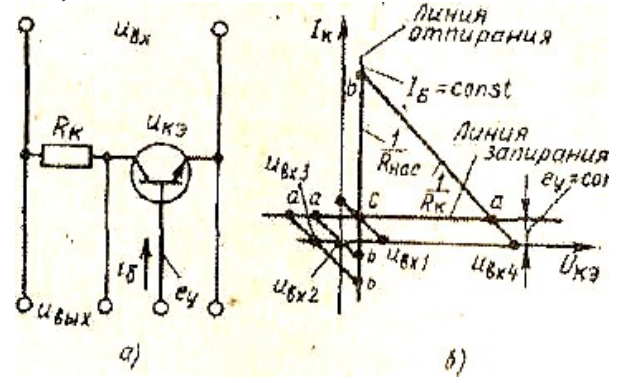


Рисунок 3.2

Схема ключа, коммутирующего аналоговые сигналы (а), и его выходные характеристики (б) при нормальном включении транзистора

Роль источника напряжения выполняет коммутируемое напряжение  $U_{вх}$ . Для того, чтобы переходы транзистора оставались запертыми при любых изменениях полярности и значения  $U_{вх}$ , необходимо, чтобы при подаче запирающего напряжения управления  $e_y$  выполнялось условие:  $|e_y| > |U_{ax.max}|$ .

Пусть ключ, изображенный на рисунке 3.2, а, заперт по цепи базы управляющим напряжением -  $e_y$ . Тогда при всех значениях напряжения, при которых  $|U_{кэ}| < |e_y|$ , в выходной цепи протекает ток, близкий к  $I_{кбо}$ , и характеристика  $I_k(U_{кэ})$  идет почти горизонтально (см. рисунок 3.2, б). Назовем линию, по которой перемещается точка а, линией запираения.

При изменении полярности напряжения  $e$  транзистор откроется. Пусть ток в цепи базы  $i_b = I_b = \text{const}$  и  $I_b > I_{b.nac}$ . Тогда падение напряжения на транзисторе мало и характеристика  $I_k(U_{кэ})$  идет почти вертикально. Назовем эту линию линией отпираения.

В идеальном аналоговом ключе линий отпираения и запираения, совпадают с осями координат. В транзисторном ключе эти линии имеют небольшой наклон, а их точка пересечения не совпадает с началом координат. В итоге при конечном сигнале  $U_{вх1}$  получается нулевое напряжение на выходе, а при нулевом сигнале  $U_{вх2}$  - соответственно конечное выходное напряжение.

Таким образом, транзисторному ключу свойственны два вида погрешностей: сдвига и наклона. Влияние этих погрешностей уменьшается с увеличением входного сигнала. Если  $|U_{вх}| \gg U_{вх1}$ , то общая погрешность невелика и, как видно из выходных характеристик, имеет разный знак в зависимости от полярности входного сигнала.

2 Примеры решения задач приведены в литературе [2] стр. 268 - 270

Контрольные вопросы:

1. Объясните различие между видеоимпульсом и радиоимпульсом.
2. Как называются участки трапецеидального импульса?
3. Перечислите параметры периодически повторяющихся импульсов.
4. Объясните работу электронного ключа на транзисторах.
5. Назовите режимы работы электронного ключа.

Тема 4: Логические элементы и схемы.

Цель: Ознакомление с логическими элементами и схемами на транзисторах, интегральными и цифровыми логическими схемами, составление схемы по заданному уравнению и уравнений по заданной схеме.

План

- 1 Теоретические сведения о логических элементах и схемах.
- 2 Решение задач.

1. Базовые логические элементы — это схемы, содержащие электронные ключи и выполняющие основные логические операции. Базовые логические элементы составляют основу для проектирования сложных цифровых

устройств, выполняющих различные логические функции. Из алгебры логики известно, что сложные логические функции можно выразить через совокупность конечного числа базисных логических функций. Такие совокупности образуют:

- базисные логические функции НЕ (инверсия), И (конъюнкция), ИЛИ (дизъюнкция);
- логические функции НЕ, И;
- логические функции НЕ, ИЛИ и др.

Основные логические функции реализуются в базовых логических элементах.

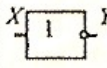
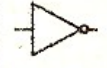
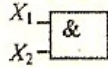

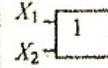

НЕ	И	ИЛИ																																				
 	 	 																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	X	Y	1	0	0	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X<sub>1</sub></th> <th>X<sub>2</sub></th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X<sub>1</sub></th> <th>X<sub>2</sub></th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1
X	Y																																					
1	0																																					
0	1																																					
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y																																				
1	1	1																																				
0	1	0																																				
1	0	0																																				
0	0	0																																				
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y																																				
0	0	0																																				
1	0	1																																				
0	1	1																																				
1	1	1																																				

Рисунок 4.1

Базовые логические элементы

Базовые логические элементы могут изготавливаться в виде отдельных интегральных микросхем. Условные обозначения и таблицы истинности (таблицы состояний) наиболее часто используемых базовых элементов НЕ, И, ИЛИ приведены в табл. 4.1,

2. В зависимости от применяемых элементов и схемотехники выделяются следующие классы логических элементов (так называемые логики):

- резисторно-транзисторная логика (РТЛ);
- диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
- транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
- эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
- транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки (ТТЛШ);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа p (p-МДП);
- логика на основе МОП-транзисторов с каналами типа n (n-МДП);
- логика на основе комплементарных ключей на МДП-транзисторах (КМДП, ШОП);
- интегральная инжекционная логика  $I^2L$  ;
- логика на основе полупроводника из арсенида галлия GaAs.

В настоящее время наиболее широко используются следующие логики: ТТЛ, ТТЛШ, КМОП, ЭСЛ. Устарела и практически не используется РТЛ.

Для разрабатываемых в настоящее время устройств можно рекомендовать использовать КМОП-логику, а также логику на основе GaAs.

Логические элементы и другие цифровые электронные устройства выпускаются в составе серий микросхем. Серия микросхем — это совокупность микросхем, характеризуемых общими технологическими и схемотехническими решениями, а также уровнями электрических сигналов и напряжения питания.

Приведем примеры серии микросхем: ТТЛ — К155, КМ155, К133, КМ133; ТТЛШ - К530, КР531, КМ531, КР1531, 533, К555, КМ555, 1533, КР1533; ЭСЛ - К500, К1500; КМОП - 564, К561, 1564, КР1554; GaAs -К6500.

Каждая серия микросхем, несмотря на то, что она обычно содержит самые разнообразные цифровые устройства, характеризуется некоторым набором параметров, дающих достаточно подробное представление об этой серии. При определении этих параметров ориентируются именно на логические элементы — простейшие устройства серии микросхем. В соответствии с этим говорят о параметрах не серии микросхем, а о параметрах логических элементов данной серии.

2 Примеры решения задач приведены в литературе [2] стр. 325-334

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные логические функции?
2. Дайте определение серии микросхем?
3. Дайте схему ТТЛ на биполярных транзисторах.
4. Объясните работу схемы РТЛ.
5. Объясните работу схемы ДТЛ.

Тема 5: Расчет выпрямителей

Цель: Ознакомление со схемами и методикой расчета различных выпрямителей.

План

- 1 Теоретические сведения о выпрямителях
- 2 Решение задач.

1. В маломощных источниках питания (до нескольких сотен ватт) обычно используют однофазные выпрямители. В мощных источниках целесообразно применять трехфазные выпрямители.

Выпрямители имеют следующие основные параметры:

а) среднее значение выходного напряжения  $i_{\text{вых}}$ :  $U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вых}} dt$ , где  $T$  — период напряжения сети (для промышленной сети - 20 мс);

б) среднее значение выходного тока  $i_{\text{вых}}$ :  $I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{вых}} dt$ ,

в) коэффициент пульсаций выходного напряжения:  $\varepsilon = \frac{U_m}{U_{cp}}$ , где  $U_m$ , — амплитуда низшей (основной) гармоники выходного напряжения. Часто коэффициент пульсаций измеряют в процентах. Обозначим его через  $\varepsilon$  %:

$$\varepsilon \% = \frac{U_m}{U_{cp}} \cdot 100\% .$$

Указанные параметры являются наиболее важными при использовании выпрямителя.

При проектировании выпрямителя широко применяются также следующие параметры, характеризующие его внутренние особенности:

- а) действующее значение  $U_{вх}$  входного напряжения выпрямителя;
- б) максимальное обратное напряжение  $U_{обр. макс}$  на отдельном диоде или тиристоре (т.е. на вентиле). Это напряжение принято выражать через напряжение  $U_{cp}$  ;
- в) среднее значение  $I_{д.ср}$  тока отдельного вентиля;
- г) максимальное (амплитудное) значение  $I_{д.макс}$  тока отдельного вентиля.

Токи  $I_{д.ср}$  и  $I_{д.макс}$ , принято выражать через  $I_{ср}$ . Значение  $U_{обр. макс}$  используется для выбора вентиля по напряжению. Значения  $I_{д.ср}$  и  $I_{д.макс}$  используются для выбора вентиля по току. Здесь следует иметь в виду, что вследствие малой тепловой инерционности полупроводникового вентиля он может выйти из строя даже в том случае, когда его средний ток  $I_{д.ср}$  мал, но велик максимальный ток  $I_{д.макс}$  .

2 Примеры решения задач приведены в литературе [2] стр. 387-390.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются выпрямители однофазный мостовой от выпрямителя со средней точкой?
2. Дайте определение угла управления управляемого выпрямителя?
3. Дайте схему трехфазного мостового выпрямителя.
4. Что такое внешняя характеристика выпрямителя?
5. Перечислите основные параметры выпрямителей.

Тема 6: Расчет сглаживающих фильтров

Цель: Ознакомление со схемами и методикой расчета различных сглаживающих фильтров

План

- 1 Теоретические сведения о выпрямителях
- 2 Решение задач.

1. Сглаживающие фильтры Выпрямленное напряжение имеет существенные пульсации, поэтому широко используют сглаживающие фильтры - устройства, уменьшающие эти пульсации. Важнейшим параметром сглаживающего фильтра является коэффициент сглаживания  $S$ .



По определению  $S = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$ , причем  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  определяют как коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра соответственно.

Для емкостного фильтра, у которого вход и выход фактически совпадают, под  $\varepsilon_1$  понимают коэффициент пульсаций до подключения фильтра, а под  $\varepsilon_2$  — коэффициент пульсаций после его подключения. Коэффициент сглаживания показывает, во сколько раз фильтр уменьшает пульсации. На выходе фильтра напряжение оказывается хорошо сглаженным, а коэффициент пульсаций может иметь значения в диапазоне 0,001 ... 0,00003.

Простейшим фильтром является емкостной фильтр (С-фильтр). Рассмотрим его работу на примере однофазного однополупериодного выпрямителя (см. рисунок 6.1). Емкостной фильтр подключают параллельно нагрузке (см. рисунок 6.1, а).

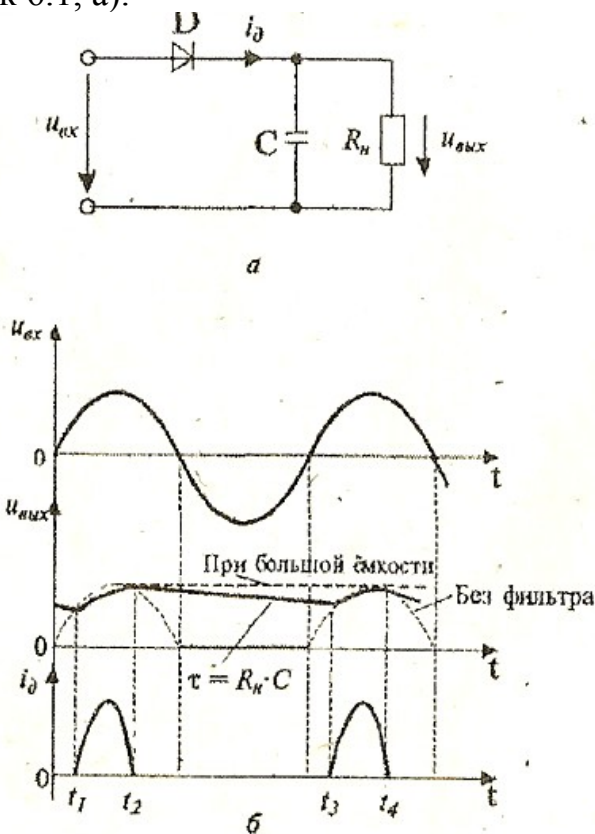


Рисунок 6.1

### Применение емкостного фильтра

На отрезке времени  $t_1 \dots t_2$  диод открыт, и конденсатор заряжается (см. рисунок 6.1, б). На отрезке  $t_2 \dots t_3$  диод закрыт, источник входного напряжения отключен от конденсатора и нагрузки. Разряд конденсатора характеризуется экспонентой с постоянной времени  $\phi = R_n \cdot C$ . Ток через диод протекает только часть полупериода (отрезок  $t_1 \dots t_2$ ). Чем короче отрезок  $t_1 \dots t_2$ , тем больше амплитуда тока диода при заданном среднем токе нагрузки. Если емкость  $C$  очень велика, то отрезок  $t_1 \dots t_2$  оказывается очень малым, а амплитуда тока диода очень большой, и диод может выйти из строя. Такой фильтр широко используется в маломощных выпрямителях; в мощных

выпрямителях он используется редко, так как режим работы диода и соответствующих электрических цепей (к примеру, обмоток трансформатора) достаточно тяжел.

В качестве фильтра можно использовать и индуктивность, Легко доказать, что индуктивный фильтр (L-фильтр) практически не дает полезного эффекта в однофазном однополупериодном выпрямителе. Рассмотрим работу индуктивного фильтра на примере однофазного мостового выпрямителя. Индуктивный фильтр включают последовательно с нагрузкой (см. рисунок 6.2, а). Часто используют катушку индуктивности (реактор) на магнитном сердечнике с зазором.

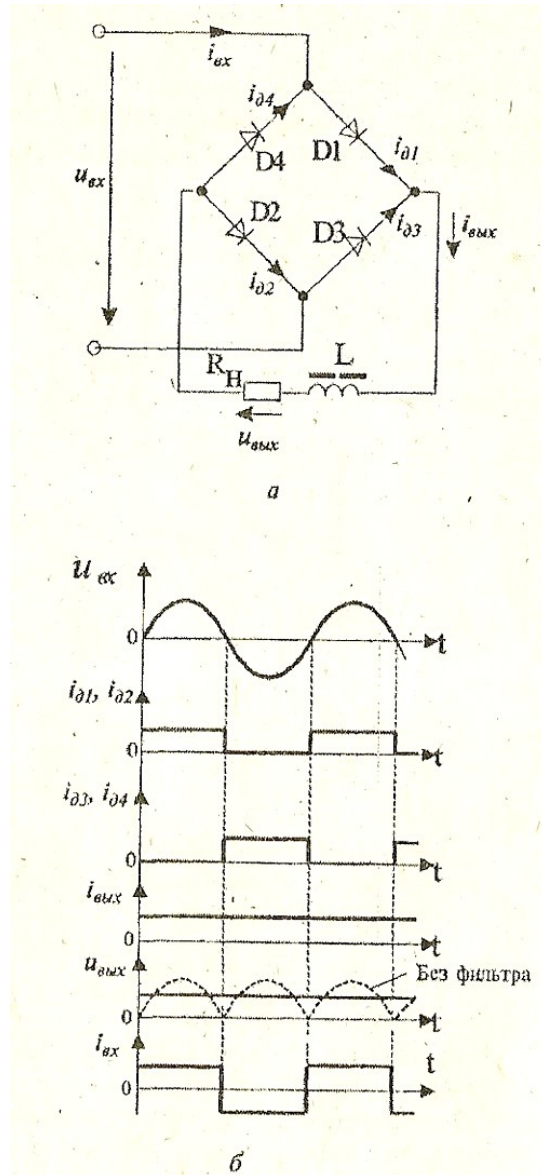


Рисунок 6.2

### Применение индуктивного фильтра

Предположим, что постоянная времени  $\tau$ , определяемая выражением  $\tau = L/R_H$ , достаточно велика (как это обычно бывает на практике). Тогда ток нагрузки оказывается практически постоянным (см. рисунок 6.2, в). Такой фильтр широко используется в выпрямителях, особенно мощных. Режим

работы диодов (и соответствующих электрических цепей) не является тяжелым.

На практике используют также следующие типы фильтров (см. рисунок 6.3): индуктивно-емкостной или Г-образный LC-фильтр (а), Г-образный RC-фильтр (б), П-образный LC-фильтр (в), П-образный RC-фильтр (г).

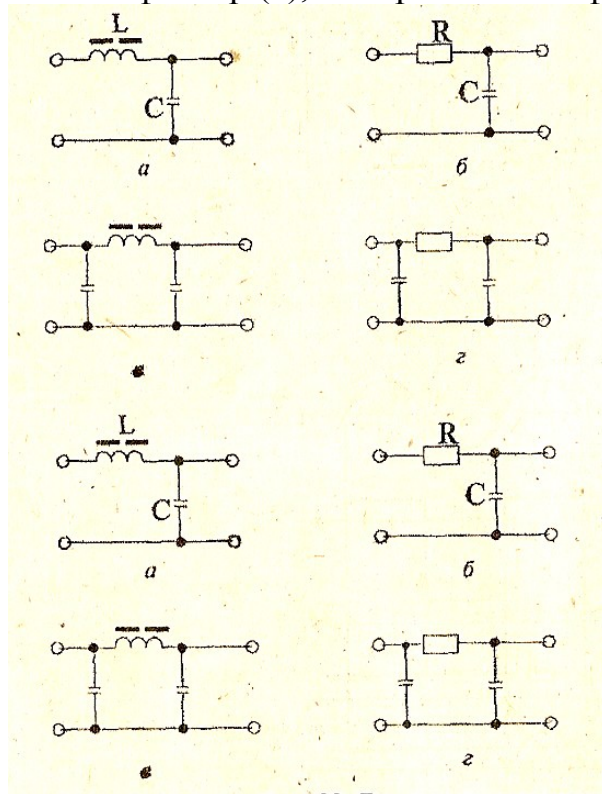


Рисунок 6.3

Типы сглаживающих фильтров

Обычно Г- и П-образные RC-фильтры применяются только маломощных схемах, так как они потребляют значительную доли энергии. На практике применяют и другие, более сложные фильтры.

Рассмотрим внешние характеристики выпрямителей с фильтрами Внешняя характеристика — это зависимость среднего значения выходного напряжения (напряжения на нагрузке) от среднего значения выходного тока (тока нагрузки).

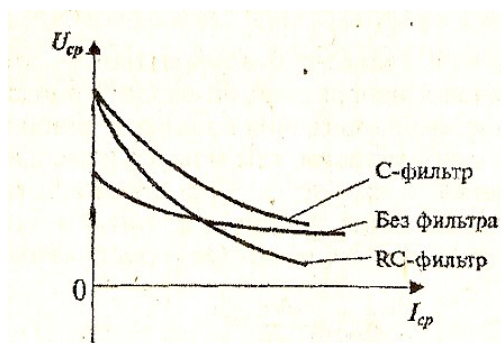


Рисунок 6.4

Внешние характеристики сглаживающих фильтров

Рассмотрим типичные внешние характеристики (см. рисунок 6.4), которые получают, изменяя сопротивление нагрузки, подключенное к выходу фильтра.

Наклон внешней характеристики при том или ином токе  $I_{cp}$  характеризуют выходным сопротивлением  $R_{вых}$ , которое определяется

выражением:  $R_{вых} = \left| \frac{dU_{cp}}{dI_{cp}} \right| I_{cp}$  – заданный.

Чем меньше величина  $R_{вых}$ , тем меньше выходное напряжение зависит от выходного тока, что обычно и требуется.

2 Примеры решения задач приведены в литературе [2] стр. 435-437

Контрольные вопросы:

1. Изобразите схему фильтра LC.
2. Изобразите схему фильтра RC.
3. Перечислите параметры фильтров.
4. Объясните работу фильтра.
5. Дайте схему фильтра с активными элементами.

## Список использованной литературы

### Основная:

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пособие для ВУЗов. М. Высшая школа. 1982 г.
2. Основы промышленной электроники. Под ред. Исакова Ю.М., Платонова А.П. и других. Киев. Издательство «Техника» 1976 г.

### Дополнительная:

3. Лачин В., Савелов Н. Электроника. Ростов-на-Дону. 2002 г.
4. Кучумов А. Электроника и схемотехника. М., 2002 г.
5. Электротехника и электроника. Под ред. В. Герасимова. Книга 3. Электрические измерения и основы электроники. М. 1998 г.
6. Жеребцов И.П. Основы электроники Л. Энергоатомиздат. 1985 г.
7. Быстров Ю. Оптоэлектронные приборы и их устройства. М., 2001 г.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

## Методика выполнения лабораторных работ

### *Подготовка к лабораторным работам*

Лабораторные работы являются одним из видов практического обучения. Их цель – закрепление теоретических знаний, проверка на опыте некоторых положений теории и законов электротехники, приобретение практических навыков при сборке электрических цепей, проведении эксперимента, использовании простейших электроизмерительных приборов и аппаратов.

Вдумчивое отношение к лабораторной работе позволит студенту сделать правильные выводы, проанализировать результаты опытов, научиться самостоятельно решать некоторые несложные задачи исследовательского характера.

Задание на работу выдается за несколько дней до ее выполнения. Для качественного выполнения лабораторных работ студентам необходимо:

- 1) повторить теоретический материал по конспекту и учебнику (см. список литературы)
- 2) ознакомиться с описанием лабораторной работы: в специальной рабочей тетради записать название и номер работы, вычертить таблицы для записи показаний приборов и результатов расчета, подготовить миллиметровую бумагу, если требуются графические построения
- 3) выяснив цель работы, четко представить себе поставленную задачу и способы ее достижения, продумать ожидаемые результатов опытов
- 4) сделать предварительный домашний расчет, если требуется в задании
- 5) ответить устно или письменно на контрольные вопросы.

### *Основные правила безопасности при работе в электротехнической лаборатории.*

Согласно Правилам устройств электроустановок (ПУЭ) для помещений без повышенной опасности поражения током, к которым относятся лаборатории теоретических основ электротехники, безопасным считается напряжение до 42 В.

Сопrotивление тела человека определяется главным образом сопротивлением кожного покрова и равно 200-500 кОм. Увлажнение или повреждение кожи снижает сопротивление до 0,6-0,8 кОм; большое влияние оказывает также общее состояние организма и нервной системы. Таким образом при указанном напряжении через человека, находящегося в нормальном состоянии, протекает ток в 0,1-0,3 мА. Сила тока в 50 мА может привести к травме, а 100 мА – к смертельному исходу. Следует иметь в виду,

что при токе даже менее 50 мА мышцы кистей рук непроизвольно сокращаются и токоведущая часть может оказаться зажатой в кулаке и тогда не удастся разжать руку и прервать ток через тело. В лабораторных работах используется различное напряжение 127,220 В, поэтому меры предосторожности имеют особо важное значение.

*Основные правила по технике безопасности следующие.*

Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что выключатель находится в выключенном состоянии.

Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправными клеммами, проводов с поврежденной изоляцией, неисправных реостатов патронов ламп, тумблеров и др. Перед тем как присоединить конденсатор, его необходимо предварительно разрядить, замкнув выводы накоротко проводником. Собранную цепь проверяет руководитель и ее можно включать по его разрешению. Перед включением цепи следует убедиться, что никто не прикасается к оголенным токоведущим частям. Все необходимые переключения нужно производить только при выключенном напряжении. Любое изменение в цепи должно быть проверено преподавателем. Студентам не разрешается самостоятельно производить какие-либо переключения на главном распределительном щите лаборатории. Во время работы с электродвигателем необходимо постоянно следить за тем, чтобы волосы и части одежды не попали на вращающиеся части. Если во время работы возникает какое-либо повреждение, в результате чего появится дым, специфический запах или накалятся проводники, то надо быстро выключить напряжение и сообщить преподавателю о случившемся. Если кто-либо попадет под напряжение и не сможет сам оторваться от токоведущих частей, то не пытайтесь оттащить его- вы сами будете поражены током. Быстро выключите напряжение. Сообщите преподавателю о случившемся.

Студентов допускают к лабораторным работам после ознакомления с настоящими правилами, что должно быть зафиксировано в специальном журнале.

### **Лабораторная работа №1**

Тема: Выпрямительные диоды

Цель:

1. Научиться снимать вольтамперную характеристику полупроводникового диода в прямом и обратном направлениях.
2. Исследовать выпрямительное действие полупроводникового диода в составе однополупериодного выпрямителя, используя виртуальные приборы (либо мультиметры и осциллограф в варианте стенда без компьютера).
3. Исследовать свойства мостового выпрямителя с помощью осциллографа и мультиметра, либо с помощью виртуальных приборов.

4. Выпрямить выходное напряжение трехфазного источника посредством сначала трехфазного выпрямителя с нулевым выводом, а затем трехфазного мостового выпрямителя (так называемая схема Ларионова). Измерить и исследовать параметры обоих выпрямителей и сравнить с параметрами однофазных выпрямителей.

## 1.1. Эффект p-n перехода в диодах

### 1.1.1. Общие сведения

Двухэлектродный полупроводниковый элемент - **диод** содержит **n** - и **p** -проводящий слои (рис. 1.1.1). В **n**-проводящем слое в качестве свободных носителей заряда преобладают **электроны**, а в **p**-проводящем слое - **дырки**. Существующий между этими слоями **p-n** переход имеет внутренний потенциальный барьер, препятствующий соединению свободных носителей заряда. Таким образом, диод блокирован.

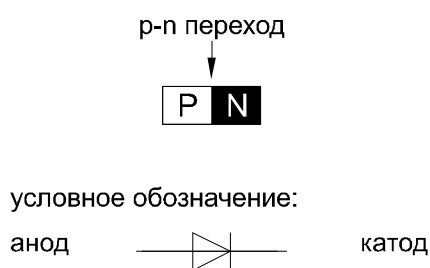


Рисунок 1.1.1

При прямом приложении напряжений («+» к слою p, «—» к слою n) потенциальный барьер уменьшается, и диод начинает проводить ток (диод открыт). При обратном напряжении потенциальный барьер увеличивается (диод заперт). В обратном направлении протекает

только небольшой ток утечки, обусловленный неосновными носителями.

### 1.1.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- К диоду (рис.1.1.2а) при прямой полярности приложите напряжение постоянного тока  $U_{пр}$ , величины которого указаны в табл. 1.1.1, измерьте с помощью мультиметра соответствующие токи  $I_{пр}$  и их значения занесите в таблицу. Используйте при этом схему измерения с погрешностью по току.



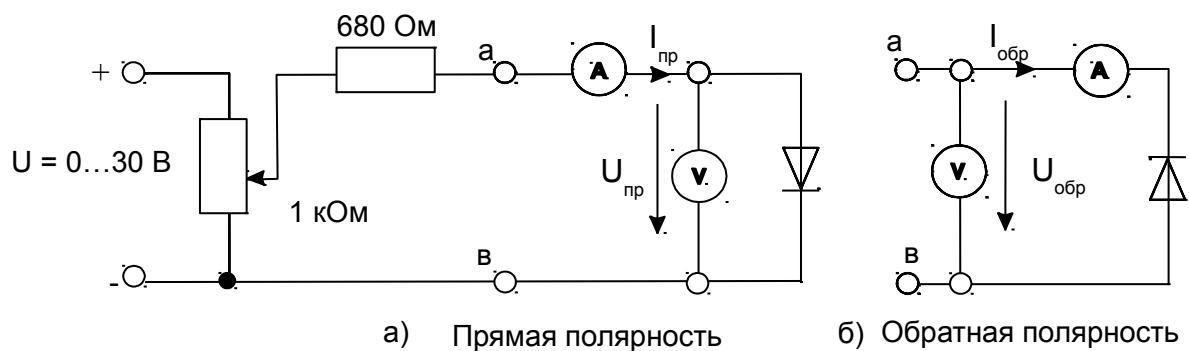


Рисунок 1.1.2

Таблица 1.1.1

$U_{пр}, В$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75
$I_{пр}, мА$										

- Измените полярность диода, переключите вольтметр для измерений с погрешностью по напряжению как показано на рис. 1.1.2б и повторите эксперимент при величинах обратных напряжений, указанных в табл. 1.1.2. Для получения напряжений больше 15 В соедините два источника последовательно.

Таблица 1.1.2

$U_{обр}, В$	0	2,5	5	10	15	20	25	30
$I_{обр}, мкА$								

Точные измерения обратного тока ( $I_{обр}$ ) возможны только с помощью высокочувствительного мультиметра.

- Перенесите измеренные данные из таблиц на график (рис.1.1.3) и постройте вольтамперную характеристику диода.

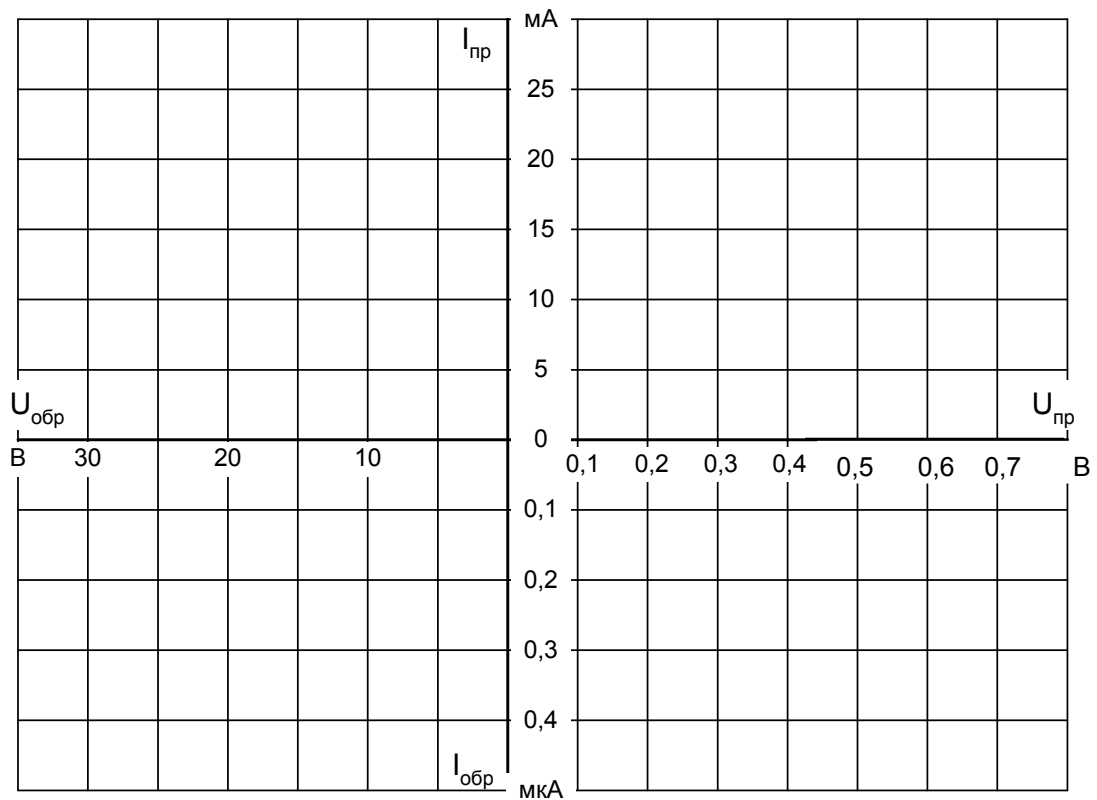


Рис.1.1.3

## 1.2. Полупроводниковый однополупериодный выпрямитель

### 1.2.1. Общие сведения

В цепи с полупроводниковым диодом (рис. 1.2.1) установившийся ток может протекать только при определенной полярности приложенного к диоду напряжения. При изменении полярности напряжения диод запирается и ток прекращается. В цепи переменного (синусоидального) напряжения ток протекает только в течение той полуволны, когда диод открыт. Полуволна другой полярности подавляется. В результате в цепи имеет место ток одного направления. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Простейшим фильтром является конденсатор, подключенный параллельно нагрузке.

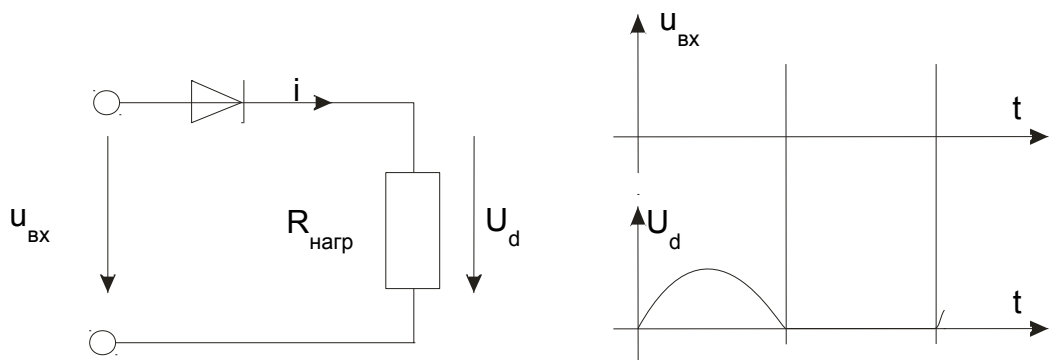


Рис. 1.2.1

При исследовании выпрямителей применяются следующие обозначения:

- $u_{ВХ}$ ,  $U_{ВХ}$  — мгновенное и действующее значения синусоидального входного напряжения;
- $u_d$ ,  $U_d$ ,  $U_{dmax}$ ,  $U_{dmin}$  — мгновенное, среднее, максимальное, минимальное значения выходного (выпрямленного) напряжения;
- $f_{п}$  — частота пульсаций выходного напряжения;
- $m = f_{пульс} / f_{ВХ}$  — число пульсаций выпрямленного напряжения за один период напряжения питания;
- $k_{пульс} = \frac{\Delta U_{пульс}}{U_d} = \frac{U_{dmax} - U_{dmin}}{U_d}$  — коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения. В данной работе используется одна фаза трехфазного источника напряжений.

### 1.2.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента.

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 1.2.2) без сглаживающего фильтра. На схеме V0 и V1 - входы коннектора. При сборке схемы обратите внимание на полярность электролитического конденсатора.
- Включите виртуальные приборы V0 и V1 и осциллограф. Подключите два любых входа осциллографа к каналам V0 и V1. Установите развертку 5 мС/дел.
- Перенесите на график (рис. 1.2.3) осциллограммы входного и выходного напряжений.
- Сделайте измерения и запишите в табл. 1.2.1. значения:  $U_{ВХ}$  — действующее,  $U_d$  — среднее,  $\Delta U_{пульс}$ ,  $m = f_{пульс} / f_{ВХ}$ .
- Рассчитайте и запишите в табл. 1.2.1 коэффициенты  $U_d / U_{ВХ}$  и  $k_{пульс}$ .

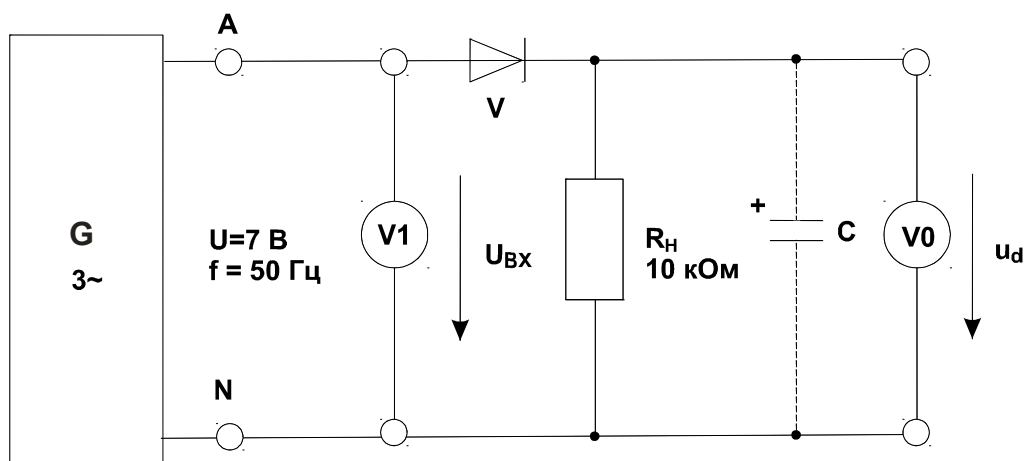


Рис. 1.2.2

- Параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  подключите сглаживающие конденсаторы  $C$  с емкостями, указанными в табл. 1.2.1, повторите измерения и дорисуйте графики выпрямленного напряжения на рис.1.2.3.

Таблица 1.2.1

$C, \text{мкФ}$	0	1	10	100
$U_{ВХ}, \text{В}$				
$U_d, \text{В}$				
$\Delta U_{\text{пульс}}, \text{В}$				
$m$				
$U_d / U_{ВХ}$				
$k_{\text{пульс}}$				

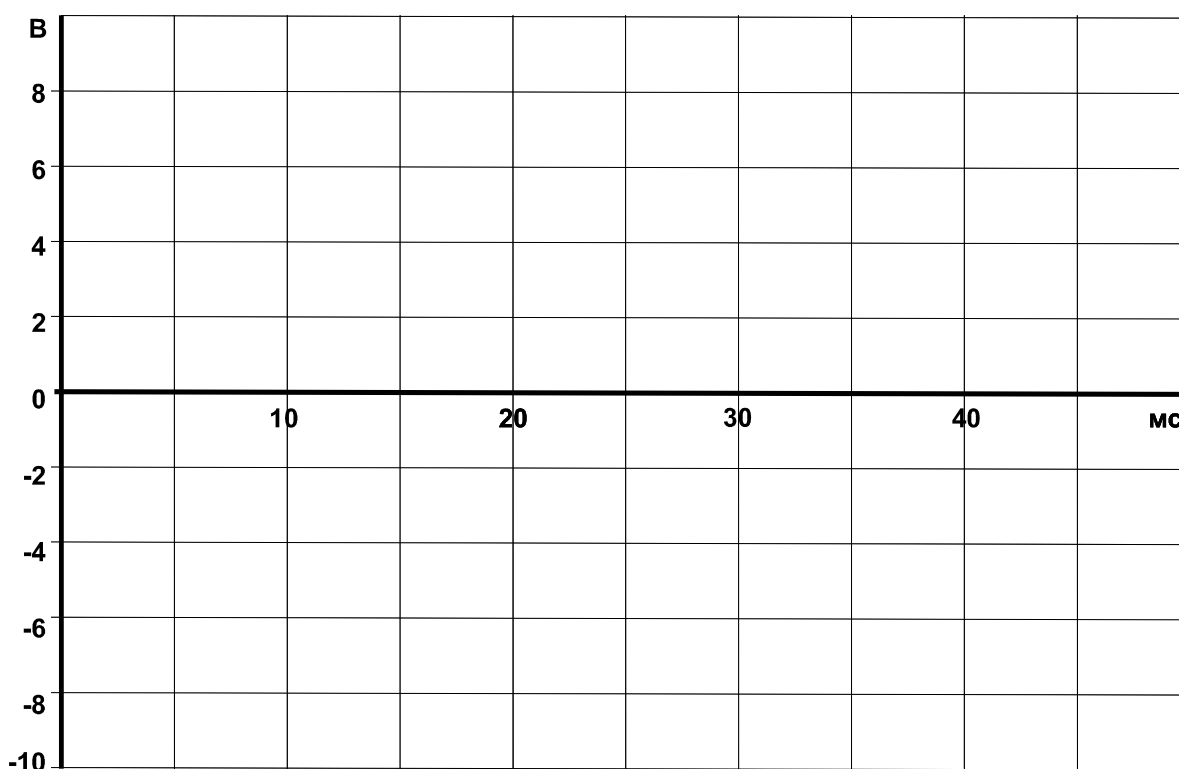


Рис. 1.2.3

*Примечание: в стенде без компьютера все измерения можно проделать с помощью мультиметров и электронного осциллографа.*

### 1.3. Полупроводниковый мостовой выпрямитель

#### 1.3.1. Общие сведения

Однополупериодный выпрямитель использует только одну полуволну переменного напряжения. Как следствие, постоянное напряжение низкое по величине и имеет значительные пульсации.

Этого недостатка удастся избежать в случае мостового выпрямителя со схемой (рис. 1.3.1). Здесь полуволны противоположной полярности суммируются, и среднее значение выпрямленного напряжения увеличивается в два раза.

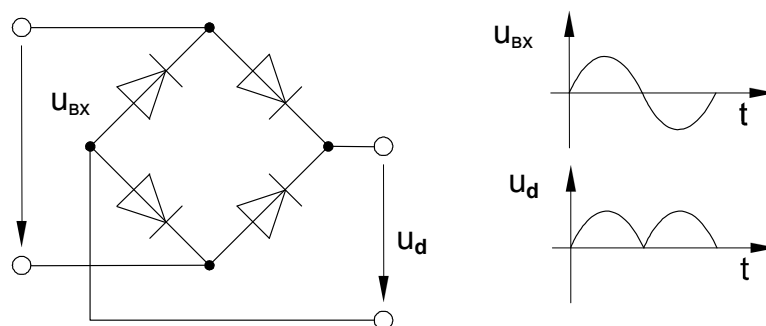


Рис. 1.3.1.

### 1.3.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 1.3.2) без сглаживающего фильтра. На схеме V0 и V1 - входы коннектора. При сборке схемы обратите внимание на полярность электролитического конденсатора.
- Включите виртуальные приборы V0 и V1 и осциллограф. Подключите два любых входа осциллографа к каналам V0 и V1. Установите развертку 5 мС/дел.
- Перенесите на график (рис. 1.3.3) осциллограммы входного и выходного напряжений.
- Сделайте измерения и запишите в табл. 1.3.1. значения:  $U_{ВХ}$  — действующее,  $U_d$  — среднее,  $\Delta U_{\text{пульс}}$ ,  $m = f_{\text{пульс}} / f_{ВХ}$ .
- Рассчитайте и запишите в табл. 1.3.1 коэффициенты  $U_d / U_{ВХ}$  и  $k_{\text{пульс}}$ .

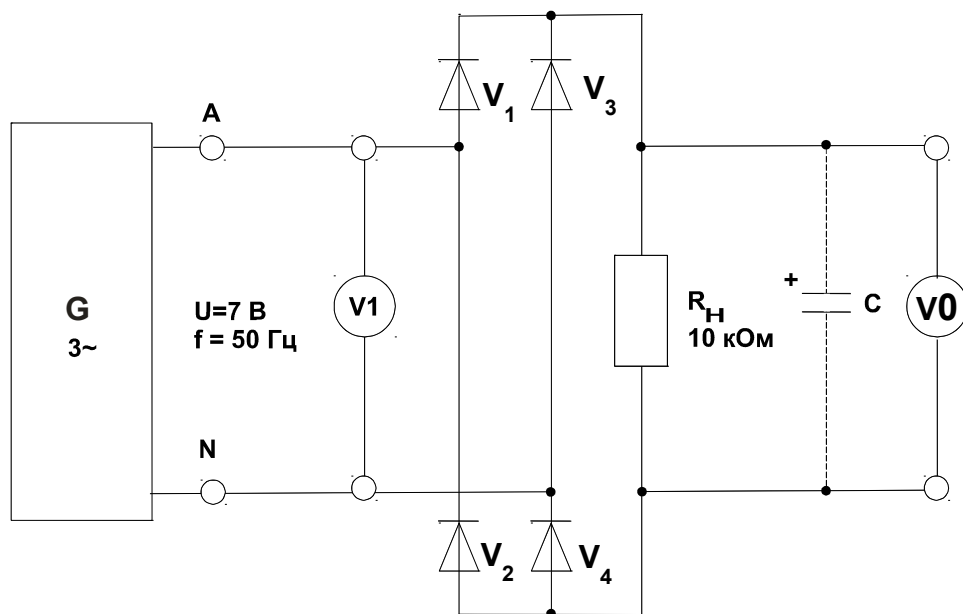


Рис. 1.3.2



Рис. 1.3.3

- Параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  подключите сглаживающие конденсаторы  $C$  с емкостями, указанными в табл. 1.3.1, повторите измерения и дорисуйте графики выпрямленного напряжения на рис.1.3.3.

Таблица 1.3.1

$C, \text{мкФ}$	0	1	10	100
$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$				
$U_d, \text{В}$				
$\Delta U_{\text{пульс}}, \text{В}$				
$m$				
$U_d / U_{\text{ВХ}}$				
$k_{\text{пульс}}$				

*Примечание: в стенде без компьютера все измерения можно проделать с помощью мультиметров и электронного осциллографа.*

## 1.4. Неуправляемый выпрямитель трехфазного тока

### 1.4.1. Общие сведения

Потребители большой мощности питаются выпрямленным трехфазным переменным током. Несколько большая в сравнении с однофазным выпрямителем стоимость трехфазного выпрямителя многократно окупается за счет более простого сглаживания выходного напряжения.

В описанных ниже экспериментах используется источник трехфазного переменного напряжения.

### 1.4.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь трехфазного выпрямителя с нулевым выводом согласно схеме (рис.1.4.1) и подайте на ее вход переменное трехфазное напряжение 7 В, 50 Гц. На схеме V0 и V1 — входы коннектора. При сборке схемы обратите внимание на полярность электролитического конденсатора. В первом опыте  $C=0$  (конденсатор отсутствует).

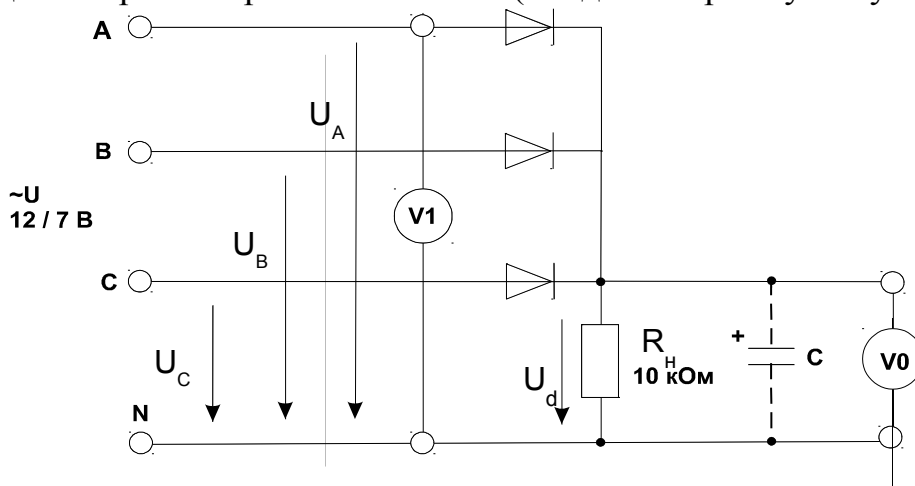


Рис.1.4.1

- Включите виртуальные приборы V0 и V1 и осциллограф. Подключите два любых входа осциллографа к каналам V0 и V1. Установите развертку 5 мС/дел.
- Перенесите на график (рис. 1.4.2) осциллограммы входного и выходного напряжений.
- Сделайте измерения и запишите в табл. 1.4.1 значения:  $U_{ВХ}$  — действующее,  $U_d$  — среднее,  $\Delta U_{\text{пульс}}$ ,  $m = f_{\text{пульс}} / f_{ВХ}$ .
- Рассчитайте и запишите в табл. 1.4.1 коэффициенты  $U_d / U_{ВХ}$  и  $k_{\text{пульс}}$ .
- Параллельно нагрузочному резистору  $R_H$  подключите сглаживающие конденсаторы  $C$  с емкостями, указанными в табл. 1.4.1, повторите измерения и дорисуйте графики выпрямленного напряжения на рис.1.4.2.

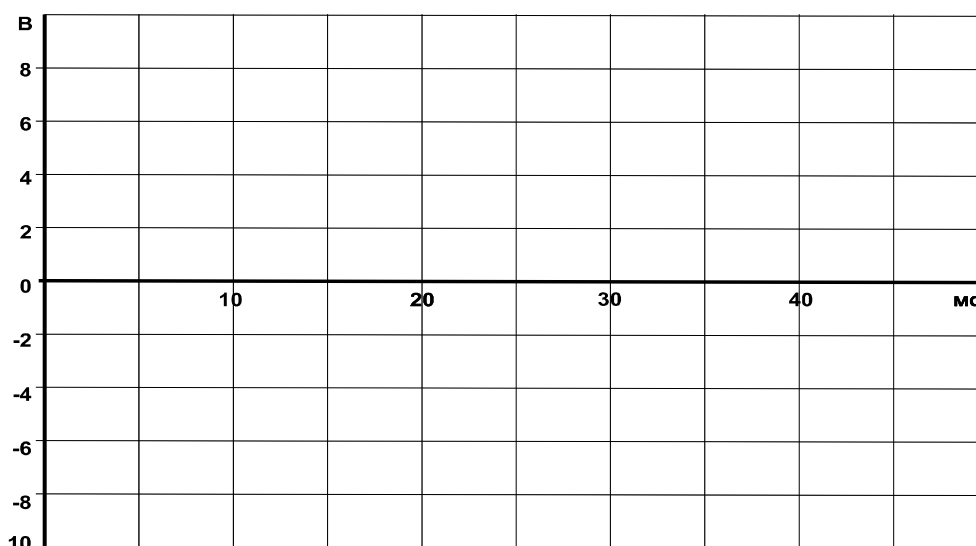


Рис. 1.4.2

Таблица 1.4.1

<b>C, мкФ</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>100</b>
<b><math>U_{ВХ}</math>, В</b>				
<b><math>U_d</math>, В</b>				
<b><math>\Delta U_{\text{пульс}}</math>, В</b>				
<b>m</b>				
<b><math>U_d / U_{ВХ}</math></b>				
<b><math>k_{\text{пульс}}</math></b>				

- Теперь соберите цепь трехфазного мостового выпрямителя согласно схеме (рис. 1.4.3) и повторите все измерения, выполненные для трехфазного выпрямителя с нулевым входом. Результаты представьте в табл. 1.4.1. и на рис. 1.4.4.



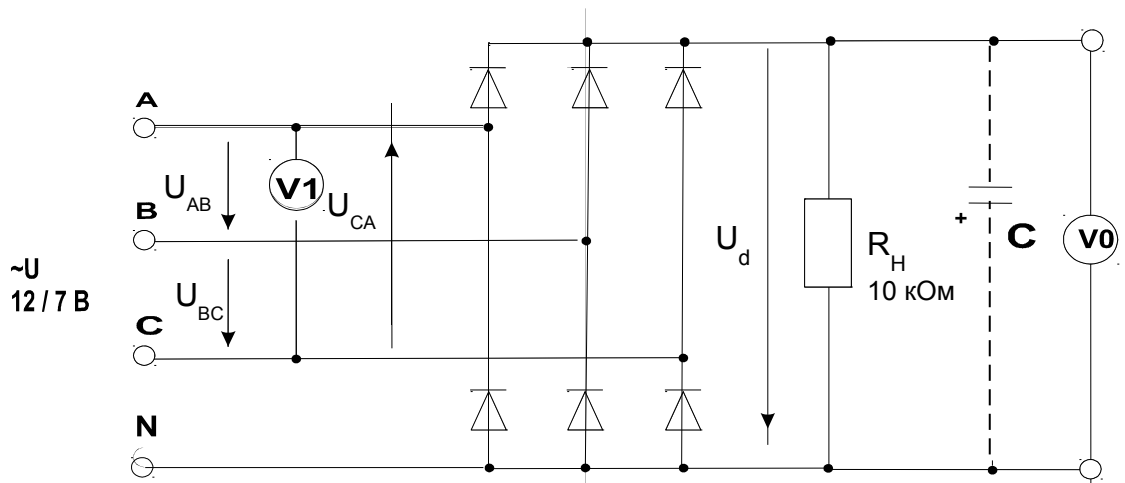


Рис. 1.4.3

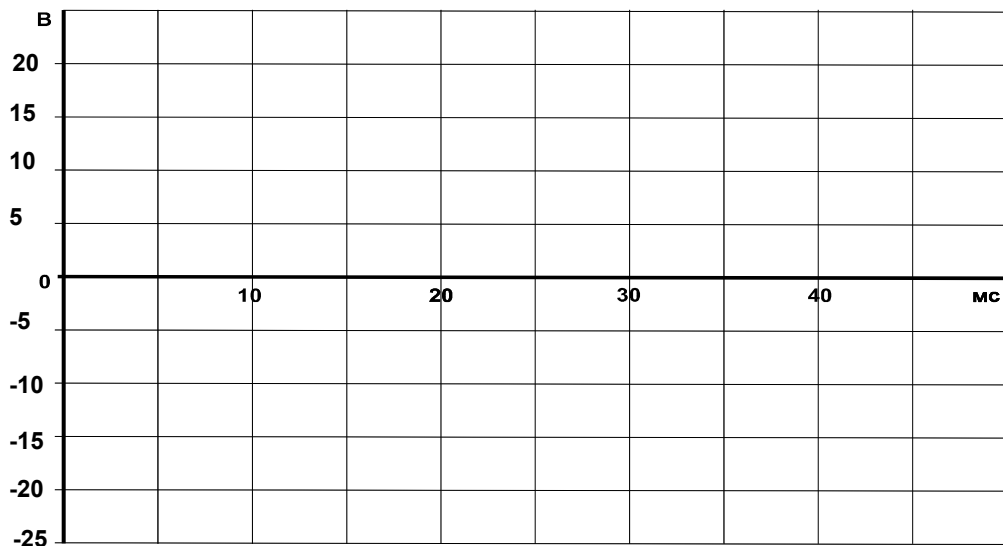


Рис. 1.4.4

*Примечание: в стенде без компьютера все измерения можно проделать с помощью мультиметров и электронного осциллографа.*

### Контрольные вопросы

1. Как называется напряжение, при котором диод становится проводящим?
2. Почему максимальное значение выпрямленного напряжения  $U_{dmax}$  не совпадает с амплитудой входного напряжения?
3. Почему максимальное значение выпрямленного напряжения  $U_{dmax}$  не совпадает с амплитудой входного напряжения?
4. Что произойдет при изменении полярности диода в цепи (рис. 1.2.2)?
5. Каково обратное напряжение диода в схеме со сглаживающим конденсатором?
6. Какое действие оказывает сглаживающий конденсатор на амплитуду пульсаций напряжения?

7. Почему максимальное значение выпрямленного напряжения  $U_{dmax}$  не совпадает с амплитудой входного напряжения?
8. Что произойдет при изменении полярности диода в цепи (рис. 1.3.2)?
9. Каково обратное напряжение диода в схеме с ёмкостным фильтром?
10. Какое действие оказывает сглаживающий конденсатор на амплитуду пульсаций напряжения?
11. Какова частота пульсаций выходного напряжения  $u_{вых}$  трехфазного выпрямителя с нулевым выводом?
12. Каково отношение выходного напряжения постоянного тока  $U_{вых}$  к действующему значению входного напряжения переменного тока  $U_{вх}$  в трехфазном выпрямителе с нулевым выводом?
13. Какова частота пульсаций выходного напряжения  $u_{пульс}$  в трехфазном мостовом выпрямителе?
14. Каково отношение напряжения постоянного тока  $U_{вых}$  к действующему значению входного напряжения переменного тока  $U_{вх}$  в трехфазном мостовом выпрямителе?

## **Лабораторная работа №2**

Тема: Стабилитроны (диоды Зенера)

### **Цель:**

1. Снять с помощью осциллографа вольтамперную характеристику и определить напряжение  $U_{ст}$  стабилитрона. Работа может быть выполнена как с помощью электронного, так и виртуального осциллографа.
2. Исследовать зависимость выходного напряжения и тока стабилитрона от входного напряжения в цепи параметрического стабилизатора напряжения.
3. Исследовать влияние тока нагрузки  $I_n$  на величину тока стабилитрона.
4. Изучить стабилизирующее действие диода Зенера в случае выпрямленного напряжения с заметными пульсациями.

### **2.1. Характеристики стабилитрона**

#### **2.1.1. Общие сведения**

Стабилитрон представляет собой кремниевый диод, характеристика которого в открытом состоянии такая же, как у выпрямительного диода. Отличие стабилитрона - в относительно низком напряжении пробоя при обратном напряжении. Когда это напряжение превышено, ток обратного направления возрастает скачком (эффект Зенера). В выпрямительных диодах такой режим является аварийным, а стабилитроны нормально работают при обратном токе, не превышающем максимально допустимого значения.

Чтобы избежать перегрузки, последовательно со стабилитроном включают балластный резистор. Величина его вычисляется следующим образом:

$$R_{\text{БАЛ}} = (U_{\text{РАБ}} - U_{\text{СТ}}) / (I_{\text{СТ}} + I_{\text{НАГР}}),$$

где  $U_{\text{РАБ}}$  - приложенное рабочее напряжение,  
 $U_{\text{СТ}}$  - напряжение стабилизации стабилитрона испытываемого типа,  
 $I_{\text{СТ}}$  - допустимый ток стабилизации,  
 $I_{\text{Н}}$  - ток в резисторе нагрузки  $R_{\text{Н}}$ , включенном параллельно стабилитрону.

Свойства стабилитронов делают их пригодными для стабилизации и ограничения напряжений.

### 2.1.1. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 2.1.1) и подайте на вход синусоидальное напряжение 24 В частотой 50 Гц. На схеме А и V — входы коннектора.
- Включите и настройте виртуальный осциллограф в режиме X-Y (А – горизонтальный вход, V – вертикальный вход).

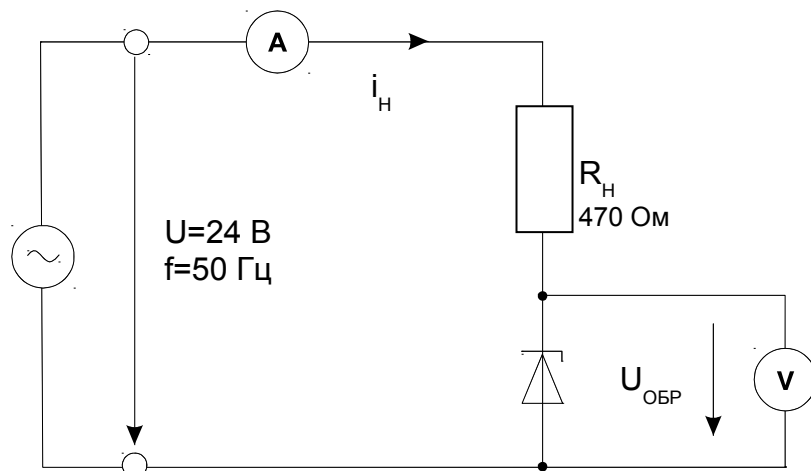


Рис. 2.1.1

- Перенесите изображение с экрана осциллографа на график (рис.2.1.2).

Рис.2.1.2

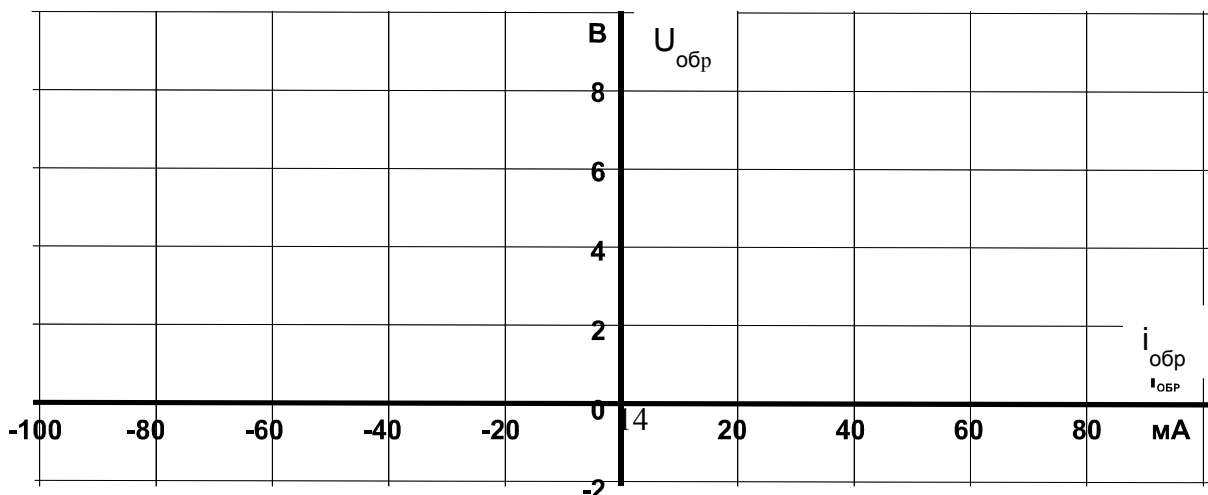
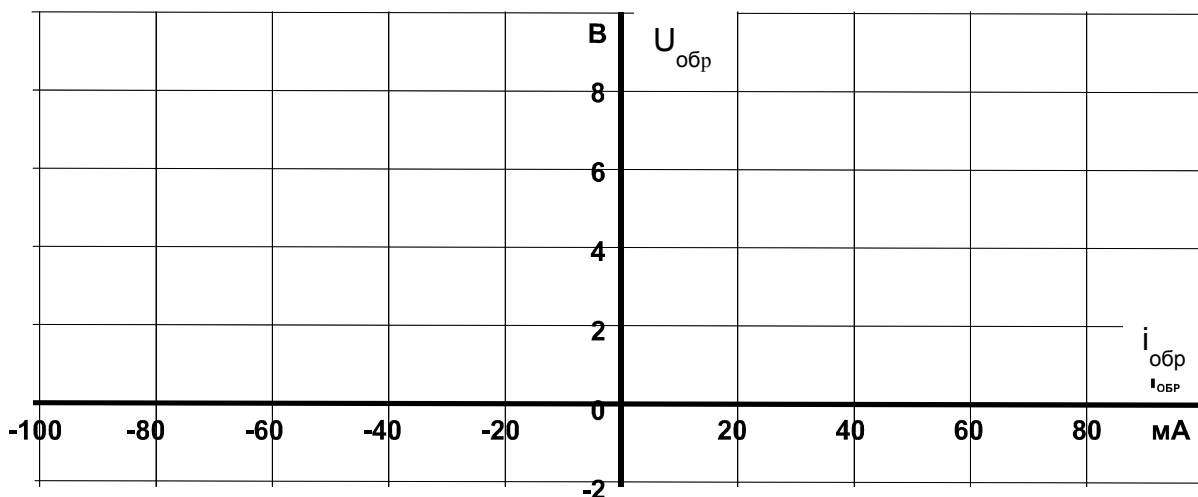


Рис.2.1.2



## 2.2. Исследование параметрического стабилизатора напряжения

### 2.2.1. Общие сведения

Наличие почти горизонтального участка на вольтамперной характеристике стабилитрона делает его пригодным для стабилизации постоянного напряжения на нагрузке. Для этого нагрузку включают параллельно стабилитрону и подсоединяют к источнику через балластный резистор.

### 2.2.2. Экспериментальная часть Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 2.2.1). Устанавливая последовательно величины входного напряжения постоянного тока по табл. 2.2.1, измерьте соответствующие выходные напряжения и токи стабилитрона посредством мультиметров. Результаты занесите в таблицу.

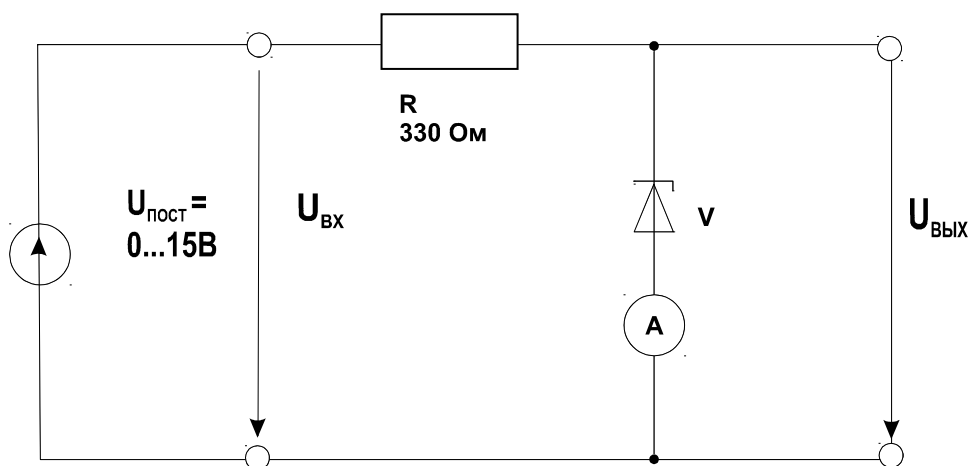


Рис. 2.2.1

Таблица 2.2.1

<b>U<sub>ВХ</sub>, В</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
<b>U<sub>ВЫХ</sub>, В</b>																
<b>I<sub>СТ</sub>, МА</b>																

- Постройте на графике (рис. 2.2.2) кривую зависимости выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного  $U_{\text{ВХ}}$ .

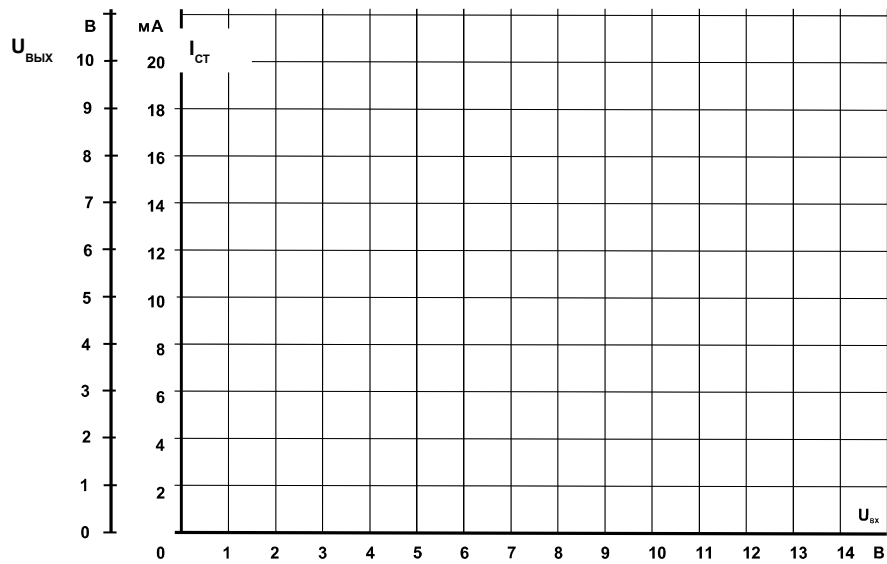


Рис. 2.2.2

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 2.2.3), и устанавливая последовательно сопротивления нагрузки 10; 4,7; 2,2; 1; 0,68; 0,47 кОм, измерьте посредством мультиметра соответствующие значения токов  $I_{СТ}$  и  $I_H$  и занесите их в табл. 2.2.2.

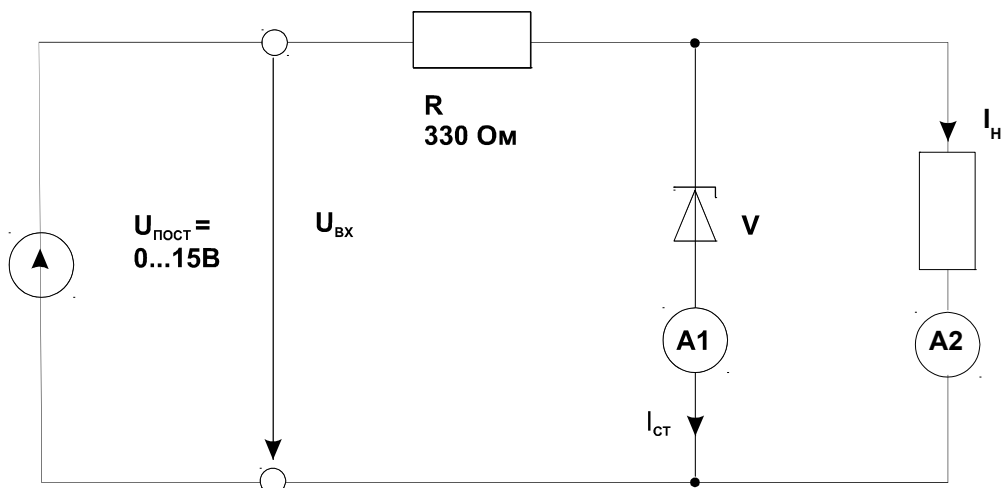


Рис. 2.2.3

Таблица 2.2.2

$R_H$ , кОм	10	4,7	2,2	1,0	0,68	0,47
$I_H$ , мА						
$I_{СТ}$ , мА						

- Постройте на графике (рис. 2.2.4) кривую зависимости тока  $I_{CT}$  от тока нагрузки  $I_H$ .

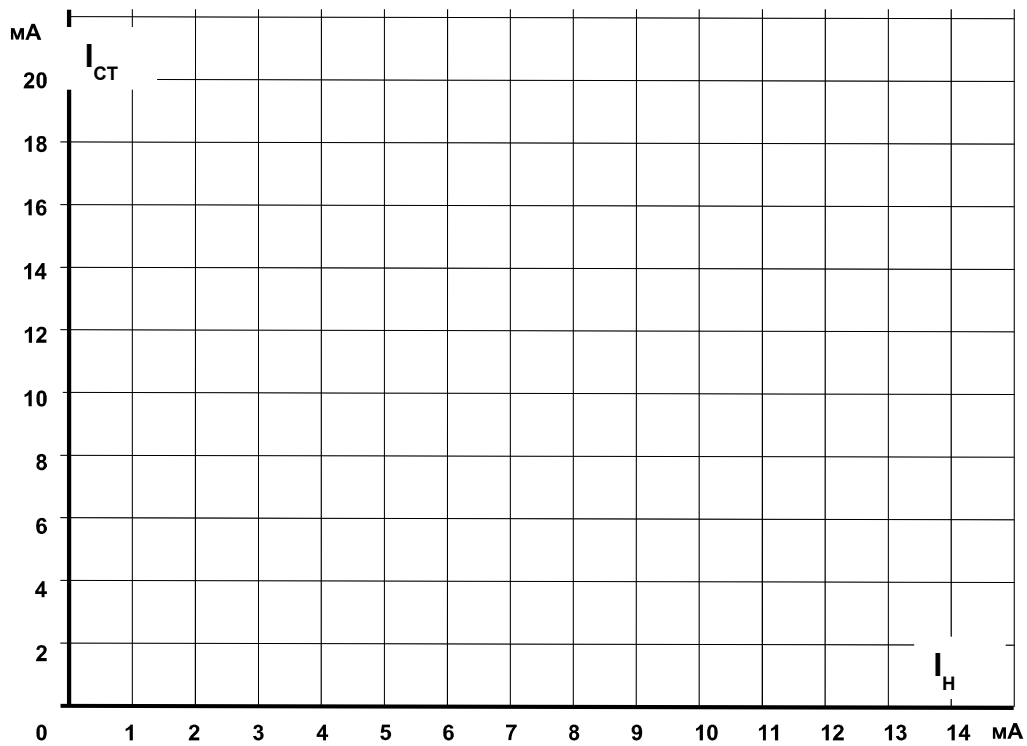


Рис. 2.2.4

### 2.3. Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения

#### 2.3.1. Общие сведения

Стабилитроны позволяют стабилизировать напряжение не только при медленных его изменениях, но и при пульсациях после выпрямления и предварительного сглаживания.

#### 2.3.2. Экспериментальная часть

##### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 2.3.1). На схеме V0 и V1 – входы коннектора.

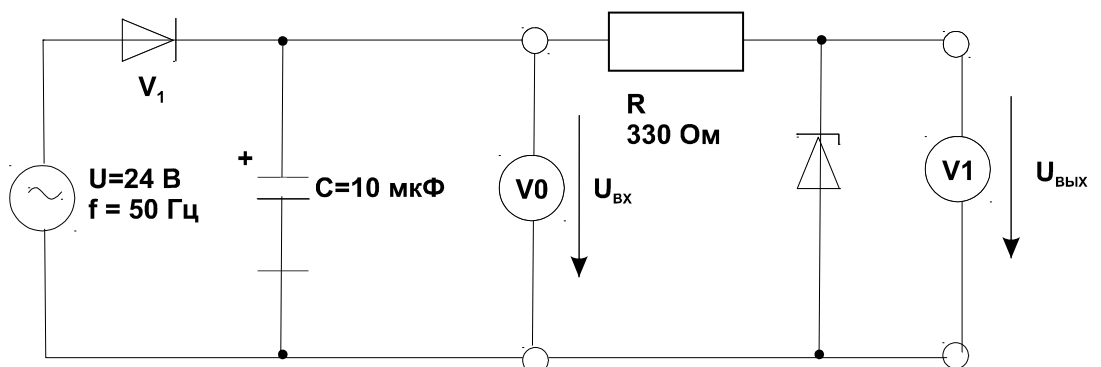


Рис. 2.3.1

- Включите и настройте виртуальный осциллограф.
- Перенесите осциллограммы входного и выходного напряжений на график (рис. 2.3.2).

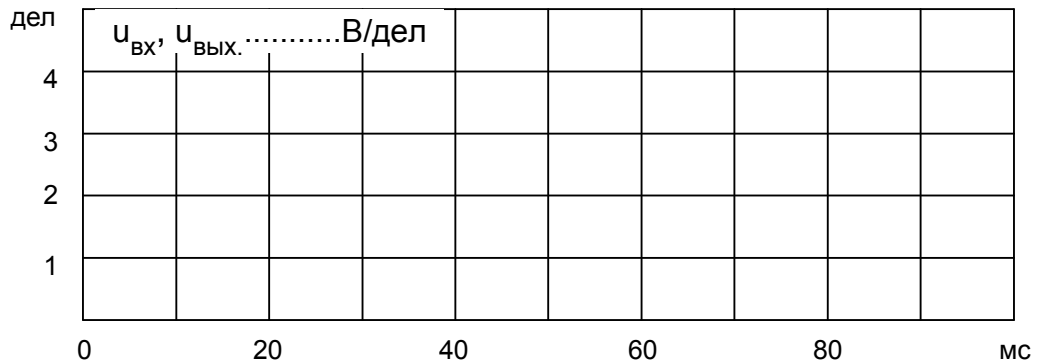


Рис. 2.3.2

- Исключите из кривых постоянную составляющую, щелкнув мышью на соответствующих кнопках виртуального осциллографа.
- Перерисуйте кривые напряжений  $u_{вх}$  и  $u_{вых}$  на графике (рис.2.3.3) без постоянных составляющих, укажите масштабы.

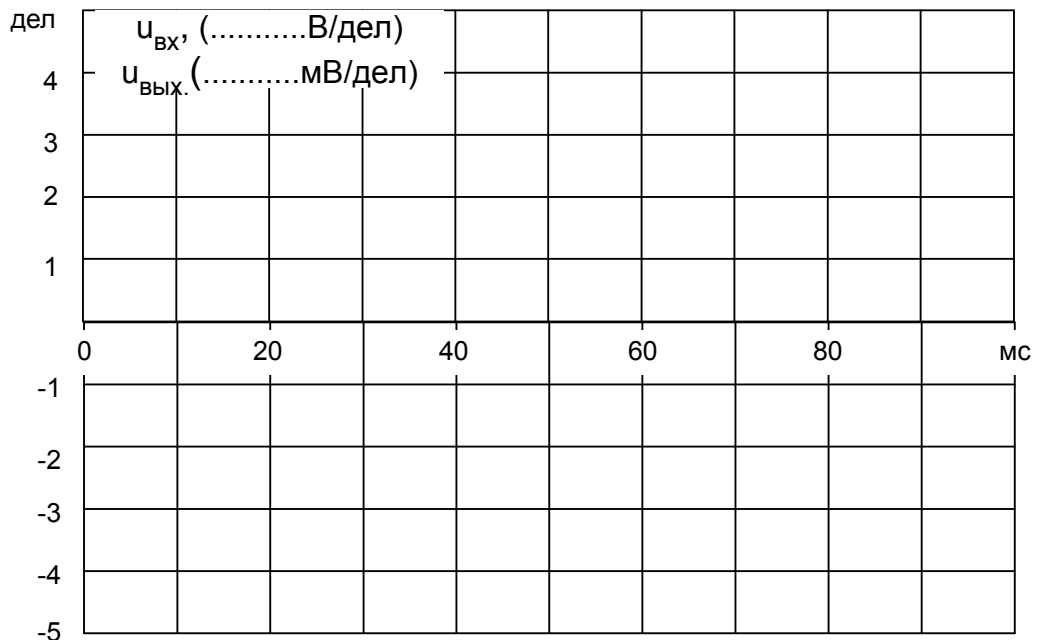


Рис. 2.3.3

- Пользуясь осциллограммами, ответьте на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Какова величина напряжения стабилизации  $U_{ст}$ ?
2. Каков максимальный обратный ток стабилитрона  $I_{ст}$ ?



3. Какова величина прямого напряжения стабилитрона  $U_{пр}$ ?
4. Каков максимальный прямой ток стабилитрона?
5. При каких условиях выходное напряжение параметрического стабилизатора остается постоянным?
6. Когда возникает ток стабилизации  $I_{ст}$ ?
7. При каких условиях эффект стабилизации сохраняется даже под нагрузкой?
8. Какова пульсация входного напряжения  $\Delta U_{вх}$  за сглаживающим конденсатором?
9. Какова пульсация выходного напряжения  $\Delta U_{вых}$  за стабилитроном?
10. Какова величина коэффициента сглаживания  $G$  (абсолютного коэффициента стабилизации)?
11. Какова величина относительного коэффициента стабилизации  $S$ ?

### **Лабораторная работа №3**

Тема: Диоды с особыми свойствами

**Цель:**

1. Снять вольтамперную характеристику светодиода посредством осциллографа.
2. Изучить влияние напряжения  $U_{сд}$ , тока  $I_{сд}$  светодиода и его полярности на световую эмиссию.
3. Снять с помощью осциллографа вольтамперную характеристику варикапа.
4. В параллельном резонансном контуре изучить зависимость резонансной частоты от обратного напряжения варикапа и влияние этого напряжения на емкость обедненного (запирающего) слоя.

#### **3.1. Светодиоды**

##### **3.1.1. Общие сведения**

В случаях, когда полупроводниковые диоды выполнены из таких материалов как арсенид галлия или фосфид галлия, часть подводимой к ним электрической энергии преобразуется не в тепло, как в других полупроводниках, а в световые потоки с намного более короткой длиной волны. Цвет излучения определяется выбором соответствующего материала и присадками. Цвет может быть инфракрасным, красным, желтым, оранжевым, зеленым или даже голубым.

##### **3.1.2. Экспериментальная часть**

###### **Порядок выполнения эксперимента**

- Подведите одно из линейных напряжений 12 В, 50 Гц трехфазного источника к цепи (рис. 3.1.1) и заосциллографируйте зависимость напряжения от тока. На схеме  $A1$  и  $V1$  – входы коннектора. Для получения

на виртуальном осциллографе зависимости напряжения от тока включите режим X-Y переключателем «XY-развертка».

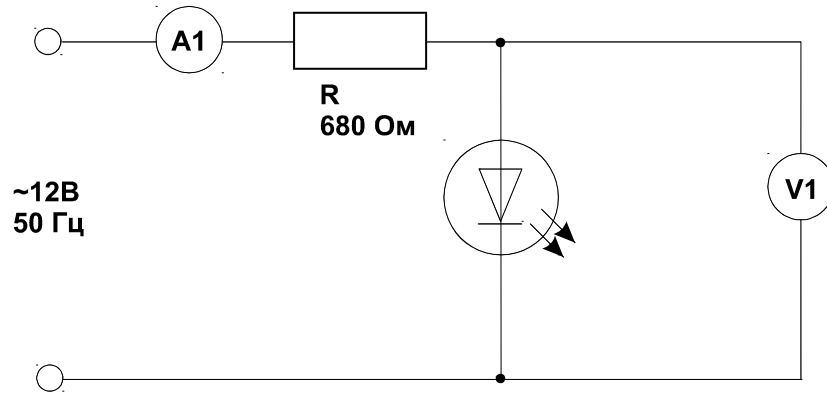


Рис. 3.1.1

- Перенесите осциллограмму на график (рис. 3.1.2).

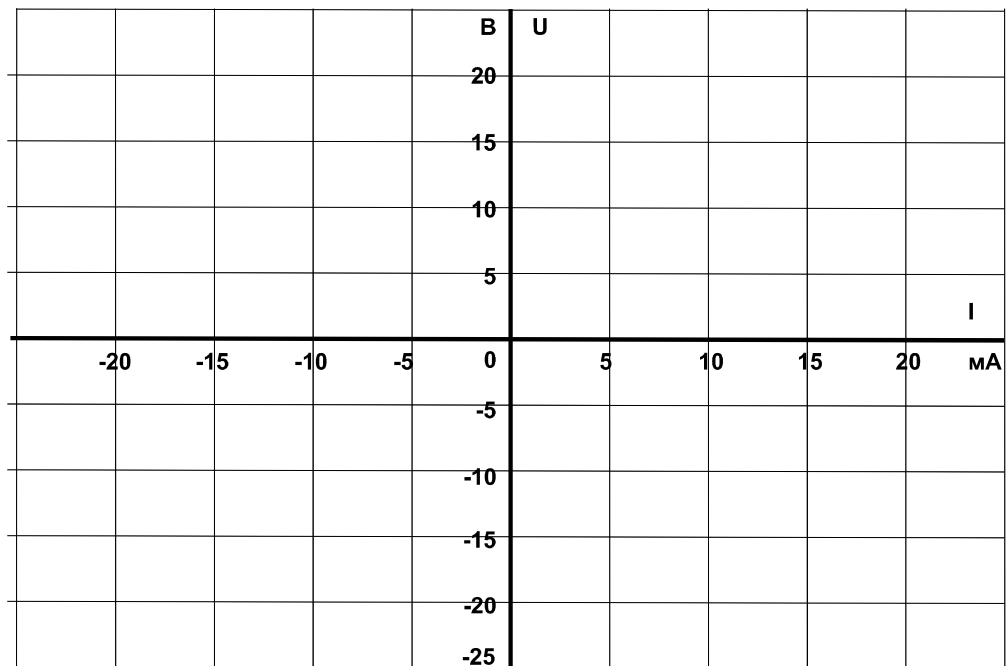


Рис. 3.1.2

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 3.1.3) и изменяйте входное напряжение последовательными шагами, как указано в табл. 3.1.1. Измерьте прямое напряжение  $U_{сд}$  и ток  $I_{сд}$  светодиода с помощью мультиметра и установите светозлучение (отсутствует, слабое, среднее, сильное). Занесите данные в таблицу.

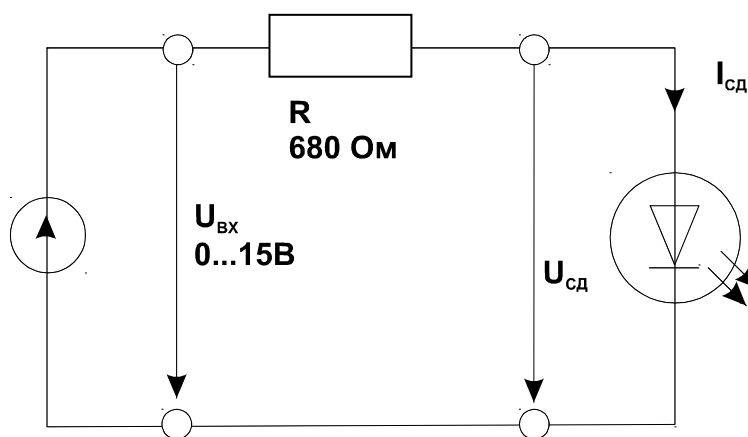


Рис. 3.1.3

Таблица 3.1.1

$U_{вх}, В$	$U_{сд}, В$	$I_{сд}, мА$	светоизлучение
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
15			

- Измените полярность диода и убедитесь, что светоизлучения не наблюдается.

### 3.2. Диоды с переменной емкостью (варикапы)

#### 3.2.1. Общие сведения

**p-n** переход запертого кремниевого диода ведет себя как изолятор и, таким образом, подобен диэлектрику конденсатора. Приложенное обратное напряжение влияет на толщину **p-n** перехода и, соответственно, на емкость.

#### 3.2.2. Экспериментальная часть

##### Порядок выполнения эксперимента

- Приложите синусоидальное напряжение 12 В, 50 Гц (одно из линейных напряжений трехфазного источника) к цепи (рис. 3.2.1) и заосциллографируйте зависимость напряжения от тока. На схеме А1 и V1 –

входы коннектора. Для получения на виртуальном осциллографе зависимости напряжения от тока включите режим X-Y переключателем «XY-развертка».

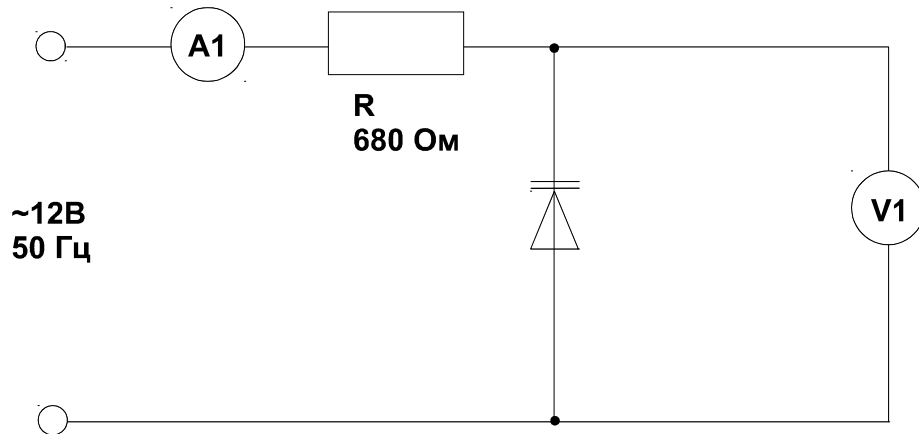


Рис. 3.2.1

- Перенесите осциллограмму на график (рис. 3.2.2).

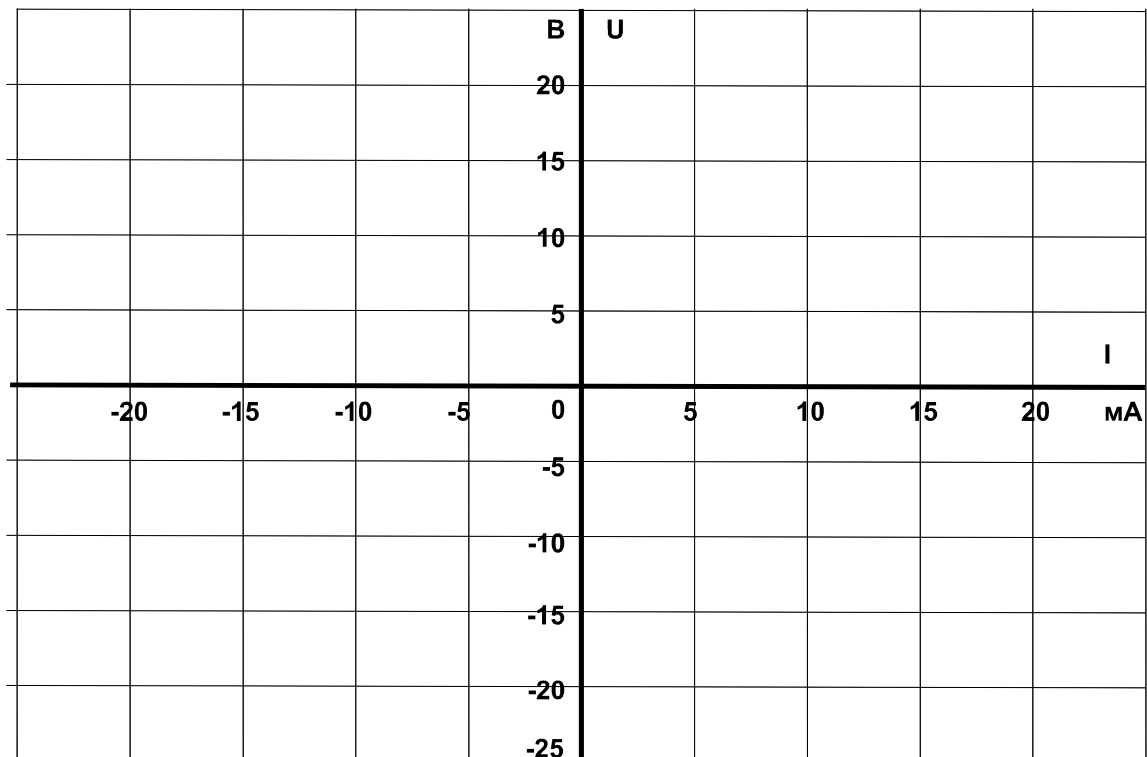


Рис. 3.2.2

### Порядок выполнения эксперимента

- Приложите синусоидальное напряжение амплитудой 10 В к цепи (рис.3.2.3). Частота напряжения должна быть между 10 и 20 кГц. На схеме V1 – вход коннектора или мультиметр, V2 – только мультиметр. Индуктивность 200 мГн получается путем последовательного соединения двух индуктивностей по 100 мГн, постоянное напряжение

больше 15 В – путем последовательного соединения регулируемого и нерегулируемого источников напряжения.

**Примечания:**

1. В схеме нельзя использовать два канала коннектора, т.к. при этом частота отсчетов оказывается недостаточной.
2. Конденсатор  $C = 0,22$  мкФ служит для исключения пути протекания постоянного тока через катушку и ввиду большой емкости не влияет на параметры резонансного контура.

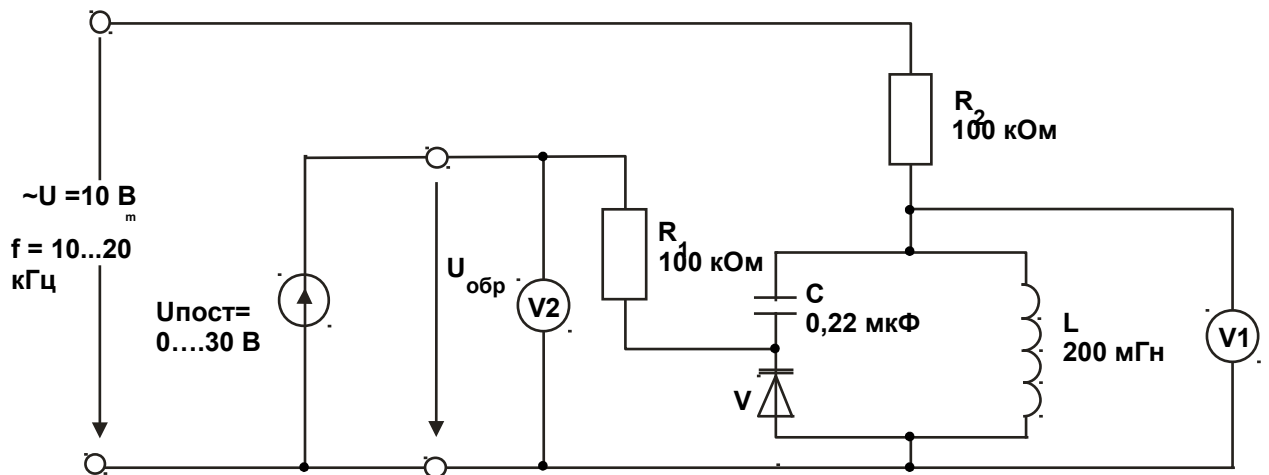


Рис.3.2.3

- Изменяйте обратное постоянное напряжение варикапа ступенями согласно табл. 3.2.1. и находите значения резонансной частоты  $f_{РЕЗ}$  для каждого значения обратного напряжения. Резонансная частота в данном случае - это та частота, при которой напряжение между концами параллельной цепочки достигает максимума. Занесите результаты измерений в табл.3.2.1.

Таблица 3.2.1

$U_{ОБР}, В$	$f_{РЕЗ}, кГц$	$L, мГн$	$C, пФ$
2		200	
5		200	
10		200	
15		200	
20		200	
25		200	
30		200	

- По таблице 3.2.1 постройте график зависимости резонансной частоты от обратного напряжения  $U_{ОБР}$ .

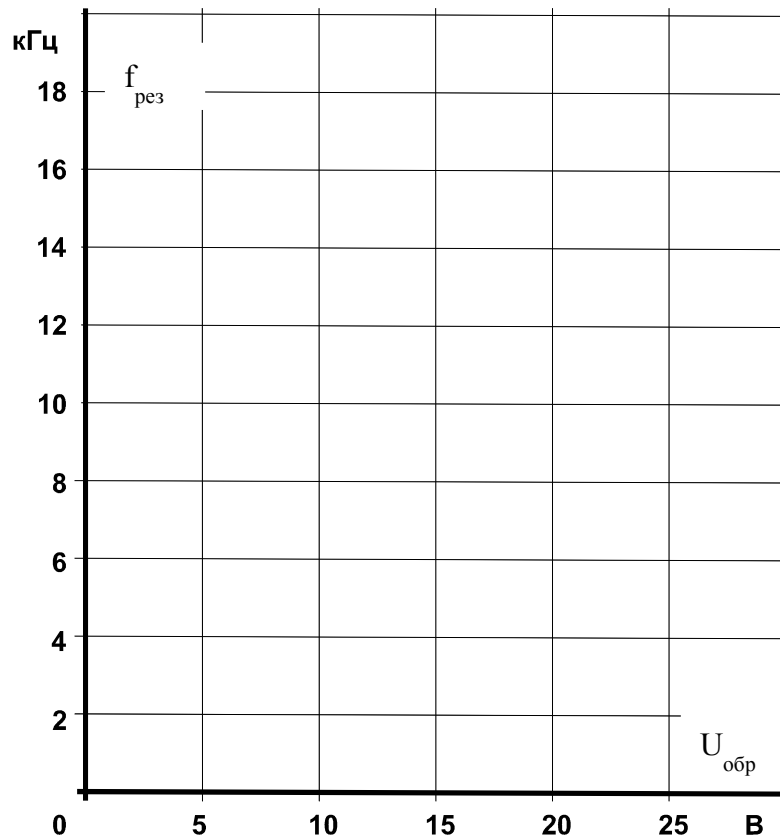


Рис.3.2.4

- Вычислите емкость резонансной цепи по измеренным резонансным частотам и индуктивности, занесите значения в табл. 3.2.1.

$$C = \frac{1}{(2\pi f_{\text{рез}})^2 L},$$

где  $C$  - емкость варикапа в Ф,  
 $L$  - индуктивность катушки в Гн,  
 $f_{\text{рез}}$  - резонансная частота в Гц.

- Занесите значения емкости варикапа в табл. 3.2.1. Затем постройте зависимость емкости запорного слоя  $C$  от обратного напряжения  $U_{\text{обр}}$  на графике (рис. 3.2.5).

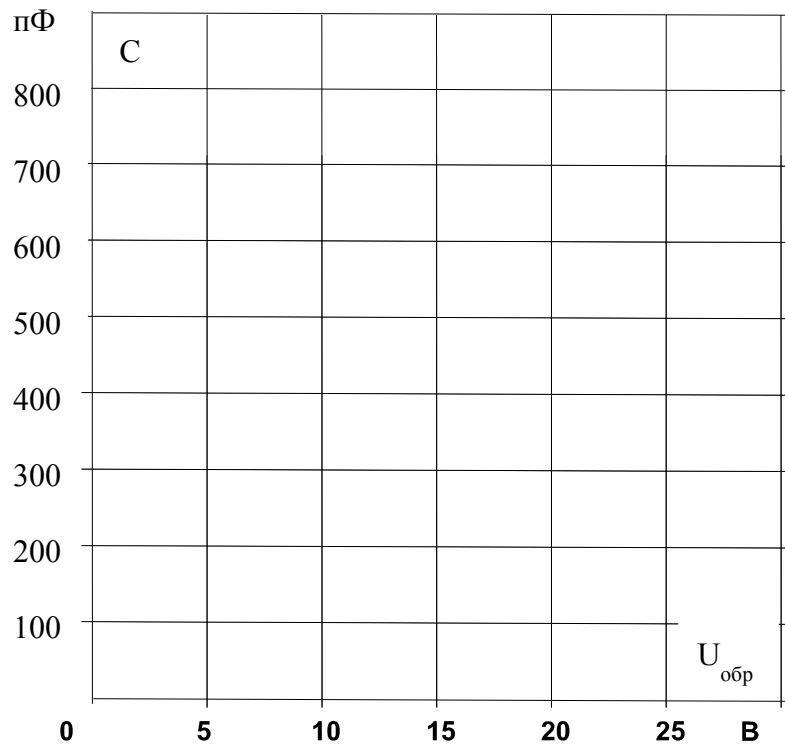


Рис. 3.2.5

**Контрольные вопросы:**

1. Какой минимальный ток необходим светодиоду для слабого свечения?
2. Как ведет себя свечение при изменении полярности прикладываемого напряжения?
3. Напряжение питания светодиода 5 В. Какой добавочный резистор необходим при токе 15 мА?
4. Какова величина порогового напряжения варикапа?
5. Как ведет себя емкость запорного слоя при увеличении обратного напряжения?

**Лабораторная работа №4**

Тема: Биполярные транзисторы

Цель:

1. Снять вольтамперные характеристики эмиттерного и коллекторного **p-n** переходов транзисторов типа **p-n-p** и типа **n-p-n** в прямом направлении. Убедитесь, что в обратном направлении токи через эти **p-n** переходы ничтожно малы.
2. Исследовать влияние тока базы на вольтамперную характеристику  $I_K(U_{ЭК})$  для **n-p-n** транзистора с помощью осциллографа.
3. Снять экспериментально и построить графики четырех семейств характеристик биполярного транзистора **n-p-n** типа.

4. Экспериментально исследовать влияние сопротивления в цепи коллектора на коэффициент усиления по напряжению.
5. Выполнить измерения и определить следующие электрические показатели основных схем усилителей:
  - коэффициент усиления по напряжению  $\nu_U$ ,
  - угол фазового сдвига  $\varphi$ ,
  - входное сопротивление  $R_{вх}$ ,
  - выходное сопротивление  $R_{вых}$ .
6. Изучить выходное напряжение регулятора напряжения как функцию входного напряжения.
7. Изучить выходные напряжение и ток регулятора тока в зависимости от входного напряжения и сопротивления нагрузки.

#### **4.1. Испытание слоев и выпрямительного действия биполярных транзисторов**

##### **4.1.1. Общие сведения**

Транзистор (рис. 4.1.1) представляет собой полупроводниковый триод, у которого тонкий **p**-проводящий слой помещен между двумя **n**-проводящими слоями (**n-p-n** транзистор) или **n**-проводящий слой помещен между двумя **p**-проводящими слоями (**p-n-p** транзистор).

**p-n** переходы между средним слоем (база) и двумя крайними слоями (эмиттер и коллектор) обладают выпрямительным свойством, которое можно исследовать как в случае любого выпрямительного диода.

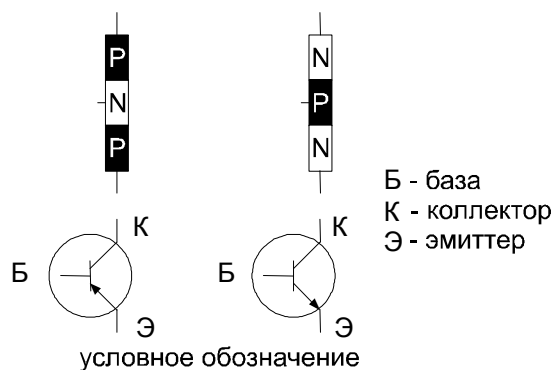


Рис. 4.1.1

#### **4.1.2. Экспериментальная часть**

##### **Порядок выполнения эксперимента**

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.1.2а).



- Поочередно устанавливая значения токов  $I_{ПР}$  регулятором напряжения источника, измерьте соответствующие значения напряжения на **p-n** переходе  $U_{БЭ}$  и занесите их в табл. 4.1.1.
- Измените схему в соответствии сначала с рис. 4.1.2б, затем 4.1.2в и 4.1.2г и повторите все измерения.

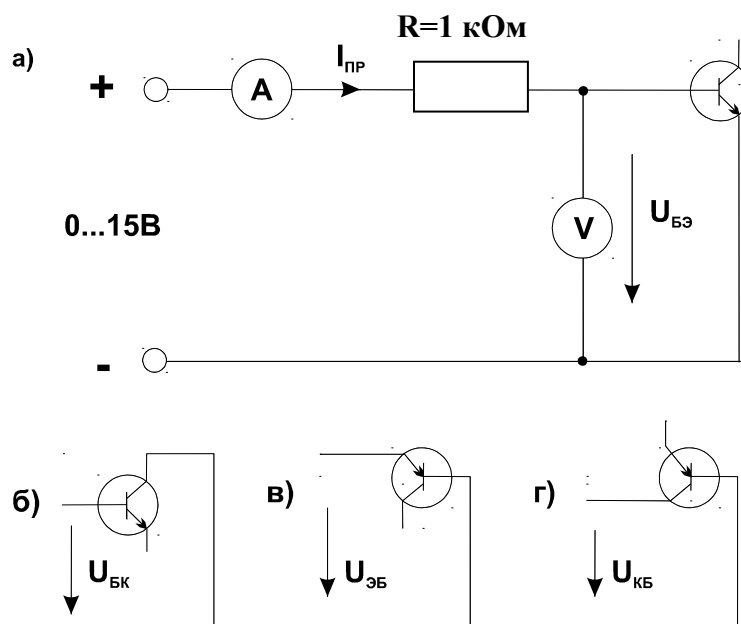


Рис. 4.1.2

- На рис. 4.1.3 постройте графики  $I_{ПР}(U_{ПР})$  для каждого случая и убедитесь, что вольтамперные характеристики всех **p-n** переходов практически совпадают.
- Установите входное напряжение источника равным нулю, поменяйте его полярность (зажим «+» на «—») и увеличивая напряжение до 5 В (но не выше!), убедитесь, что ток в **p-n** переходе практически остается равным нулю (не превышает 1  $\mu$ А).
- Прodelайте этот с остальными **p-n** переходами согласно схеме на рис. 4.1.2 при обратной полярности источника питания.

Таблица 4.1.1

$I_{ПР}$ , мА	Транзистор n-p-n		Транзистор p-n-p	
	$U_{БЭ}$ , В	$U_{БК}$ , В	$U_{ЭБ}$ , В	$U_{КБ}$ , В
0				
1				
2				
4				
8				
14				

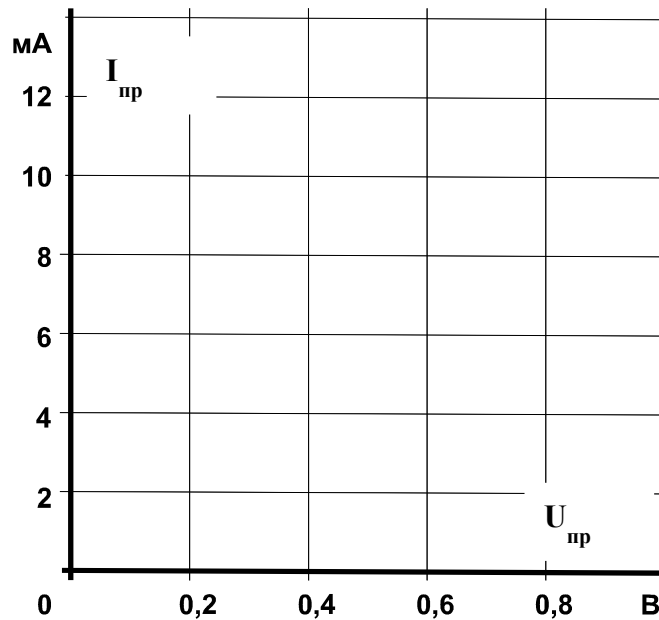


Рис. 4.1.3

## 4.2. Распределение тока в транзисторе

### и управляющий эффект тока базы

#### 4.2.1. Общие сведения

В транзисторе **p-n-p** типа (рис. 4.2.1) ток эмиттера к коллектору через базу обусловлен неосновными для базы носителями заряда – дырками. При положительном направлении напряжения  $U_{ЭБ}$  эмиттерный **p-n** переход открывается, и дырки из эмиттера проникают в область базы. Часть из них уходит к источнику напряжения  $U_{ЭБ}$ , а другая часть достигает коллектора. Возникает так называемый транзитный ток от эмиттера к коллектору. Он резко возрастает с увеличением  $U_{ЭБ}$  и тока базы.

В транзисторе **n-p-n** типа (рис. 4.2.1б) транзитный ток через базу обусловлен также неосновными для нее носителями заряда – электронами. Там они появляются из эмиттера, если к эмиттерному **p-n** переходу прикладывается напряжение  $U_{БЭ}$ , полярность которого показана на рис. 4.2.1б.

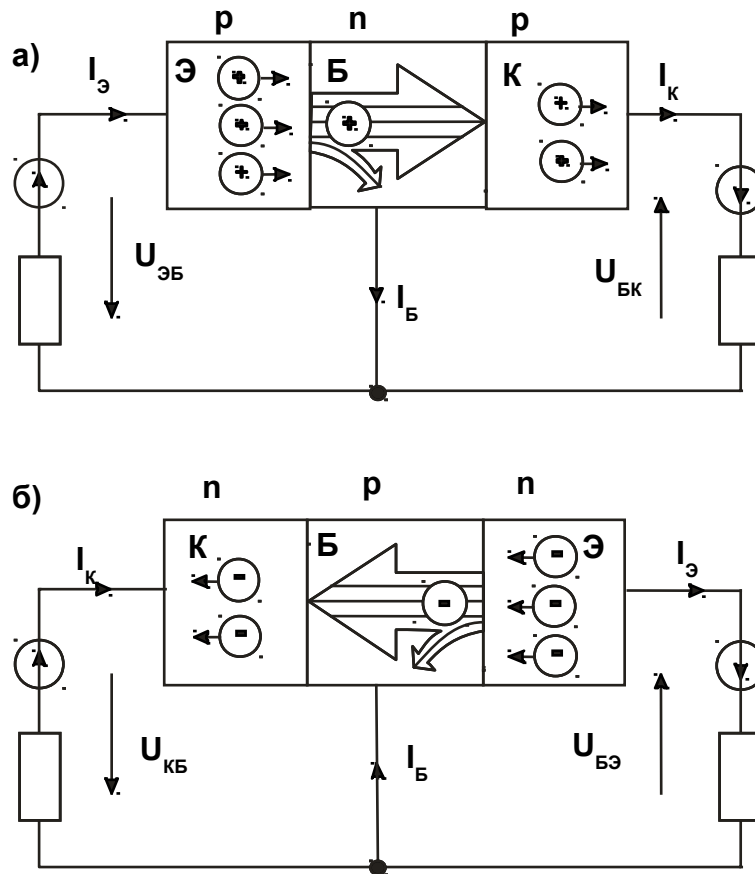


Рис. 4.2.1

Токи эмиттера, коллектора и базы связаны между собой уравнением первого закона Кирхгофа:

$$I_K = I_E - I_B.$$

Обычно ток базы существенно меньше  $I_K$  и  $I_E$ , но от него сильно зависит как  $I_K$ , так и  $I_E$ . Отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы называется коэффициентом усиления по току:

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B.$$

Он может иметь значения от нескольких десятков до нескольких сотен. Поэтому с помощью сравнительно малого тока базы можно регулировать относительно большие токи коллектора (и эмиттера).

#### 4.2.2. Экспериментальная часть

##### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.2.2). В этой цепи в качестве источника синусоидального напряжения используется линейное напряжение трехфазного генератора, а диод включен для исключения обратного напряжения на транзисторе. Приборы A1 и V0 – входы

коннектора, служащие для вывода тока  $I_K$  и напряжения  $U_{KЭ}$  на виртуальный осциллограф. Миллиамперметр А служит для измерения тока базы и может быть как мультиметром, так и виртуальным прибором.

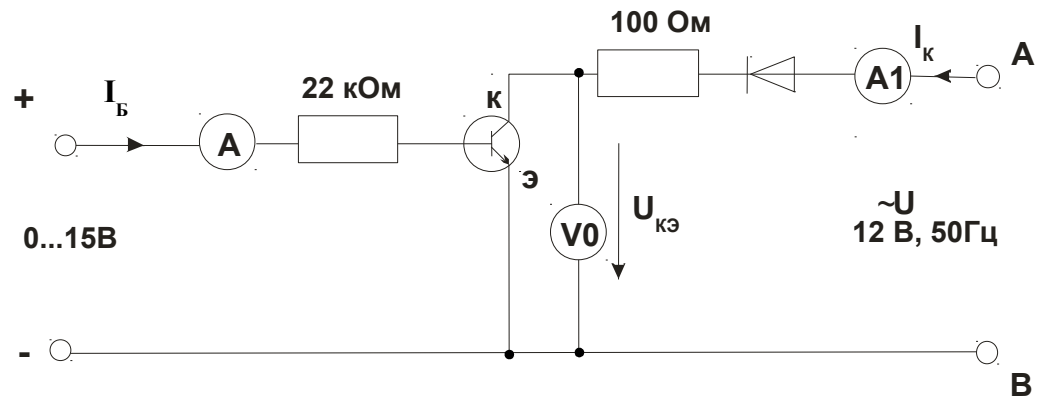


Рис. 4.2.2

- Включите виртуальные приборы A1, V0 и виртуальный осциллограф. На осциллографе установите режим XY. В качестве входа Y выберите ток коллектора, т.е. A1 (по умолчанию это канал 3). В качестве входа X выберите  $U_{KЭ}$ , т.е. V0 (по умолчанию – канал 1).
- Установите регулятор постоянного напряжения на ноль и зафиксируйте кнопкой 1 осциллографа масштаб по напряжению. Затем установите регулятор постоянного напряжения на максимум и зафиксируйте кнопкой 3 осциллографа масштаб тока. Теперь при регулировании тока базы масштабы по осям осциллографа автоматически изменяться не будут.
- Регулируя тока базы от 0 до максимального значения и наоборот, наблюдайте за изменением кривой  $I_K(U_{KЭ})$  на осциллографе. При нескольких значениях тока базы (включая нулевое и максимальное) перерисуйте кривую  $I_K(U_{KЭ})$  с осциллографа на рис. 4.2.2. Не забудьте указать масштабы по осям и токи базы для каждой кривой.
- На семействе кривых  $I_K(U_{KЭ})$  выберите какое-либо постоянное напряжение  $U_{KЭ}$  (например, 5 В) и на рис. 4.2.3 постройте зависимость  $I_K(I_B)$  для этого значения напряжения  $U_{KЭ}$ . Рассчитайте и на этом же рисунке постройте график  $\beta(I_B) = \Delta I_K / \Delta I_B$ . Нанесите шкалы по осям.

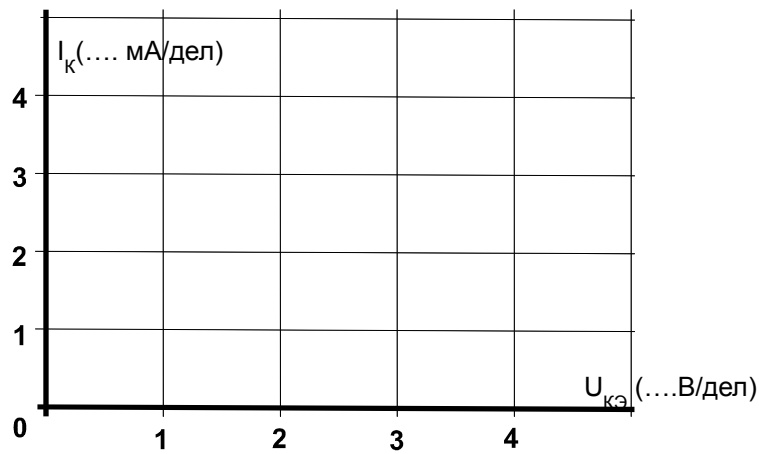


Рис. 4.2.2.

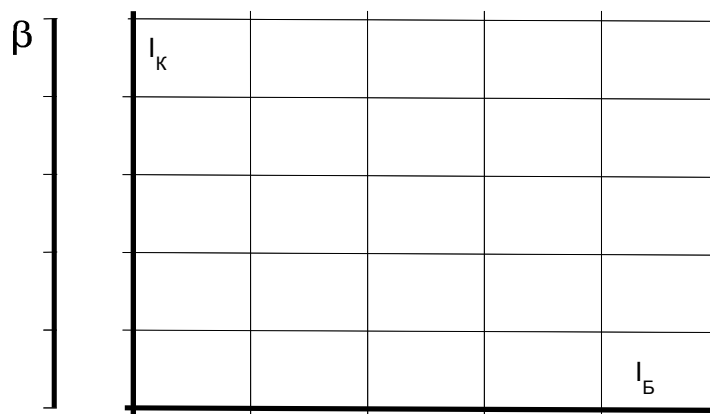


Рис. 4.2.3.

### 4.3. Характеристики транзистора

#### 4.3.1. Общие сведения

Свойства транзисторов описываются следующими четырьмя семействами характеристик.

**Входная характеристика** показывает зависимость тока базы  $I_B$  от напряжения в цепи база/эмиттер  $U_{БЭ}$  (при  $U_{кэ} = \text{const}$ ).

**Выходная характеристика** показывает зависимость тока коллектора  $I_K$  от напряжения цепи коллектор/эмиттер  $U_{кэ}$  при различных фиксированных значениях тока базы.

**Характеристика управления** представляет собой зависимость тока коллектора  $I_K$  от тока базы  $I_B$  (при  $U_{кэ} = \text{const}$ ).

**Характеристика обратной связи** есть зависимость напряжения цепи база / эмиттер  $U_{БЭ}$ , соответствующего различным неизменным значениям тока базы, от напряжения цепи коллектор/эмиттер  $U_{кэ}$  при различных фиксированных значениях тока базы.

### 4.3.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения экспериментов

- Соберите цепь согласно схеме (рис.4.3.1). Потенциометр 1 кОм используется для регулирования тока базы, резисторы 100 и 47 кОм – для ограничения максимального тока базы. Измерение тока базы  $I_B$  и напряжения  $U_{БЭ}$  производятся мультиметрами на пределах 200  $\mu$ А и 2 В соответственно. Регулирование напряжения  $U_{КЭ}$  осуществляется регулятором источника постоянного напряжения, ток коллектора  $I_K$  и напряжение  $U_{КЭ}$  измеряются виртуальными приборами (пределы измерения коннектора изменяются в ходе работы по мере необходимости или по подсказкам компьютера).
- Установите первое значение тока базы 20  $\mu$ А и изменяя напряжение  $U_{КЭ}$  согласно значениям, указанным в табл. 4.3.1, снимите зависимости  $I_K(U_{КЭ})$  и  $U_{БЭ}(U_{КЭ})$ . Повторите эти измерения при каждом значении  $I_B$ , указанном в таблице.

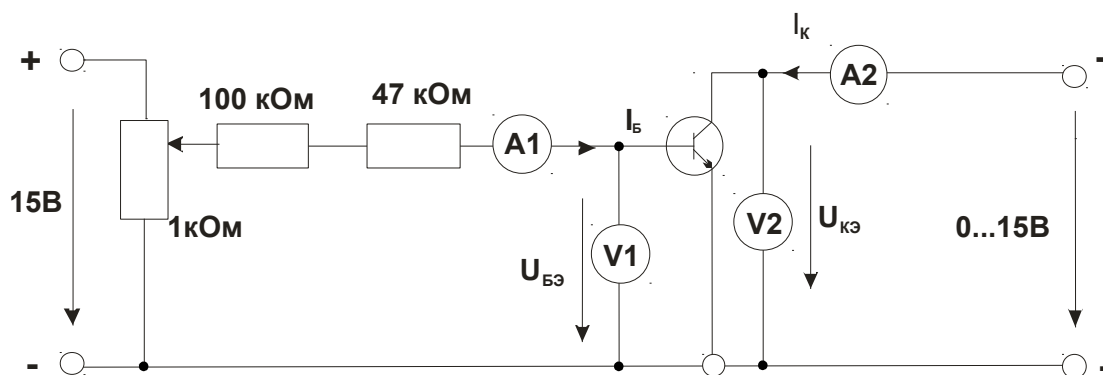


Рис.4.3.1

**Примечание:** характеристики транзистора изменяются в ходе работы из-за его нагрева. Поэтому для большей определенности рекомендуется установить нужные значения  $I_{БЭ}$  и  $U_{КЭ}$ , выключить на 30 с блок генераторов напряжений, затем включить его и быстро записать показания приборов  $V1$  и  $A2$ .

Таблица 4.3.1

$U_{КЭ}$ , В	$I_B = 20 \mu A$		$I_B = 40 \mu A$		$I_B = 60 \mu A$		$I_B = 80 \mu A$	
	$I_K$ , мА	$U_{БЭ}$ , В	$I_K$ , мА	$U_{БЭ}$ , В	$I_K$ , мА	$U_{БЭ}$ , В	$I_K$ , мА	$U_{БЭ}$ , В
0								
0,5								
1								
2								
5								
10								

<b>15</b>								
-----------	--	--	--	--	--	--	--	--

- На рис. 4.3.3 постройте графики семейства выходных характеристик  $I_K(U_{KЭ})$  и семейство характеристик обратной связи  $U_{БЭ}(U_{KЭ})$ , не забыв указать какому току базы соответствует каждая кривая.
- Установите  $U_{KЭ} = 0$  и изменяя ток базы в соответствии со значениями, указанными в табл. 4.3.2, снимите зависимость  $U_{БЭ}(I_B)$ , Увеличьте напряжение  $U_{KЭ}$  до 5 В и снова снимите зависимость  $U_{БЭ}(I_B)$ , а также и  $I_K(I_B)$ . Повторите этот опыт также при  $U_{KЭ} = 15$  В. (При проведении этих измерений также учитывайте примечание к предыдущему опыту).
- На рис. 4.3.3 постройте графики входных  $I_B(U_{БЭ})$  и регулировочных  $I_K(I_B)$  характеристик, указав для каждой кривой соответствующие значения  $U_{KЭ}$ .

Таблица 4.3.2

$I_B,$ $\mu A$	$U_{KЭ} = 0$ В		$U_{KЭ} = 5$ В		$U_{KЭ} = 15$ В	
	$U_{БЭ},$ В	$I_K,$ мА	$U_{БЭ},$ В	$I_K,$ мА	$U_{БЭ},$ В	$I_K,$ мА
<b>0</b>						
<b>5</b>						
<b>10</b>						
<b>20</b>						
<b>50</b>						
<b>80</b>						

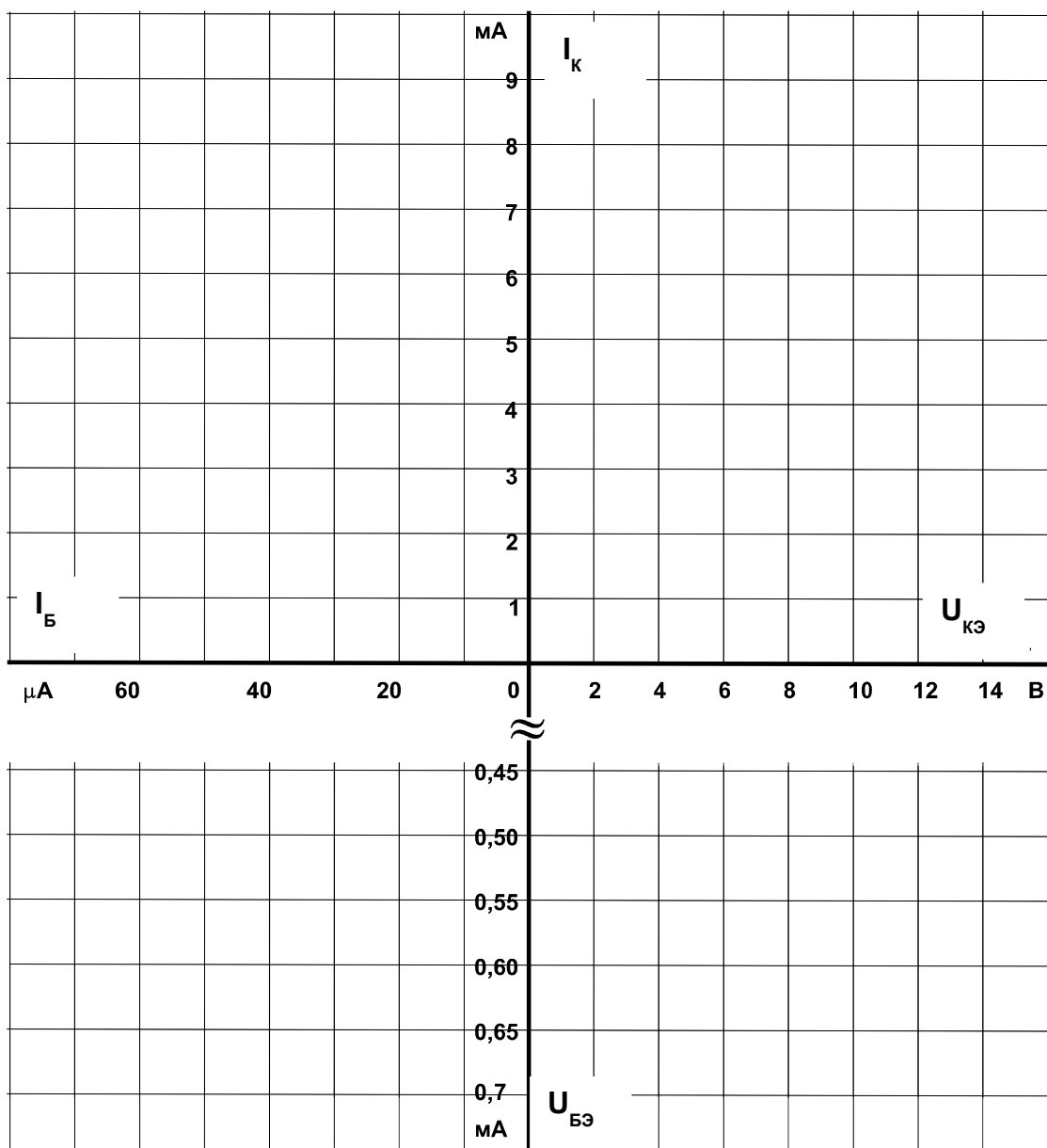


Рис. 4.3.3

#### 4.4. Установка рабочей точки транзистора и исследование влияния резистора в цепи коллектора на коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада с общим эмиттером

##### 4.4.1. Общие сведения

Изменение тока коллектора  $I_k$  транзистора, вызванное изменением тока базы  $I_B$ , приводит к изменению падения напряжения на последовательно включенном резисторе  $R_k$  и изменению напряжения  $U_{кэ}$  на транзисторе. В свою очередь изменение тока коллектора вызывается изменением напряжения в цепи база/эмиттер  $U_{бэ}$ . Отношение этих напряжений есть коэффициент усиления транзистора по напряжению:



$$\nu_U = \Delta U_{КЭ} / \Delta U_{БЭ}.$$

Поскольку изменение напряжения цепи коллектор / эмиттер  $U_{КЭ}$  зависит от резистора  $R_K$ , этот резистор также влияет на усиление по напряжению.

#### 4.4.2. Экспериментальная часть

##### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.4.1). Для начала установите  $R_K = 220 \text{ Ом}$ . Подайте на вход делителя  $1 \text{ кОм} / 100 \text{ Ом}$  синусоидальное напряжение ( $2 \dots 3 \text{ В}$ ) частотой  $1 \dots 2 \text{ кГц}$ .

**Примечание:** К выходу источника переменного тока подключен делитель напряжения ( $1 \text{ кОм} / 100 \text{ Ом}$ ), чтобы обеспечить более точную регулировку и измерение входного напряжения. Это означает, что при напряжении источника  $U = 2 \text{ В}$  на входе усилителя будет напряжение  $U_{ВЫХ} = 0,2 \text{ В}$ .

- Включите виртуальные приборы V0 и V1, установите на них род измеряемой величины – «действующее значение переменной составляющей» и период измерения  $0,02 \text{ с}$ .
- Включите виртуальный осциллограф, активизируйте каналы V0 и V1 и установите длительность развертки  $200 \text{ мкс}$ .
- Установите потенциометром ток покоя коллектора таким образом, чтобы среднее значение выходного напряжения составляло примерно  $7,5 \text{ В}$  (по осциллографу), а регулятором синусоидального напряжения установите максимально возможную амплитуду выходного напряжения, при которой еще нет сильных искажений синусоиды.
- Запишите в табл. 4.4.1 значения  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$ , учитывая что напряжение, измеряемое вольтметром V1 в 10 раз больше, чем  $U_{ВХ}$ . Вычислите коэффициент усиления.
- Проведите этот опыт при всех значениях сопротивления  $R_K$ , указанных в табл. 4.4.1 и на рис. 4.4.2 постройте график зависимости  $\nu_U$  от  $R_K$ .

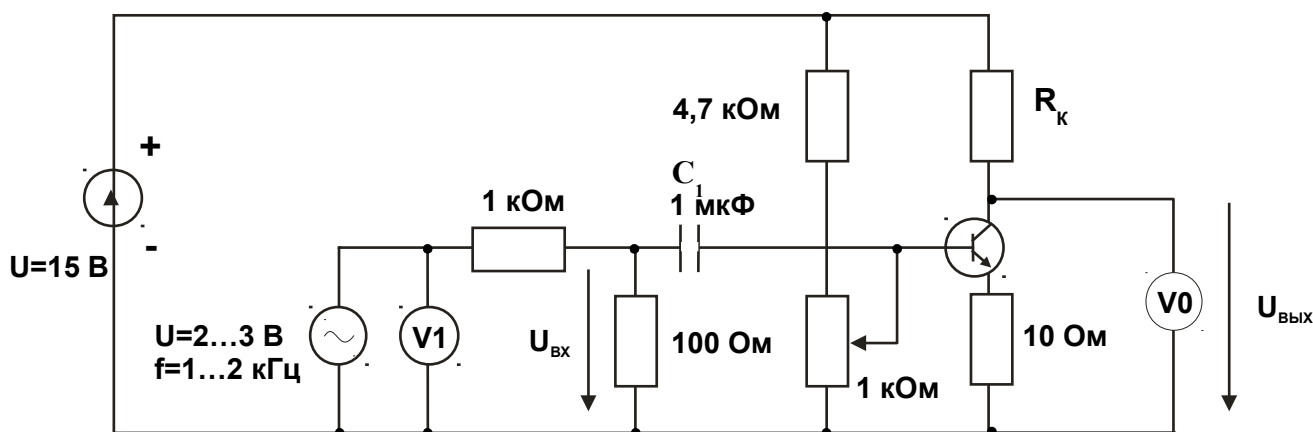


Рис. 4.4.1

Таблица 4.4.1

$R_K, \text{кОм}$	0,22	0,33	0,47	1	1,47	2,2
$U_{ВХ}, \text{мВ}$						
$U_{ВЫХ}, \text{В}$						
$\nu_U$						

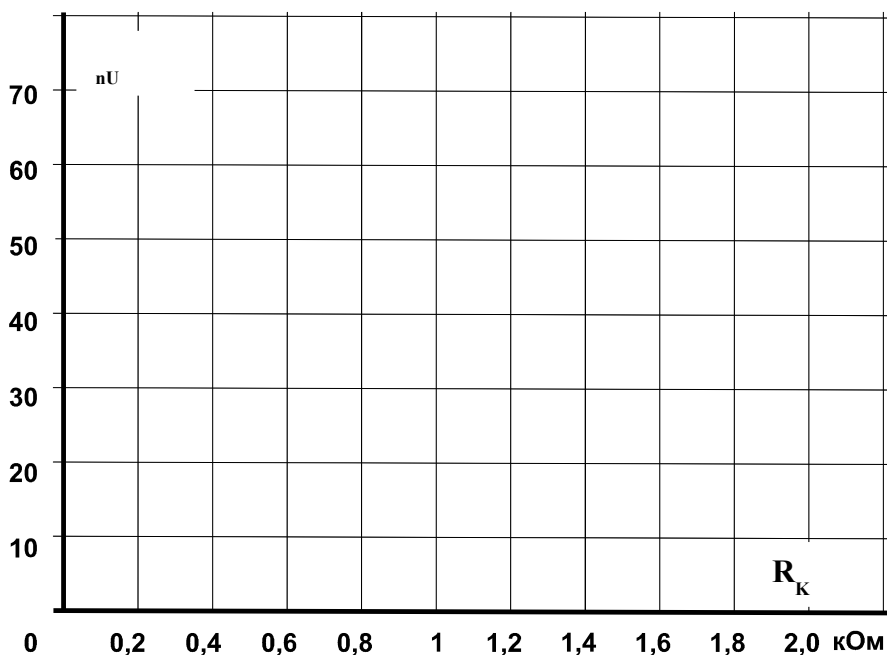


Рис.4.4.2

#### 4.5. Усилители на биполярных транзисторах

##### 4.5.1. Общие сведения

Транзисторы используются как управляющие элементы в усилительных цепях. По названию того электрода транзистора, который используется как общая точка для напряжений входного и выходного сигналов, различают три основные схемы усилителей на биполярных транзисторах:

- с общим эмиттером (ОЭ),
- с общим коллектором (ОК),
- с общей базой (ОБ).

В наиболее распространенных схемах усилителей используются **п-р-п** транзисторы. Однако **р-п-р** транзисторы также можно использовать, но тогда нужно изменить полярность рабочего напряжения.

##### 4.5.2. Экспериментальная часть

5. Коэффициент усиления по напряжению  $\nu_U$ ,
6. угол фазового сдвига  $\varphi$ ,
7. входное сопротивление  $R_{ВХ}$ ,
8. выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$ .

Усилители используются для усиления напряжения переменного тока. Конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  установлены для развязывания рабочего и управляющего напряжений, делитель напряжения  $100 \text{ кОм}/100 \text{ Ом}$  – для удобства регулирования и измерения малых значений входного напряжения.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь усилителя по схеме с общим эмиттером (рис. 4.5.1) и установите частоту синусоидального напряжения  $f = 1 \text{ кГц}$  и действующее значение напряжения  $2 \text{ В}$ . Для производства измерений включите виртуальные приборы и осциллограф.

**Примечание:** К выходу источника переменного тока подключен делитель напряжения ( $1 \text{ кОм}/100 \text{ Ом}$ ), чтобы обеспечить более точную регулировку и измерение входного напряжения. Это означает, что при напряжении источника  $U = 2 \text{ В}$  на входе усилителя будет напряжение  $U_{\text{вх}} = 0,2 \text{ В}$ .

- Перерисуйте осциллограммы входного и выходного напряжений на рис. 4.5.2 и укажите масштабы по осям. Рис. 4.5.1

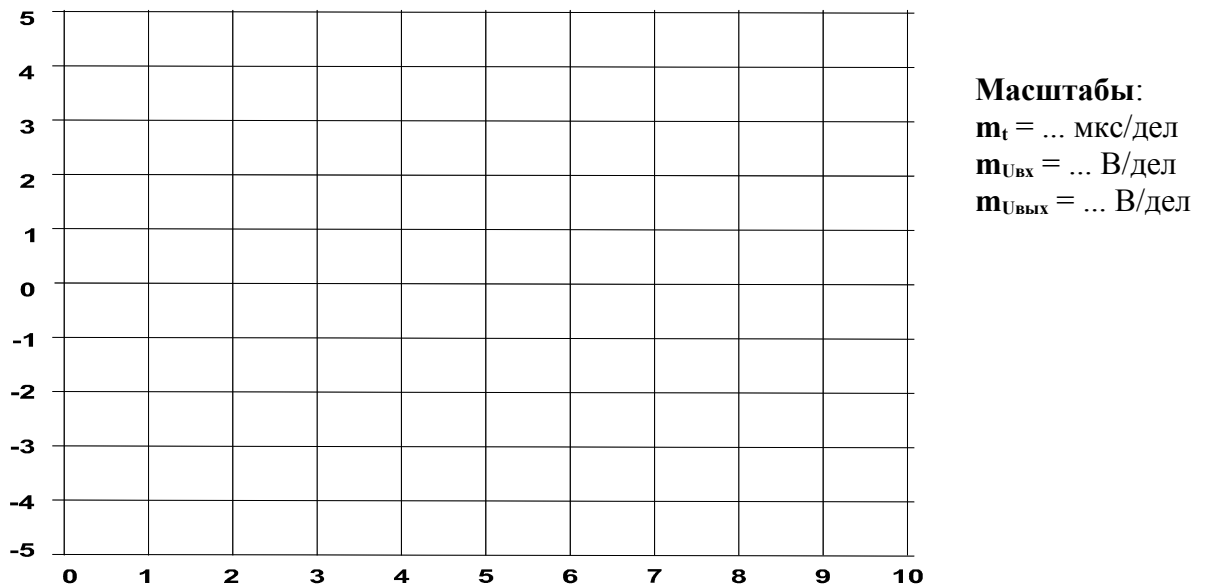


Рис. 4.5.2

- Измерьте входное и выходное напряжения, определите угол фазового сдвига этих напряжений  $\varphi$  и вычислите коэффициент усиления по напряжению, используя следующее соотношение:

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

Результаты этих и последующих измерений и вычислений занесите в табл. 4.5.1.

- Далее определите входное сопротивление усилителя  $R_{\text{вх}}$ . Для этого включите последовательно во входную цепь усилителя (точка А) резистор  $R_{\text{доб}} = 1 \text{ кОм}$ . Это вызовет снижение выходного напряжения

$U_{\text{ВЫХ}}$  усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Тогда входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  можно рассчитать следующим образом:

$$R_{\text{ВХ}} = R_{\text{ДОБ}} / (U_1 / U_2 - 1).$$

- Теперь определите выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$ . Для этого включите нагрузочный резистор  $R_{\text{Н}} = 1 \text{ кОм}$  параллельно выходу усилителя (точки С -0). Это также вызовет снижение выходного напряжения усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Выходное сопротивление можно вычислить, используя соотношение:

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{Н}} (U_1 / U_2 - 1).$$

- Соберите цепь усилителя по схеме с общим коллектором (рис. 4.5.3). Конденсатор  $C_3$  в схеме служит для подавления высокочастотных помех. Повторите описанные выше измерения, постройте кривые на графике (рис.4.5.4) и занесите результаты измерений в табл. 4.5.2. При этом  $R_{\text{ДОБ}} = 10 \text{ кОм}$ , а  $R_{\text{Н}} = 100 \text{ Ом}$ .

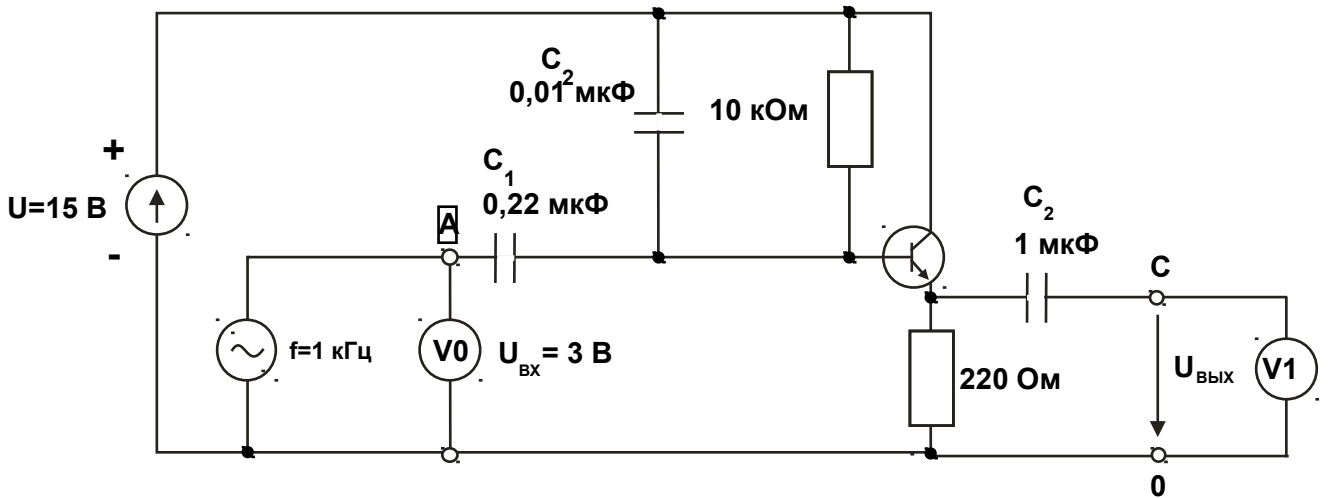
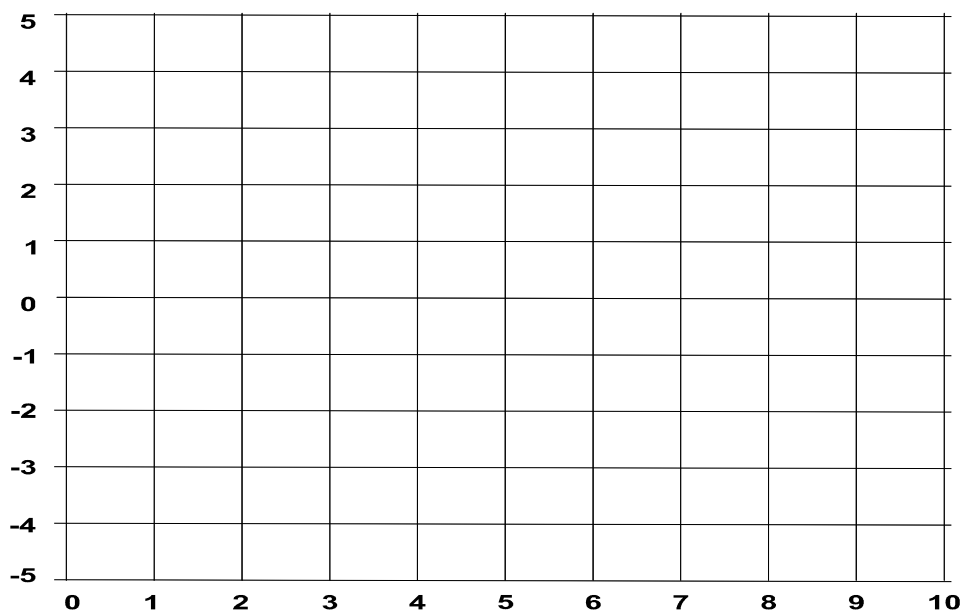


Рис. 4.5.3



**Масштабы:**  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{вх}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{вых}} = \dots$  В/дел

Рис. 4.5.4

- Наконец, соберите цепь усилителя по схеме с общей базой (рис. 4.5.5). Соблюдайте полярность подключения электролитического конденсатора 10 мкФ. Повторите измерения, постройте кривые на графике (рис. 4.5.6) и занесите результаты в табл. 4.5.1 (при этом  $R_{доб} = 220 \text{ Ом}$ , а  $R_H = 1 \text{ кОм}$ ).

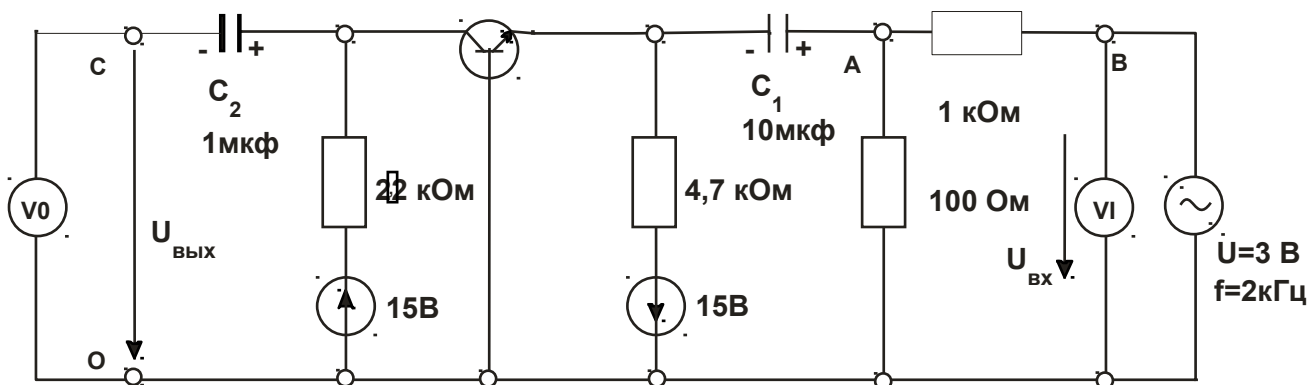
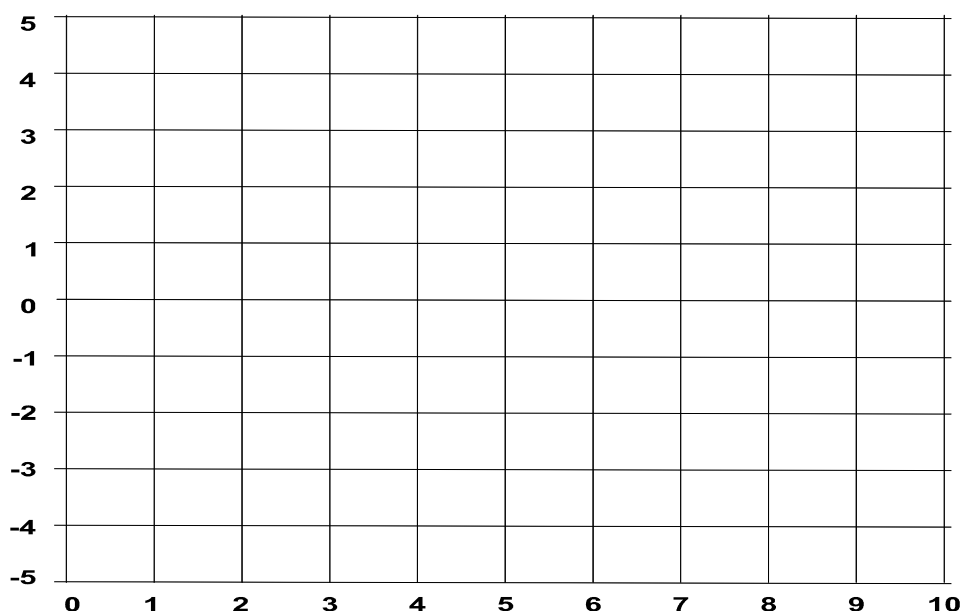


Рис. 4.5.5



**Масштабы:**  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{вх}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{вых}} = \dots$  В/дел

Рис. 4.5.6

Таблица 4.5.1

	<b>с общим эмиттером</b>	<b>с общим коллектором</b>	<b>с общей базой</b>
$U_{вх}$	0,2 В, 1кГц	0,3 В, 1кГц	0,3 В, 10 кГц
$U_{вых}$			
$\nu_U$			
$\varphi$			
$R_{вх}$			
$R_{вых}$			

## 4.6. Регулятор напряжения (линейный)

### 4.6.1. Общие сведения

Поскольку ток коллектора зависит от разности потенциалов между базой и эмиттером, транзистор может служить как электронный регулятор. Как известно, регулятор формирует управляющий сигнал как разность между постоянной величиной задаваемого параметра (уставка) и текущей величиной регулируемого параметра. Управляющий сигнал воздействует на исполнительный элемент таким образом, что отклонение регулируемого параметра от величины уставки устраняется.

В качестве уставки обычно используется постоянное напряжение стабилитрона или операционного усилителя в режиме компаратора. В настоящее время широко применяются интегральные схемы для стабилизации напряжения.

### 4.6.2. Экспериментальная часть

## Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь стабилизатора напряжения согласно схеме (рис. 4.6.1) и подайте на вход напряжение постоянного тока  $U_{ВХ} = 30$  В. Установите с помощью потенциометра выходное напряжение  $U_{ВЫХ} = 14$  В.

**Примечание:** Резистор  $R_1$  является защитным и служит для предотвращения повреждения полупроводниковых элементов в случае коротких замыканий или перегрузок.

- Изменяйте ступенчато, как указано в табл. 4.6.1, входное напряжение и одновременно записывайте значения выходного напряжения.

Таблица 4.6.1

$U_{ВХ}, В$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25	30
$U_{ВЫХ}, В$													

- На графике (рис. 4.6.2) постройте кривую зависимости выходного напряжения от напряжения на входе регулятора  $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ .

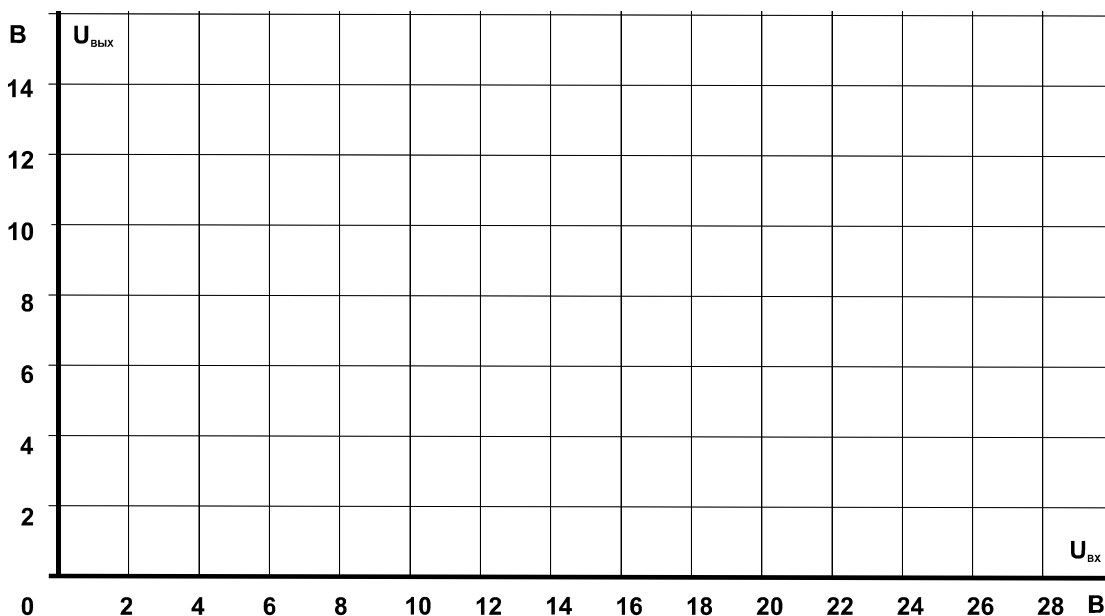


Рис. 4.6.2

## 4.7. Регулятор тока

### 4.7. Общие сведения

Регулятор тока также формирует управляющий сигнал как разность между постоянной величиной задаваемого параметра (уставка) и текущей величиной регулируемого параметра. Он воздействует на исполнительный

элемент таким образом, что отклонение регулируемого параметра от величины уставки устраняется.

В электронных регуляторах тока в качестве уставки также используется постоянное напряжение стабилитрона, которое сравнивается с зависящим от выходного тока падением напряжения на резисторе. В рассматриваемой ниже цепи сравнение имеет место непосредственно между базой и эмиттером регулирующего транзистора. Одно из применений стабилизаторов тока - в зарядных устройствах аккумуляторов.

#### 4.7.2. Экспериментальная часть

##### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь стабилизатора тока согласно схеме (рис. 4.7.1). В этой схеме уставка тока регулируется потенциометром 1 кОм, а резистор 220 Ом служит для ограничения максимального тока. Конденсатор 0,01 мкФ включён для подавления самовозбуждения транзисторного эмиттерного повторителя. Вместо сопротивления нагрузки вставьте сначала перемычку ( $R=0$ ).

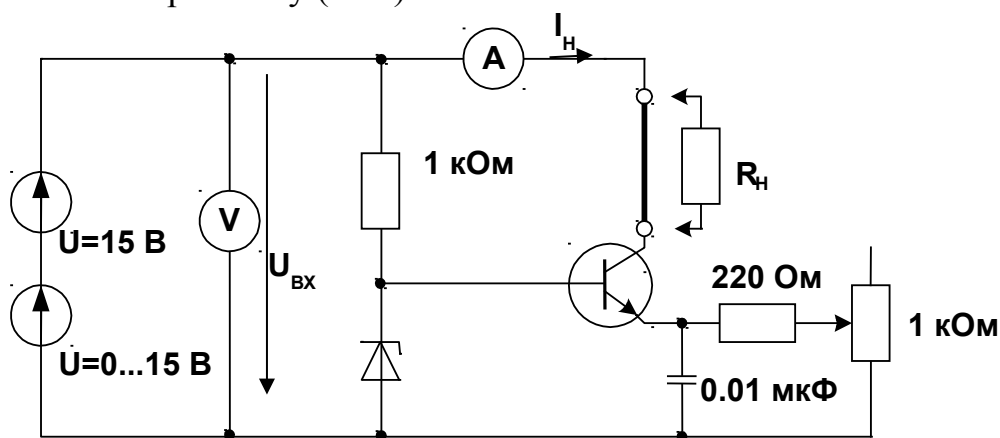


Рис. 4.7.1

- Регулятором источника питания установите на входе цепи максимальное напряжение 30 В, а потенциометром – желаемую уставку тока (примерно от 10 до 40 мА).
- Затем изменяйте степенями, как указано в табл. 4.7.1, сопротивление нагрузки  $R_n$  и записывайте значения тока нагрузки  $I_n$ .
- Теперь снова замкните накоротко резистор нагрузки и уменьшайте входное напряжение степенями от 30 В до 0. Снова записывайте соответствующие значения тока нагрузки в табл. 4.7.2.

Таблица 4.7.1

$R_n, \text{ Ом}$	0	47	100	220	330	470	680	1000
$I_n, \text{ мА}$								



Таблица 4.7.2

<b>U<sub>ВХ</sub>, В</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>
<b>I<sub>Н</sub>, мА</b>										

- На рис. 4.7.2 постройте кривые зависимостей выходного тока от сопротивления нагрузки  $I_H = f(R_H)$ , а на рис.4.7.2 – от напряжения на входе регулятора. Не забудьте нанести шкалы по осям!

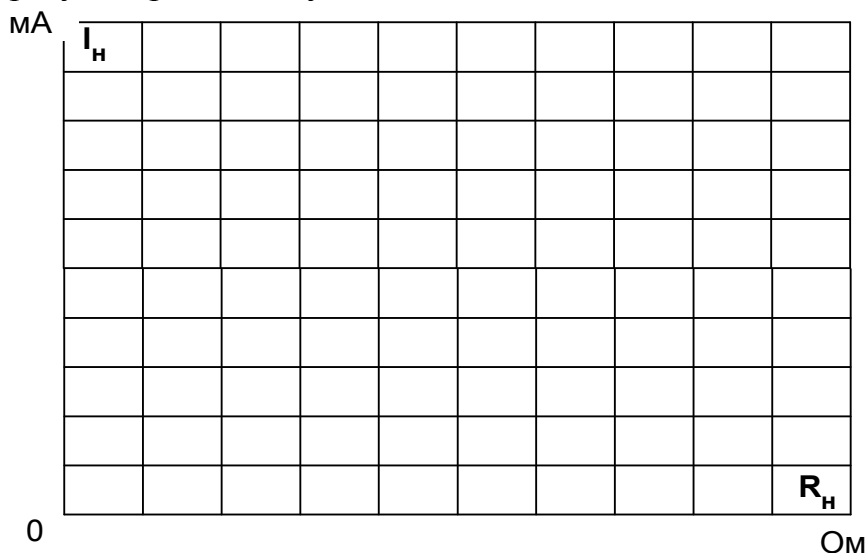


Рис. 4.7.2

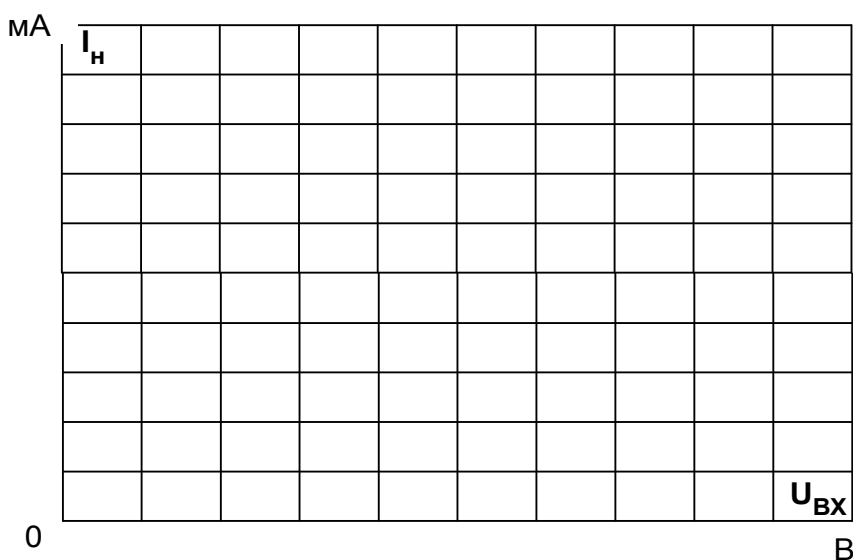


Рис. 4.7.3

### Контрольные вопросы

1. Каковы общие свойства обоих **p-n** переходов транзисторов двух типов?
2. Каковы отличия **p-n** переходов в двух типах транзисторов?
3. Какое влияние оказывает сопротивление в цепи коллектора на коэффициент усиления?

4. Какое влияние оказывает сопротивление в цепи коллектора на форму выходного напряжения?
5. Какой из трех усилителей имеет инвертирующий эффект?
6. В каких задачах свойства усилителя с общим коллектором имеют особое применение?
7. В каких отношениях усилитель с общей базой отличается от усилителя с общим эмиттером?
8. Какой элемент цепи (рис. 4.6.1) можно использовать для задания максимального выходного напряжения?
9. Из каких компонентов состоит линейный регулятор напряжения?
10. Как можно объяснить термин «стабилизация тока»?

## Лабораторная работа №5

**Тема:** Униполярные (полевые) транзисторы

**Цель:**

Исследовать свойства **p-n** переходов между электродами затвора и главными электродами (исток и сток) полевого транзистора с каналом **n**-типа. Используя мультиметр, определить зависимость тока от приложенного напряжения. Затем повторите эксперимент с транзистором **p**-типа.

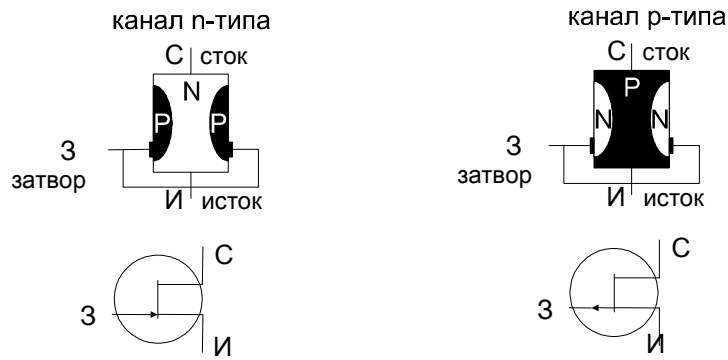
Измерить и изучить характеристику включения **p-n** перехода между затвором и каналом полевого транзистора. Этот опыт нужно выполнить только для транзистора **n**-типа. Результаты справедливы также для транзисторов **p**-типа с учетом изменения полярности.

Исследовать экспериментально влияние напряжения затвор / исток на ток затвора и стока. Построить характеристики управления  $I_c = f(U_{зи})$  и  $I_z = f(U_{зи})$ .

### *5.1. Испытание слоев и выпрямительного действия униполярных транзисторов*

#### 5.1.1. Общие сведения

В полевых транзисторах (рис. 5.1.1) ток обеспечивается носителями заряда одного знака (электронами или дырками) и протекает по **каналу** под воздействием прикладываемого извне электрического поля (отсюда название транзисторов этого типа). Электроды канала принято называть **истоком** и **стоком**. Управление током транзистора осуществляется посредством электрода, называемого **затвором**, который изолирован от канала **p-n** переходом или по-иному.



условное обозначение  
Рис. 5.1.1

### 5.1.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.1.2, диаграмма 1) и с помощью мультиметра (в режиме миллиамперметра) определите состояние **p-n** перехода (проводящее / запертое). Повторите измерения согласно диаграммам 2, 3 и 4. Результаты занесите в таблицу 5.1.1

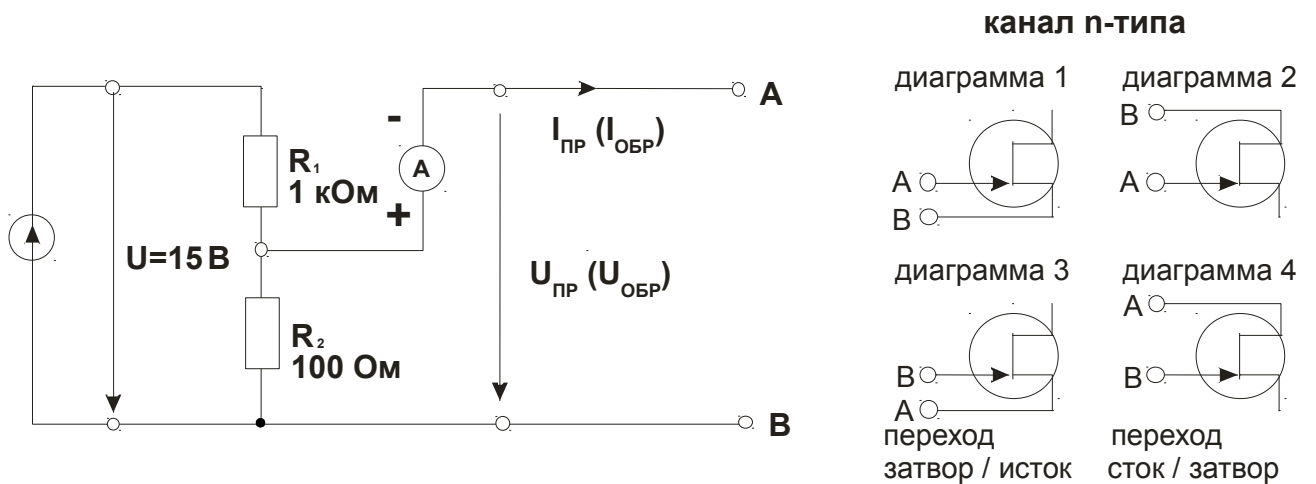


Рис. 5.1.2

Таблица 5.1.1

Диаграмма	1	2	3	4
канал n-типа				
канал p-типа				

- Затем замените транзистор с каналом **n**-типа транзистором с каналом **p**-типа (рис. 5.1.3). Определите состояния **p-n** переходов путем измерения для диаграмм 1...4 и занесите результаты в табл. 5.1.1.

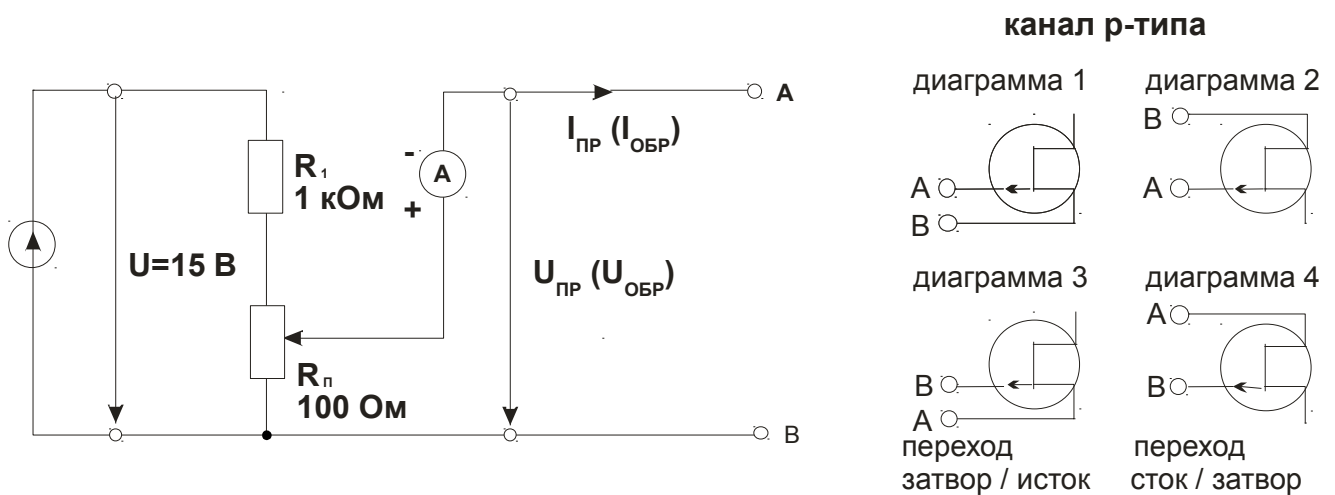


Рис. 5.1.3

## 5.2. Характеристика включения затвора полевого транзистора

### 5.2.1. Общие сведения

Переход между затвором и каналом полевого транзистора обладает выпрямительным действием. Хотя это и не имеет практического значения, его характеристику включения следует знать, чтобы понимать особенности управления полевыми транзисторами.

### 5.2.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис.5.2.1) для контура затвор / исток. Установите последовательно величины прямого напряжения  $U_{пр}$ , указанные в табл. 5.2.1. Измерьте мультиметром соответствующие значения тока  $I_{пр}$  и занесите их в таблицу.

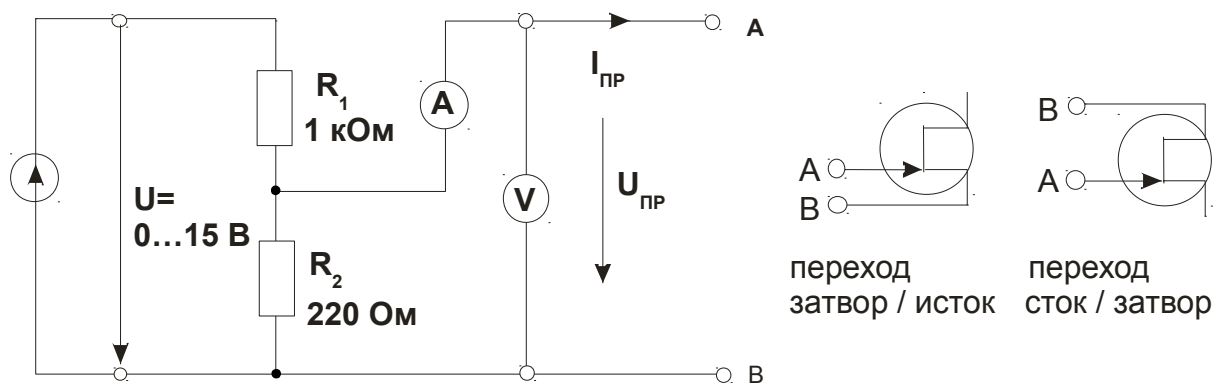


Рис.5.2.1

Таблица 5.2.1

контур затвор / исток										
$U_{пр}, В$	0	0,5	0,4	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1,0

$I_{пр}, \text{мА}$										
---------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

- Повторите измерения для контура сток / затвор и занесите измеренные значения тока в табл. 5.2.2.

Таблица 5.2.2

контур сток/затвор										
$U_{пр}, \text{В}$	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1,0
$I_{пр}, \text{мА}$										

На графике (рис. 5.2.2) постройте характеристику включения **p-n** переходов  $I_{пр} = f(U_{пр})$

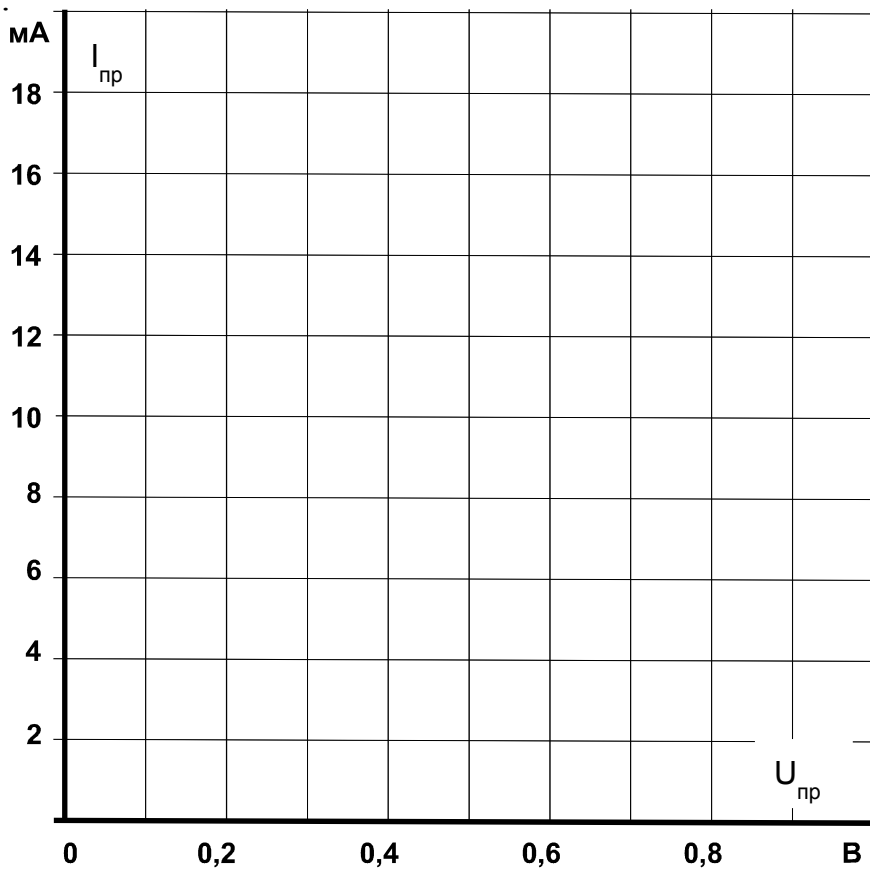


Рис. 5.2.2

### 5.3. Управляющий эффект затвора полевого транзистора *n*-типа

#### 5.3.1. Общие сведения

Током в канале (контур исток / сток) полевого транзистора можно управлять с помощью потенциала затвора. В отличие от биполярных транзисторов для этого не требуется мощности, так как **p-n** переход между затвором и каналом остается запертым.

Входная характеристика или характеристика управления полевого транзистора выражает соотношение между напряжением затвор / исток  $U_{зи}$  и током стока  $I_C$ .

Зависимость  $I_C(U_{зи})$  называется стоко-затворной характеристикой.

Важными параметрами полевого транзистора являются крутизна стоко-затворной характеристики:

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи},$$

и напряжение отсечки  $U_{зи0}$ , при котором ток стока становится близким к нулю.

### 5.3.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.3.1) и установите поочередно значения напряжения затвор / исток  $U_{зи}$ , указанные в табл. 5.3.1. Измерьте виртуальными приборами или мультиметрами соответствующие значения токов затвора  $I_3$  и стока  $I_C$  и занесите их в табл.5.3.1.

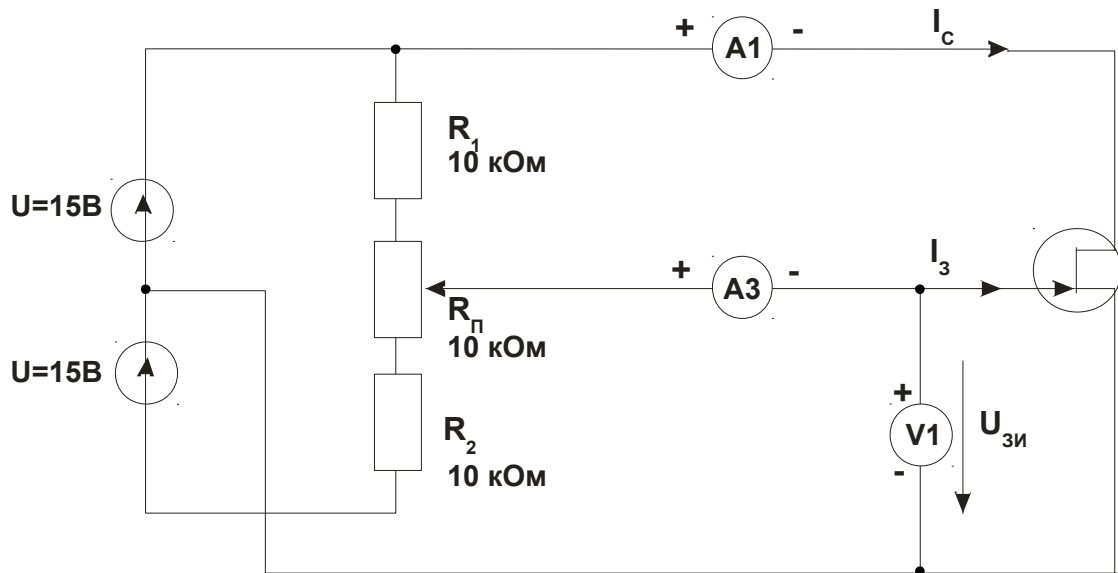


Рис. 5.3.1

Таблица 5.3.1

$U_{зи}, В$	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	+0,2	+0,4	+0,6	
$I_C, мА$										
$I_3, мА$										

- На графиках (рис. 5.3.2 и 5.3.3) постройте кривые зависимостей тока затвора  $I_3$  и тока стока  $I_C$  от напряжения  $U_{зи}$ .
- По графикам определите напряжение отсечки  $U_{зи0}$  и крутизну стоко-затворной характеристики  $S$ :

$$U_{зио} = \dots\dots \text{В};$$

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} = \dots\dots\dots \text{мА/В}.$$

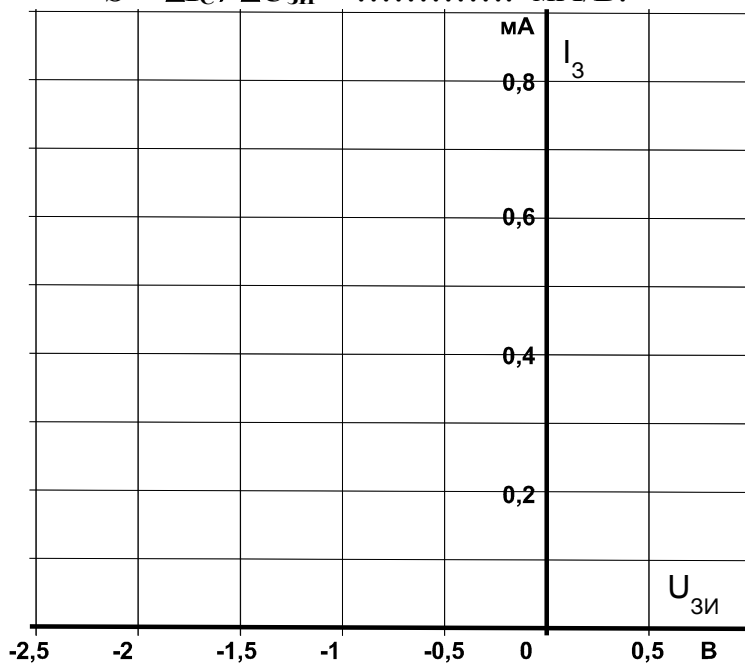


Рис. 5.3.2

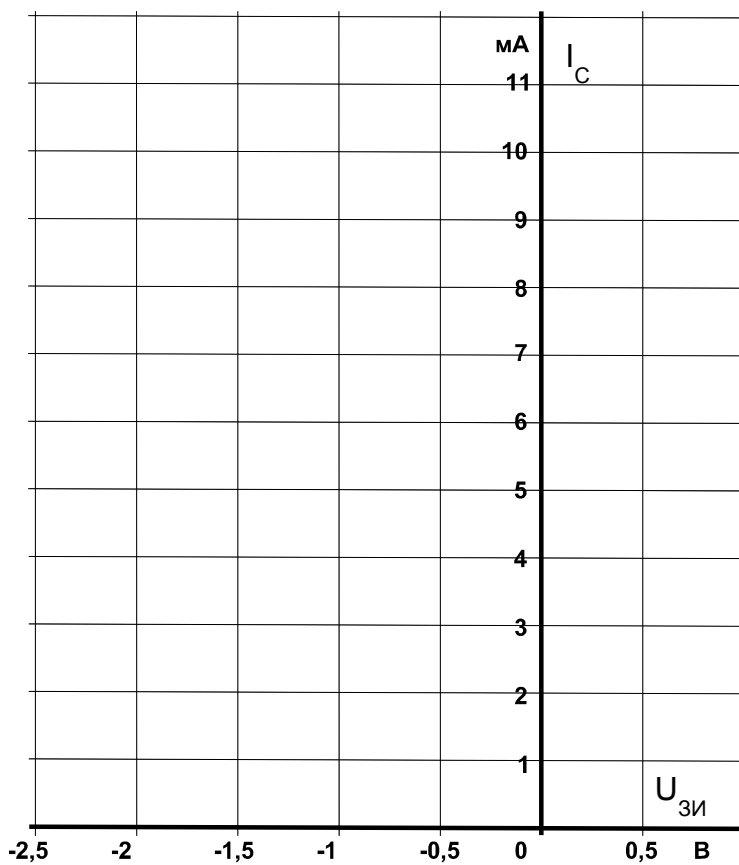


Рис. 5.3.3

## 5.4. Выходные характеристики полевого транзистора

### 5.4.1. Общие сведения

Выходными характеристиками полевого транзистора называют зависимости тока стока от напряжения сток / исток при различных фиксированных значениях напряжения затвор / исток.

Выходные характеристики снимают без нагрузочного сопротивления в статике.

### 5.4.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис.5.4.1).

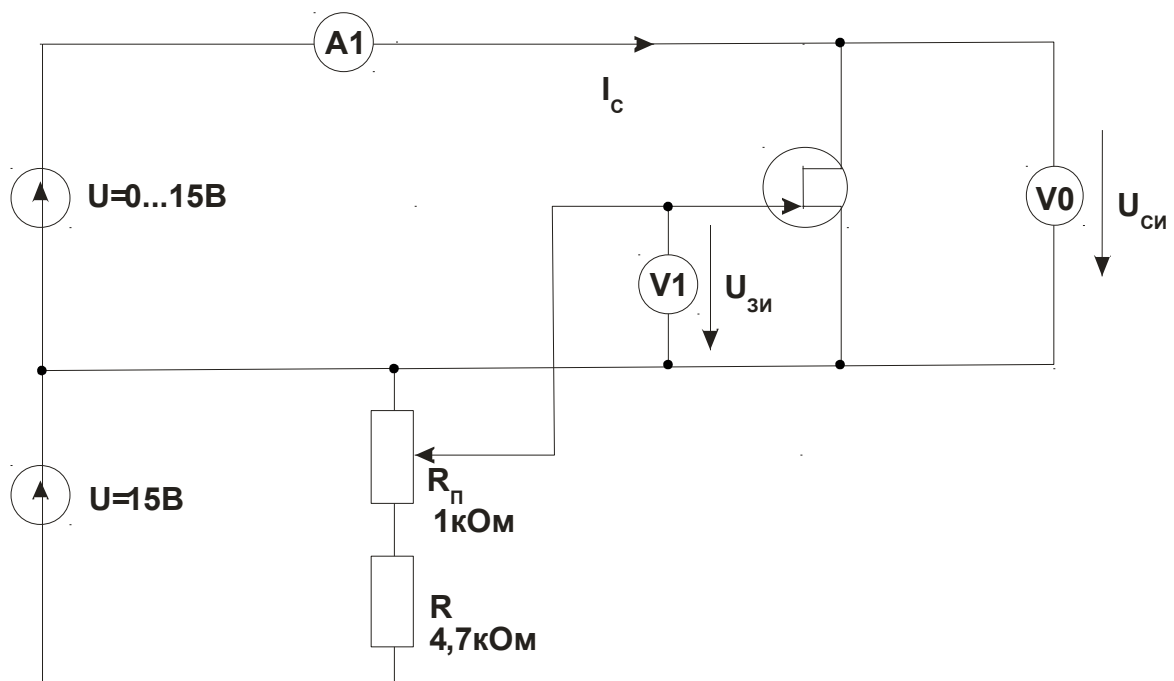


Рис.5.4.1

- Установите значения напряжений затвор / исток  $U_{зи}$  и сток / исток  $U_{си}$ , указанные в табл. 5.4.1, и измерьте виртуальными приборами или мультиметрами соответствующие значения тока стока  $I_C$ . Измените на противоположную полярность источника питания 15 В для измерения напряжения сток / исток при  $U_{зи} = 0,5$  В. Внесите значения тока стока  $I_C$  в таблицу.

Таблица 5.4.1

$U_{си}, В$	0	0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	10	12	14	15
$I_C, мА$ при $U_{зи} = -1,5 В$													
$I_C, мА$ при $U_{зи} = -1 В$													



<b><math>I_C</math>, мА при <math>U_{зи}=-0,5</math> В</b>														
<b><math>I_C</math>, мА при <math>U_{зи}=+0,5</math> В</b>														

- На графике (рис.5.4.2) постройте кривые зависимости тока стока  $I_C$  от напряжения сток / исток  $U_{си}$  при различных фиксированных значениях напряжения затвор / исток  $U_{зи}$ .

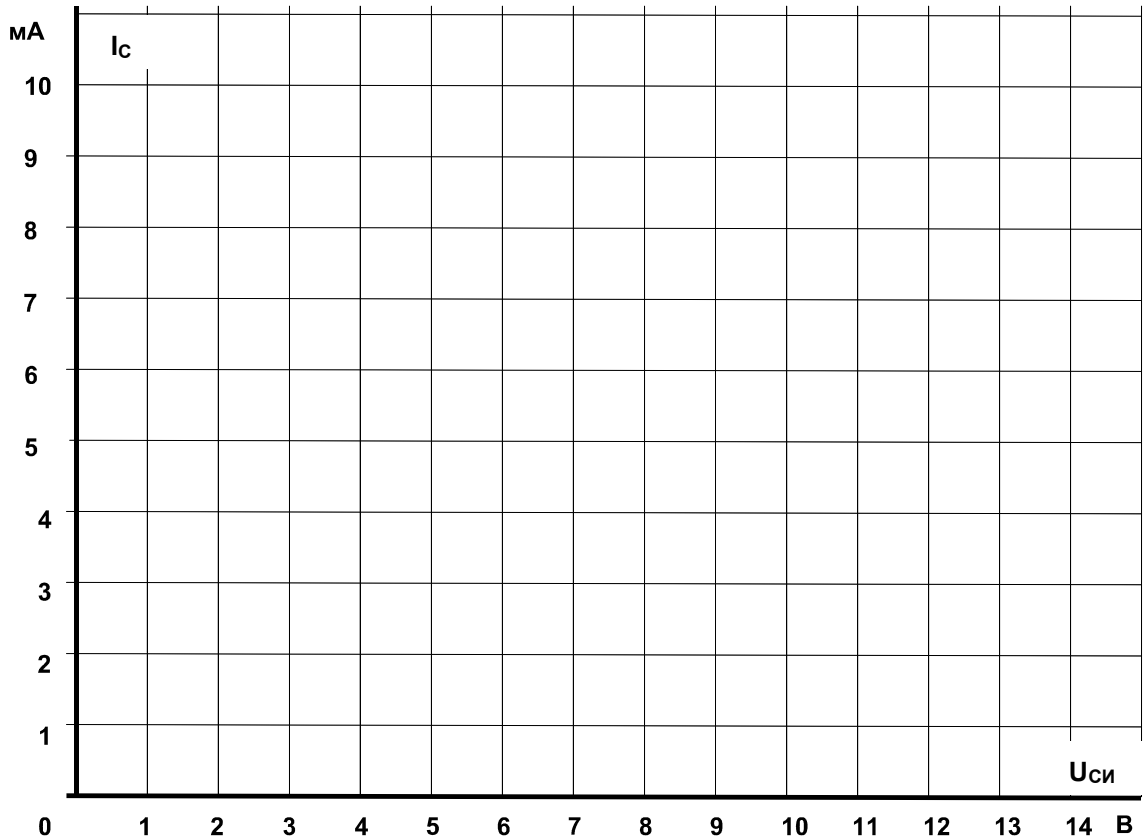


Рис.5.4.2

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.4.3).

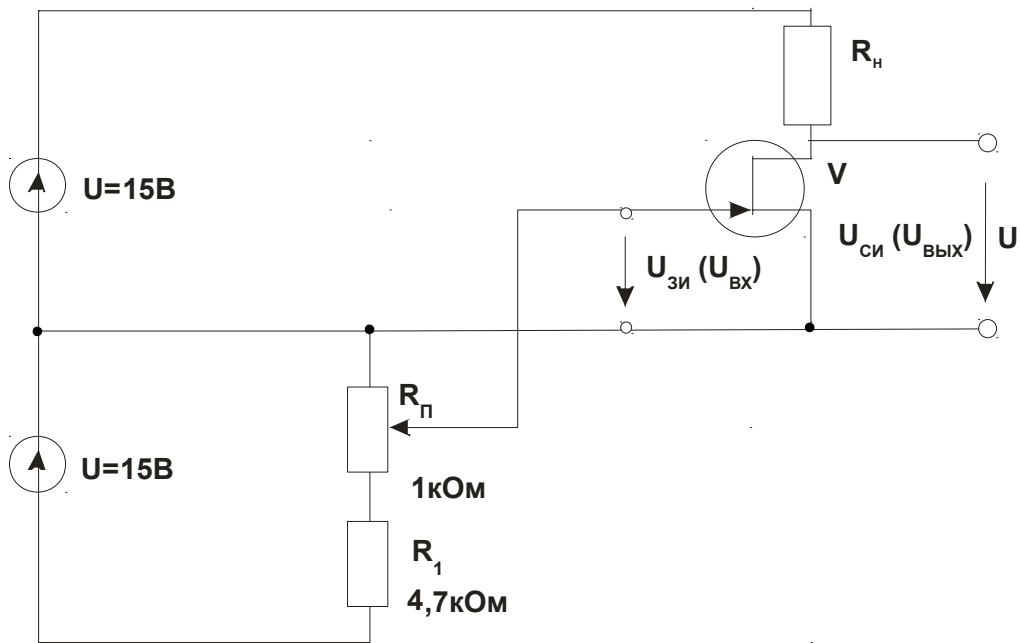


Рис. 5.4.3

- Установите сопротивление нагрузки  $R_H$  и поочередно различные значения входного напряжения  $U_{ВХ}$ , указанные в табл. 5.4.2, и измерьте мультиметрами или виртуальными приборами соответствующие значения выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$ . Все результаты занесите в таблицу.
- Рассчитайте коэффициент усиления по напряжению  $\nu$  для каждого значения  $R_H$  и также занесите в табл. 5.4.2.

Таблица 5.4.2

$R_H, \text{кОм}$	1	2,2	4,7	10	22
$-U_{ВХ1}, \text{В}$	-0,5	-0,5	-1,0	-1,2	-1,5
$-U_{ВХ2}, \text{В}$	-1,0	-1,0	-1,5	-1,8	-2,0
$U_{ВЫХ1}, \text{В}$					
$U_{ВЫХ2}, \text{В}$					
$\Delta U_{ВХ}, \text{В}$					
$\Delta U_{ВЫХ}, \text{В}$					
$\nu = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta U_{ВХ}$					

- На графике (рис. 5.4.4) постройте кривую зависимости коэффициента усиления по напряжению  $\nu$  от сопротивления нагрузки  $R_H$ .

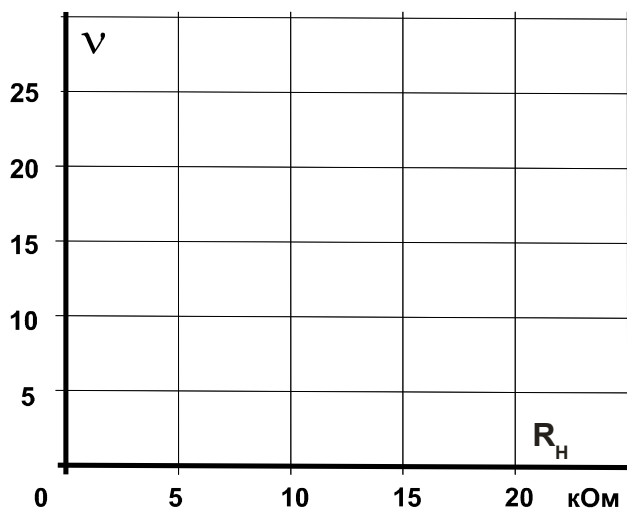


Рис. 5.4.4

## 5.5. Усилители на полевых транзисторах

### 5.5.1. Общие сведения

Полевые транзисторы могут быть использованы как управляющие элементы в различных усилительных цепях. По названию того электрода транзистора, который используется как общая точка для напряжений входного и выходного сигналов, различают три основные схемы усилителей на полевых транзисторах:

- с общим истоком (ОИ),
- с общим стоком (ОС) и
- с общим затвором (ОЗ).

### 5.5.2. Экспериментальная часть

Усилители используются для усиления напряжения переменного тока. Конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  установлены для развязывания рабочего и управляющего напряжений.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь усилителя по схеме с общим истоком (рис. 5.5.1). При этом не перепутайте полярность подключения электролитического конденсатора  $C_3$ , который служит для исключения отрицательной обратной связи для переменного напряжения.

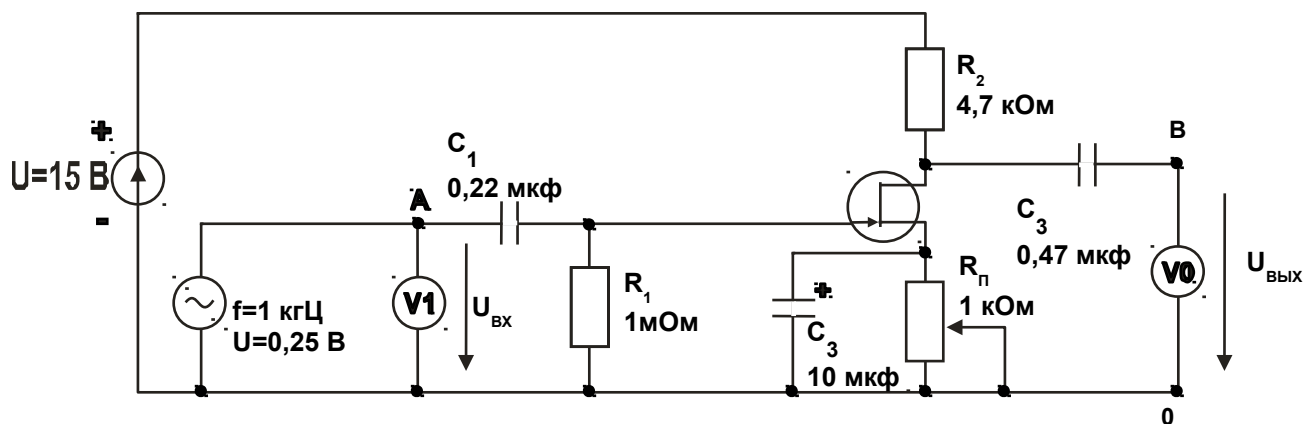
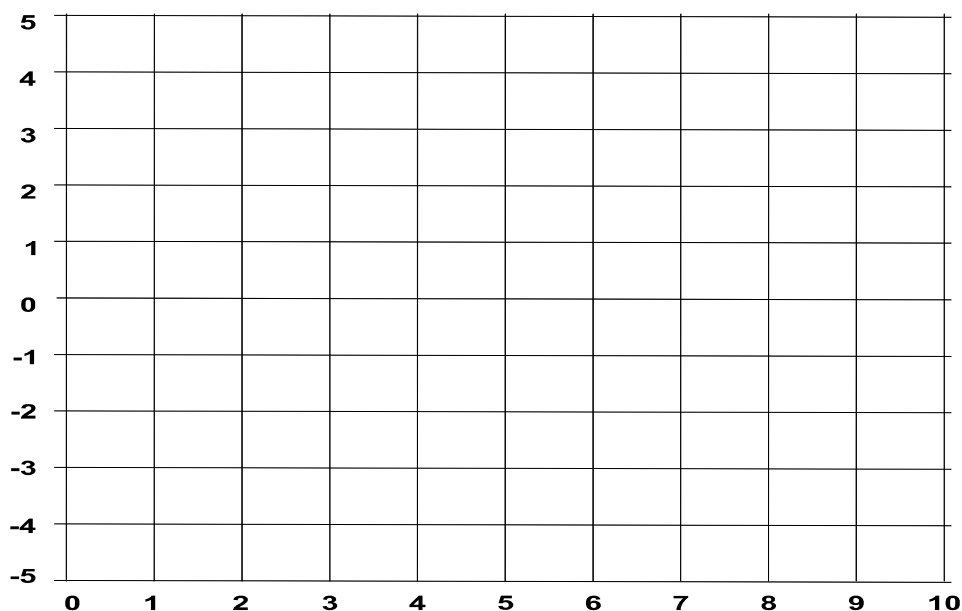


Рис. 5.5.1

- Установите частоту синусоидального напряжения 1 кГц и действующее значение 200...300 мВ.
- Используя потенциометр  $R_{\Pi}$ , настройте рабочую точку транзистора так, чтобы напряжение на выходе усилителя было наименее искаженным.
- Измерьте входное  $U_{ВХ}$  и выходное  $U_{ВЫХ}$  напряжения, используя виртуальные приборы и осциллограф, и постройте их кривые на графике (рис. 5.5.2). Определите угол фазового сдвига этих напряжений  $\varphi$  и вычислите коэффициент усиления по напряжению, используя следующее соотношение:

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}.$$



**Масштабы:**

$m_t = \dots$  мкс/дел

$m_{U_{ВХ}} = \dots$  В/дел

$m_{U_{ВЫХ}} = \dots$  В/дел

Рис. 5.5.2

- Далее определите входное сопротивление усилителя  $R_{ВХ}$ . Для этого включите последовательно во входную цепь усилителя (точка А) резистор  $R_{ДОБ} = 10$  кОм. Это вызовет снижение выходного напряжения усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Тогда входное сопротивление  $R_{ВХ}$  можно рассчитать следующим образом:

$$R_{ВХ} = R_{ДОБ} / (U_1 / U_2 - 1).$$

- Теперь определите выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$ . Для этого включите нагрузочный резистор  $R_H = 10$  кОм параллельно выходу усилителя (точки С - 0). Это также вызовет снижение выходного напряжения усилителя от  $U_1$  до  $U_2$ . Выходное сопротивление можно вычислить, используя соотношение:

$$R_{ВЫХ} = R_H (U_1 / U_2 - 1).$$

- Занесите результаты в табл.5.5.1.
- Соберите цепь усилителя по схеме с общим стоком (рис. 5.5.3). Установите действующее значение напряжения на входе 2...3 В и потенциометром  $R_H$  настройте рабочую точку транзистора по условию минимального искажения сигнала.

Повторите описанные выше измерения, постройте кривые на графике (рис. 5.5.4) и занесите результаты измерений в табл. 5.5.1. При этом  $R_{ДОБ} = 47$  кОм, а  $R_H = 10$  кОм.

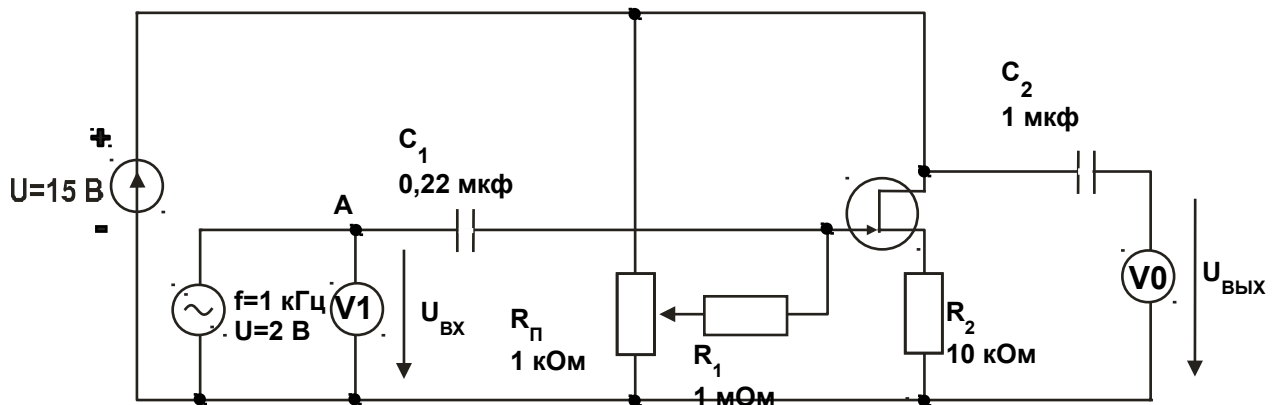
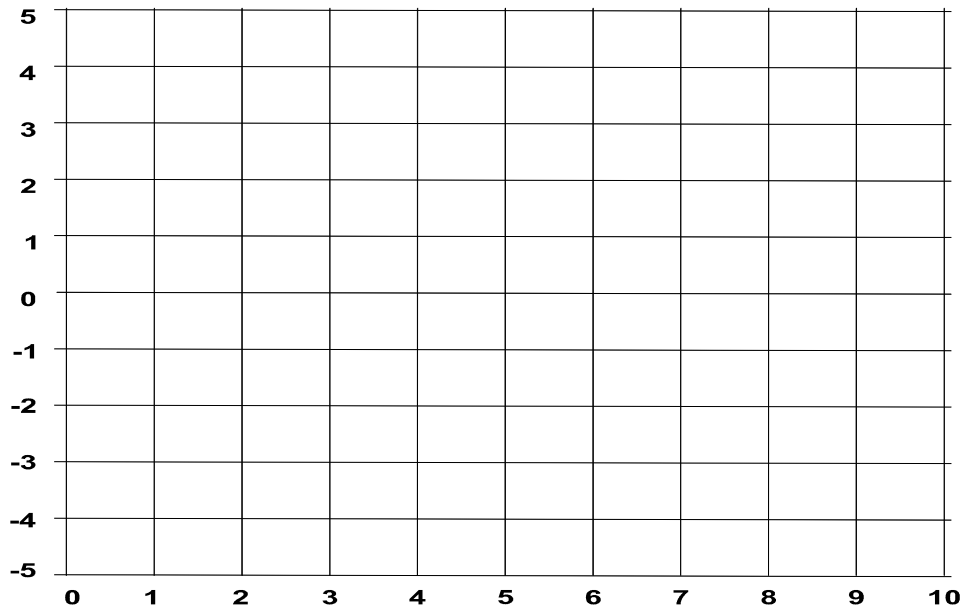


Рис. 5.5.3



Масштабы:  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{вх}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{вых}} = \dots$  В/дел

Рис. 5.5.4

- Наконец, соберите цепь усилителя по схеме с общим затвором (рис. 5.5.5). Отрегулируйте входное напряжение так, чтобы на входе усилителя было  $U_{вх} = 2 \dots 3$  В, а потенциометром  $R_{п}$  добейтесь минимальных искажений этого напряжения. Повторите измерения, постройте кривые на графике (рис. 5.5.6) и занесите результаты в табл. 5.5.1. При этом  $R_{доб} = 1$  кОм, а  $R_{н} = 47$  кОм.

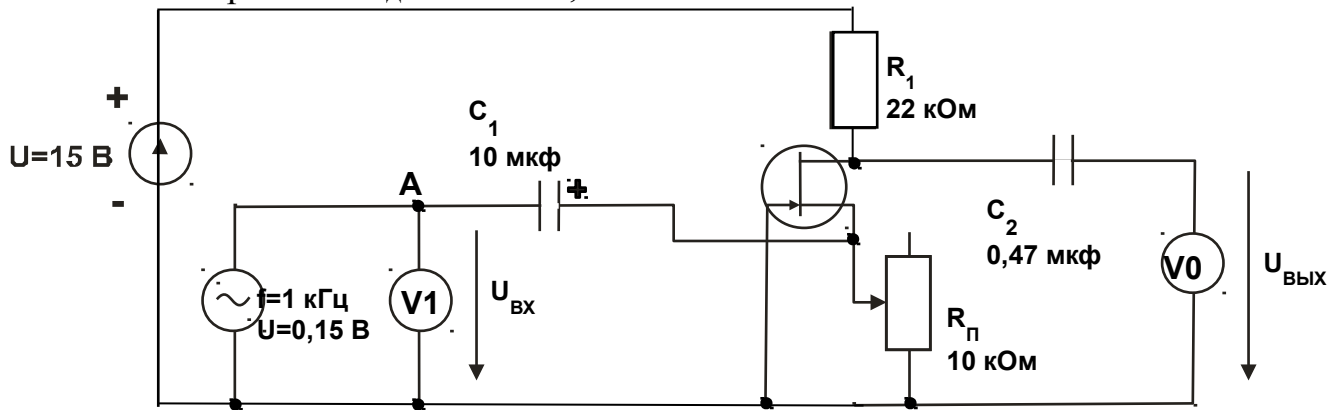
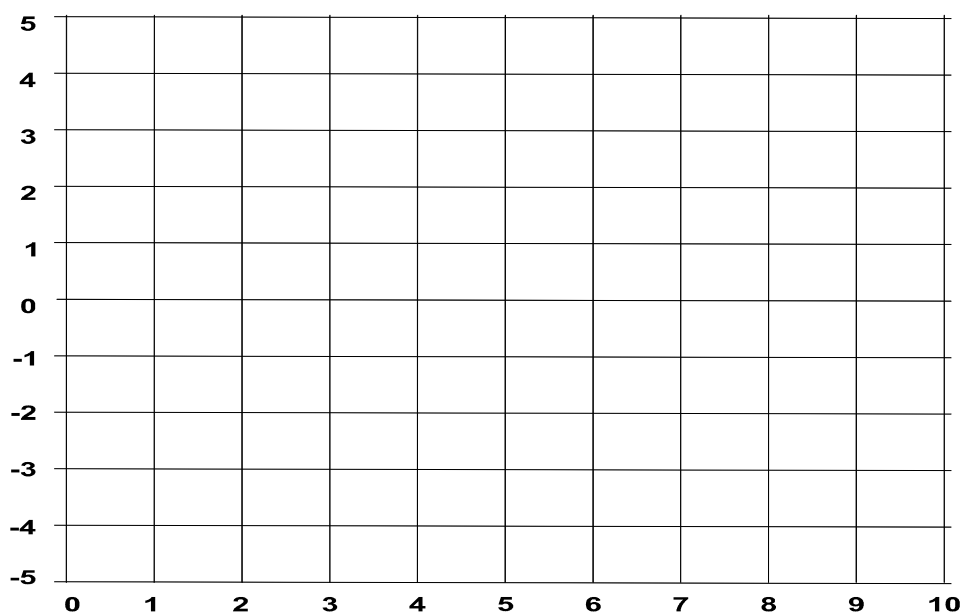


Рис. 5.5.5



**Масштабы:**  
 $m_i = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{вх}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{вых}} = \dots$  В/дел

Рис. 5.5.6

Таблица 5.5.1

	с общим истоком	с общим стоком	с общим затвором
$U_{вх}$	0,25 В, 1кГц	2 В, 1кГц	0,15 В, 1 кГц
$U_{вых}$			
$\nu_U$			
$\varphi$			
$R_{вх}$			
$R_{вых}$			

### Контрольные вопросы

1. Когда **p-n** переходы полевого транзистора с каналом **n**-типа заперты?
2. Когда **p-n** переходы полевого транзистора с каналом **p**-типа заперты?
3. Какое значение имеют расхождения между двумя полученными характеристиками включения?
4. Каков наклон характеристики **S** полевого транзистора, когда изменение напряжения затвор / исток составляет 1,5 В, а соответствующее изменение тока стока равно 4,5 мА?
5. Когда полевой транзистор управляется без потерь мощности?
6. Как ведет себя коэффициент усиления  $\nu$  при увеличении сопротивления нагрузки  $R_H$ ?
7. Какой из трех усилителей имеет инвертирующий эффект?
8. Почему усилитель с общим стоком не имеет такой же значимости, что и усилитель с общим коллектором на биполярном транзисторе?
9. В каких отношениях усилитель с общим затвором отличается от усилителя с общим истоком?

## Лабораторная работа №6

Тема: Тиристоры

Цель:

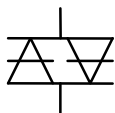
1. Снять статическую характеристику симистора
2. Снять динамическую характеристику симистора с использованием осциллографа
3. Исследовать влияние напряжения цепи управляющий электрод / катод тиристора на ток управления и анодный ток. Дополнительно изучите процесс запираания тиристора
4. Произвести измерения и изучить свойства тиристора как управляемого выпрямителя с однопереходным транзистором в цепи управления.

### 6.1. Диодный тиристор (симистор)

#### 6.1.1. Общие сведения

**Диодные тиристоры**, именуемые также **динисторами**, изменяют свое состояние соответственно приложенному напряжению. При некотором граничном напряжении (**напряжении отпирания**) динистор переходит от

симистор



условное обозначение

Рис.6.1.1

состояния с высоким сопротивлением к состоянию с низким сопротивлением. Он сохраняет состояние низкой резистивности до тех пор, пока ток в нем не упадет ниже величины **тока удержания**. Так называемый **симистор** (рис.6.1.1) призван выполнять функции двух динисторов, включенных **встречно-**

**параллельно**. Изменение состояния симистора происходит при обеих полярностях приложенного напряжения, обеспечивая проведение тока в обоих направлениях.

Симисторы используются главным образом для включения триодных тиристорov, выпускаемых на большие токи и напряжения.

#### 6.1.2. Экспериментальная часть

##### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.1.2). Если вы используете виртуальные приборы, то установите период измерения 0,02 с.
- Плавно увеличивая напряжение регулируемого источника напряжения, определите напряжение отпирания симистора (это наибольшее напряжение, при котором ток еще равен нулю, при дальнейшем увеличении напряжения источника ток возрастает скачком, а напряжение на симисторе скачком уменьшается). Запишите значение  $U_{отп}$  в табл. 6.1.1.



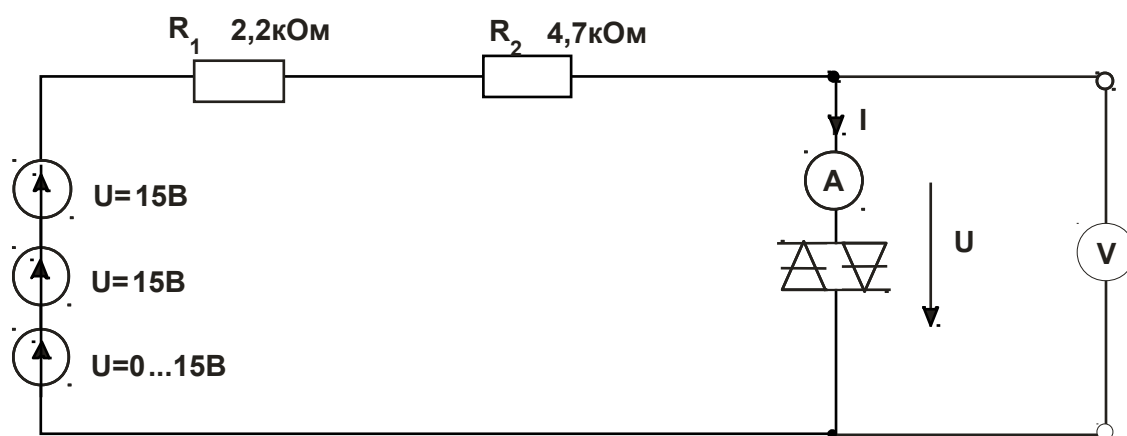


Рис. 6.1.2

- Плавно уменьшая напряжение регулируемого источника напряжения, определите ток удержания симистора (это наименьшее значение тока, при котором симистор еще остается включенным, при дальнейшем снижении напряжения источника ток скачком падает до нуля, а напряжение на симисторе скачком возрастает). Запишите значение  $I_{уд}$  в табл. 6.1.1.
- Изменяя напряжение регулируемого источника, поочередно установите значения тока, указанные в табл. 6.1.1 и запишите в нее соответствующие напряжения на симисторе.
- Повторите измерения для обратной полярности симистора и результаты занесите в табл. 6.1.2.

Таблица 6.1.1

+I, мА	$I_{уд} =$ мА	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
+U, В	$U_{отп} =$ В							

Таблица 6.1.2

-I, мА	$I_{уд} =$ мА	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	
-U, В	$U_{отп} =$ В							

- На графике (рис. 6.1.3) постройте кривую зависимости тока от напряжения.

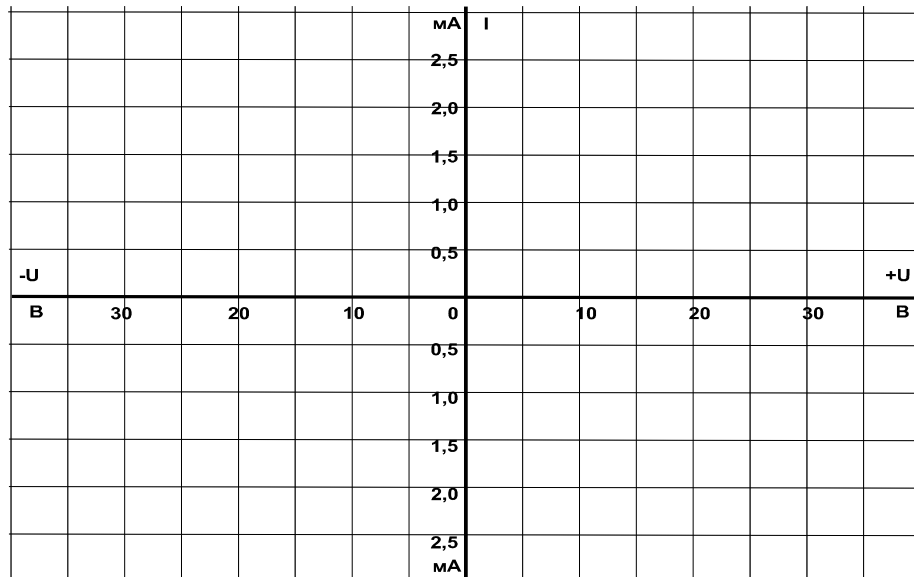


Рис. 6.1.3

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь, схема которой показана на рис. 6.1.4.
- Включите виртуальные приборы V0, A1 и «Осциллограф». На осциллографе включите режим XY (вход X – канал 3, вход Y – канал 1).
- На графике (рис. 6.1.5) отобразите характеристику, полученную на мониторе осциллографа, и сравните ее со статической характеристикой.

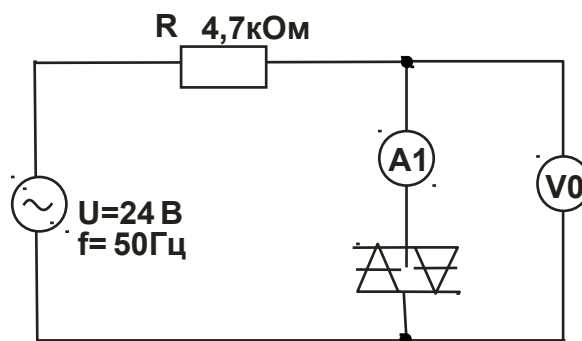


Рис. 6.1.4

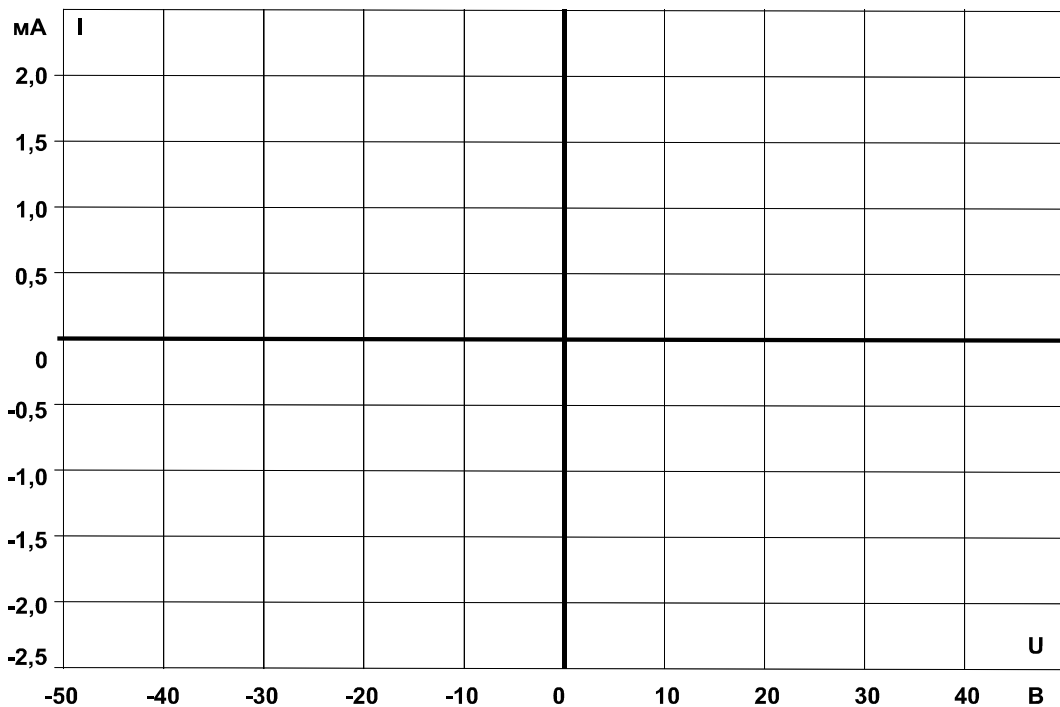


Рис. 6.1.5

## 6.2. Триодный тиристор

### 6.2.1. Общие сведения

**Триодные тиристоры**, обычно называемые просто **тиристорами** (рис.6.2.1), имеют четыре слоя **p-n-p-n** один из которых соединен с внешним управляющим электродом (УЭ). Это позволяет приводить цепь катод (К) / анод (А) тиристора в открытое состояние.

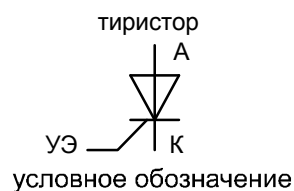


Рис. 6.2.1

Тиристор может быть также переведен в открытое состояние катодно-анодным напряжением. Однако этого способа, если возможно, следует избегать, чтобы не разрушить тиристор.

Будучи открытым, тиристор сохраняет проводящее состояние, даже когда напряжение на управляющем электроде выключается. Цепь катод / анод возвращается к запертому состоянию, когда анодный ток уменьшается ниже минимальной величины (ток удержания  $I_{уд}$ ).

## 6.2.2. Экспериментальная часть

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь, как показано на рис. 6.2.2, и подайте на нее максимальное напряжение 15 В, при напряжении управляющий электрод/катод  $U_{ук} = 0$  В. Увеличивайте напряжение  $U_{ук}$ , и измеряйте соответствующие значения тока управления  $I_y$  мультиметром. Занесите данные измерений в таблицу 6.2.1. Заметьте и запишите при каком напряжении  $U_{ук}$  отпирается тиристор (загорается лампочка).

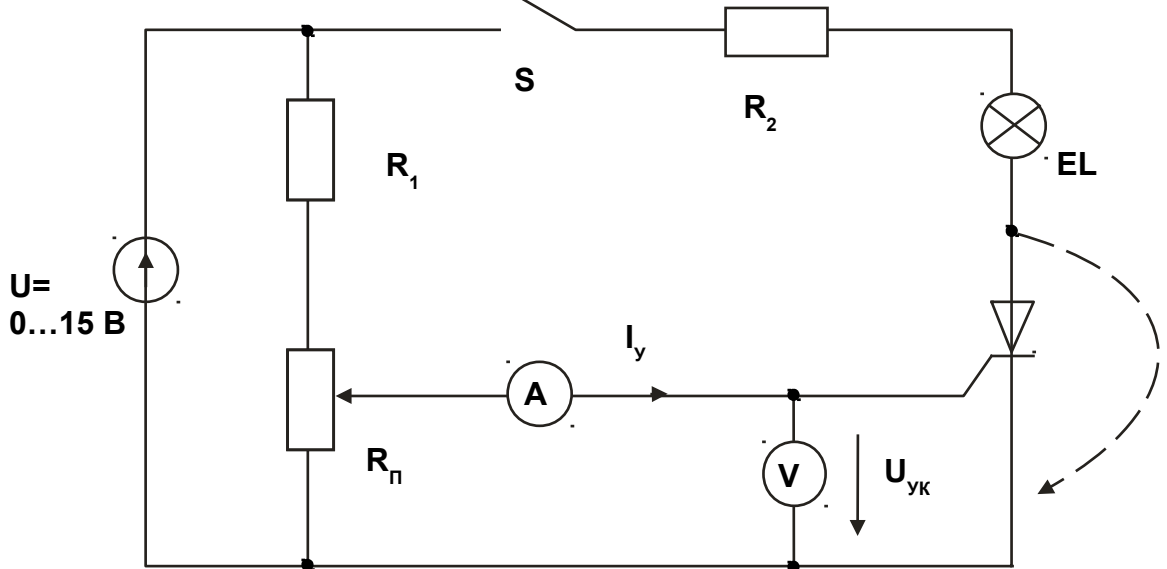


Рис. 6.2.2

- Снижайте напряжение  $U_{ук}$  до нуля и снова записывайте значения  $I_y$  в табл. 6.2.1.
- На рис. 6.2.3 постройте графики  $I_y(U_{ук})$  при увеличении и уменьшении напряжения. На графике отметьте напряжения  $U_{отп}$  и ток  $I_{отп}$ .

Таблица 6.2.1

$U_{ук}, В$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
$I_{y1}^*, мА$										
$I_{y2}^*, мА$										

$I_{y1}^*$  – при увеличении  $U_{ук}$ ,  $I_{y2}^*$  – при уменьшении.

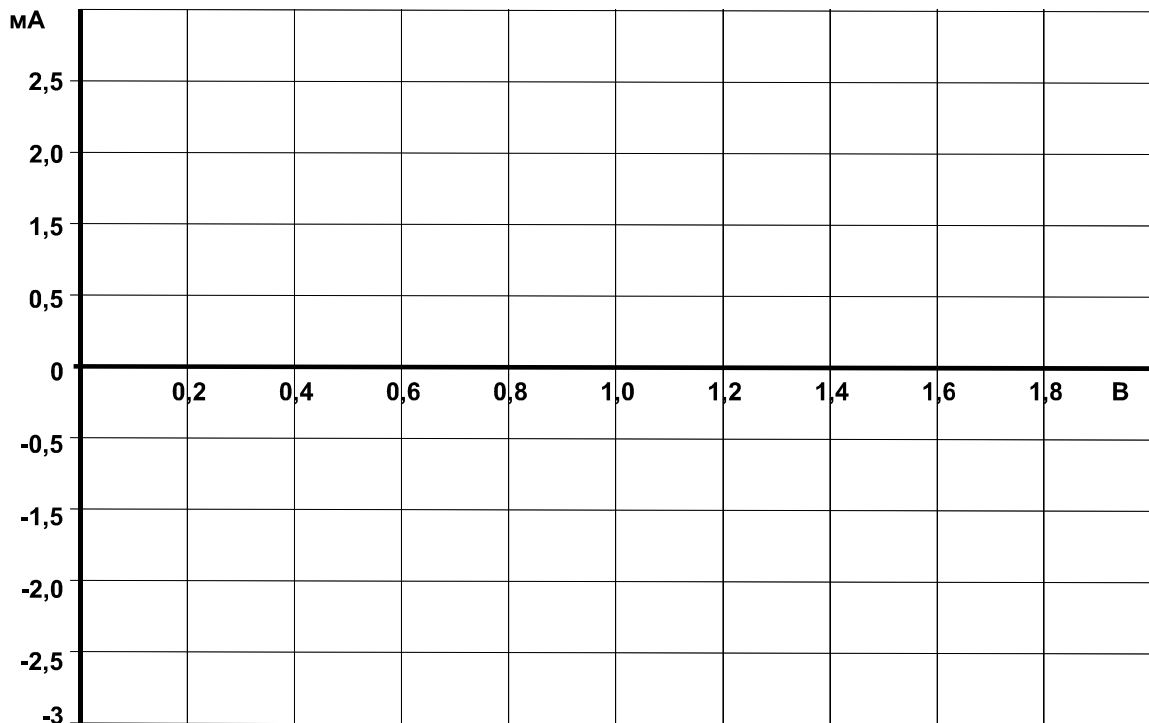


Рис. 6.2.3

- Убедитесь, что снижение напряжения управления до нуля не приводит к выключению тиристора и что для его запирания необходимо либо кратковременно прервать цепь (выключить выключатель S), либо зашунтировать тиристор (показано на схеме пунктиром), либо снизить ток до значения меньше тока удержания.
- Определите тока удержания  $I_{уд}$ . Для этого переключите миллиамперметр в цепь нагрузки и при нулевом токе управления плавно снижайте напряжение питания до тех пор, пока ток нагрузки скачком не упадет до нуля. Последнее значение тока перед этим скачком и есть ток удержания:

$$I_{уд} = \dots\dots\dots \text{мА.}$$

- Соберите цепь (рис. 6.2.4) для снятия вольтамперной характеристики  $I_A(U_{AK})$  тиристора с помощью осциллографа (виртуального или электронного). Установите максимальную амплитуду синусоидального напряжения и максимальное значение постоянного напряжения 15 В.

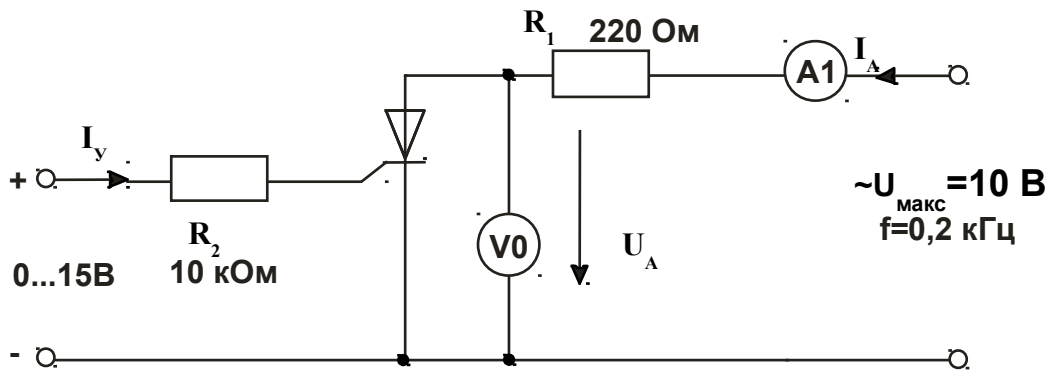
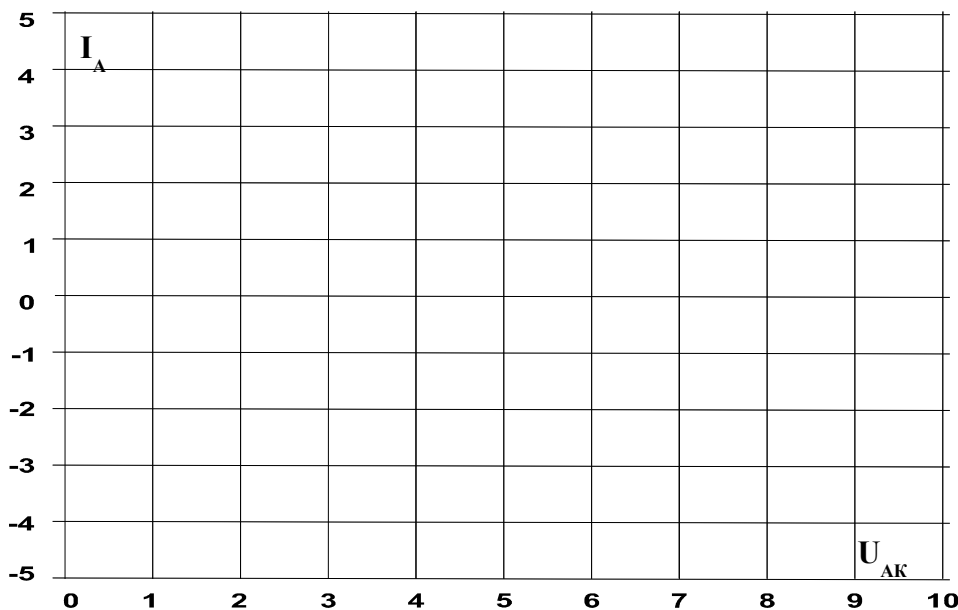


Рис. 6.2.4

- Включите виртуальный осциллограф и получите на экране изображение одного-двух периодов тока и напряжения на тиристоре.
- Снижая и увеличивая напряжение управления, убедитесь, что тиристор выключается (ток становится равным нулю, а напряжение на тиристоре синусоидальное) и включается (появляется положительная полуволна тока, а напряжение имеет только отрицательную полуволну). При необходимости замените резистор 10 кОм на 4,7 кОм. При токе управления близком к минимальному току отпирания, можно заметить включение тиристора при нарастании анодного напряжения.
- Включите режим XY осциллографа (канал V0 по входу X и канал A1 по входу Y), получите на экране изображение вольтамперной характеристики  $I_A(U_{AK})$ . Проследите за ее изменением при увеличении и уменьшении тока управления и перерисуйте на график (рис. 6.2.5) при  $I_y > I_{отп}$  и  $I_y < I_{отп}$ . Не забудьте указать масштабы.



**Масштабы:**  
 $m_U = \dots \text{ В/дел}$   
 $m_I = \dots \text{ В/дел}$

Рис. 6.2.5

## 6.3. Фазовое управление тиристора

### 6.3.1. Общие сведения

При фазовом способе управления на управляющий электрод тиристора подаются короткие импульсы напряжения, отпирающие тиристор в определенной точке полуволны приложенного напряжения. Запирается тиристор автоматически в момент перехода тока через ноль. Изменение точки (фазового угла) отпирания приводит к изменению среднего за полупериод значения тока нагрузки (рис. 6.3.1).

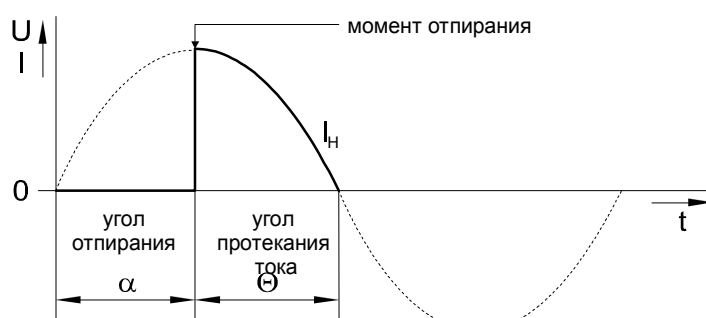


Рис. 6.3.1

В данной работе исследуется тиристорный регулятор выпрямления тока. Последовательно с нагрузкой, состоящей из лампы накаливания  $E_L$  и добавочного резистора  $R_1$ , включен тиристор  $V_1$ , управляемый от генератора импульсов.

Генератор импульсов выполнен на однопереходном транзисторе  $VT$ . При подаче полуволны напряжения на анод запятого тиристора конденсатор  $C$  заряжается через сопротивления  $R_2$ ,  $R_{II}$  и  $R_3$ . Когда напряжение на конденсаторе достигает значения  $0,7...0,8 U_{ст}$ , транзистор открывается и конденсатор разряжается по цепи эмиттер – база – управляющий электрод – катод тиристора. Тиристор отпирается, создает цепь для протекания тока через нагрузку и одновременно шунтирует генератор импульсов. Индуктивность  $L$  служит для создания колебательного контура в цепи разряда конденсатора для более четкого запирающего однопереходного транзистора. Скорость заряда конденсатора и, следовательно, задержка подачи отпирающего импульса по отношению к моменту подачи положительного напряжения на анод тиристора регулируется потенциометром  $R_{II}$ .

### 6.3.1. Экспериментальная часть Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.3.2) и подайте на вход этой цепи синусоидальное напряжение 24 В, 50 Гц. Для измерения тока в цепи

нагрузки и угла задержки отпирания тиристора включите виртуальные приборы V0, A1 и виртуальный осциллограф. Не забудьте установить род измеряемой величины – «среднее значение».

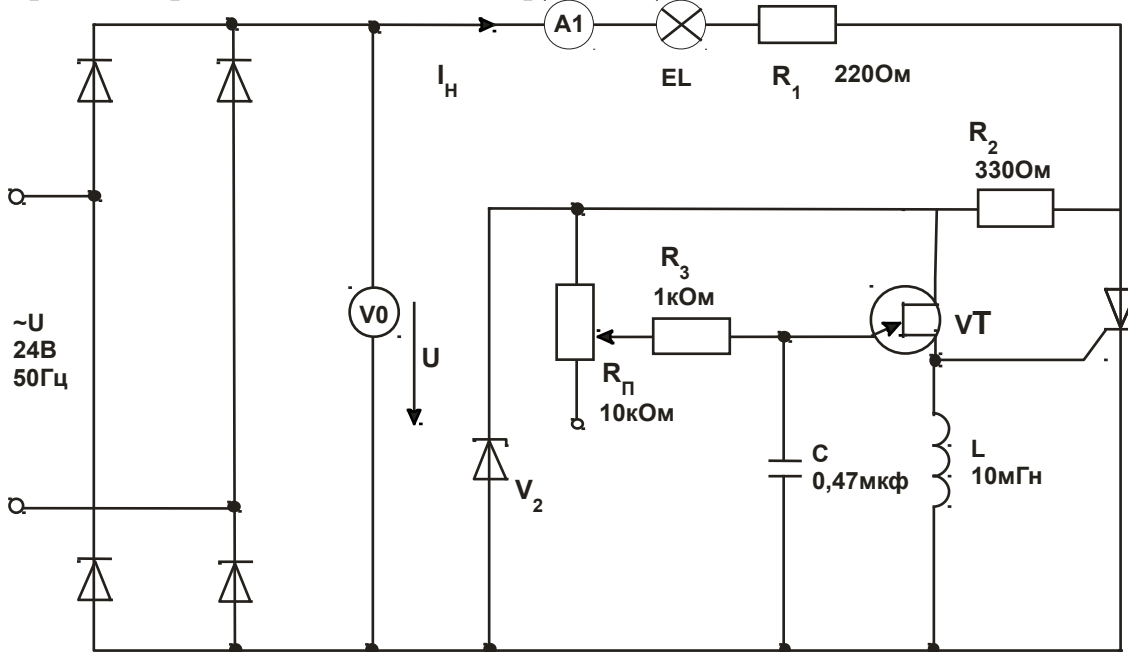


Рис. 6.3.2

- Включите блок генераторов напряжений, настройте осциллограф и, вращая ручку потенциометра, убедитесь, что регулируется угол задержки отпирания тиристора и среднее значение выпрямленного тока.
- При одном из положений потенциометра перерисуйте кривые выпрямленных напряжения и тока на рис. 6.3.3. Определите и запишите масштабы.

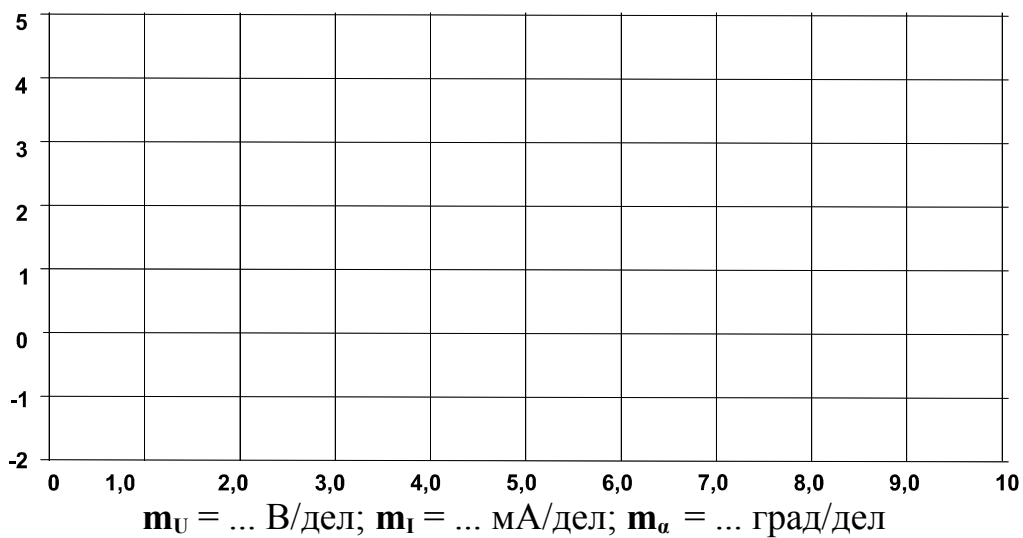


Рис. 6.3.3

- Изменяя угол задержки отпирания от минимально возможного значения до максимального, снимите зависимость  $I_H(\alpha)$ , занесите



результаты измерений в табл. 6.3.1 и на рис. 6.3.4 постройте график.

**Примечание:** для уменьшения минимально возможного угла  $\alpha$  замените конденсатор  $C = 0,47 \text{ мкФ}$  на  $0,1 \text{ мкФ}$ .

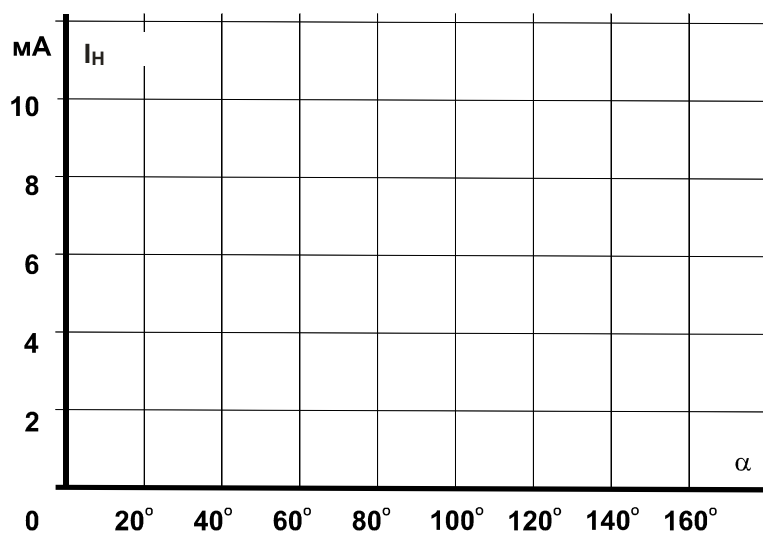


Рис. 6.3.4

Таблица 6.3.1

$\alpha, ^\circ$	18	36	72	108	144	180
$I_H, \text{ mA}$						

#### Контрольные вопросы

1. Какова величина напряжения отпирания симистора (по рис. 6.1.5)?
2. Каковы величины дифференциального сопротивления симистора в запертом состоянии и отпертом состояниях при токе 2...3 мА?
3. Какие причины «заставляют» симистор вернуться к запертому состоянию?
4. Запирается ли отпертый тиристор, когда отключается напряжение цепи управляющий электрод/катод?
5. Что случится с отпертым тиристором при размыкании выключателя в цепи (рис. 6.2.2), если  $U_{ук} > U_{отп}$ ? Если  $U_{эк} < U_{отп}$ ?
6. Как поведет себя тиристор, если к цепи (рис. 6.2.2) вместо постоянного напряжения приложить синусоидальное напряжение при  $U_{ук} > U_{отп}$ ? при  $U_{ук} < U_{отп}$ ?
7. Что произойдет с отпертым тиристором при его кратковременном шунтировании переключкой в цепи (рис. 6.2.2), если  $U_{ук} > U_{отп}$ ? Если  $U_{ук} < U_{отп}$ ?
8. Какие свойства проявляет тиристор, работая при измененной на противоположную полярности напряжений?
9. Как изменяется ток нагрузки при увеличении угла отпирания тиристора?

## Лабораторная работа №7

Тема: Логические элементы

Цель:

1. Исследовать свойства элемента **И** с тремя входами со следующим соответствием сигналов
2. Исследовать свойства элемента **ИЛИ** с тремя входами со следующим соответствием сигналов
3. Проведя необходимые измерения, исследовать свойства элемента **НЕ**
4. Производя измерения, исследовать свойства элемента **И - НЕ** с тремя входами со следующим соответствием сигналов:  $0 \text{ В} \equiv \text{сигнал } 0 \equiv \text{уровень низкого потенциала}$ ,  $+15 \text{ В} \equiv \text{сигнал } 1 \equiv \text{уровень высокого потенциала}$ .
5. Производя измерения, исследовать свойства элемента **ИЛИ - НЕ** с тремя входами со следующим соответствием сигналов:  $0 \text{ В} \equiv \text{сигнал } 0 \equiv \text{уровень низкого потенциала}$ ,  $+15 \text{ В} \equiv \text{сигнал } 1 \equiv \text{уровень высокого потенциала}$ .

### Введение

**Логические** (двоичные) **элементы** служат для выполнения различных логических операций над цифровыми сигналами при двоичном способе их представления. Существенная особенность двоичных цепей в том, что в них рассматриваются не столько величины напряжений, сколько двоичные сигналы. Соответствие между напряжениями и двоичными сигналами устанавливается произвольно. Чаще всего используются дискретные сигналы, нулевому значению которых соответствует уровень низкого электрического потенциала, а единичному значению - уровень высокого потенциала (положительного или отрицательного). Возможны и другие соответствия.

Свойства логических элементов подчиняются правилам Булевой алгебры. Это означает, в частности, что входные переменные логических элементов следует обозначать строчными, а выходные переменные - прописными буквами.

Основные Булевы (логические) функции следующие:

1. Функция **AND (И)** - конъюнкция (логическое умножение).
2. Функция **OR (ИЛИ)** - дизъюнкция (логическое сложение).
3. Функция **NOT (НЕ)** - инверсия (логическое отрицание).

Дополнительно существуют такие комбинации как:

функция **NOT AND (И - НЕ)**,  
функция **NOT OR (ИЛИ - НЕ)** и др.

## 7.1. Логический элемент AND (И)

### 7.1.1. Общие сведения

Элемент **И** имеет несколько входов и один выход. Выход приобретает значение 1 только тогда, когда все входы данного логического элемента имеют значение 1. Его условное обозначение показано на рис. 7.1.1а.

### 7.1.2. Экспериментальная часть Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 7.1.1б). Подайте последовательно

0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала,  
+15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала,

ко входам  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , как указано в табл. 7.1.1. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

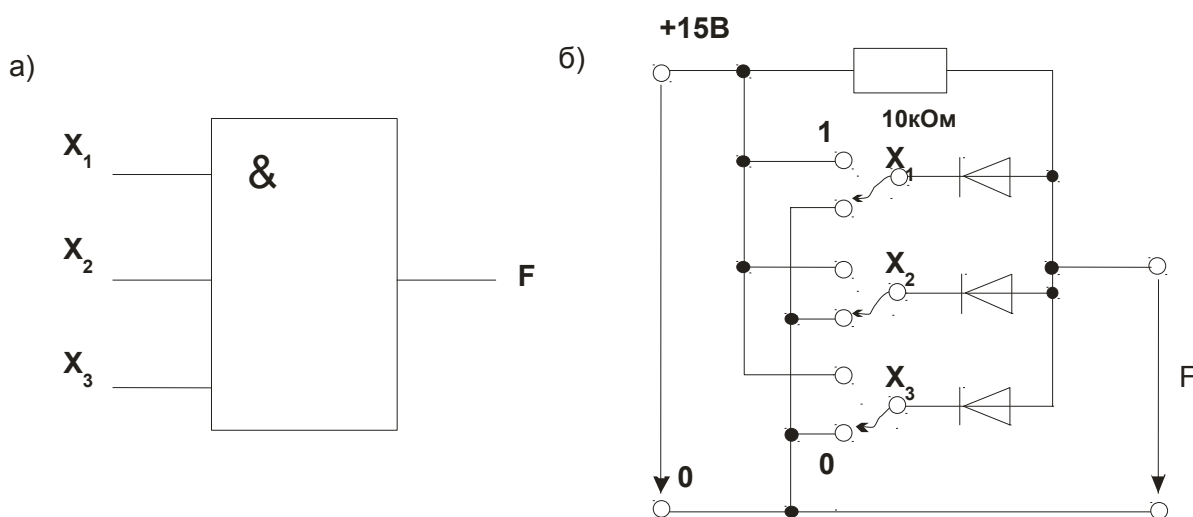


Рис. 7.1.1.

Таблица 7.1.1

Входные сигналы			Выходные сигналы
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$F$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

**Примечание:** Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.

## 7.2. Логический элемент OR (ИЛИ)

### 7.2.1. Общие сведения

Элемент **ИЛИ** имеет несколько входов и один выход. Выход приобретает значение 1, когда хотя бы один вход данного логического элемента имеет значение 1. Его условное обозначение показано на рис. 7.2.1а.

### 7.2.2. Экспериментальная часть Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 7.2.1б). Подайте последовательно

0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала,  
 +15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала,

к входам  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , как указано в табл. 7.2.1. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

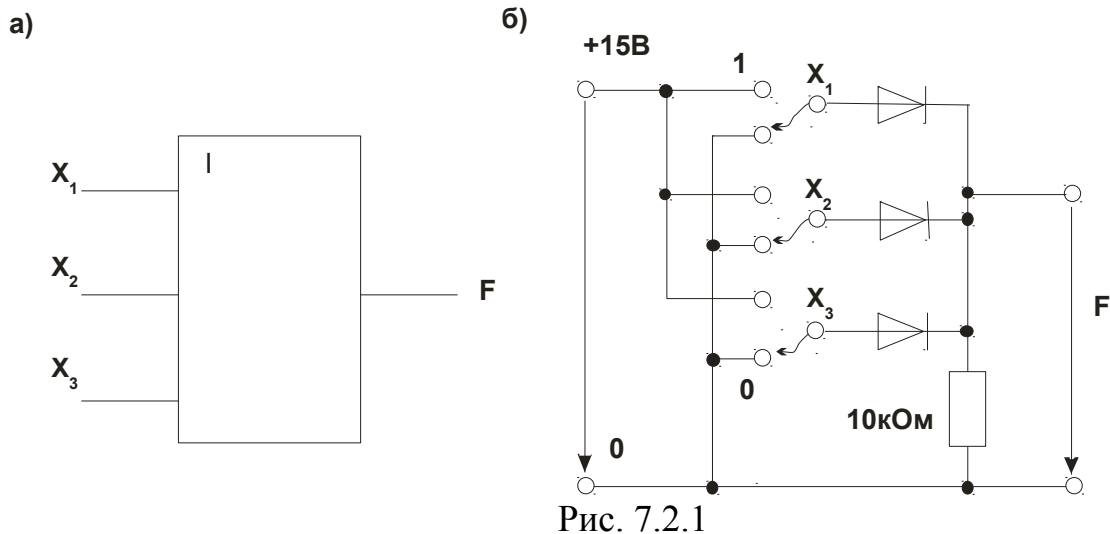


Таблица 7.2.1

Входные сигналы			Выходные сигналы
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F$
0	0	0	

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

**Примечание:** *Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.*

### 7.3. Логический элемент NOT (НЕ)

#### 7.3.1. Общие сведения

Логические элементы **НЕ** отрицают входной сигнал, т.е. они преобразуют сигналы 1 в сигналы 0 и наоборот. Они всегда имеют по одному входу и одному выходу. Используются наряду с другими элементами в цифровых инверторах и логических устройствах. Условное обозначение элемента **НЕ** показано на рис. 7.3.1а.

#### 7.3.2. Экспериментальная часть

##### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 7.3.1). Подайте на вход сначала 0 В (сигнал 0), а затем +15 В (сигнал 1). Занесите соответствующие значения выходного сигнала (1/0) в табл. 7.3.1.

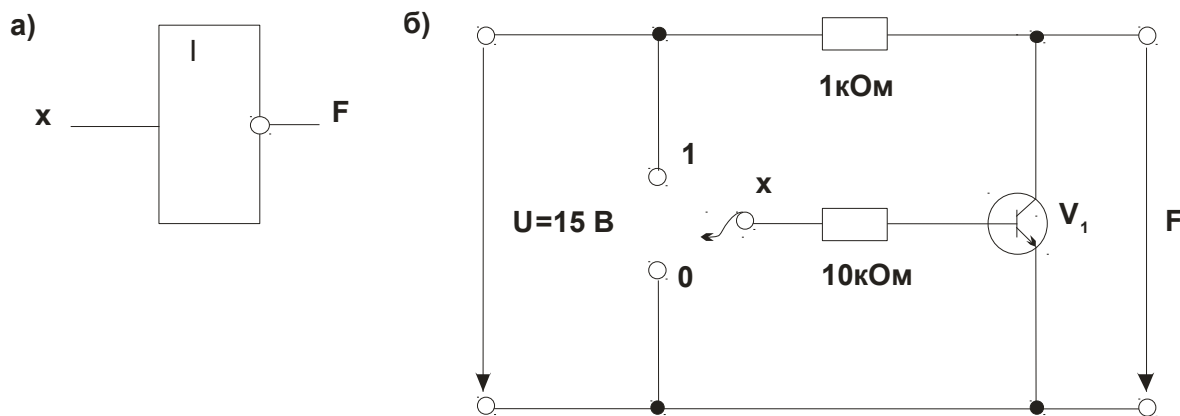


Рис. 7.3.1

Таблица 7.3.1

Входной сигнал	Выходной сигнал
x	F
0	
1	

#### 7.4. Логический элемент NOT AND (И - НЕ)

##### 7.4.1. Общие сведения

Элемент **И - НЕ** состоит из элемента **И**, сопровождаемого элементом **НЕ**. Элементы **И - НЕ** предпочтительны для использования в цифровых цепях, так как все основные цепи (**И**, **ИЛИ** и **НЕ**) можно смоделировать с помощью этого элемента. Условное обозначение элемента **И - НЕ** и его функциональный эквивалент показаны на рис. 7.4.1а и 7.4.1б.

##### 7.4.2. Экспериментальная часть

###### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 7.4.1в). Подайте последовательно

0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала,  
+15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала,

к входам **а**, **б** и **с**, как указано в табл. 7.4.1. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

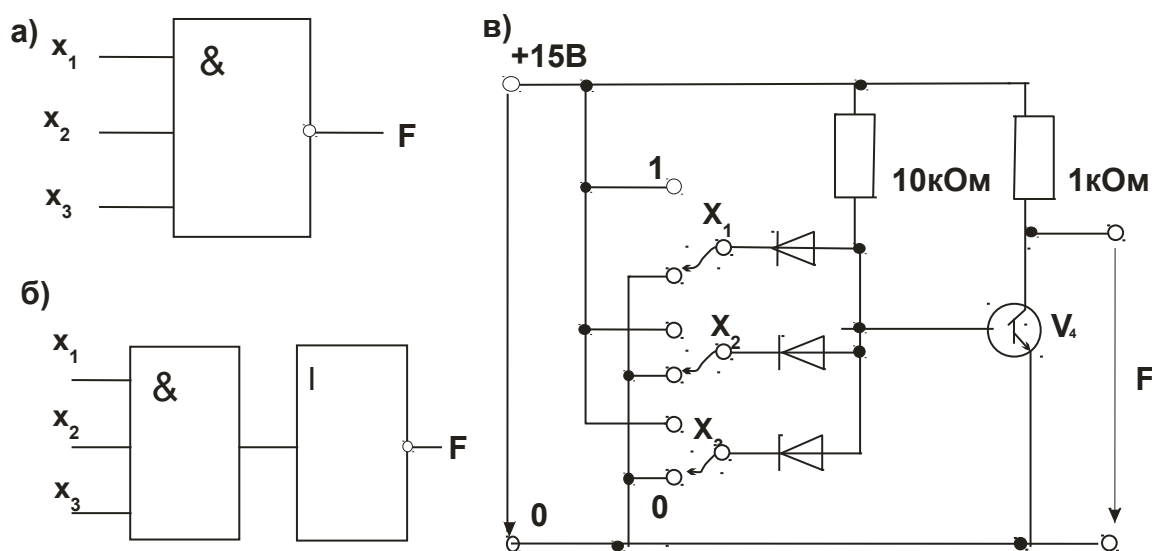


Рис. 7.4.1

Таблица 7.4.1

Входные сигналы			Выходные сигналы
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

*Примечание: Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.*

## 7.5. Логический элемент NOT OR (ИЛИ - НЕ)

### 7.5.1. Общие сведения

Элемент **ИЛИ - НЕ** состоит из элемента **ИЛИ**, сопровождаемого элементом **НЕ**. Как и элемент **И - НЕ**, элемент **ИЛИ - НЕ** предпочтителен к использованию в цифровых цепях, поскольку с его помощью можно строить основные элементы **И**, **ИЛИ** и **НЕ**. Условное обозначение элемента **ИЛИ - НЕ** и его функциональный эквивалент показаны на рис. 7.5.1а и 7.5.1б.

### 7.5.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 7.5.1в). Подайте последовательно

0 В  $\equiv$  сигнал 0  $\equiv$  уровень низкого потенциала,  
+15 В  $\equiv$  сигнал 1  $\equiv$  уровень высокого потенциала,

к входам **а**, **б** и **с**, как указано в табл. 7.5.1. Занесите соответствующие значения выходного сигнала (0/1) в таблицу.

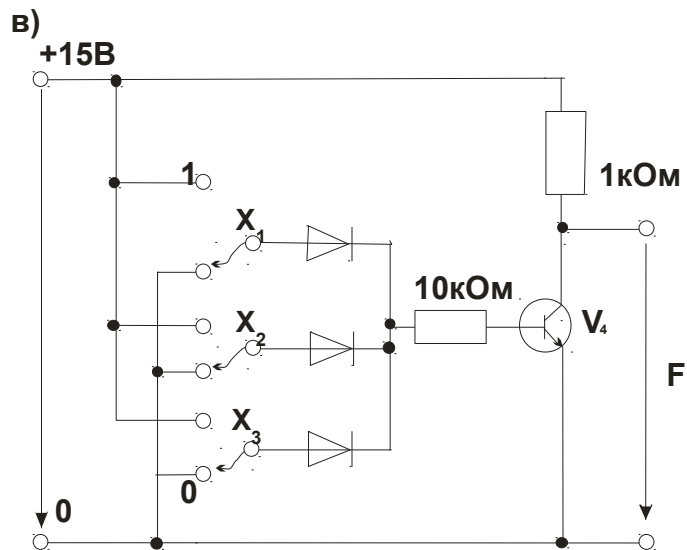
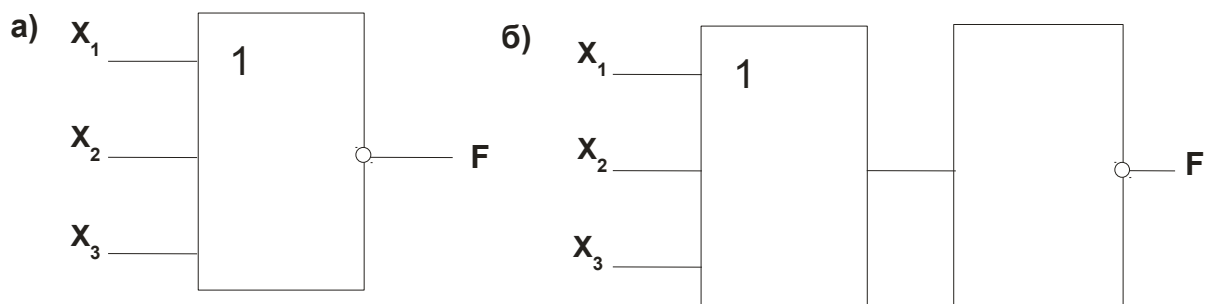


Рис. 7.5.1

Таблица 7.5.1

Входные сигналы			Выходные сигналы
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$F$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

*Примечание: Разомкнутые входы логического элемента не имеют состояния определенного сигнала. Поэтому состояния выходной переменной при разомкнутых входах не несут какой-либо определенной информации.*

**Контрольные вопросы:**

1. Какова формула операции элемента **И**?
2. Когда выходной сигнал элемента **И** имеет величину 1?
3. Какова формула операции элемента **ИЛИ**?



3. При каких условиях на входах выходной сигнал элемента **ИЛИ** имеет величину 1?
4. Какова формула операции элемента **НЕ**?
5. Какова формула операции элемента **И - НЕ**?
6. При каких входных сигналах выходной сигнал элемента **И - НЕ** имеет величину 0?
7. Какова формула операции элемента **ИЛИ - НЕ**?
8. При каких условиях на входах выходной сигнал элемента **ИЛИ - НЕ** имеет величину 0?

### Лабораторная работа №8

**Тема:** Операционные усилители

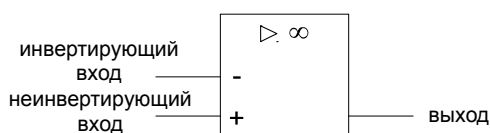
**Цель:**

1. Построить кривую, показывающую зависимость выходного напряжения от входного, изучить влияние величины сопротивления нагрузки на выходное напряжение.
2. Построить кривые зависимости выходного напряжения от входного при различных значениях сопротивления отрицательной обратной связи.
3. Исследовать свойства суммирующего усилителя.
4. Изучить экспериментально ослабление синфазного сигнала дифференциального усилителя.
5. Исследовать поведение операционного усилителя, когда он управляется синусоидальным напряжением. Снять амплитудно-частотные характеристики усилителей, изображенных на рис. 8.5.1 и 8.5.2.

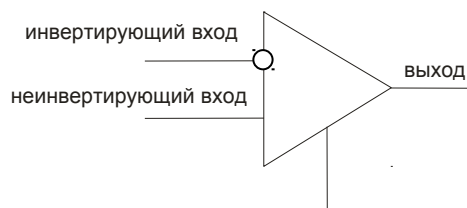
#### Краткие сведения об операционных усилителях

Операционный усилитель представляет собой идеальный усилитель с высокорезистивным дифференциальным входом (два входных вывода) и очень высоким коэффициентом усиления. Фактически многие электронные устройства, выполняемые на транзисторах, могут быть также реализованы на операционных усилителях.

условное обозначение:



ИЛИ



При подаче на неинвертирующий вход приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с приращениями входного сигнала. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то приращение выходного сигнала имеет обратный знак (противоположный по фазе). При подаче сигналов на оба входа сигнал на выходе равен

$$U_{\text{ВЫХ}} = v (U_1 - U_2),$$

где  $v \rightarrow \infty$  – коэффициент усиления операционного усилителя;  
 $U_1$  и  $U_2$  – сигнал на неинвертирующем и инвертирующем входах соответственно.

Входное сопротивление операционного усилителя очень велико ( $R_{\text{ВХ}} \rightarrow \infty$ ), поэтому входной ток при расчете считается равным нулю.

Выходное сопротивление операционного усилителя весьма мало ( $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$ ), поэтому ток нагрузки усилителя практически не влияет его выходное напряжение.

Инвертирующий вход часто используется для введения в операционный усилитель внешних обратных связей.

## 8.1. Инвертирующий усилитель

### 8.1.1. Общие сведения

Инвертирующий усилитель представляет собой устройство, которое преобразует входное напряжение в выходное напряжение противоположной полярности. В случае синусоидального напряжения образуется фазовременной сдвиг  $180^\circ$  между входным и выходным сигналами. Инвертирующий усилитель может быть использован для усиления или ослабления входного сигнала. Его принципиальная схема показана на рис. 8.1.1.

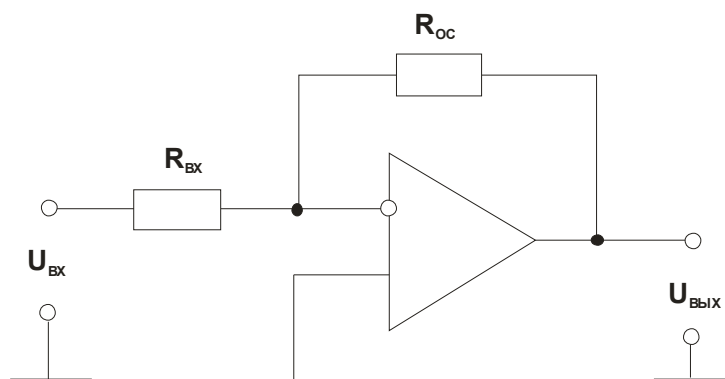


Рис. 8.1.1

Коэффициент усиления равен

$$v = - U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = - R_{\text{ОС}} / R_{\text{ВХ}}.$$

Для упрощения расчетов делаются следующие допущения:

- В диапазоне модуляции разность потенциалов между двумя входами равна 0;
- Входной ток усилителя равен 0.

Коэффициент усиления  $\nu = -1$  (когда  $R_{OC} = R_{BX}$ ), то есть амплитуды входного и выходного сигналов равны.

### 8.1.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь, как показано на рис. 8.1.1. С помощью мультиметра измерьте величины выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{OC}$  и входных напряжениях  $U_{ВХ}$  согласно табл. 8.1.1.

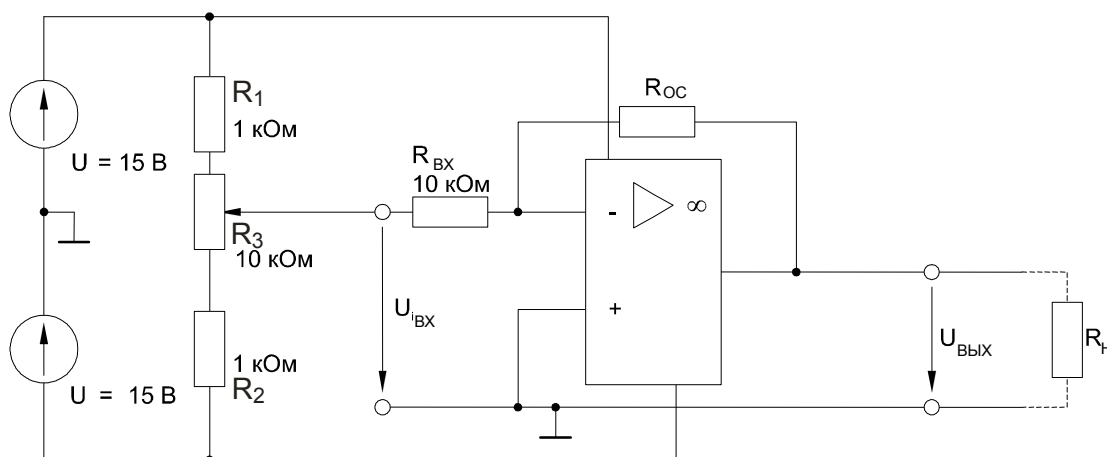


Рис. 8.1.2

Таблица 8.1.1

$U_{ВХ}, В$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{ВЫХ}$ при $R_{OC} = 10 \text{ кОм}$											
$U_{ВЫХ}$ при $R_{OC} = 22 \text{ кОм}$											
$U_{ВЫХ}$ при $R_{OC} = 47 \text{ кОм}$											

- Занесите результаты измерений в табл. 8.1.1. На графике (рис. 8.1.3) постройте кривые зависимостей выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  от входного  $U_{ВХ}$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{OC}$ .

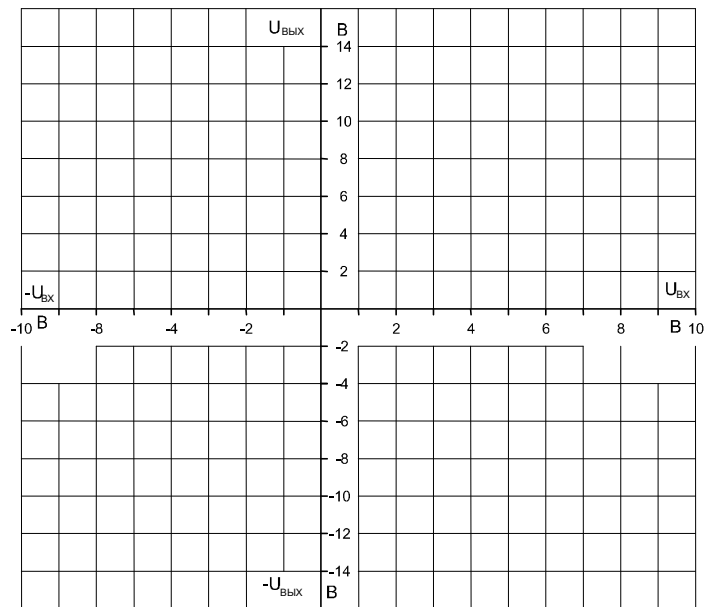


Рис. 8.1.3

- Для изучения влияния сопротивления нагрузки установите входное напряжение  $U_{ВХ} = -5 В$ , а  $R_{ОС} = R_{ВХ} = 10 кОм$ . Подсоедините к выходу усилителя поочередно различные сопротивления нагрузки согласно табл. 8.1.2 и измерьте мультиметром результирующие выходные напряжения  $U_{ВЫХ}$ .

Таблица 8.1.2

$R_H, Ом$	1000	680	470	330	220	100	47
$U_{ВЫХ}, В$							

- Занесите измеренные величины в табл. 8.1.2 и затем постройте на графике (рис. 8.1.4) кривую зависимости выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  от сопротивления нагрузки  $R_H$ .

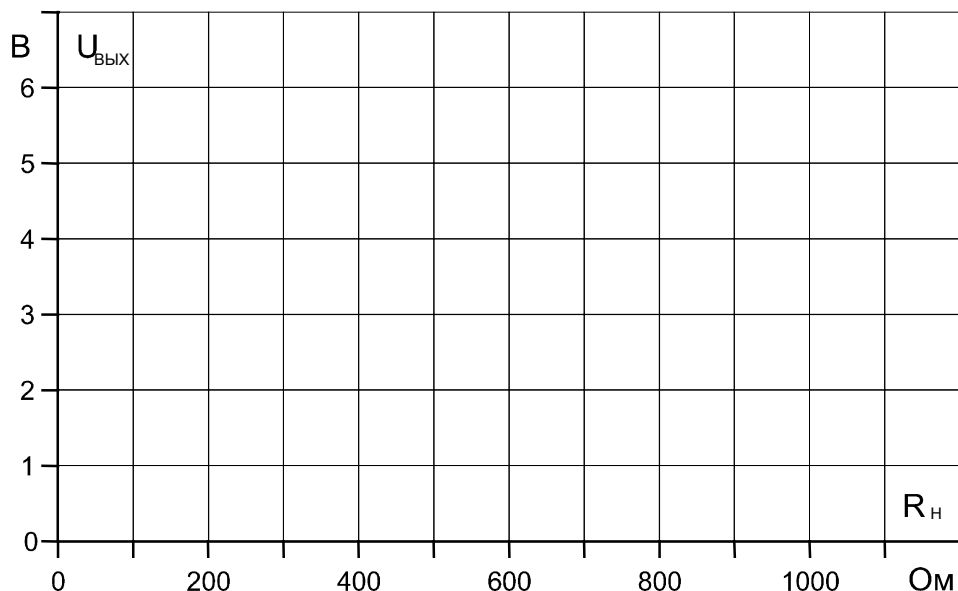
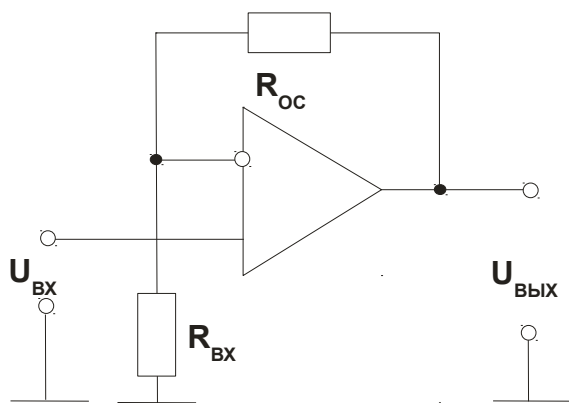


Рис. 8.1.4

## 8.2. Неинвертирующий усилитель

### 8.2.1. Общие сведения



В операционном усилителе без инвертирования входное и выходное напряжения имеют одинаковую полярность, то есть фазовый сдвиг по напряжению равен  $0^\circ$ .

Как показано на принципиальной схеме (рис. 8.2.1), входное напряжение подается на неинвертирующий вход. В диапазоне модуляции усилителя разность потенциалов между двумя входами равна 0. Коэффициент усиления вычисляется по формуле:

$$\nu = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = 1 + R_{\text{ОС}} / R_{\text{ВХ}}.$$

### 8.2.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь по схеме (рис. 8.2.2). Используя мультиметр, измерьте выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  при различных значениях сопротивления отрицательной обратной связи  $R_{\text{ОС}}$  и входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  согласно таблице 8.2.1.

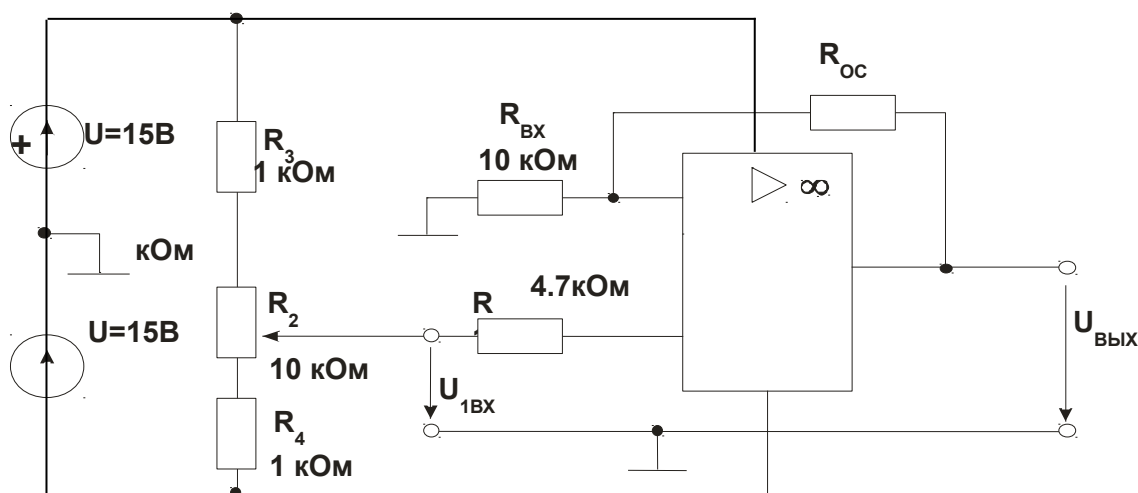


Рис. 8.2.2.

- Занесите результаты измерений в таблицу. На графике (рис. 8.2.3) постройте зависимости выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  при различных сопротивлениях отрицательной обратной связи  $R_{\text{ОС}}$ .

Таблица 8.2.1

$U_{ВХ}, В$	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U_{ВЫХ}, В$ при $R_{ОС}=10$ кОм											
$U_{ВЫХ}, В$ при $R_{ОС}=22$ кОм											
$U_{ВЫХ}, В$ при $R_{ОС}=47$ кОм											

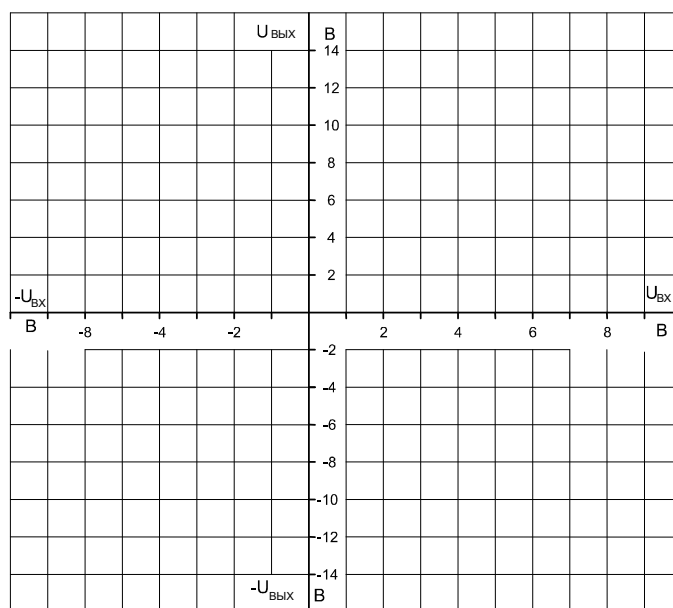


Рис. 8.2.3

### 8.3. Операционный суммирующий усилитель

#### 8.3.1. Общие сведения

Суммирующий усилитель складывает любое требуемое число напряжений в аналоговой форме, учитывая их знаки.

В принципе, суммирующие усилители можно строить на резисторах. Один недостаток такого подхода, однако, состоит в том, что входные резисторы гальванически не развязаны друг с другом.

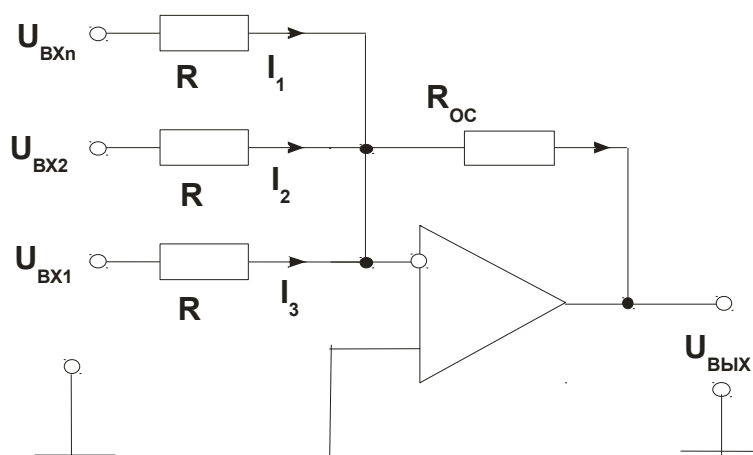


Рис. 8.3.1.

Принципиальная схема инвертирующего сумматора показана на рис. 8.3.1. Если входное напряжение подано только на первый вход, мы имеем инвертор с коэффициентом усиления

$$\nu = - R_{OC} / R_{BX1} = U_{ВЫХ} / U_{ВХ} \text{ и } U_{ВЫХ} = - \frac{R_{OC}}{R} U_{ВХ1}.$$

Важно отметить, что наличие других входов не влияет на коэффициент усиления по любому входу, т.к. точка 0 имеет потенциал земли (разность потенциалов между входами операционного усилителя всегда равна нулю). Например, если на все входы поданы напряжения, то в каждом входном резисторе возникает ток  $I_n = U_{ВХn} / R$ , а через резистор обратной связи протекает сумма токов, т.к. входной ток операционного усилителя всегда остается равным нулю:

$$I_{OC} = - \frac{1}{R} (U_{ВХ1} + U_{ВХ2} + \dots + U_{ВХn}).$$

В результате выходное напряжение усилителя

$$U_{ВЫХ} = - \frac{R_{OC}}{R} (U_{ВХ1} + U_{ВХ2} + \dots + U_{ВХn}).$$

При  $R_{OC} = R$ :

$$U_{ВЫХ} = - (U_{ВХ1} + U_{ВХ2} + \dots + U_{ВХn}).$$

### 8.3.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь, показанную на рис. 8.3.2, и установите входное напряжение  $U_{ВХ2} = 2$  В. Изменяйте входное напряжение  $U_{ВХ1}$  согласно таблице 8.3.1, измеряя соответствующие значения выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  мультиметром. Повторите измерения для входного напряжения  $U_{ВХ2} = -2$  В.

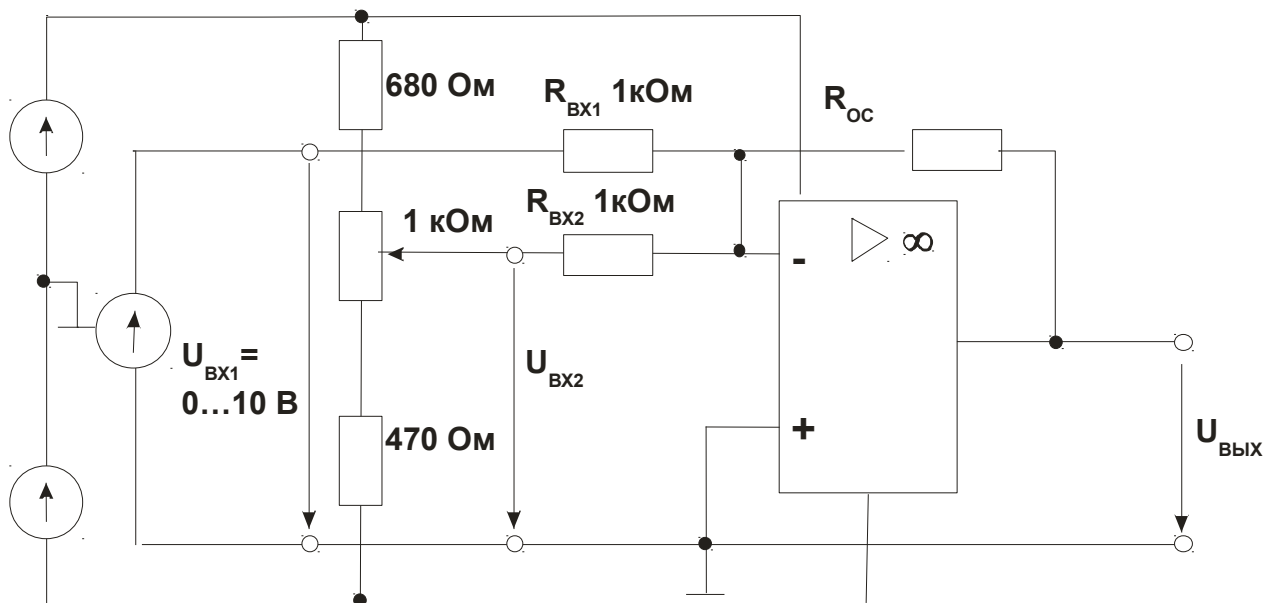


Рис. 8.3.2.

$$R_{BX1} = R_{BX2} = 1 \text{ кОм}$$

Таблица 8.3.1

$U_{BX1}, \text{ В}$	0	2	4	6	8	10
$U_{BX1}, \text{ В}$ при $U_{BX2} = 2 \text{ В}$						
$U_{BX1}, \text{ В}$ при $U_{BX2} = -2 \text{ В}$						

- Результаты измерений занесите в таблицу 8.3.1. На графике (рис. 8.3.3) постройте зависимость выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  от входного  $U_{ВХ1}$ .

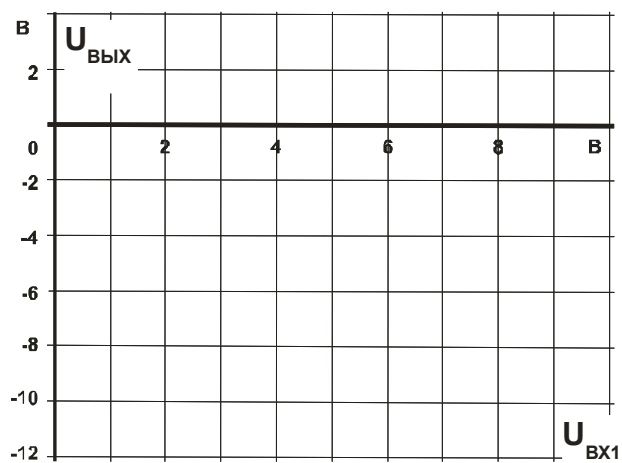


Рис. 8.3.3.



- Повторите все измерения для  $R_{BX1} = R_{BX2} = 4,7 \text{ кОм}$ , занесите результаты измерений в таблицу 8.3.2 и постройте зависимости на графике (рис. 8.3.4).

$$R_{BX1} = R_{BX2} = 4,7 \text{ кОм}$$

Таблица 8.3.2

$U_{BX1}, \text{ В}$	0	2	4	6	8	10
$U_{BX1}, \text{ В при } U_{BX2} = 2 \text{ В}$						
$U_{BX1}, \text{ В при } U_{BX2} = -2 \text{ В}$						

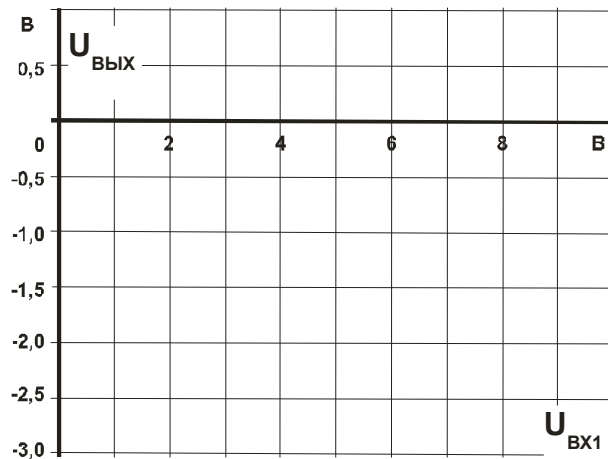


Рис. 8.3.4.

## 8.4. Операционный дифференциальный усилитель

### 8.4.1. Общие сведения

Дифференциальный усилитель (рис. 8.4.1) представляет собой элемент вычитания с усилением. Оба входных напряжения усиливаются с одним и тем же коэффициентом усиления. Ослабление синфазного сигнала удовлетворительно, только когда коэффициенты усиления по обоим входам одинаковы, т.е.  $R_{BX1} = R_{BX2} = R_{BX}$  и  $R_{OC1} = R_{OC2} = R_{OC}$ .

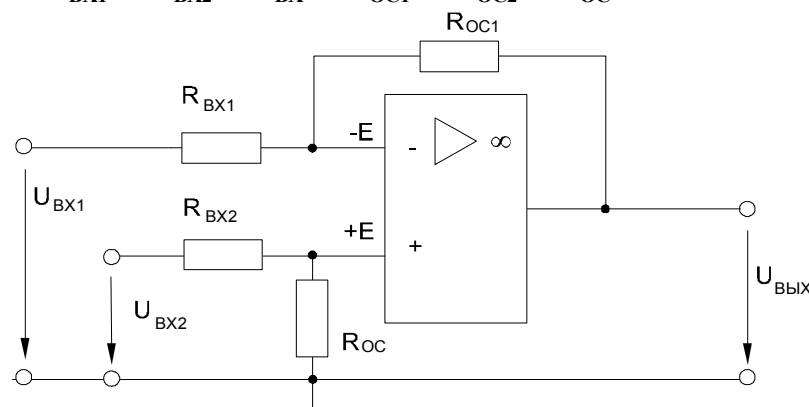


Рис. 8.4.1.

Тогда

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}) \cdot R_{\text{ОС}} / R_{\text{ВХ}}$$

Ослабление синфазного сигнала ухудшается при увеличении коэффициента усиления  $R_{\text{ОС}} / R_{\text{ВХ}}$ .

Операционные дифференциальные усилители применяются, например, как измерительные усилители.

### 8.4.2. Экспериментальная часть

#### Порядок выполнения эксперимента

Соберите цепь, схема которой приведена на рис. 8.4.2. С помощью потенциометра  $R_7$  установите входные напряжения  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$  согласно таблице 8.4.1 и измерьте соответствующие значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Занесите их в таблицу и постройте на графике (рис. 8.4.3) зависимость выходного напряжения от входных напряжений  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$ .

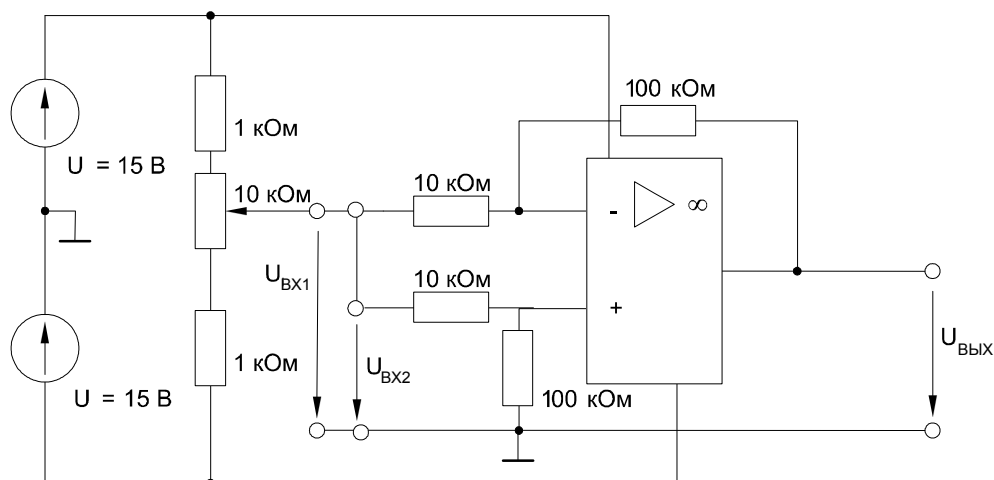


Рис. 8.4.2.

Таблица 8.4.1

$U_{\text{ВХ1}}=U_{\text{ВХ2}},$ <b>В</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{ВЫХ}},$ <b>В</b>											

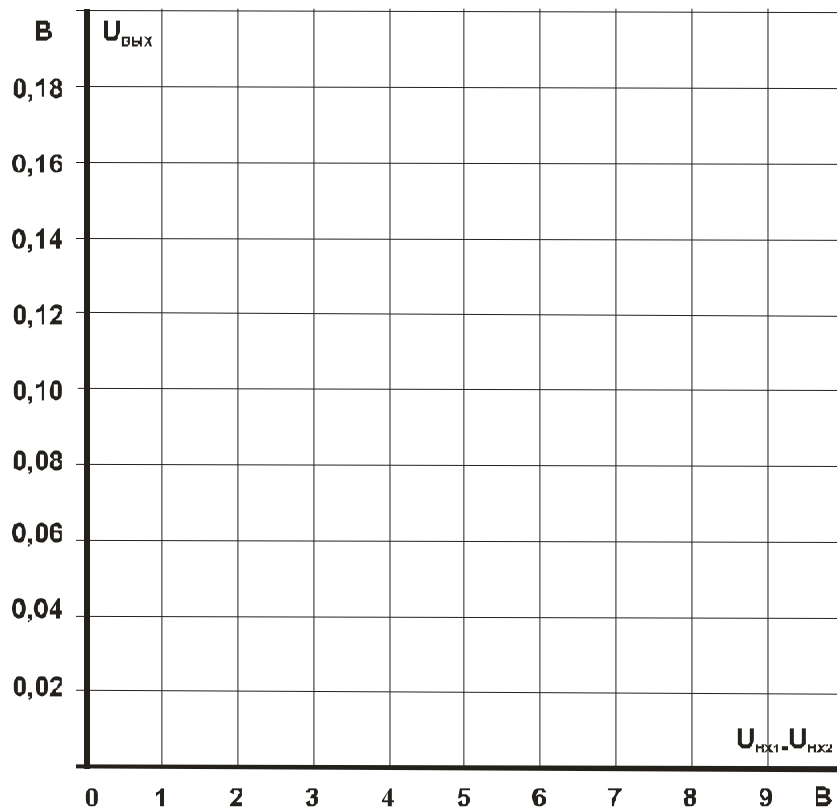


Рис. 8.4.3.

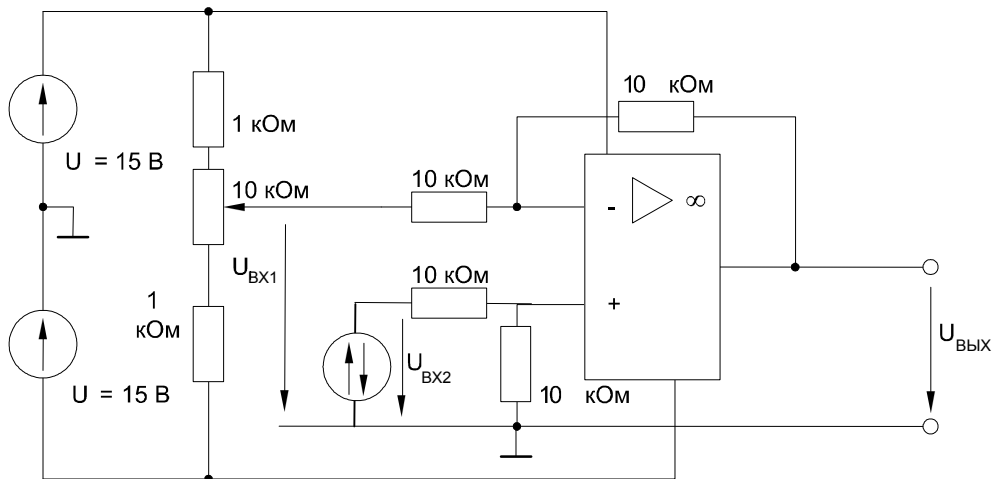


Рис. 8.4.4.

- Затем соберите цепь по рис. 8.4.4. Измерьте значения выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  при различных входных напряжениях  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$ , приведенных в таблице 8.4.2. Занесите результаты измерений в таблицу и на графике (рис. 8.4.5) постройте зависимость выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входных напряжений  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$ .

Таблица 8.4.2

$U_{\text{ВХ1}}, \text{В}$	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$ при $U_{\text{ВХ2}} = -4 \text{ В}$							

<b><math>U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}</math> при <math>U_{\text{ВХ2}} = 0 \text{ В}</math></b>							
<b><math>U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}</math> при <math>U_{\text{ВХ2}} = 4 \text{ В}</math></b>							

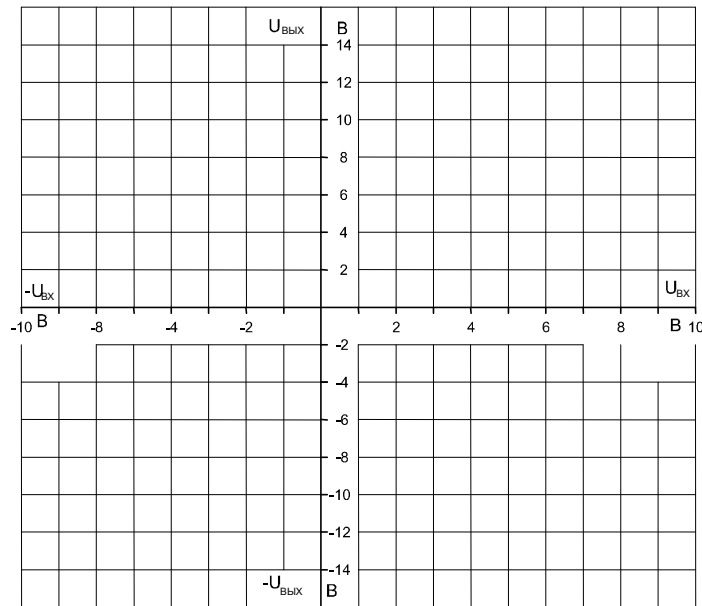


Рис. 8.4.5.

## 8.5. Поведение операционного усилителя в динамике

### 8.5.1. Общие сведения

Операционные усилители представляют собой широкополосные усилители напряжения постоянного тока, которые в определенном частотном диапазоне усиливают также и напряжения переменного тока. Зависимость коэффициента усиления от частоты  $\nu(\omega)$  называется амплитудно-частотной характеристикой усилителя. Она зависит как от внешних сопротивлений и емкостей, подключаемых к операционному усилителю, так и от «паразитных» сопротивлений и емкостей внешних проводников и внутренней схемы самого операционного усилителя.

Операционные усилители используются в схемах фильтров, интегрирующих и дифференцирующих цепей и других устройств.

На рис.8.5.1а приведена простейшая схема интегрирующего усилителя (фильтра низких частот), на рис.8.5.1б – схема дифференцирующего усилителя (фильтра высоких частот), на рис. 8.5.1в – схема усилителя средних частот (простейшего полосового фильтра).

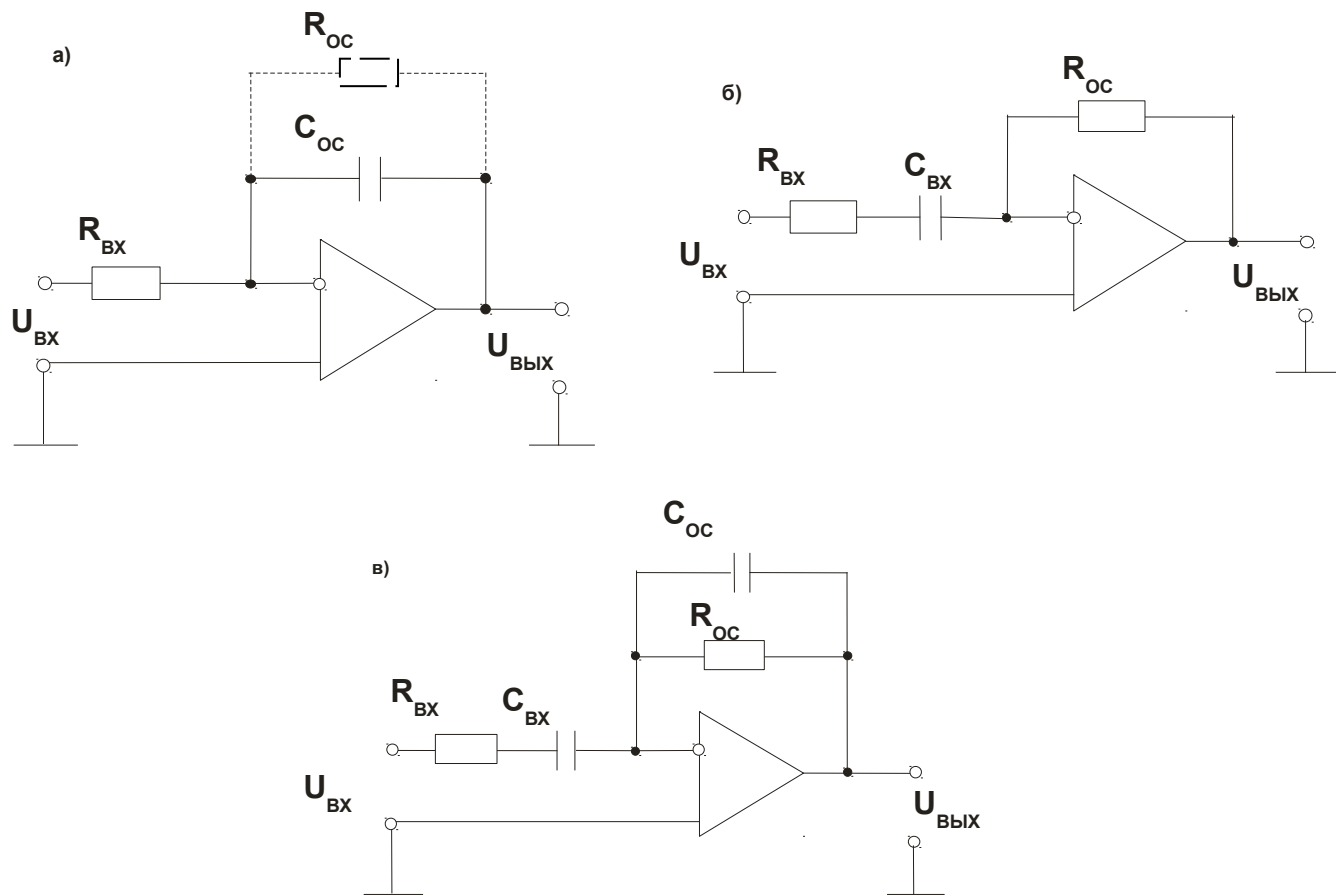


Рис. 8.5.1

## 8.5.2. Экспериментальная часть

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь широкополосного усилителя (рис. 8.5.2) и установите на входе действующее значение синусоидального напряжения 3 В частотой 1кГц. Для измерения напряжений  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$  включите виртуальные приборы, выберите род измеряемых величин «Действ. перем.» и выведите эти величины на виртуальный осциллограф. Перенесите кривые на график (рис. 8.5.3).

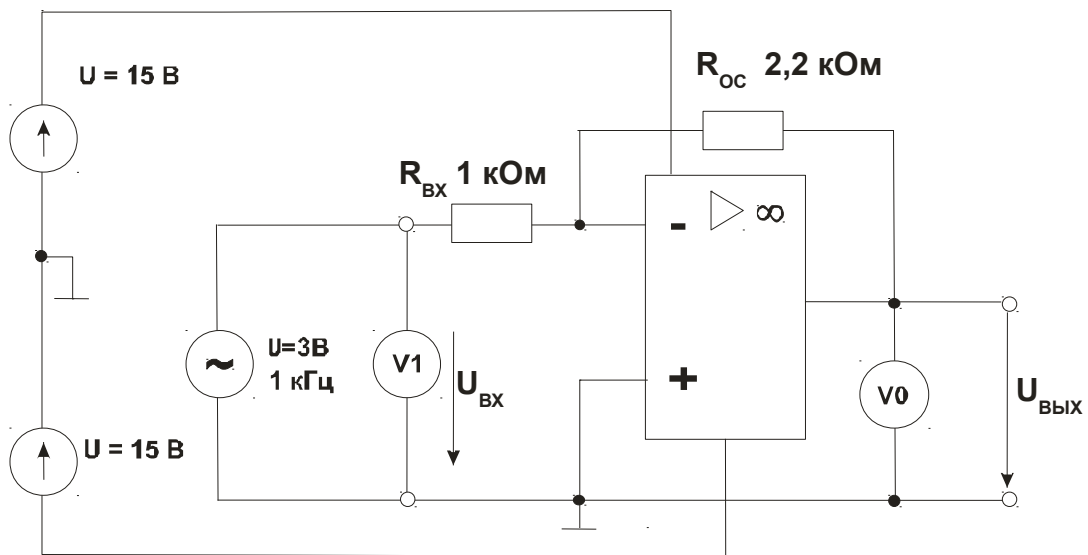
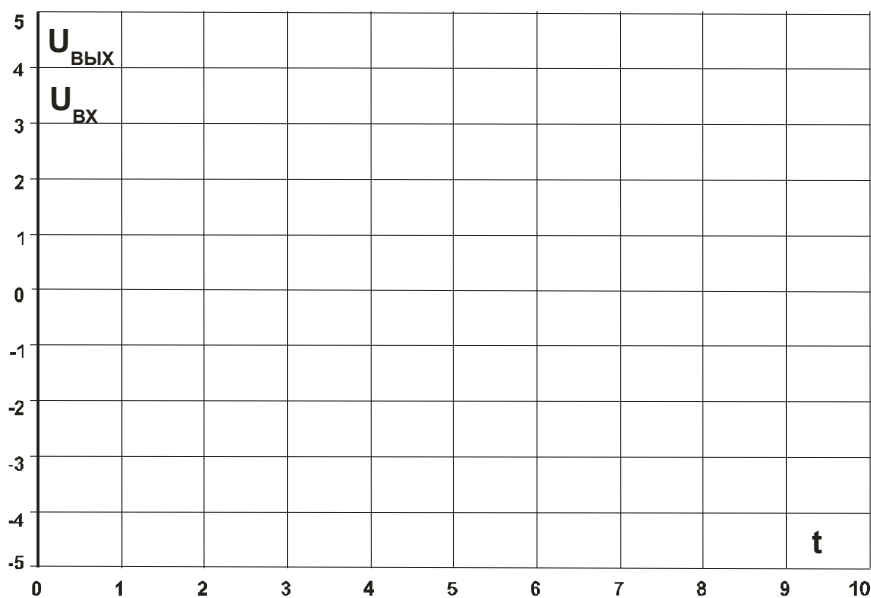


Рис. 8.5.2.

- Изменяя частоту от 0,2 до 4 кГц, как указано в табл. 8.5.1, снимите зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}$  (+), рассчитайте значения коэффициента усиления  $\nu$  для каждой частоты, и на рис. 8.5.7 постройте график  $\nu(+)$  для данного усилителя.



**Масштабы:**  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{\text{ВХ}}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{\text{ВЫХ}}} = \dots$  В/дел

Рис. 8.5.3.

- Для получения интегрирующего усилителя замените резистор  $R_{\text{ОС}}$  на конденсатор  $C_{\text{ОС}} = 1$  мкФ. Параллельно конденсатору подключите резистор с большим сопротивлением 100 кОм для исключения дрейфа выходного напряжения при интегрировании постоянной составляющей входного сигнала.
- Повторите с этим усилителем те же опыты, что и с первым. Результаты отобразите на осциллограмме (рис. 8.5.4), в табл. 8.5.1 и на графике (рис. 8.5.7).

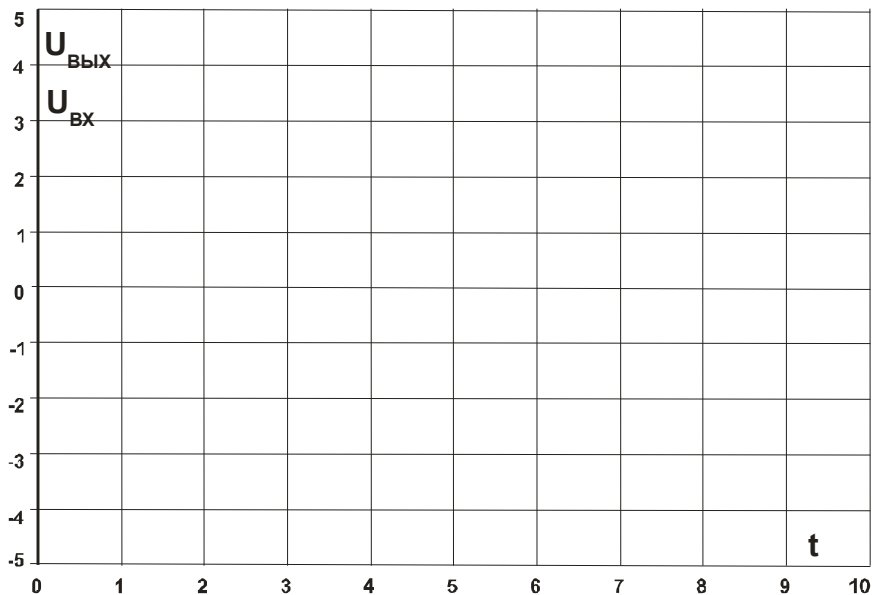


Рис. 8.5.4

**Масштабы:**  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{ВХ}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{ВЫХ}} = \dots$  В/дел

- Прodelайте те же опыты с дифференцирующим усилителем, заменив  $R_{ВХ} = 1$  кОм на конденсатор  $C_{ВХ} = 0,1$  мкФ с последовательно соединенным резистором 10 Ом для устранения самовозбуждения усилителя. В обратную связь включите резистор  $R_{ОС} = 1$  кОм. Результаты также отобразите на рис. 8.5.5, 8.5.7 и в табл. 8.5.1.

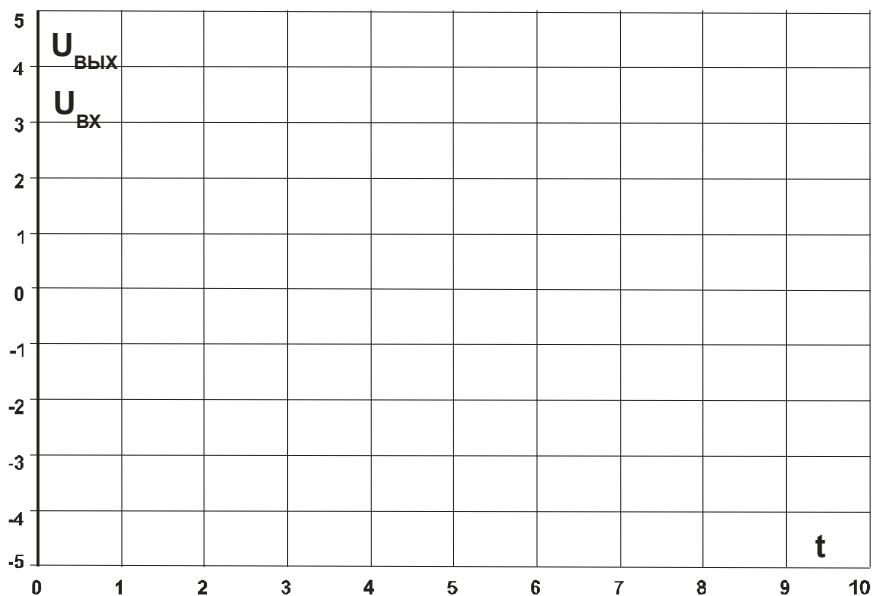
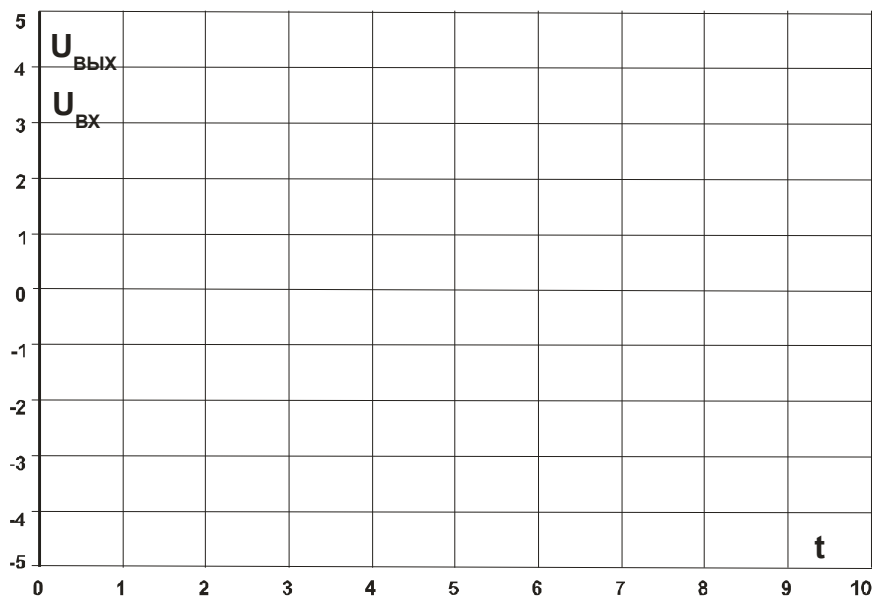


Рис. 8.5.5

**Масштабы:**  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{ВХ}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{ВЫХ}} = \dots$  В/дел

- Наконец, повторите эти опыты с усилителем средних частот, в котором во входную цепь включены последовательно  $R_{ВХ} = 0,22$  кОм и  $C_{ВХ} = 0,47$  мкФ, а в цепь обратной связи включены параллельно  $R_{ОС} = 1$  кОм и  $C_{ОС} = 0,1$  мкФ. Результаты представьте на рис. 8.5.6, 8.5.7 и в табл. 8.5.1.



**Масштабы:**  
 $m_t = \dots$  мкс/дел  
 $m_{U_{ВХ}} = \dots$  В/дел  
 $m_{U_{ВЫХ}} = \dots$  В/дел

Рис. 8.5.6

Таблица 8.5.1

$U_{ВХ} = \dots\dots\dots$ В во всех опытах								
f, кГц	Широкополосный усилитель $R_{ВХ} = 1$ кОм $R_{ОС} = 2,2$ кОм		Интегрирующий усилитель $R_{ВХ} = 1$ кОм $C_{ОС} = 0,1$ мкФ $R_{ОС} = 100$ кОм		Дифференцирующий усилитель $R_{ВХ} = 10$ Ом $C_{ВХ} = 0,1$ мкФ $R_{ОС} = 1$ кОм		Усилитель средних частот $R_{ВХ} = 220$ кОм $C_{ВХ} = 0,47$ мкФ $C_{ОС} = 0,1$ мкФ $R_{ОС} = 1$ кОм	
	$U_{ВЫХ}, В$	$\nu$	$U_{ВЫХ}, В$	$\nu$	$U_{ВЫХ}, В$	$\nu$	$U_{ВЫХ}, В$	$\nu$
0,2								
0,5								
1,0								
1,5								
2,0								
2,5								
3,0								
3,5								
4,0								



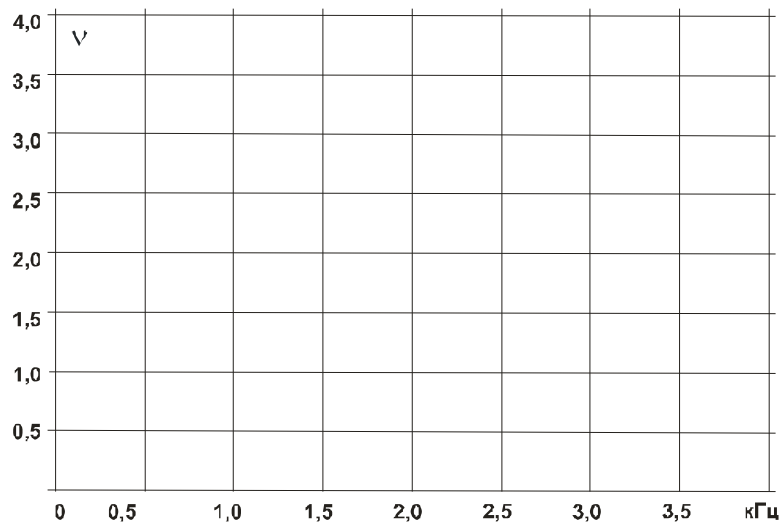


Рис. 8.5.7

### Контрольные вопросы

1. Какова полярность входного напряжения  $U_{ВХ}$  инвертирующего усилителя по сравнению с выходным напряжением  $U_{ВЫХ}$ ?
2. Какие компоненты определяют коэффициент усиления  $\nu$  инвертирующего усилителя?
3. Какова величина коэффициента усиления при  $R_{ОС} = 100$  кОм и  $R_{ВХ} = 10$  кОм?
4. Какое утверждение можно сделать относительно характеристики на рис. 8.1.4?  
Какие компоненты усилителя определяют величину коэффициента усиления?
5. Какова величина выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$  при  $R_{ОС} = 47$  кОм,  $R_{ВХ} = 10$  кОм и  $U_{ВХ} = 2$  В?
6. Какова полярность входного напряжения  $U_{ВХ}$  в сравнении с выходным напряжением  $U_{ВЫХ}$ ?
7. Как изменяется выходное напряжение при увеличении входных сопротивлений  $R_{ВХ1}$  и  $R_{ВХ2}$  от 1 кОм до 4,7 кОм и почему?
8. Какой тип цепи получается, когда использован только один вход усилителя?
9. Каково результирующее выходное напряжение, когда одно входное напряжение положительно, а другое отрицательно?  
Когда получается удовлетворительное значение ослабления синфазного сигнала?
10. Какому типу цепи соответствует дифференциальный усилитель?
11. Какое значение выходного напряжения имеет место при равных сигналах на входах?
12. Какова величина фазового сдвига между входным и выходным напряжениями в каждом из четырех усилителей и как зависит она от частоты?
13. Как и почему изменяется коэффициент усиления каждого из рассмотренных усилителей при изменении частоты?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов В.Г., Кузнецов Э.В., Николаева О.В. и др. Электротехника и электроника: В 3 кн. Учебник для студентов неэлектротехнических специальностей вузов. Кн 1. Электрические и магнитные цепи. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
2. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н. Электротехника / Учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Матерников В.Е. Электротехника. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: [Учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов]: В 2 кн. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

## Самостоятельная работа студентов

### 1 График выполнения и сдачи заданий СРО и СРОП

№ п/п	Тема, задание	Содержание темы, задания	Литература	Форма отчетности и контроля	Сроки сдачи, неделя
1	Использование вольт-амперной характеристики диода для определения его режима работы	Изучить режимы работы диода. Сравнить ВАХ различных типов диодов.	1. стр5-36	Устный опрос	1
2	Классификация и система обозначений диодов.	Изучить классификацию диодов. Уметь работать со справочной литературой.	2.стр.7-25	Устный опрос	2
3	Фотоприборы полупроводниковые.	Изучить работу фотодиодов, фототранзисторов, фототиристоров, оптопары, лазеров.	1.стр.93-115 2.стр.85-105	Реферат, доклад	3
4	Три схемы включения транзистора с ненулевым сопротивлением нагрузки.	Изучить схемы включения транзисторов с ОЭ, с. ОБ, с ОК.	2.стр27-54 1.стр.46-66	Устный опрос	4
5	Графический анализ схем с полевыми транзисторами.	Уметь строить стоковые и стоко-затворные характеристики	1.стр.66-85	Устный опрос	5
6	МДП-транзистор со встроенным и МДП-транзистор с индуцированным каналом.	Ячейка памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флеш-память). Изучить работу МДП-транзисторов, знать область их применения.	1.стр.370-384 2.стр.39-54		6
7	Различные усилители на биполярных транзисторах.	Знать характеристики, параметры, режимы работы усилительных каскадов. Уметь строить схемы	1.стр.120-190 2.стр.121-195	Реферат, доклад	7
8	Различные усилители на основе ОУ.	Знать схемы инвертирующего, неинвертирующего дифференциального усилителей на основе ОУ.	1.стр.220-280	Устный опрос	8

9	Оптические квантовые генераторы	Изучить принцип работы лазеров и области их применения	[1], .402...419; [2], с.193...210	Устный опрос	9
10	Импульсный режим работы электронных устройств.	Электронные ключи. Знать работу электронных ключей на биполярных и полевых транзисторах. Электрические генераторы импульсов. Знать схемы и работу мультивибраторов.	1.стр.318-358 2. стр.200-267	Реферат , доклад	10
11	Схемы логических элементов.	Комбинационные устройства. Знать схемы логических элементов, работу комбинационных устройств.	1.стр.388-420 2.стр.322-334	Устный опрос	11
12	Триггеры на основе логических элементов.	Уметь строить схемы различных триггеров на основе логических элементов.	1.стр.430-486 2.стр.336-342	Реферат , доклад	12
13	Неуправляемые выпрямители.	Знать схемы, параметры, характеристики.	1.стр.351-427	Устный опрос	13
14	Управляемые выпрямители.	Знать схемы, параметры, характеристики.	1.стр.450-511	Реферат , доклад	14
15	Фильтры сглаживающие.	Импульсные стабилизаторы. Знать схемы, параметры, характеристики.	1.стр.520-535		15

## **2 Темы рефератов**

1. Полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Прямое и обратное включение р-n-перехода. Емкости р-n-перехода.
2. Разновидности полупроводниковых диодов. Система обозначений.
3. Биполярные транзисторы. Устройства и физические процессы
4. Характеристики биполярных транзисторов.
5. Схемы включения биполярного транзистора.
6. Полевые транзисторы. Устройства и физические процессы.
7. Инверсное включение полевого транзистора.
8. Частотные (динамические) свойства полевого транзистора.
9. Полевые транзисторы и изолированным затвором.
10. МДП-транзисторы.
11. Ячейка памяти на основе полевого транзистора с изолированным затвором (флеш-память).
12. Тиристоры.
13. Оптоэлектронные приборы. Общая характеристика.
14. Светодиоды
15. Фоторезисторы. Фотодиоды. Фототранзисторы. Фототиристоры.
16. Оптопары.
17. Индикаторы.
18. Лазеры.
19. Интегральные микросхемы.
20. Цифровые интегральные микросхемы.
21. Аналоговые интегральные микросхемы.
22. Интегральные транзисторы и полупроводниковые диоды.
23. Интегральные конденсаторы и резисторы.
24. Классификация микросхем по функциональному признаку.
25. Усилители. Основные параметры и характеристики.
26. Три основные схемы усилителей на биполярных транзисторах.
27. Показатели усилителей на биполярных транзисторах.
28. Усилители на полевых транзисторах.
29. Режимы работы усилительных каскадов.
30. Усилители мощности.
31. Усилители постоянного тока.
32. Обратные связи в усилителях.
33. Операционный усилитель (ОУ).
34. Инвертирующий и неинвертирующий ОУ.
35. Дифференциальный усилитель на основе ОУ.
36. Ограничители и интеграторы на основе ОУ.
37. Аналоговые перемножители.
38. Импульсный режим работы электронных устройств.
39. Импульсные и цифровые устройства.
40. Цифровое представление преобразуемой информации и логические состояния.
41. Основные логические операции.

42. Электрические схемы логических элементов.
43. Электронные ключи на биполярных и полевых транзисторах.
44. Комбинационные устройства. Дешифратор. Мультиплексор. Сумматор.
45. Триггеры. Основные характеристики. Схемы.
46. Счетчики и регистры.
47. Формирователи импульсов.
48. Программируемые логические матрицы.
49. Преобразовательные устройства.
50. Неуправляемые выпрямители.
51. Управляемые выпрямители.
52. Сглаживающие фильтры.
53. Стабилизаторы.
54. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.

## Список использованной литературы

### Основная:

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. Учебное пособие для ВУЗов. М. Высшая школа. 1982 г.
2. Основы промышленной электроники. Под ред. Исакова Ю.М., Платонова А.П. и других. Киев. Издательство «Техника» 1976 г.

### Дополнительная:

3. Лачин В., Савелов Н. Электроника. Ростов-на-Дону. 2002 г.
4. Кучумов А. Электроника и схемотехника. М., 2002 г.
5. Электротехника и электроника. Под ред. В. Герасимова. Книга 3. Электрические измерения и основы электроники. М. 1998 г.
6. Жеребцов И.П. Основы электроники Л. Энергоатомиздат. 1985 г.
7. Быстров Ю. Оптоэлектронные приборы и их устройства. М., 2001 г.

## ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ

Прежде чем приступить к выполнению контрольной работе, нужно внимательно ознакомиться с помещенными ниже указаниями. Несоблюдение этих указаний может стать причиной того, что представленная работа не будет даже принята к рецензированию. Нужно помнить, что выполнение контрольных работ является важным элементом в изучении теоретического материала. Все задачи надо решать самостоятельно, используя проработанный теоретический материал. В случае затруднений, встречающихся при изучении той или иной темы, студент может обратиться на кафедру за устной или письменной консультациями. Задачи для контрольных работ помещены ниже. В каждой задаче дается таблица с числовыми данными. Номер варианта определяется последней цифрой учебного шифра студента. Так, например, если учебный шифр студента 68046, то номер его варианта 6. Работа, оформление которой не удовлетворяет изложенным ниже требованиям, не будет принята рецензентом к рассмотрению.

Требования, предъявляемые к оформлению контрольной работы:

1. Каждая работа выполняется на листах формата А4, на титульном листе которой должны быть написаны: наименование университета, института, кафедры; фамилия и инициалы; номер учебного шифра; номер контрольной работы.
2. На каждой странице должны быть оставлены поля шириной не менее: 3 см – слева, 1,5 см – справа, 2 см – сверху и снизу. Проставлена нумерация страниц.
3. Текст, формулы и числовые выкладки должны быть написаны четко и аккуратно, без помарок (возможен печатный компьютерный вариант).
4. Схемы и графики должны быть выполнены с помощью чертежных инструментов.
5. Электрические схемы должны вычерчиваться с соблюдением установленных условий графических изображений элементов этих схем. Следует строго придерживаться установленных буквенных обозначений электрических величин. Решение должно сопровождаться краткими, четкими, пояснениями. Все единицы измерения должны соответствовать Международной системе единиц СИ. Для каждой задачи следует начертить электрическую схему. Необходимо указывать в конце работы список использованных методических указаний. Указание: студент может руководствоваться теми изображениями элементов схем и буквенными обозначениями, которые применяются в помещенных ниже задачах; они соответствуют данным требованиям.
6. Графики должны быть вычерчены на миллиметровой или клетчатой бумаге, либо на форматах листа А4 в компьютерной обработке. На координатных осях должны быть построены шкалы; отметки на них должны быть равномерными и выражаться числами вида 1:10; 2:10 или 5:10 ( $n$  —любое целое число или нуль).



7. В конце расчетно-графической работы надо поставить дату выполнения работы и подписаться.

8. Если расчетно-графическая работа не зачтена, то все необходимые поправки должны быть сделаны в той же работе после подписи рецензента. Нельзя вносить какие-либо исправления в текст или графики, уже просмотренные рецензентом. При отсутствии места в работе студент может подклеить к ней дополнительные листы.

### Работа № 1

1. Рассчитать выпрямитель, работающий на емкость. Исходные данные: выпрямленное напряжение  $U_{cp}$ ; выпрямленный ток  $I_{cp}$ ; коэффициент пульсаций  $K_p$ ; напряжение питающей сети  $U_1$ ; частота тока питающей сети  $f_c$ . Начертить схему выпрямителя.

№ варианта	$U_{cp}$ , В	$I_{cp}$ , мА	$K_p$ , %	$U_1$ , В	$f_c$ , Гц
0	500	200	12	127	50
1	600	100	13	220	50
2	400	150	14	380	50
3	550	120	15	127	50
4	650	220	13	220	50
5	450	300	15	380	50
6	300	320	12	127	50
7	350	400	14	220	50
8	250	200	15	380	50
9	200	210	13	127	50

2. Рассчитать выпрямитель, работающий на индуктивность. Исходные данные: выпрямленное напряжение  $U_{cp}$ ; выпрямленный ток  $I_{cp}$ ; коэффициент пульсаций  $K_p$ ; напряжение питающей сети  $U_1$ ; частота тока питающей сети  $f_c$ . Начертить схему выпрямителя.

№ варианта	$U_{cp}$ , В	$I_{cp}$ , А	$U_1$ , В	$f_c$ , Гц
0	30	8	127	50
1	36	10	220	50
2	32	7	380	50
3	35	6	127	50
4	25	5	220	50
5	26	9	380	50
6	27	12	127	50
7	32	8	220	50
8	35	11	380	50
9	36	13	127	50

## Работа № 2

1. Определить значения динамических параметров усилительного каскада по схемам включения ОБ, ОЭ и ОК, если заданы типичные величины  $h$ -параметров маломощного транзистора по схеме включения ОБ:  $h_{116} = 20 \text{ Ом}$ ;  $h_{216} = -0,95$ ;  $h_{126} = 2 \cdot 10^{-4}$ ;  $h_{226} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ См}$ . Кроме того,  $R_n = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_{и} = 0,5 \text{ кОм}$ . Вспомогательный параметр  $h_6 = h_{116} \cdot h_{226} - h_{126} \cdot h_{216}$ .

№ варианта	$h_{116}, \text{ Ом}$	$h_{216} \times 10^{-4}$	$h_{226} \times 10^{-4}, \text{ См}$	$R_n, \text{ кОм}$	$R_{и}, \text{ кОм}$
0	22	1,9	1,0	1,0	0,5
1	21	1,8	1,1	1,4	0,6
2	20	2,0	1,2	1,2	0,7
3	18	2,1	0,9	1,3	0,8
4	20	2,2	0,8	1,2	0,9
5	21	2,3	1,1	1,3	1,0
6	18	1,9	1,2	1,5	0,6
7	19	2,0	0,9	1,8	0,7
8	23	2,1	0,8	1,5	0,8
9	22	1,7	1,0	1,8	0,9

Согласно формулам таблице определяем  $h$ -параметры двух других схем включения, а также вспомогательные параметры.

Сим- рол	Параметры четырехполюсника			Физические параметры
	схема ОЭ	схема ОБ	схема ОК	
$h_{11э}$	1100 Ом	$\frac{h_{11б}}{1 + h_{21б}}$	$h_{11к}$	$r_б + \frac{r_э}{1 - \alpha}$
$h_{12э}$	$2,5 \times 10^{-4}$	$\frac{h_{11б}h_{22б}}{1 + h_{21б}} - h_{12б}$	$1 - h_{12к}$	$\frac{r_э}{(1 - \alpha)r_к}$
$h_{21э}$	50	$-\frac{h_{21б}}{1 + h_{21б}}$	$-(1 + h_{21к})$	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
$h_{22э}$	$25 \times 10^{-6}$ См	$\frac{h_{22б}}{1 + h_{21б}}$	$h_{22к}$	$\frac{1}{(1 - \alpha)r_к}$
$h_{11б}$	$\frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}}$	21,6 Ом	$-\frac{h_{11к}}{h_{21к}}$	$r_э + (1 - \alpha)r_б$
$h_{12б}$	$\frac{h_{11э}h_{22э}}{1 + h_{21э}} - h_{12э}$	$2,9 \times 10^{-4}$	$h_{12к} - \frac{h_{11к}h_{22к}}{h_{21к}} - 1$	$\frac{r_б}{r_к}$
$h_{21б}$	$-\frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}$	-0,98	$-\frac{1 + h_{21к}}{h_{21к}}$	$-\alpha$
$h_{22б}$	$\frac{h_{22э}}{1 + h_{21э}}$	$0,49 \times 10^{-6}$ См	$-\frac{h_{22к}}{h_{21к}}$	$\frac{1}{r_к}$
$h_{11к}$	$h_{11э}$	$\frac{h_{11б}}{1 + h_{21б}}$	1100 Ом	$r_б + \frac{r_э}{1 - \alpha}$
$h_{12к}$	$1 - h_{12э}$	$\approx 1$	$\approx 1$	$1 - \frac{r_э}{(1 - \alpha)r_к}$
$h_{21к}$	$-(1 + h_{21э})$	$-\frac{1}{1 + h_{21б}}$	-51	$-\frac{1}{1 - \alpha}$
$h_{22к}$	$h_{22э}$	$\frac{h_{22б}}{1 + h_{21б}}$	$25 \times 10^{-6}$ См	$\frac{1}{(1 - \alpha)r_к}$
$\alpha$	$\frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}$	$-h_{21б}$	$\frac{1 + h_{21к}}{h_{21к}}$	0,98

Сим-вол	Параметры четырехполюсника			Физические параметры
	схема ОЭ	схема ОБ	схема ОК	
$r_k$	$\frac{1 + h_{21э}}{h_{22э}}$	$\frac{1}{h_{22б}}$	$-\frac{h_{21к}}{h_{22к}}$	2,04 МОм
$r_э$	$\frac{h_{12э}}{h_{22э}}$	$h_{11б} - \frac{h_{12б}}{h_{22б}}(1 + h_{21б})$	$\frac{1 - h_{12к}}{h_{22к}}$	10 Ом
$r_б$	$h_{11э} - \frac{h_{12э}}{h_{22э}} \times (1 + h_{21э})$	$\frac{h_{12б}}{h_{22б}}$	$h_{11к} + \frac{h_{21к}}{h_{22к}} \times (1 + h_{12к})$	590 Ом

2. Рассчитать транзисторный каскад усиления с RC-связью на транзисторе Т1, нагруженный аналогичным ему каскадом на транзисторе Т2.

Данные каскада на транзисторе Т2: амплитуда входного тока сигнала  $I_{бт2} = 0,3$  мА; входное сопротивление  $R_{вх2} = 200$  Ом; результирующее сопротивление плеч делителя  $R_{12} = R_1/R_2 = 2200$  Ом. Напряжение источника питания  $E_k = 12,6$  В;  $f_n = 100$  Гц;  $f_b = 5000$  Гц;  $M_{н2} = M_{н.э} = M_b = 1,12$  (т. е. менее 1 дБ); амплитуда входного тока рассчитываемого каскада  $I_{бт1}$  не должна превышать 0,02 мА.

№ варианта	$I_{бт2}$ , мА	$R_{вх2}$ , Ом	$R_{12}$ , Ом	$E_k$ , В	$f_n$ , Гц	$f_b$ , Гц	$M_{н2}$
0	0,3	220	2000	15	100	5000	1,15
1	0,35	200	1800	14	50	5000	1,13
2	0,4	180	2200	12,6	60	5000	1,12
3	0,45	230	1900	13,5	70	5000	1,14
4	0,5	190	2300	12	100	5000	1,12
5	0,55	215	2400	13	50	5000	1,13
6	0,2	185	1850	12,5	60	5000	1,15
7	0,25	205	1930	12,8	70	5000	1,12
8	0,32	178	2150	14,5	120	5000	1,13
9	0,33	225	1950	13,8	100	5000	1,11

## ВОПРОСЫ РУБЕЖНЫХ КОНТРОЛЕЙ

### *Первый рубежный контроль*

1. Полупроводниковые приборы.
2. Разновидности диодов.
3. Биполярные транзисторы.
4. Полевые транзисторы.
5. Тиристоры.
6. Оптоэлектронные приборы.
7. Интегральные микросхемы.
8. Усилители.
9. Операционные усилители.

### *Второй рубежный контроль*

1. Импульсные и цифровые устройства.
2. Электронные ключи.
3. Логические элементы.
4. Триггеры.
5. Выпрямители.
6. Фильтры.
7. Стабилизаторы.
8. Аналого-цифровые преобразователи.
9. Цифро-аналоговые преобразователи.

**Перечень специализированных аудиторий, кабинетов, лабораторий  
кафедры электроэнергетики для проведения занятий по дисциплине  
«Электроника и микропроцессорная техника»**

№ п/п	Корпус	№ аудиторий	Приборы и оборудование, используемые при изучении дисциплины
1	3	210	

Составитель: Сапа Владимир Юрьевич

Должность: ст. преподаватель.

\_\_ . \_\_ . 20 \_\_ г.

<b>Заглавие книги</b>	<i>«Электроника и микропроцессорная техника»</i>
<b>Авторы книги</b>	<i>Сапа В.Ю.</i>
<b>Краткое описание (аннотация)</b>	<i>Дисциплина «Электроника и микропроцессорная техника» является обязательной профилирующей дисциплиной. Данный курс представляет собой научные теоретические и практические основы дисциплины «Электроника и микропроцессорная техника». При изучении дисциплины студенты изучат устройство электронных приборов, устройства информационной электроники и преобразовательной техники. Предназначен для студентов специальности 5В080600 – Аграрная техника и технологии.</i>
<b>Год издания</b>	<i>2013</i>
<b>Место издания и издательство</b>	<i>КГУ имени А.Байтурсынова</i>
<b>Язык текста</b>	<i>Русский</i>
<b>ББК</b>	<i>31.2</i>
<b>УДК</b>	<i>631.3</i>
<b>Раздел</b>	<i>УМКД</i>
<b>Специальность</b>	<i>5В080600 – Аграрная техника и технологии.</i>
<b>Ключевые слова</b>	<i>Величина напряжения, ток, мощность, методы расчета, синусоидальный ток, транзистор, диод, сопротивление.</i>