

БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. ИММАНУИЛА КАНТА

А. А. Горбачев, И. А. Ветров

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Часть 1

Электроника

Учебно-методическое пособие

Издательство
Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
2022

УДК 621.38
ББК 32.85
Г672

Рецензенты

В. В. Капустин, канд. техн. наук, доц.,
Калининградский государственный технический университет;
Н. Я. Синявский, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Горбачев, А. А.
Г672 Электроника и схемотехника. Ч. 1: Электроника : учебно-методическое пособие / А. А. Горбачев, И. А. Ветров. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2022. — 104 с.
ISBN 978-5-9971-0723-9

Предлагаемое учебно-методическое пособие призвано облегчить студентам изучение дисциплины «Электроника и схемотехника». В нем приведены методики выполнения лабораторных работ, охватывающих принципиальные физические аспекты функционирования базовых элементов современной интегральной электроники. Каждый раздел содержит подробные примеры выполнения лабораторных работ и перечень основных тематических вопросов, необходимых для усвоения материала.

Предназначено для студентов образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», обучающихся по специальности «Компьютерная безопасность» и по направлению бакалавриата «Техника и технология защиты информации».

УДК 621.38
ББК 32.85

ISBN 978-5-9971-0723-9

© Горбачев А. А., Ветров И. А., 2022
© БФУ им. И. Канта, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Вентильные свойства <i>p-n</i> -переходов.....	5
2. Стабилитрон. Барьерная емкость <i>p-n</i> -переходов.....	24
3. Диодные устройства обработки сигналов.....	35
4. Выпрямители напряжения.....	49
5. Биполярные транзисторы.....	60
6. Полевые транзисторы.....	77
7. Транзисторные ключи.....	91
Список рекомендуемой литературы	104

ВВЕДЕНИЕ

Современные информационные технологии тесно связаны не только с применением программных средств вычислительной техники, но и с широким спектром различных устройств приема, хранения, передачи, а также защиты информации. Все эти устройства имеют в своем составе узлы и элементы как аналоговой, так и цифровой электроники. Постоянно растущие требования к быстродействию и энергосбережению современной электронной техники привели к появлению уникальных радиоэлектронных элементов — чипов (микросхем с высокой степенью интеграции). Для проектирования и изготовления подобных микросхем требуются высококвалифицированные специалисты с соответствующим профильным образованием. Вместе с тем широкое проникновение средств вычислительной техники и других технических средств обработки информации практически во все сферы жизни общества привело к необходимости введения в образовательные процессы подготовки специалистов различных направлений дисциплин, позволяющих получить базовые представления о принципах работы современных технических средств обработки информации.

Данное учебно-методическое пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Электроника и схемотехника» и обучающихся по специальности «Компьютерная безопасность», а также на бакалавриате по направлению «Организация и технология защиты информации». Оно представляет собой логическое дополнение к лекционному материалу и включает в себя подробное описание лабораторных работ по ключевым вопросам электроники. В каждой лабораторной работе приводится пример выполнения с необходимыми комментариями и объяснениями. В качестве лабораторной базы выбрана среда схемотехнического моделирования Multisim. Подобный подход имеет определенную притягательность для молодежи, а также некоторые преимущества по сравнению с реальной радиотехнической лабораторией. В частности, у студентов, для которых радиотехнические дисциплины не являются профильными, существенно снижается время на проведение виртуального эксперимента. При этом принципиальные физические аспекты рассматриваются без ущерба для понимания. Кроме того, работа в реальной лаборатории зачастую сопровождается непреднамеренными поломками и выходом из строя учебного оборудования, что приводит к определенным временным издержкам или к невозможности выполнения какой-либо лабораторной работы.

Основное внимание в учебно-методическом пособии уделено не конкретным радиотехническим или электронным устройствам, а основным физическим принципам, лежащим в основе функционирования базовых элементов (диодов, транзисторов и т. п.), из которых состоят современные чипы, а следовательно, и сами устройства.

К каждой лабораторной работе прилагается перечень основных учебных вопросов и тем, которые необходимо освоить перед выполнением данной работы. Кроме того, для закрепления учебного материала в каждой лабораторной работе имеется перечень вопросов для самоконтроля.

1. Вентильные свойства *p-n*-переходов

1.1. Темы для подготовки к лабораторной работе

Энергетические уровни и зоны. Проводники, полупроводники и диэлектрики. Собственная проводимость полупроводников. Распределение электронов по энергетическим уровням. Примесная проводимость полупроводников. Процессы переноса зарядов в полупроводниках. Электрические переходы. Энергетические диаграммы и свойства *p-n*-переходов. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода. Пробой *p-n*-перехода.

1.2. Контрольные вопросы

1. Дать определения разрешенным и запрещенным энергетическим зонам.
2. Что называется уровнем Ферми и как он определяется?
3. Влияние концентрации примесей на положение уровня Ферми.
4. Объяснить механизм собственной проводимости полупроводников.
5. Что понимается под диффузией и дрейфом носителей заряда в полупроводниках?
6. Как влияет температура на концентрации носителей заряда в полупроводнике?
7. Объяснить механизм примесной проводимости полупроводника.
8. Что понимается под инжекцией и экстракцией носителей заряда?
9. Как образуется электронно-дырочный переход?
10. От чего зависит ширина *p-n*-перехода и высота потенциального барьера?
11. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода и ее уравнение.
12. Виды и механизмы пробоев *p-n*-перехода.
13. Как влияет температура на сопротивление *p-n*-перехода?

1.3. Лабораторная работа № 1

Исследование вентильных свойств *p-n*-переходов

Цель работы: экспериментально исследовать параметры и характеристики *p-n*-перехода в германиевых и кремниевых диодах.

Справочные величины.

Таблица 1.1

Материал	I_0 , А (при $t = -20^\circ\text{C}$)	I_0 , А (при $t = 20^\circ\text{C}$)	I_0 , А (при $t = 80^\circ\text{C}$)
Ge	$1,384 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	$3,287 \cdot 10^{-4}$
Si	$3,577 \cdot 10^{-11}$	10^{-9}	$1,714 \cdot 10^{-5}$
AsGa	$1,437 \cdot 10^{-13}$	10^{-11}	$2,463 \cdot 10^{-6}$

Таблица 1.2

Тип диода (из таблиц 1.3 и 1.4)	Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	Максимальный прямой ток $I_{пр\max}$, А	Напряжение открытого перехода $U_{откр}$, В
Германиевый	0,6	1	0,5
Кремниевый	1,11	1	0,7

Практическая часть.

Задание 1. Для германиевого и кремниевых диодов снять прямые и обратные ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) при различных рабочих температурах.

1.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 1.1. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметра и амперметра.

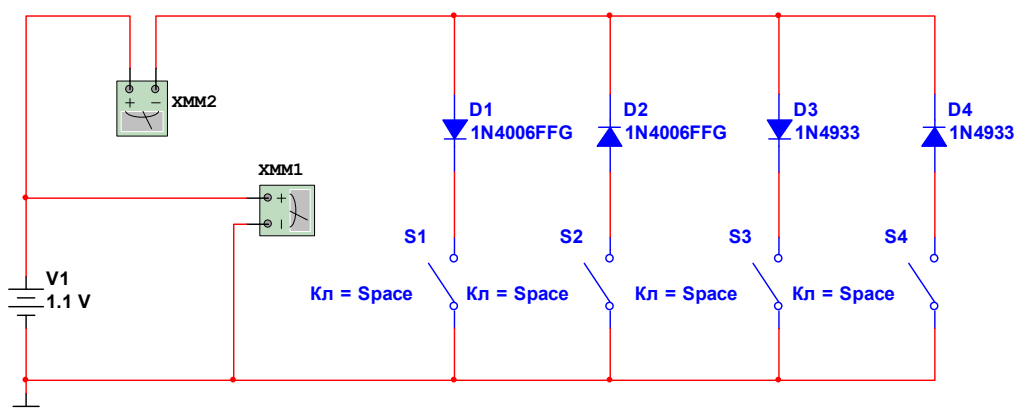


Рис. 1.1. Схема для снятия ВАХ диодов

1.2. Выбрать германиевый и кремниевый диоды в соответствии с номером своего варианта из таблиц 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3

№	Марка германиевого диода (Ge)	Максимальное прямое напряжение $U_{пр\max}$, В	Максимальное обратное напряжение пробоя $U_{обр\max}$, В	Максимальный обратный ток пробоя $I_{обр\max}$, мкА	Интервал рабочих температур Δt , °С
1	1N4001G	1,1	50	10	-65...+175
2	1N4001RLG	1,1	50	10	-65...+175
3	1N4002G	1,1	100	10	-65...+175
4	1N4002RLG	1,1	100	10	-65...+175
5	1N4003G	1,1	200	10	-65...+175
6	1N4003RLG	1,1	200	10	-65...+175
7	1N4004G	1,1	400	10	-65...+175

Окончание табл. 1.3

№	Марка германиевого диода (Ge)	Максимальное прямое напряжение $U_{пр\max}$, В	Максимальное обратное напряжение пробоя $U_{обр\max}$, В	Максимальный обратный ток пробоя $I_{обр\max}$, мкА	Интервал рабочих температур Δt , °С
8	1N4004RLG	1,1	400	10	-65...+175
9	1N4005G	1,1	600	10	-65...+175
10	1N4005RLG	1,1	600	10	-65...+175
ПР	1N4006FFG	1,1	800	10	-65...+175

Таблица 1.4

№	Марка кремниевого диода (Si)	Максимальное прямое напряжение $U_{пр\max}$, В	Максимальное обратное напряжение пробоя $U_{обр\max}$, В	Максимальный обратный ток пробоя $I_{обр\max}$, мкА	Интервал рабочих температур Δt , °С
1	1N4245GP	1,2	120,5	1	-65...+160
2	1N4246GP	1,2	120,5	1	-65...+160
3	1N4247GP	1,2	120,5	1	-65...+160
4	1N4248GP	1,2	120,5	1	-65...+160
5	1N4249GP	1,2	120,5	1	-65...+160
6	1N4383GP	1	120,5	5	-65...+175
7	1N4384GP	1	120,5	5	-65...+175
8	1N4385GP	1	120,5	5	-65...+175
9	1N4585GP	1	120,5	5	-65...+175
10	1N4586GP	1	120,5	5	-65...+175
ПР	1N4933	1,2	100	5	-65...+150

1.3. Установить параметры вольтметра ХММ1: MODE — DC, $R_V=100$ МОм; амперметра ХММ2: MODE — DC, $R_I=100$ мкОм; значение ЭДС — в соответствии с типом диода и своим вариантом.

На рисунке 1.1 символами D1 и D2 обозначен один и тот же германиевый диод, который при помощи переключателей S1 и S2 может быть подключен в прямом или обратном направлении. Аналогично символами D3 и D4 обозначен один и тот же кремниевый диод, который также при помощи переключателей S3 и S4 может быть включен в прямом или обратном направлении. Указанные на рисунке 1.1 диоды соответствуют диодам из таблиц 1.3 и 1.4, строки «ПР» — «Пример».

1.4. Прямые и обратные ветви ВАХ для германиевого и кремниевого диодов требуется снять при трех различных рабочих температурах:

$$t_1 = -20\text{ °C} \quad (T_1 = 253\text{ К});$$

$$t_2 = 20\text{ °C} \quad (T_2 = 293\text{ К});$$

$$t_3 = 80\text{ °C} \quad (T_3 = 353\text{ К}).$$

Для задания рабочих температур необходимо произвести редактирование моделей исследуемых диодов. Перед началом измерений нужно дважды щелкнуть по изображению диода на рабочем поле, после чего откроется меню редактирования параметров модели (рис. 1.2).

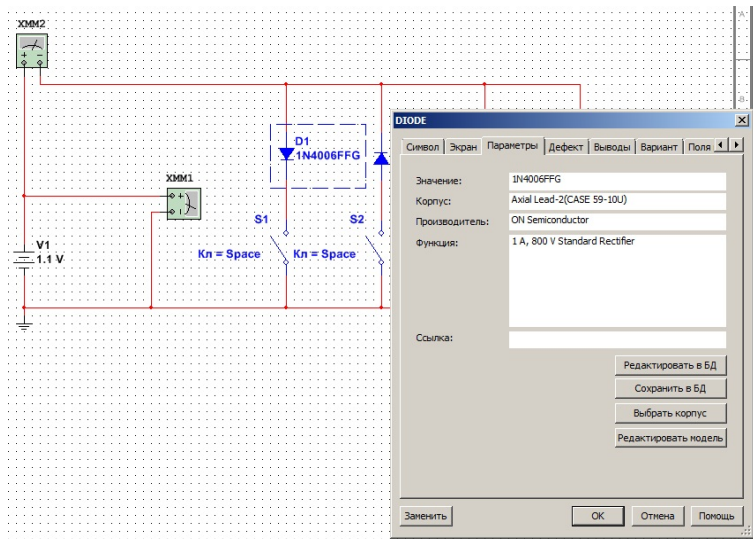


Рис. 1.2. Окно параметров модели

Затем следует нажать клавишу «Редактировать модель». В открывшемся окне (рис. 1.3) станет возможным внести изменения в значения параметров модели диода. После задания требуемой рабочей температуры нужно нажать клавишу «Заменить компонент». Аналогичным образом следует устанавливать температуры для всех последующих измерений.

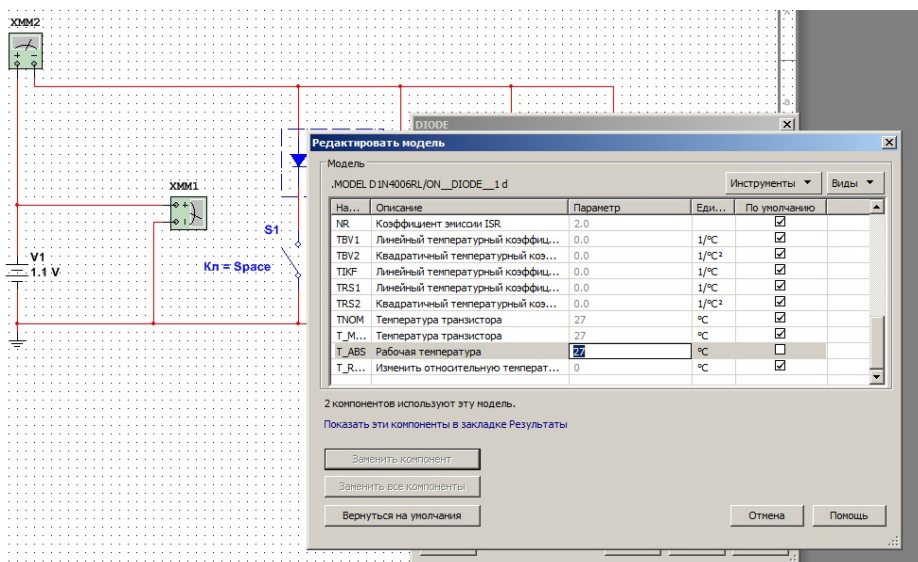


Рис. 1.3. Редактирование параметров модели

Важно! После осуществления всех измерений следует вернуться в редактор модели и установить исходную рабочую температуру (по умолчанию).

1.5. Задание прямого или обратного режима работы диодов осуществляется при помощи переключателей S1, S2, S3 и S4. В таблице 1.5 приведены комбинации переключателей для прямого и обратного переходов германиевого и кремниевого диодов (символ «х» соответствует включенному переключателю, а символ «0» — выключенному).

Таблица 1.5

Переключатель	Ge диод		Si диод	
	D1 Прямой переход	D2 Обратный переход	D3 Прямой переход	D4 Обратный переход
S1	х	0	0	0
S2	0	х	0	0
S3	0	0	х	0
S4	0	0	0	х

1.6. Снять прямые ветви ВАХ германиевого диода, установив переключатели в положения согласно таблице 1.5.

1.7. Установить рабочую температуру $t_1 = -20^\circ\text{C}$.

1.8. Установить значение ЭДС источника (на рисунке 1.1 обозначена V1) равным $E = U_{np} = 1,2 \cdot U_{откр}$. Значения напряжений $U_{откр}$ приведены в таблице 1.2. Остальные значения прямого напряжения задаются в долях от $U_{np\max}$. Значения $U_{np\max}$ для исследуемых диодов приведены в таблице вариантов 1.3. Включить схему и записать показание амперметра в строку таблицы 1.6 (с. 11), соответствующую прямому току *p-n*-перехода (I_{np}) для установленной рабочей температуры. Выключить схему и изменить значение ЭДС источника в соответствии с таблицей 1.6. Включить схему и снова снять показания амперметра. Повторяя эти действия для различных ЭДС источника, заполнить строку таблицы 1.6, соответствующую прямому току *p-n*-перехода (I_{np}) для установленной рабочей температуры.

1.9. Не меняя положения переключателей, установить рабочую температуру $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Повторить для этой температуры действия, указанные в п. 1.8.

1.10. Не меняя положения переключателей, установить рабочую температуру равную $t_3 = 80^\circ\text{C}$. Повторить для этой температуры действия, указанные в п. 1.8.

1.11. Снять прямые ветви ВАХ кремниевого диода, установив переключатели в положения согласно таблице 1.5.

1.12. Повторить для кремниевого диода действия п. 1.7—1.10, заполнив при этом аналогичную таблицу 1.6.

1.13. Снять обратные ветви ВАХ германиевого диода, установив переключатели в положения согласно таблице 1.5. При этом следует иметь в виду, что задаваемые напряжения и регистрируемые токи являются отрицательными.

1.14. Установить рабочую температуру $t_1 = -20^\circ\text{C}$.

1.15. Установить значение ЭДС источника (на рисунке 1.1 обозначена $V1$) равным $E = 0,9 \cdot U_{обр\max}$. Значения $U_{обр\max}$ для исследуемых диодов приведены в таблице вариантов 1.3. Включить схему и записать показание амперметра в строку таблицы 1.7, соответствующую обратному току p - n -перехода ($I_{обр}$) для установленной рабочей температуры. Выключить схему и изменить значение ЭДС источника в соответствии с таблицей 1.7. Включить схему и снять показания амперметра. Повторяя эти действия для различных ЭДС источника, заполнить строку таблицы 1.7, соответствующую обратному току p - n -перехода ($I_{обр}$) для установленной рабочей температуры.

Внимание! Последнее измерение производится для обратного напряжения, равного $U_{обр} = -1,2 \cdot U_{откр}$. Значения напряжений $U_{откр}$ приведены в таблице 1.2.

1.16. Не меняя положения переключателей, установить рабочую температуру, равную $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Повторить для этой температуры действия, указанные в п. 1.15.

1.17. Не меняя положения переключателей, установить рабочую температуру, равную $t_3 = 80^\circ\text{C}$. Повторить для этой температуры действия, указанные в п. 1.15.

1.18. Снять обратные ветви ВАХ кремниевого диода, установив переключатели в положения согласно таблице 1.5. Повторить для кремниевого диода действия 1.14—1.17, заполнив при этом аналогичную таблицу 1.7. При этом также следует иметь в виду, что задаваемые напряжения и регистрируемые токи являются отрицательными.

1.19. По полученным экспериментальным данным для каждого из диодов построить ВАХ для трех различных рабочих температур. При этом прямые ветви ВАХ должны располагаться в первой четверти, а обратные — в третьей четверти системы координат «напряжение — ток».

Задание 2. Для германиевого и кремниевого диодов рассчитать для различных рабочих температур коэффициенты выпрямления, статические и дифференциальные сопротивления p - n -перехода.

2.1. Для каждой из рабочих температур для прямой и обратной ветвей ВАХ вычислить разности:

$$\Delta U_{np,k} = U_{np,k} - U_{np,k-1}, \quad \Delta I_{np,k} = I_{np,k} - I_{np,k-1};$$

$$\Delta U_{обр,k} = U_{обр,k} - U_{обр,k-1}, \quad \Delta I_{обр,k} = I_{обр,k} - I_{обр,k-1}.$$

Результаты вычислений занести в соответствующие строки таблицы 1.6 для прямых и таблицы 1.7 для обратных ветвей ВАХ.

2.2. Используя экспериментальные результаты п. 2.1, для каждого из диодов рассчитать дифференциальные сопротивления p - n -перехода при прямом и обратном включении для трех рабочих температур:

— для прямой ветви ВАХ $R_{np\text{ диф},k} = \frac{\Delta U_{np,k}}{\Delta I_{np,k}}$;

— для обратной ветви ВАХ $R_{обр\text{ диф},k} = \frac{\Delta U_{обр,k}}{\Delta I_{обр,k}}$.

Результаты вычислений занести в соответствующие строки таблицы 1.6 для прямых и таблицы 1.7 для обратных ветвей ВАХ.

Таблица 1.6

Напряжение прямой ветви ВАХ	$U_{np}, В$	$0,25 \cdot U_{np,max}$	$0,28 \cdot U_{np,max}$	$0,31 \cdot U_{np,max}$	$0,34 \cdot U_{np,max}$	$0,37 \cdot U_{np,max}$	$0,40 \cdot U_{np,max}$	$0,43 \cdot U_{np,max}$	$0,46 \cdot U_{np,max}$	$0,49 \cdot U_{np,max}$	$1,2 \cdot U_{откр}$
	$\Delta U_{np}, В$	X									X
$t_1 = -20^\circ C$	I_{np}, mA										
	$\Delta I_{np}, mA$	X									X
	$R_{cm}, Ом$										X
	$R_{откр}, Ом$	X									X
$t_2 = 20^\circ C$	I_{np}, mA										
	$\Delta I_{np}, mA$	X									X
	$R_{cm}, Ом$										X
	$R_{откр}, Ом$	X									X
$t_3 = 80^\circ C$	I_{np}, mA										
	$\Delta I_{np}, mA$	X									X
	$R_{cm}, Ом$										X
	$R_{откр}, Ом$	X									X

Таблица 1.7

Напряжение обратной ветви ВАХ	$U_{обр}, В$	$1,2 \cdot U_{откр}$	$0,1 \cdot U_{обр\ max}$	$0,2 \cdot U_{обр\ max}$	$0,3 \cdot U_{обр\ max}$	$0,4 \cdot U_{обр\ max}$	$0,5 \cdot U_{обр\ max}$	$0,6 \cdot U_{обр\ max}$	$0,7 \cdot U_{обр\ max}$	$0,8 \cdot U_{обр\ max}$	$0,9 \cdot U_{обр\ max}$
		$\Delta U_{обр}, В$	X	X							
$t_1 = -20^\circ C$	$I_{обр}, мкА$										
	$\Delta I_{обр}, мкА$	X	X								
	$R_{см}, МОм$	X									
	$R_{диф}, МОм$	X		X							
$t_2 = 20^\circ C$	$I_{обр}, мкА$										
	$\Delta I_{обр}, мкА$	X	X	X							
	$R_{см}, МОм$	X									
	$R_{диф}, МОм$	X		X							
$t_3 = 80^\circ C$	$I_{обр}, мкА$										
	$\Delta I_{обр}, мкА$	X	X	X							
	$R_{см}, МОм$	X									
	$R_{диф}, МОм$	X		X							

2.3. Используя экспериментальные результаты, для каждого из диодов рассчитать статические сопротивления для трех рабочих температур:

— для прямой ветви ВАХ $R_{np\text{ ст},k} = \frac{U_{np,k}}{I_{np,k}}$;

— для обратной ветви ВАХ $R_{обр\text{ ст},k} = \frac{U_{обр,k}}{I_{обр,k}}$.

Результаты вычислений занести в соответствующие строки таблицы 1.6 для прямых и таблицы 1.7 для обратных ветвей ВАХ.

2.4. На основе расчетов, выполненных в п. 2.2, для каждого диода построить семейства (для трех температур) графиков зависимостей дифференциальных сопротивлений от напряжений:

$$R_{np\text{ диф}} = f(U_{np}) \Big|_{t=-20^{\circ}\text{C}}; R_{np\text{ диф}} = f(U_{np}) \Big|_{t=20^{\circ}\text{C}}; R_{np\text{ диф}} = f(U_{np}) \Big|_{t=80^{\circ}\text{C}};$$

$$R_{обр\text{ диф}} = f(U_{обр}) \Big|_{t=-20^{\circ}\text{C}}; R_{обр\text{ диф}} = f(U_{обр}) \Big|_{t=20^{\circ}\text{C}}; R_{обр\text{ диф}} = f(U_{обр}) \Big|_{t=80^{\circ}\text{C}}.$$

2.5 На основе расчетов, выполненных в п. 2.3, для каждого диода построить семейства (для трех температур) графиков зависимостей статических сопротивлений от напряжений:

$$R_{np\text{ ст}} = f(U_{np}) \Big|_{t=-20^{\circ}\text{C}}; R_{np\text{ ст}} = f(U_{np}) \Big|_{t=20^{\circ}\text{C}}; R_{np\text{ ст}} = f(U_{np}) \Big|_{t=80^{\circ}\text{C}};$$

$$R_{обр\text{ ст}} = f(U_{обр}) \Big|_{t=-20^{\circ}\text{C}}; R_{обр\text{ ст}} = f(U_{обр}) \Big|_{t=20^{\circ}\text{C}}; R_{обр\text{ ст}} = f(U_{обр}) \Big|_{t=80^{\circ}\text{C}}.$$

2.6. Пользуясь экспериментальными значениями, для каждого из диодов для трех рабочих температур для напряжений $U_B = \pm 1,2 \cdot U_{откр}$ вычислить коэффициент выпрямления:

$$K_B = \left| \frac{I_{np}}{I_{обр}} \right|.$$

Замечание.

Значение прямого тока определяется из результата измерений, соответствующего прямому напряжению $U_B = 1,2 \cdot U_{откр}$, а значение обратного тока определяется также по результату измерений, соответствующему обратному напряжению $U_B = -1,2 \cdot U_{откр}$.

В таблицах 1.6 и 1.7 столбцы, соответствующие этим значениям, выделены серым цветом.

При этом в формулу для коэффициента выпрямления следует подставлять абсолютные значения прямого и обратного токов.

Вычисленные значения коэффициента выпрямления занести в таблицу 1.8.

Таблица 1.8

Тип полупроводника	K_B		
	$t_1 = -20^\circ\text{C}$	$t_2 = 20^\circ\text{C}$	$t_3 = 80^\circ\text{C}$
Ge			
Si			

1.4. Пример выполнения лабораторной работы

Задание 1. Для германиевого и кремниевого диодов снять прямые и обратные ветви ВАХ при различных рабочих температурах.

1.1. В соответствии с рисунком 1.1 собираем схему для исследования ВАХ диодов.

1.2. В качестве исследуемых диодов примем диоды из таблиц 1.3 и 1.4 из строк «ПР» — «Пример».

1.6. Снимаем прямые ветви ВАХ германиевого диода для трех различных температур. Экспериментальные данные заносим в таблицу 1.6 (пример Ge).

1.11. Снимаем прямые ветви ВАХ кремниевого диода для трех различных температур. Экспериментальные данные заносим в аналогичную таблицу 1.6 (пример Si).

1.13. Снимаем обратные ветви ВАХ германиевого диода для трех различных температур. Экспериментальные данные заносим в таблицу 1.7 (пример Ge).

1.18. Снимаем обратные ветви ВАХ кремниевого диода для трех различных температур. Экспериментальные данные заносим в аналогичную таблицу 1.7 (пример Si).

1.19. По полученным экспериментальным данным строим для каждого из диодов ВАХ.

Задание 2. Для германиевого и кремниевого диодов рассчитать для различных рабочих температур коэффициенты выпрямления, статические и дифференциальные сопротивления $p-n$ -перехода.

2.1. Для каждой из рабочих температур для обоих диодов в соответствии с указаниями вычисляем разности напряжений и токов и результаты заносим в соответствующие строки таблиц 1.6 (пример) и 1.7 (пример) для прямых и обратных ветвей ВАХ.

2.2—2.3. На основе экспериментальных данных и результатов вычислений, выполненных в п. 2.1, определяем статические и дифференциальные сопротивления. Результаты также заносим в соответствующие строки таблиц 1.6 (пример) и 1.7 (пример).

2.4—2.5. Для каждого из диодов строим графики зависимостей статических и дифференциальных сопротивлений от напряжений.

Германиевый диод

Таблица 1.6 (пример Ge)

Напряжение прямой ветви ВАХ	$U_{np}, В$	0,275	0,308	0,341	0,374	0,407	0,440	0,473	0,506	0,539	0,600
	$\Delta U_{np}, В$	x	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	x
$t_1 = -20^\circ C$	I_{np}, mA	0,003	0,007	0,015	0,032	0,069	0,147	0,314	0,669	1,424	5,740
	$\Delta I_{np}, mA$	x	0,004	0,008	0,017	0,037	0,078	0,167	0,355	0,755	x
	$R_{cm}, Ом$	91667	44000	22733	11688	5898	2993	1506	756	379	x
	$R_{outф}, Ом$	x	8250	4125	1941	892	423	198	93	44	x
$t_2 = 20^\circ C$	I_{np}, mA	0,009	0,018	0,034	0,066	0,127	0,244	0,469	0,900	1,729	5,765
	$\Delta I_{np}, mA$	x	0,009	0,016	0,032	0,061	0,117	0,225	0,431	0,829	x
	$R_{cm}, Ом$	30556	17111	10029	5667	3205	1803	1009	562	312	x
	$R_{outф}, Ом$	x	3667	2063	1031	541	282	147	77	40	x
$t_3 = 80^\circ C$	I_{np}, mA	0,028	0,048	0,082	0,142	0,244	0,419	0,721	1,240	2,132	5,796
	$\Delta I_{np}, mA$	x	0,020	0,034	0,060	0,102	0,175	0,302	0,519	0,892	x
	$R_{cm}, Ом$	9821	6417	4159	2634	1668	1050	656	408	253	x
	$R_{outф}, Ом$	x	1650	971	550	324	189	109	64	37	x

Германиевый диод

Таблица 1.7 (пример Ge)

Напряжение обратной ветви ВАХ	$U_{обр}, В$	0,600	80	160	240	320	400	480	560	640	720
	$\Delta U_{обр}, В$	x	x	80	80	80	80	80	80	80	80
$t_1 = -20^\circ C$	$I_{обр}, мкА$	0,017	1,602	3,803	6,203	8,604	11,004	13,404	15,804	18,206	20,606
	$\Delta I_{обр}, мкА$	x	x	2,201	2,400	2,401	2,400	2,400	2,400	2,402	2,400
	$R_{см}, МОм$	x	50	42	39	37	36	36	35	35	35
	$R_{оуф}, МОм$	x	x	36,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
	$I_{обр}, мкА$	0,051	1,636	3,837	6,238	8,638	11,038	13,438	15,838	18,239	20,640
$t_2 = 20^\circ C$	$\Delta I_{обр}, мкА$	x	x	2,201	2,401	2,400	2,400	2,400	2,400	2,401	2,401
	$R_{см}, МОм$	x	49	42	38	37	36	35	35	35	35
	$R_{оуф}, МОм$	x	x	36,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
	$I_{обр}, мкА$	0,315	1,900	4,101	6,502	8,901	11,302	13,702	16,102	18,504	20,905
	$\Delta I_{обр}, мкА$	x	x	2,201	2,401	2,399	2,401	2,400	2,400	2,402	2,401
$t_3 = 80^\circ C$	$R_{см}, МОм$	x	42	39	37	36	35	35	35	35	34
	$R_{оуф}, МОм$	x	x	36,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3

Кремниевый диод

Таблица 1.6 (пример Si)

Напряжение прямой ветви ВАХ	U_{np} , В	0,300	0,336	0,372	0,408	0,444	0,480	0,516	0,552	0,588	0,840
	ΔU_{np} , В	x	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	x
$t_1 = -20^\circ\text{C}$	I_{np} , mA	0,011	0,019	0,042	0,099	0,248	0,640	1,676	4,407	11,617	10280
	ΔI_{np} , mA	x	0,008	0,023	0,057	0,149	0,392	1,036	2,731	7,21	x
	R_{cm} , Ом	27273	17684	8857	4121	1790	750	308	125	51	x
	R_{outf} , Ом	x	4500	1565	632	242	92	35	13	5	x
	I_{np} , mA	0,132	0,297	0,679	1,560	3,598	8,308	19,200	44,385	102,620	35339
$t_2 = 20^\circ\text{C}$	ΔI_{np} , mA	x	0,165	0,382	0,881	2,038	4,710	10,892	25,185	58,235	x
	R_{cm} , Ом	2273	1131	548	262	123	58	27	12	6	x
	R_{outf} , Ом	x	218	94	41	18	8	3	1	0,6	x
$t_3 = 80^\circ\text{C}$	I_{np} , mA	4,290	8,610	17,274	34,648	69,490	139,360	279,462	560,359	1123	134903
	ΔI_{np} , mA	x	4,320	8,664	17,374	34,842	69,870	140,102	280,897	562,641	x
	R_{cm} , Ом	70	39	22	12	6	3	2	1	0,5	x
	R_{outf} , Ом	x	8	4	2	1	0,5	0,3	0,1	0,06	x

Кремниевый диод

Таблица 1.7 (пример Si)

Напряжение обратной ветви ВАХ	$U_{обр}, В$	0,840	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
		$\Delta U_{обр}, В$	x	x	10	10	10	10	10	10	10	10
$t_1 = -20^\circ C$	$I_{обр}, мкА$	0,024	0,250	0,450	0,649	0,849	1,049	1,249	1,449	1,649	1,849	
	$\Delta I_{обр}, мкА$	x	x	0,200	0,199	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	
	$R_{см}, МОм$	x	40	44	46	47	48	48	48	49	49	
	$R_{оуф}, МОм$	x	x	50	50	50	50	50	50	50	50	
		$I_{обр}, мкА$	0,024	0,250	0,450	0,649	0,849	1,049	1,249	1,449	1,649	1,849
$t_2 = 20^\circ C$	$\Delta I_{обр}, мкА$	x	x	0,200	0,199	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	
	$R_{см}, МОм$	x	40	44	46	47	48	48	48	49	49	
	$R_{оуф}, МОм$	x	x	50	50	50	50	50	50	50	50	
		$I_{обр}, мкА$	0,037	0,263	0,463	0,662	0,862	1,062	1,262	1,462	1,662	1,862
		$\Delta I_{обр}, мкА$	x	x	0,200	0,199	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
$t_3 = 80^\circ C$	$R_{см}, МОм$	x	38	43	45	46	47	48	48	48	48	
	$R_{оуф}, МОм$	x	x	50	50	50	50	50	50	50	50	

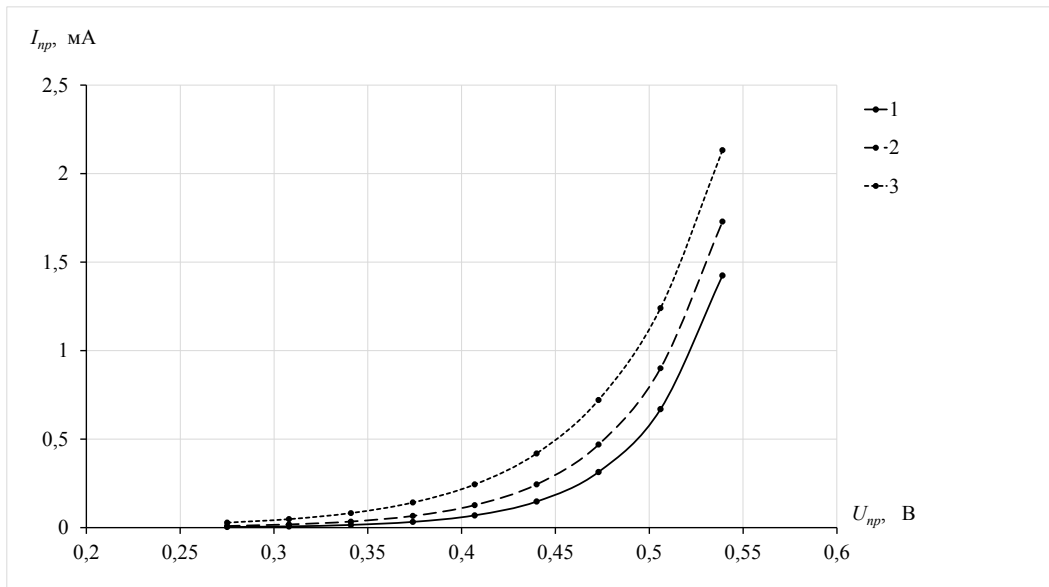


Рис. 1.4. Прямые ветви ВАХ германиевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

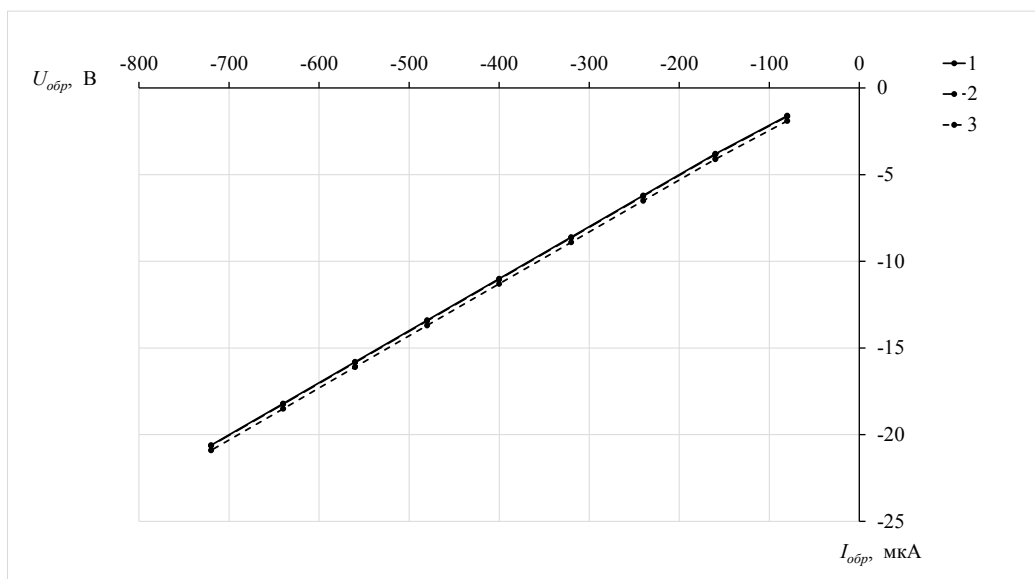


Рис. 1.5. Обратные ветви ВАХ германиевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

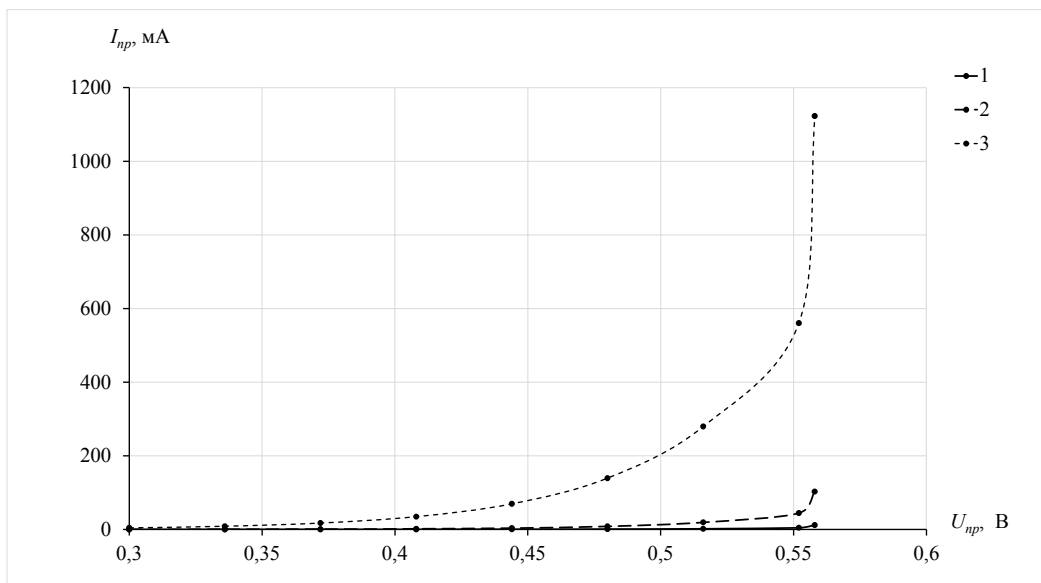


Рис. 1.6. Прямые ветви ВАХ кремниевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

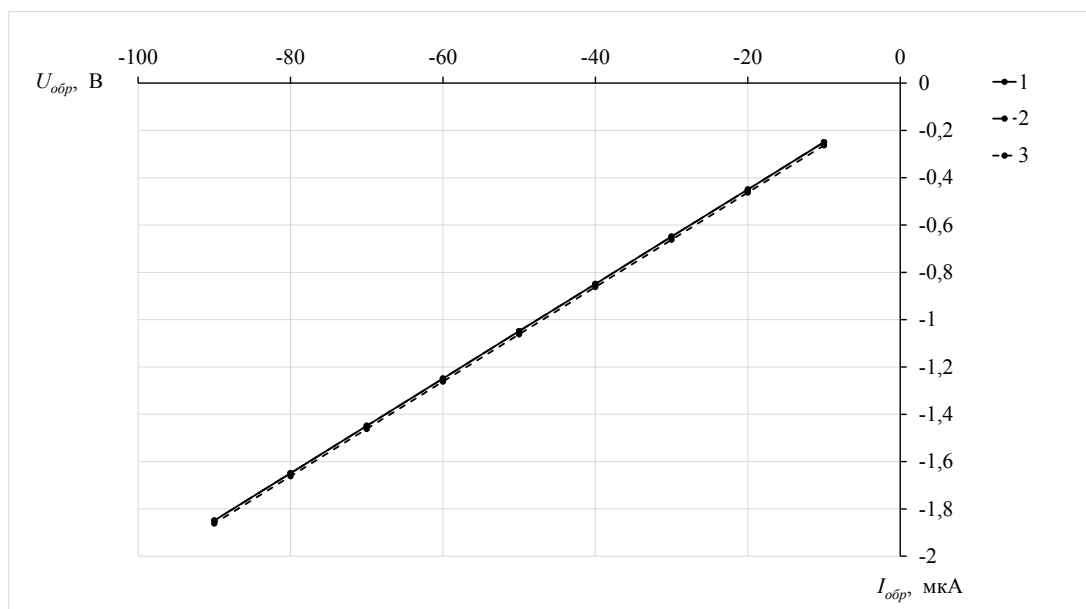


Рис. 1.7. Обратные ветви ВАХ кремниевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

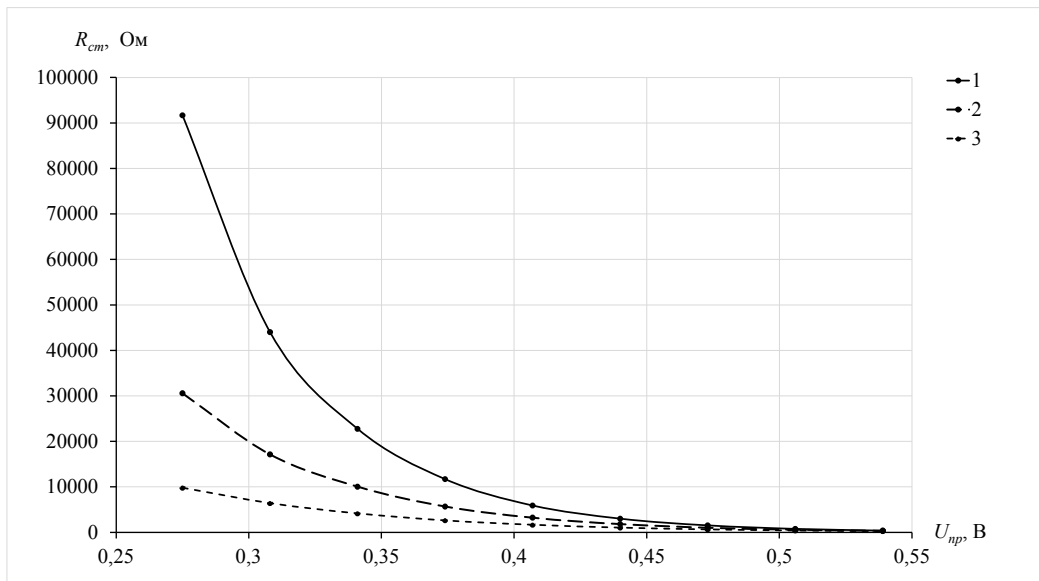


Рис. 1.8. Зависимости статических сопротивлений для прямых ветвей ВАХ германиевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

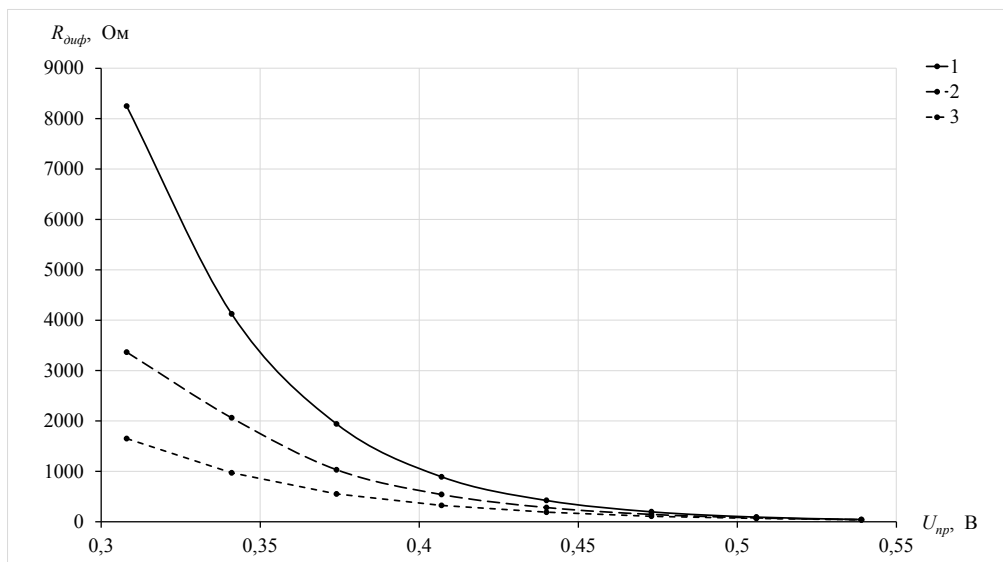


Рис. 1.9. Зависимости дифференциальных сопротивлений для прямых ветвей ВАХ германиевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

Исходя из полученных результатов видно, что дифференциальные сопротивления для обратных веток ВАХ германиевого диода не зависят от температуры, являются постоянными величинами и составляют $R_{диф\ обр} = 33,3 \text{ МОм}$ (табл. 1.7, пример Ge), поэтому графические зависимости не приводятся.

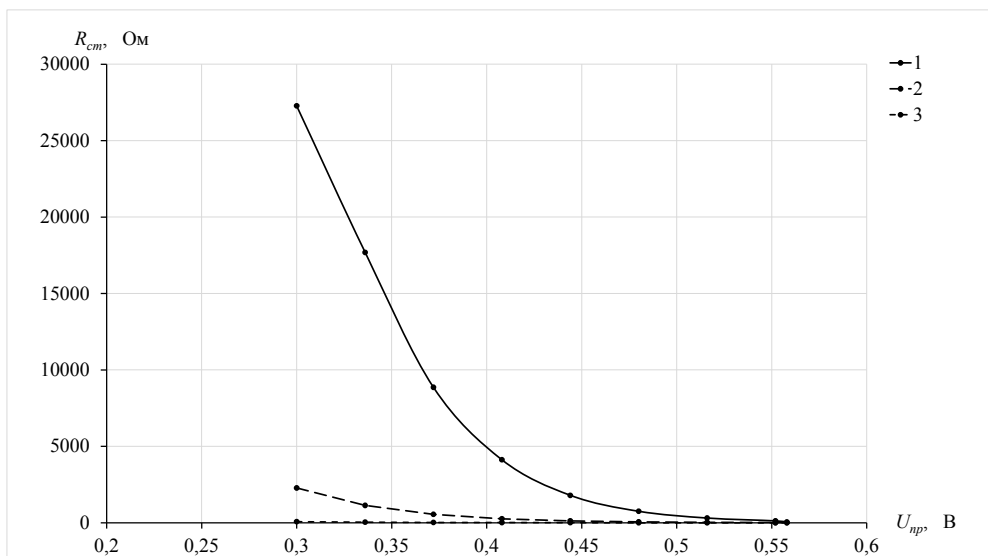


Рис. 1.10. Зависимости статических сопротивлений для прямых ветвей ВАХ кремниевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

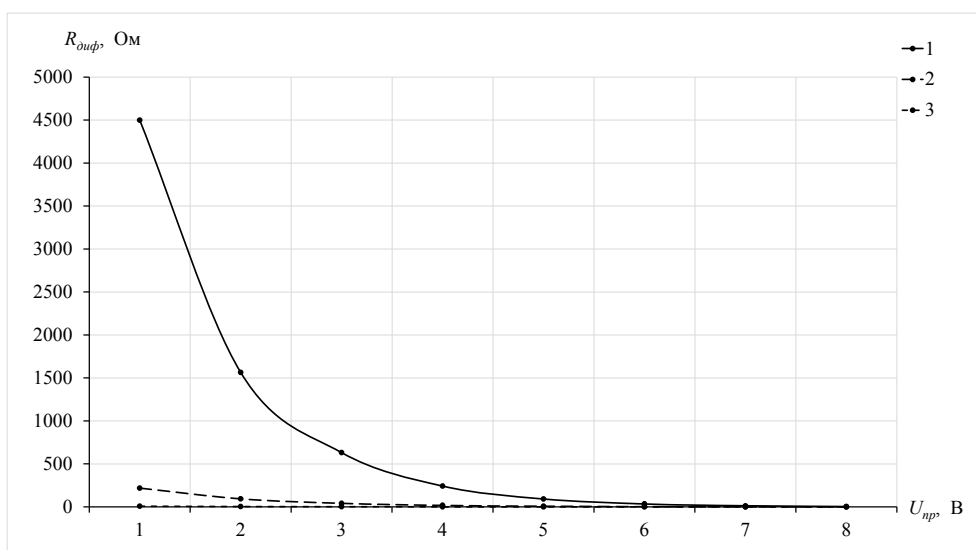


Рис. 1.11. Зависимости дифференциальных сопротивлений для прямых ветвей ВАХ кремниевого диода при различных температурах:
 1 — $t = -20^\circ\text{C}$; 2 — $t = 20^\circ\text{C}$; 3 — $t = 80^\circ\text{C}$

Исходя из полученных результатов видно, что дифференциальные сопротивления для обратных веток ВАХ кремниевого диода не зависят от температуры, являются постоянными величинами и составляют $R_{диф\ обр} = 50\text{ МОм}$ (табл. 1.7, пример Si), поэтому графические зависимости не приводятся.

2.6. Для каждого диода для трех рабочих температур определяем значение коэффициента выпрямления. Результаты заносим в таблицу 1.8 (пример).

Таблица 1.8 (пример)

Тип полупроводника	K_B		
	$t_1 = -20^\circ\text{C}$	$t_2 = 20^\circ\text{C}$	$t_3 = 80^\circ\text{C}$
Ge	$3,4 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^4$
Si	$4,28 \cdot 10^8$	$14,72 \cdot 10^8$	$36,46 \cdot 10^8$

2. Стабилитрон. Барьерная емкость p - n -переходов

2.1. Темы для подготовки к лабораторной работе

Примесная проводимость полупроводников. Процессы переноса зарядов в полупроводниках. Электрические переходы. Энергетические диаграммы и свойства p - n -переходов. ВАХ p - n -перехода. Пробои p - n -перехода. Барьерная емкость p - n -перехода. Диффузионная емкость p - n -перехода. Стабилитроны, их особенности, схемы включения, ВАХ. Варикапы, их особенности, схемы включения, ВАХ.

2.2. Контрольные вопросы

1. Как образуется электронно-дырочный переход?
2. От чего зависит ширина p - n -перехода и высота потенциального барьера?
3. ВАХ p - n -перехода и ее уравнение.
4. Виды и механизмы пробоев p - n -перехода.
5. Как образуется барьерная емкость p - n -перехода?
6. Как образуется диффузионная емкость p - n -перехода?
7. Варикап, его ВАХ и схема включения.
8. Стабилитрон, его ВАХ и схема включения.
9. В чем состоит сущность метода определения емкости варикапа в данной лабораторной работе?

2.3. Лабораторная работа № 2

Исследование стабилитрона и барьерной емкости p - n -перехода варикапа

Цель работы: экспериментально исследовать ВАХ стабилитрона и барьерную емкость p - n -перехода варикапа.

Задание 1. Для полупроводникового стабилитрона снять прямую и обратную ветви ВАХ.

1.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 2.1. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметра и амперметра.

1.2. Стабилитрон следует выбрать в соответствии со своим вариантом из таблицы 2.1. Установить параметры вольтметра ХММ1: MODE — DC, $R_V = 10$ МОм; амперметра ХММ2: MODE — DC, $R_I = 10$ нОм; значение ЭДС (V_1) — в соответствии с типом диода и своим вариантом (табл. 2.1).

На рисунке 2.1 символами D1 и D2 обозначен один и тот же стабилитрон, который при помощи переключателя S1 может быть подключен в прямом или обратном направлении. В таблице 2.2 приведены положения переключателя S1 для включения прямого и обратного переходов. Указанный на рисунке 2.1 стабилитрон соответствует стабилитрону из таблицы 2.1, строка «ПР» — «Пример».

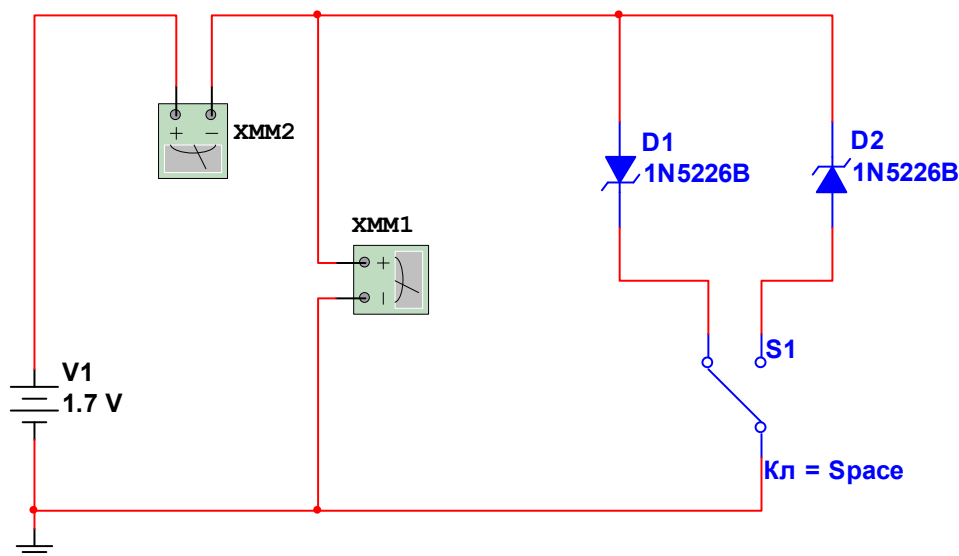


Рис. 2.1. Схема для снятия ВАХ стабилитрона

Таблица 2.1

№	Кремниевые стабилитроны $E_g = 1,11$ эВ	Максимальное напряжение стабилизации $U_{ст\max}$, В	Номинальное напряжение стабилизации $U_{ст\ном}$, В	Минимальное напряжение стабилизации $U_{ст\min}$, В	Максимальный (номинальный) ток стабилизации $I_{ст}$, мА	Прямое напряжение номинальное $U_{пр\ном}$, В
1	1N5227B	3,78	3,6	3,42	55	1,1
2	1N5228B	4,09	3,9	3,71	20	1,1
3	1N5333B	3,47	3,3	3,14	380	1,2
4	1N5334B	3,78	3,6	3,42	350	1,2
5	1N5335B	4,10	3,9	3,71	320	1,2
6	1N5336B	4,52	4,3	4,09	290	1,2
7	1N5337B	4,94	4,7	4,27	260	1,2
8	1N5338B	5,36	5,1	4,85	240	1,2
9	1N5339B	5,88	5,6	5,32	220	1,2
10	1N5340B	6,30	6,0	5,70	200	1,2
ПП	1N5226B	3,46	3,3	3,14	38	1,1

Таблица 2.2

Переключатель	D1 Прямой переход	D2 Обратный переход
S1	Левое	Правое

1.3. Вычислить значения ЭДС источника (на рисунке 2.1 обозначена V1) в соответствии с таблицей 2.3 для прямой ветви. Результаты записать в соответствующую строку таблицы 2.3 для прямой ветви ВАХ. Значения $U_{пр\ном}$ для исследуемых стабилитронов приведены в таблице вариантов 2.1.

Таблица 2.3

Прямая ветвь	$U_{пр}, В$	$0,1 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,2 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,3 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,4 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,5 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,6 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,7 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,8 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$0,9 \cdot U_{пр\text{пот}}$	$U_{пр\text{пот}}$
	$I_{пр}, МА$	$U_{см\text{max}} + \frac{\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}}$	$U_{см\text{max}} - \frac{\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{2\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{3\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{4\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{5\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{min}}$	$U_{см\text{min}} - \frac{\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{min}} - \frac{U_{см\text{min}}}{2}$
Обратная ветвь	$U_{обр}, В$	$U_{см\text{max}} + \frac{\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}}$	$U_{см\text{max}} - \frac{\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{2\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{3\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{4\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{max}} - \frac{5\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{min}}$	$U_{см\text{min}} - \frac{\Delta U_{см}}{6}$	$U_{см\text{min}} - \frac{U_{см\text{min}}}{2}$
	$I_{обр}, МА$										

1.4. Снять прямую ветвь ВАХ стабилитрона, установив переключатель S1 в положение согласно таблице 2.2. Устанавливая ЭДС источника начиная с $E = U_{np\text{ном}}$, регистрировать показания амперметра и записывать их в строку, соответствующую прямому току p - n -перехода (I_{np}) таблицы 2.3 для заданного значения ЭДС. **Важно!** Перед изменением значения ЭДС схему необходимо выключить.

1.5. Вычислить значения ЭДС источника (на рисунке 2.1 обозначена V1) в соответствии с таблицей 2.3 для обратной ветви. Результаты записать в соответствующую строку таблицы 2.3 для обратной ветви ВАХ. Следует иметь в виду, что напряжения и токи обратной ветви ВАХ имеют отрицательные значения, а сам график располагается в 3-й четверти системы координат.

1.6. Снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона, установив переключатель S1 в положение согласно таблице 2.2. Устанавливая ЭДС источника начиная с $E = \frac{U_{cm\text{min}}}{2}$, регистрировать показания амперметра и записывать их в строку, соответствующую обратному току p - n -перехода ($I_{обр}$) таблицы 2.3 для заданного значения ЭДС. **Важно!** Перед изменением значения ЭДС схему необходимо выключить.

1.7. На основе данных таблицы 2.1 для исследуемого стабилитрона вычислить следующую величину:

$$\Delta U_{cm} = U_{cm\text{max}} - U_{cm\text{min}}.$$

1.8. На основе экспериментальных данных для напряжений $U_{cm\text{max}}$ и $U_{cm\text{min}}$ вычислить следующую величину:

$$\Delta I_{cm} = I_{cm\text{max}} - I_{cm\text{min}},$$

где $I_{cm\text{max}}$ — значение обратного тока, соответствующего максимальному напряжению стабилизации $U_{cm\text{max}}$; $I_{cm\text{min}}$ — значение обратного тока, соответствующего минимальному напряжению стабилизации $U_{cm\text{min}}$.

Вычислить дифференциальное сопротивление стабилитрона:

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

1.9. По полученным экспериментальным данным построить ВАХ стабилитрона.

Задание 2. Снять вольт-фарадную характеристику и рассчитать барьерную емкость варикапа.

2.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 2.2. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметра и амперметра.

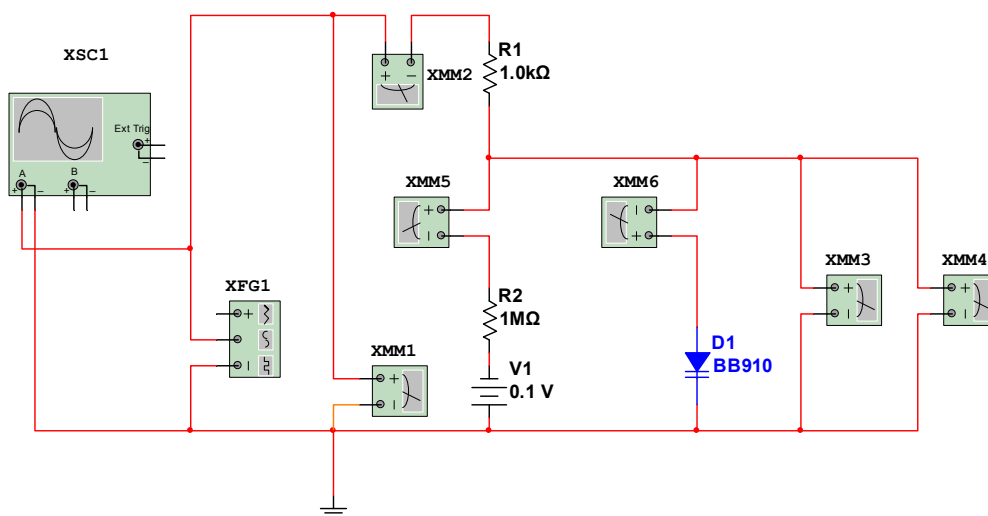


Рис. 2.2. Схема для снятия вольт-фардовой характеристики варикапа

2.2. Варикап следует выбрать в соответствии со своим вариантом из таблицы 2.4. Указанный на рисунке 2.2 варикап соответствует варикапу из таблицы 2.4, строка «ПР» — «Пример». Установить параметры вольтметров XMM1, XMM4: MODE — AC, $R_V = 10 \text{ МОм}$; амперметров XMM2, XMM5, XMM6: MODE — AC, $R_I = 10 \text{ нОм}$; вольтметра XMM3: MODE — DC, $R_V = 10 \text{ МОм}$; значения ЭДС (V1) устанавливаются в соответствии с таблицей 2.7. Параметры двухканального осциллографа XSC1: режим работы «AC»; чувствительность по каналу «A» — 2 В/дел (V/Div); синхронизация — «Норм»; длительность развертки в режиме «Y/T» — 100 нс/дел (ns/Div). Для большего удобства работы с осциллографом в процессе эксперимента можно изменять его чувствительность по каналу «A» и (или) время развертки.

Таблица 2.4

№	Кремниевые варикапы* $E_g = 1,11 \text{ эВ}$	Прямой ток номинальный $I_{пр \text{ ном}}, \text{ мА}$	Барьерная емкость при $E_{обр} = 0$ $C_{0 \text{ бар}}, \text{ пФ}$	Барьерная емкость при $E_{обр} = 1 \text{ В}$ $C_{1 \text{ бар}}, \text{ пФ}$	Барьерная емкость при $E_{обр} = 28 \text{ В}$ $C_{28 \text{ бар}}, \text{ пФ}$
1	BB130	50	55,63	55	12,0
2	BB215	20	32,49	18	1,8
3	BB417	20	53,29	11	2,2
4	BB515	20	34,12	20	1,9
5	BB619	20	82,44	42	2,4
6	BB809	20	83,87	46	4,0
7	BB811	20	17,87	9,8	0,85
8	BB909A	20	37,52	31	2,6
9	BB911	20	104,9	75	2,4
10	BB620	20	175,6	76	2,9
ПР	BB910	20	59,2	38	2,7

Примечание. * Для всех варикапов, приведенных в таблице 2.4, максимальное обратное напряжение и номинальный обратный ток одинаковы и составляют (табл. 2.5):

Таблица 2.5

Максимальное обратное напряжение $U_{обр\ max}$, В	Обратный ток номинальный $I_{обр\ ном}$, нА
30	10

Настройки функционального генератора XFG1:

- форма сигнала — синусоидальный;
- начальная частота — 1 МГц;
- амплитуда — 4 В (Vp);
- смещение — 0 В (V).

2.3. Для облегчения работы с измерительными приборами полезно руководствоваться таблицей соответствий измеряемых величин и обозначений приборов (табл. 2.6).

Таблица 2.6

U_0 , В	I_0 , мА	$U_{обр\ вар}$, мВ	$U_{вар}$, В	I_E , мкА	$I_{вар}$, мА
XMM1	XMM2	XMM3	XMM4	XMM5	XMM6

2.4. Сущность метода определения емкости варикапа заключается в построении делителя напряжений на элементах R_1 , R_2 , D_1 . На рисунке 2.3 показана схема делителя напряжений, на которой варикап D_1 представлен эквивалентной емкостью C . Будем полагать, что варикап имеет чисто емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega C_{бар}}$.

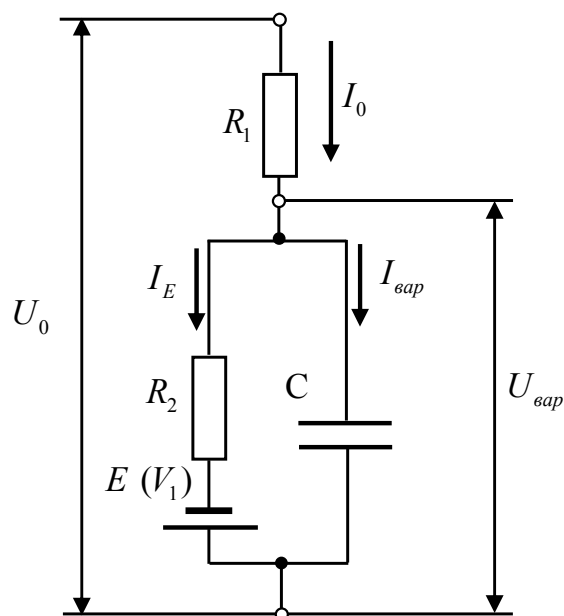


Рис. 2.3. Делитель напряжения для определения емкости варикапа

При этом величина сопротивления R_2 выбирается такой, чтобы ток I_E , текущий по ветке, содержащей источник $V1$, был намного меньше тока, текущего через варикап $I_E \ll I_{вар}$. Тогда в соответствии с первым законом Кирхгофа можно считать ток, текущий через варикап $I_{вар}$, примерно равным общему току I_0 на входе в делитель напряжения:

$$I_0 = I_E + I_{вар} \approx I_{вар}.$$

Далее в соответствии с законом Ома можно записать:

$$I_0 \approx I_{вар} = \frac{U_0}{R_1 + X_C} = \frac{U_{вар}}{X_C}.$$

Откуда нетрудно получить выражение

$$\frac{U_0}{U_{вар}} = \frac{R_1 + X_C}{X_C} = \frac{R_1}{X_C} + 1.$$

Выразим из полученной формулы емкостное сопротивление варикапа

$$X_C = \frac{R_1}{\left(\frac{U_0}{U_{вар}} - 1\right)}.$$

Принимая во внимание, что $X_C = \frac{1}{\omega C_{бар}}$, получим формулу для определения барьерной емкости варикапа:

$$C_{бар} = \frac{\left(\frac{U_0}{U_{вар}} - 1\right)}{\omega R_1} = \frac{\left(\frac{U_0}{U_{вар}} - 1\right)}{2\pi\nu R_1}.$$

С экспериментальной точки зрения удобно подобрать частоту ν входного напряжения U_0 так, чтобы отношение напряжений $\frac{U_0}{U_{вар}}$ было целым числом, **например 2**.

Тогда рабочая формула для определения барьерной емкости варикапа будет иметь вид

$$C_{бар} = \frac{1}{2\pi\nu R_1}.$$

2.5. Установить значение обратной ЭДС ($V1$) $E_{обр} = 0,1$ В. Включить схему и сравнить показания вольтметров ХММ1, ХММ4. Указанные вольтметры будут отображать действующие (не амплитудные) значения соответствующих напряжений. Амплитудное значение напряжения функционального генератора можно контролировать при помощи осциллографа. Если показания вольтметров не соответствуют отношению $\frac{U_0}{U_{вар}} = 2$, то выключить схему и изменить частоту функционального генератора. После нескольких

итераций добиться выполнения отношения $\frac{U_0}{U_{вар}}=2$. Записать в таблицу 2.7 в строку «Частота генератора» найденное значение частоты. Сопоставить показания вольтметров ХММ2, ХММ5 и ХММ6 и убедиться, что выполняется неравенство $I_E \ll I_{вар}$. Повторить указанные действия для остальных значений обратной ЭДС $E_{обр}$ в соответствии с таблицей 2.7.

Таблица 2.7

Обратная ЭДС (V1) $E_{обр}$, В	0,1	0,5	1	2,5	5	7,5	10	15	20	25
Частота генератора ν , МГц										
$C_{бар}$, пФ										

2.6. Для каждой из подобранных частот вычислить значение барьерной емкости варикапа по формуле

$$C_{бар} = \frac{1}{2\pi\nu R_1},$$

где $R_1 = 1000$ Ом в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 2.2

2.7. Построить вольт-фарадную характеристику — зависимость $C_{бар} = f(E_{обр})$, откладывая по вертикальной оси значения барьерной емкости, а по горизонтальной оси влево значения обратной ЭДС $E_{обр}$. Экстраполировать полученный график до пересечения с осью барьерных емкостей и оценить значение барьерной емкости при $E_{обр} = 0$.

2.4. Пример выполнения лабораторной работы

Задание 1. Для полупроводникового стабилитрона снять прямую и обратную ветви ВАХ.

1.1. В соответствии с рисунком 2.1 собираем схему для исследования ВАХ стабилитрона.

1.2. В качестве исследуемого примем стабилитрон из таблицы 2.1, строка «ПР» — «Пример».

1.3. В соответствии с данными таблицы 2.1 вычисляем значения прямого напряжения $U_{пр}$ и записываем их в соответствующую строку таблицы 2.3 (пример).

1.4. Устанавливаем прямой режим работы стабилитрона. Снимаем прямую ветвь ВАХ стабилитрона, записывая значения прямого тока $I_{пр}$ в соответствующую строку таблицы 2.3 (пример).

Таблица 2.3 (пример)

Прямая ветвь	U_{np} , В	0	0,11	0,22	0,33	0,44	0,55	0,66	0,77	0,88	0,99	1,1
	I_{np} , мкА	0	0,0125	0,0222	0,0389	0,0444	0,4774	30,6	2100	52700	199100	379700
Обратная ветвь	$U_{обр}$, В	-3,51	-3,46	-3,41	-3,35	-3,3	-3,23	-3,19	-3,14	-3,09	-1,57	0
	$I_{обр}$, мА	-291,900	-211,300	-136,400	-71,800	-19,900	-1,900	-0,420	-0,062	-0,009	-0,0001	0

1.5. В соответствии с данными таблицы 2.1 вычисляем значения обратного напряжения $U_{обр}$ и записываем их в соответствующую строку таблицы 2.3 (пример).

1.6. Устанавливаем обратный режим работы стабилитрона. Снимаем обратную ветвь ВАХ стабилитрона, записывая значения обратного тока $I_{обр}$ в соответствующую строку таблицы 2.3 (пример).

1.7. На основе данных таблицы 2.1 для исследуемого стабилитрона вычисляем следующую величину:

$$\Delta U_{cm} = U_{cm\max} - U_{cm\min} = -3,46 - (-3,14) = -0,32 \text{ В}.$$

1.8. На основе экспериментальных данных для напряжений $U_{cm\max}$ и $U_{cm\min}$ вычисляем следующую величину:

$$\Delta I_{cm} = I_{cm\max} - I_{cm\min} = -211,3 - (-0,062) = -211,238 \text{ мА}.$$

Вычисляем дифференциальное сопротивление:

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}} = \frac{-0,32}{-211,238 \cdot 10^{-3}} = 1,51 \text{ Ом}.$$

1.9. По полученным экспериментальным данным строим ВАХ стабилитрона (рис. 2.4).

Задание 2. Снять вольт-фарадную характеристику и рассчитать барьерную емкость варикапа.

2.1. В соответствии с рисунком 2.2 собираем схему для исследования вольт-фарадной характеристики варикапа.

2.2. В качестве исследуемого примем варикап из таблицы 2.4, строка «ПР» — «Пример».

2.5 Для различных значений обратной ЭДС в соответствии с таблицей 2.7 подбираем частоты функционального генератора так, чтобы выполнялось отношение $\frac{U_0}{U_{вар}} = 2$.

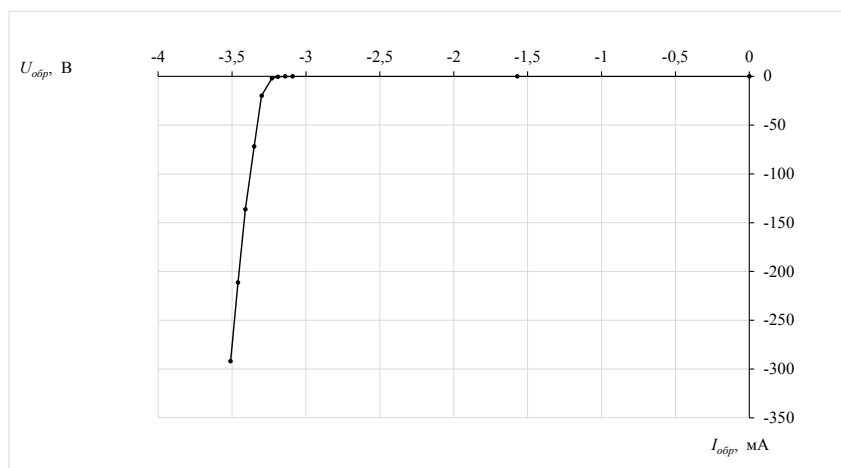
Результаты записываем в соответствующую строку таблицы 2.7 (пример).

Таблица 2.7 (пример)

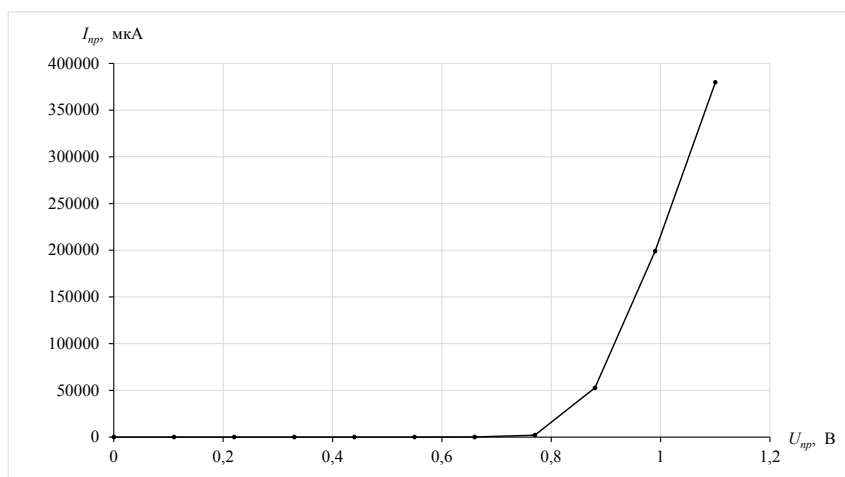
Обратная ЭДС (V1) $E_{обр}$, В	-0,1	-0,5	-1	-2,5	-5	-7,5	-10	-15	-20	-25
Частота генератора ν , МГц	4,53	4,53	4,53	4,54	4,545	4,55	4,56	4,58	4,595	4,61
$C_{бар}$, пФ	35,1	35,1	35,1	35,0	35,0	34,9	34,9	34,7	34,6	34,5

2.6. Для каждой из подобранных частот вычисляем значение барьерной емкости варикапа. Результаты также записываем в таблицу 2.7 (пример).

2.7. По полученным экспериментальным данным строим вольт-фарадную характеристику варикапа (рис. 2.5).



a



б

Рис. 2.4. ВАХ стабилитрона:
a — обратная ветвь; *б* — прямая ветвь

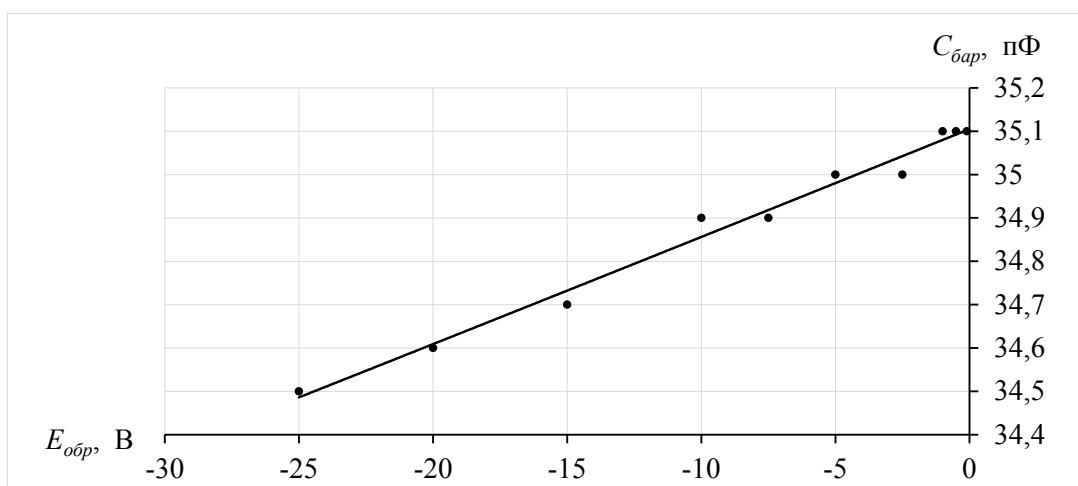


Рис. 2.5. Вольт-фарадная характеристика варикапа

3. Диодные устройства обработки сигналов

3.1. Темы для подготовки к лабораторной работе

Электрические переходы. Энергетические диаграммы и свойства p - n -переходов. ВАХ p - n -перехода. Устройство полупроводникового диода. Классификация диодов. ВАХ диода. Основные параметры диода. Принцип работы параллельного и последовательного диодных ключей. Принцип работы диодного ограничителя амплитуды.

3.2. Контрольные вопросы

1. Как образуется электронно-дырочный переход?
2. Устройство и назначение полупроводниковых диодов.
3. Какие электронные переходы присутствуют в диоде?
4. Привести типовую ВАХ диода.
5. Привести классификацию, области применения диодов и их типовые ВАХ.
6. Назначение и принцип работы параллельного диодного ключа. Типовые схемы.
7. Назначение и принцип работы последовательного диодного ключа. Типовые схемы.
8. Назначение и принцип работы диодных ограничителей амплитуды. Типовые схемы.

3.3. Лабораторная работа № 3

Исследование диодных ключей и диодных ограничителей амплитуды

Цель работы: экспериментально исследовать работу диодных ключей и диодных ограничителей амплитуды.

Задание 1. Исследовать работу параллельного и последовательного диодных ключей и ограничителей амплитуды.

1.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 3.1. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров, амперметров, функционального генератора и управляемых источников постоянного напряжения.

1.2. Диод следует выбрать в соответствии со своим вариантом из таблицы 3.1. Установить параметры вольтметров ХММ1, ХММ3, ХММ4, ХММ6: MODE — АС, $R_V = 10$ МОм; амперметров ХММ2, ХММ5: MODE — АС, $R_I = 10$ мкОм. Значения резисторов $R_1 = R_2 = 5$ кОм.

Значения параметров управляемых источников постоянного напряжения DC_INTERACTIVE_VOLTAGE (вкладка «**Параметры**»):

- максимальное значение — 5 В;
- минимальное значение — 0;
- приращение — 10%.

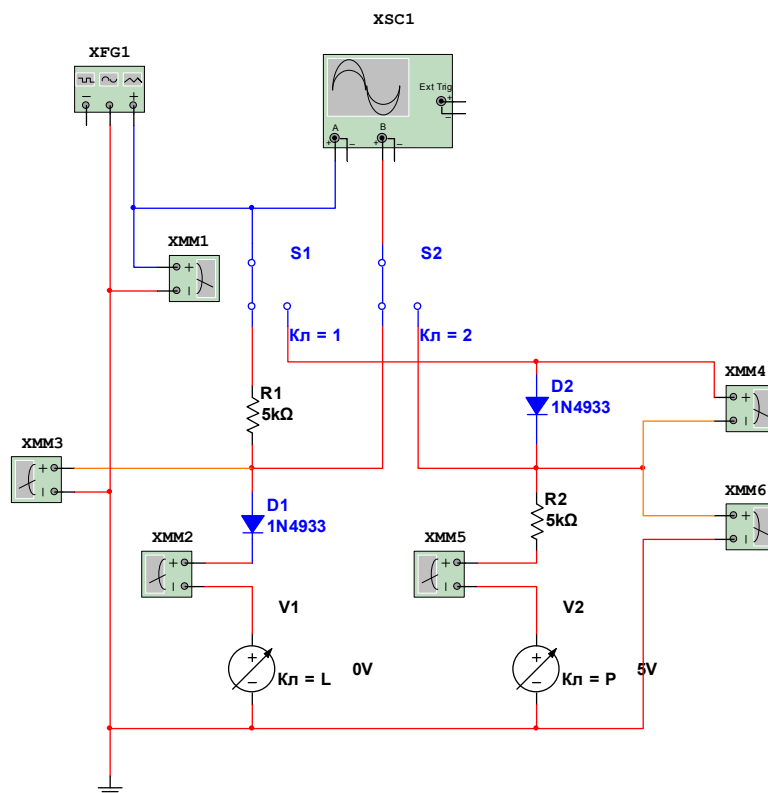


Рис. 3.1. Схема для исследования диодных ключей и диодных ограничителей напряжения

Параметры двухканального осциллографа XSC1: режим работы «DC»; чувствительность по каналам «А» и «В» — 5 В/дел (V/Div); синхронизация — «Норм»; длительность развертки в режиме «Y/T» — 100 мкс/дел ($\mu\text{s}/\text{Div}$). Для большего удобства работы с осциллографом в процессе эксперимента можно изменять его чувствительность по каналам «А» и «В» и (или) время развертки, а также рекомендуется установить смещения осциллограмм по каналам: «А» — смещение $Y = -1$; «В» — смещение $Y = 1$.

Настройки функционального генератора XFG1:

- форма сигнала — синусоидальный;
- частота — 5 кГц;
- амплитуда — 3 В (Vp);
- смещение — 0 В (V).

На рисунке 3.1 символами D1 и D2 обозначен один и тот же диод, который при помощи переключателей S1 и S2 может быть включен в режиме параллельного или последовательного ключа. Указанный на рисунке 3.1 диод соответствует диоду из таблицы 3.1, строка «ПР» — «Пример».

Таблица 3.1

№	Кремниевые диоды (Si)	Максимальное прямое напряжение $U_{пр\max}$, В	Кремниевые стабилитроны (Si)	Номинальное напряжение стабилизации $U_{ст\text{ ном}}$, В	Номинальное прямое напряжение $U_{пр\text{ ном}}$, В
1	1N4245GP	1,2	1N5227B	3,6	1,1
2	1N4246GP	1,2	1N5228B	3,9	1,1

Окончание табл. 3.1

№	Кремниевые диоды (Si)	Максимальное прямое напряжение $U_{пр\max}$, В	Кремниевые стабилитроны (Si)	Номинальное напряжение стабилизации $U_{ст\ном}$, В	Номинальное прямое напряжение $U_{пр\ном}$, В
3	1N4247GP	1,2	1N5333B	3,3	1,2
4	1N4248GP	1,2	1N5334B	3,6	1,2
5	1N4249GP	1,2	1N5335B	3,9	1,2
6	1N4383GP	1	1N5336B	4,3	1,2
7	1N4384GP	1	1N5337B	4,7	1,2
8	1N4385GP	1	1N5338B	5,1	1,2
9	1N4585GP	1	1N5339B	5,6	1,2
10	1N4586GP	1	1N5340B	6,0	1,2
ПР	1N4933	1,2	1N5226B	3,3	1,1

1.3. Выбор параллельного или последовательного режима работы диодного ключа осуществляется при помощи переключателей S1 и S2. В таблице 3.2 приведены комбинации этих переключателей.

Таблица 3.2

Переключатель	D1	D2
	Параллельный ключ	Последовательный ключ
S1	Левое положение	Правое положение
S2	Левое положение	Правое положение

1.4. Установить диод D1 в режим работы параллельного ключа (положения переключателей S1 и S2 см. в таблице 3.2). На регулируемом источнике постоянного обратного напряжения V1 при помощи движка установить напряжение 0 В. Включить схему и занести показания приборов ХММ1, ХММ2 и ХММ3 в таблицу 3.3, строка «Нулевой уровень включения». Далее при помощи клавиши «L» изменять величину обратного напряжения на регулируемом источнике напряжения V1 с шагом 0,5 В до значения 5 В. Для каждой величины обратного напряжения занести показания приборов ХММ1, ХММ2 и ХММ3 в таблицу 3.3 в строки, соответствующие этим значениям. Для значений обратного напряжения $U_{обр} = \{0, -1, -2, -3, -4\}$ В зафиксировать в отчете осциллограммы процессов (см. п. 1.8).

1.5. На основе данных таблицы 3.3 построить графики зависимостей выходного напряжения диодного ограничителя от обратного напряжения $U_{вых} = f(U_{обр})$ и тока, протекающего через диодный ограничитель от обратного напряжения $I_{вых} = f(U_{обр})$.

1.6. Установить диод D2 в режим работы последовательного ключа (положения переключателей S1 и S2 см. в таблице 3.2). На регулируемом источнике постоянного обратного напряжения V2 при помощи движка установить напряжение 0 В. Включить схему и занести показания приборов ХММ1, ХММ4, ХММ5 и ХММ6 в таблицу 3.4,

строка «Нулевой уровень включения». Далее при помощи клавиши «Р» изменять величину обратного напряжения на регулируемом источнике напряжения V2 с шагом 0,5 В до значения 5 В. Для каждой величины обратного напряжения занести показания приборов ХММ1, ХММ4, ХММ5 и ХММ6 в таблицу 3.4 в строки, соответствующие этим значениям. Для значений обратного напряжения $U_{обр} = \{0, -1, -2, -3, -4\}$ В зафиксировать в отчете осциллограммы процессов (см. п. 1.8).

Таблица 3.3

Параллельный ключ D1	V1 Обратное напряжение $U_{обр}$, В	ХММ1 $U_{вх}$, В	ХММ3 $U_{вых}$, В	ХММ2 $I_{вых}$, мКА
Нулевой уровень включения	0			
Ненулевой уровень включения	-0,5			
	-1,0			
	-1,5			
	-2,0			
	-2,5			
	-3,0			
	-3,5			
	-4,0			
	-4,5			
-5,0				

Таблица 3.4

Последовательный ключ D2	V2 Обратное напряжение $U_{обр}$, В	ХММ1 $U_{вх}$, В	ХММ4 $U_{диод}$, В	ХММ6 $U_{вых}$, мВ	ХММ5 $I_{вых}$, мКА
Нулевой уровень включения	0				
Ненулевой уровень включения	-0,5				
	-1,0				
	-1,5				
	-2,0				
	-2,5				
	-3,0				
	-3,5				
	-4,0				
	-4,5				
-5,0					

1.7. На основе данных таблицы 3.4 построить графики зависимостей выходного напряжения диодного ограничителя от обратного напряжения $U_{вых} = f(U_{обр})$ и тока, текущего через диодный ограничитель от обратного напряжения $I_{вых} = f(U_{обр})$.

1.8. Для регистрации осциллограмм в отчете полезно воспользоваться имеющимся в Multisim инструментом из меню «Вид» — «Графопостроитель». При этом поле графика следует сделать белым, выбрав в меню графопостроителя позицию «График», затем выбрать строку «Обратить цвета». На рисунке 3.2 показан вид меню графопостроителя. Придать белый фон графику можно также из главного меню графопостроителя, нажав пиктограмму «Черный фон», что эквивалентно действию «Обратить цвета». Маркеры с кривых следует удалить.

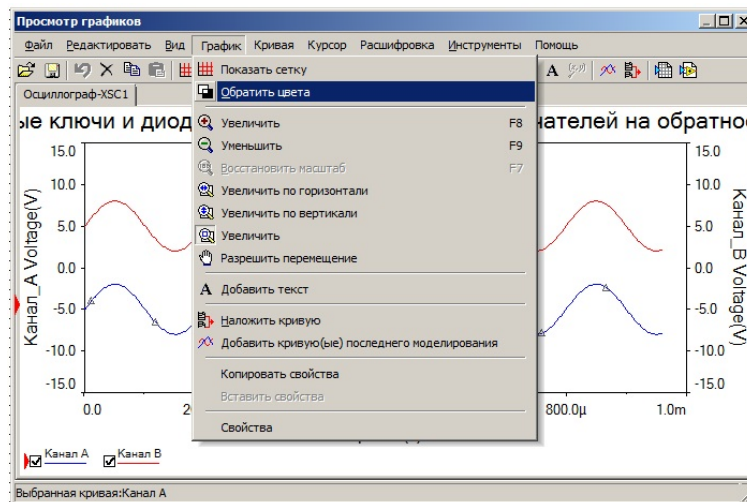


Рис. 3.2. Меню графопостроителя

Далее следует придать линиям желаемую толщину и цвет. Для этого нужно выбрать из главного меню позицию «График», а затем строку «Свойства» (рис. 3.3).

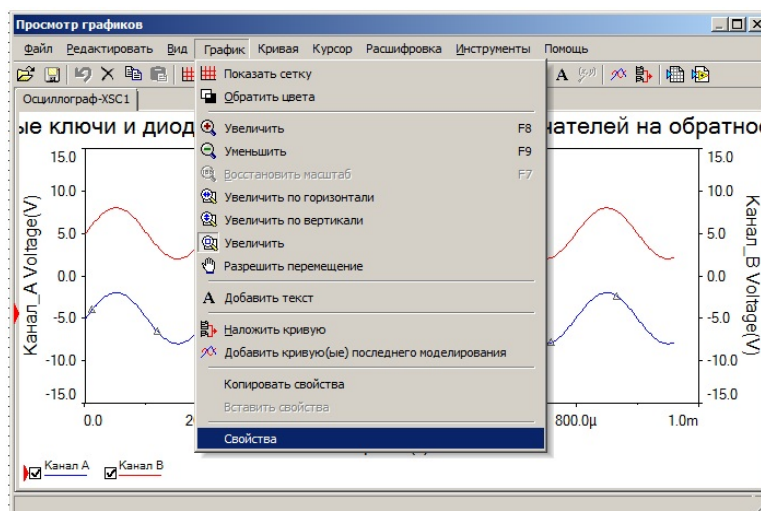


Рис. 3.3. Переход к редактированию кривых

Затем можно придать желаемую толщину и цвет линиям графиков, перейдя к меню «Свойства» (рис. 3.4).

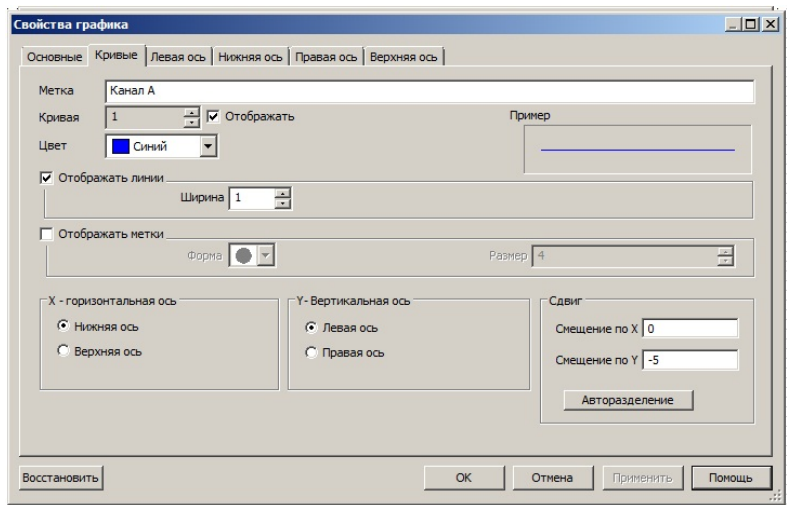


Рис. 3.4. Редактирование свойств графиков

Для копирования графиков в отчет нужно выбрать из главного меню графопостроителя позицию «Редактировать» (рис. 3.5), после чего выбрать строку «Копировать» и затем вставить график в соответствующую ячейку таблицы 3.5.

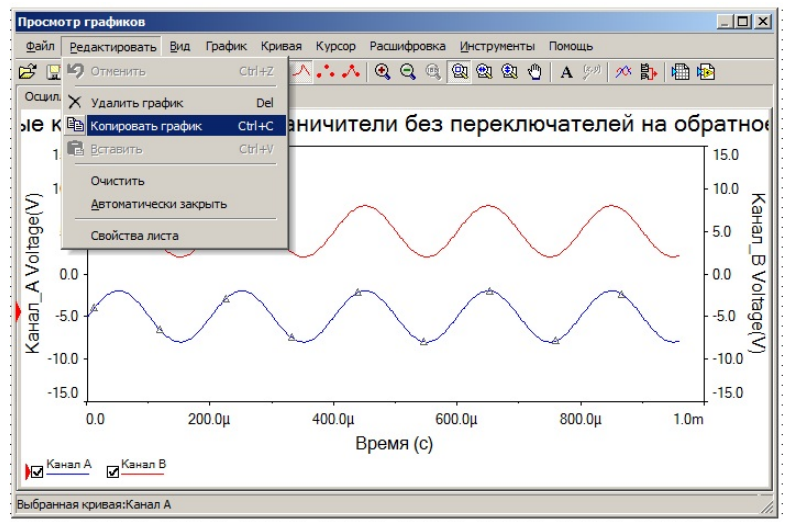


Рис. 3.5. Копирование графиков

Таблица 3.5

$U_{обр}$, В	Параллельный диодный ключ	Последовательный диодный ключ
0		
-1		
-2		
-3		
-4		

Задание 2. Исследовать работу амплитудного ограничителя на стабилитроне.

2.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 3.6. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров и функционального генератора.

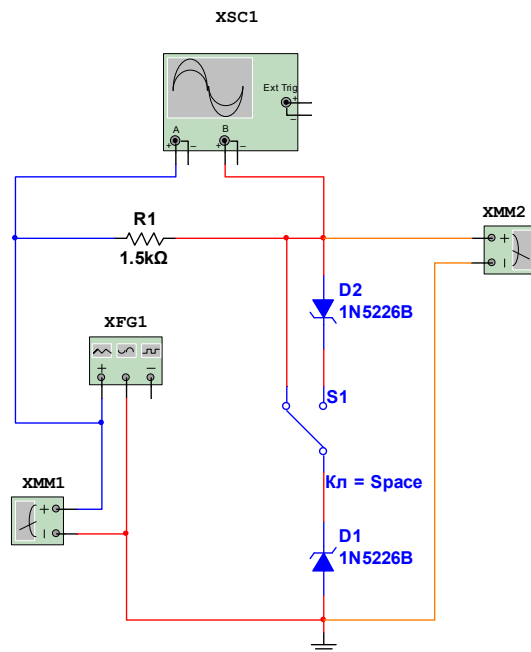


Рис. 3.6. Схема для исследования ограничителей напряжения на стабилитронах

2.2. Стабилитрон следует выбрать в соответствии со своим вариантом из таблицы 3.1. Установить параметры вольтметров XMM1, XMM2: MODE — AC, $R_V = 10 \text{ МОм}$. Значения резистора $R_1 = 1,5 \text{ кОм}$. Параметры двухканального осциллографа XSC1: режим работы «DC»; чувствительность по каналам «А» и «В» — 5 В/дел (V/Div) ; синхронизация — «Норм»; длительность развертки в режиме «Y/T» — $100 \text{ мкс/дел (}\mu\text{s/Div)}$. Для большего удобства работы с осциллографом в процессе эксперимента можно изменять его чувствительность по каналам «А» и «В» и (или) изменять время развертки, а также рекомендуется установить смещения осциллограмм по каналам: «А» — смещение $Y = -1$, «В» — смещение $Y = 1$.

Настройки функционального генератора XFG1:

- форма сигнала — синусоидальный;
- частота — 5 кГц ;
- амплитуда — 1 В (Vp) ;
- смещение — 0 В (V) .

На рисунке 3.6 символами D1 и D2 обозначен один и тот же стабилитрон, соответствующий стабилитрону из таблицы 3.1, строка «ПР» — «Пример».

2.3. Перевести переключатель S1 в левое положение (в цепь включен один стабилитрон — однополярный ограничитель амплитуды напряжения). Установить на функциональном генераторе амплитудное значение напряжения 1 В . Включить схему и записать показания вольтметра XMM2 ($U_{\text{вых}}$) в таблицу 3.6 в столбец, соответствующий однополярному ограничителю амплитуды напряжения для $U_{\text{амп ген}} = 1 \text{ В}$.

Таблица 3.6

Амплитудное напряжение на функциональном генераторе $U_{амп\ ген}$, В	ХММ1* $U_{вх}$, В	ХММ2 $U_{вых}$, В	
		Однополярный ограничитель амплитуды	Двухполярный ограничитель амплитуды
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Примечание. * Показания вольтметра ХММ1 для различных значений $U_{амп\ ген}$ будут одинаковыми как для однополярного, так и для двухполярного ограничителя амплитуды.

2.4. Выключить схему и повторить действия п. 2.3, увеличивая с шагом 1 В входное напряжение до $U_{амп\ ген} = 10$ В. При этом отметить то значение напряжения U^* , начиная с которого на осциллограмме будет заметно ограничение амплитуды. Сравнить это напряжение с номинальным напряжением стабилизации $U_{ст\ ном}$ из таблицы 3.1 для своего варианта. Используя рекомендации п. 1.8 по копированию графиков, зафиксировать в отчете осциллограмму, соответствующую этому напряжению. Кроме того, зафиксировать в отчете осциллограммы, соответствующие амплитудным значениям напряжения на функциональном генераторе 1 В и 10 В. Все осциллограммы вставить в соответствующие строки и столбцы таблицы 3.7.

2.5. Перевести переключатель S1 в правое положение (в цепь включены два стабилизатора — двухполярный ограничитель амплитуды напряжения). Установить на функциональном генераторе амплитудное значение напряжения 1 В. Включить схему и записать показания вольтметра ХММ2 в таблицу 3.6 в столбец, соответствующий двухполярному ограничителю амплитуды напряжения для $U_{амп\ ген} = 1$ В.

2.6. Выключить схему и повторить действия п. 2.5, увеличивая с шагом 1 В входное напряжение до $U_{амп\ ген} = 10$ В. При этом отметить то значение напряжения U^* , начиная с которого на осциллограмме будет заметно ограничение амплитуды. Сравнить это напряжение с номинальным напряжением стабилизации $U_{ст\ ном}$ из таблицы 3.1 для своего варианта. Используя рекомендации п. 1.8 по копированию графиков, зафиксировать в отчете осциллограмму, соответствующую этому напряжению. Кроме того, зафиксировать в отчете осциллограммы, соответствующие амплитудным значениям напряжения на функциональном генераторе 1 В и 10 В. Все осциллограммы вставить в соответствующие ячейки таблицы 3.7.

Таблица 3.7

$U_{ампл ген}, В$	Однополярный ограничитель	Двухполярный ограничитель
1		
10		
U^*		

2.7. На основе данных таблицы 3.6 для обоих ограничителей построить графики зависимостей выходного напряжения амплитудного ограничителя от входного напряжения $U_{вых} = f(U_{вх})$.

3.4. Пример выполнения лабораторной работы

Задание 1. Исследовать работу параллельного и последовательного диодных ключей и ограничителей амплитуды.

1.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 3.1.

1.2. В качестве исследуемого примем кремниевый диод из таблицы 3.1, строка «ПР» — «Пример».

1.4. Исследуем диод D1 в режиме параллельного ключа. Для этого установим при помощи переключателей S1 и S2 диод D1 в режим работы параллельного ключа (табл. 3.2). Задавая значение обратного напряжения на регулируемом источнике напряжения V1 при помощи клавиши «L» с шагом 0,5 В от $U_{обр} = 0$ В до $U_{обр} = 5$ В, заносим показания приборов ХММ1, ХММ2 и ХММ3 в таблицу 3.3 (пример) в соответствующие строки. Осциллограммы процессов для значений обратных напряжений $U_{обр} = \{0, -1, -2, -3, -4\}$ В размещаем в таблице 3.5 (пример) в столбце, соответствующем режиму параллельного ключа.

Таблица 3.3 (пример)

Параллельный ключ D1	V1 Обратное напряжение $U_{обр}, В$	ХММ1 $U_{вх}, В$	ХММ3 $U_{вых}, В$	ХММ2 $I_{вых}, мкА$
Нулевой уровень включения	0	2,121	1,404	177,958
Ненулевой уровень включения	-0,5	2,121	1,594	137,115
	-1,0	2,121	1,769	97,077
	-1,5	2,121	1,924	58,967
	-2,0	2,121	2,049	24,864
	-2,5	2,121	2,117	1,951
	-3,0	2,121	2,120	1,051
	-3,5	2,121	2,120	0,969
	-4,0	2,121	2,120	0,910
	-4,5	2,121	2,120	0,863
-5,0	2,121	2,120	0,824	

1.5. На рисунке 3.7 приведен график зависимости выходного напряжения диодного ограничителя от обратного напряжения $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{обр}})$, а на рисунке 3.8 — тока, текущего через диодный ограничитель, от обратного напряжения $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{обр}})$.

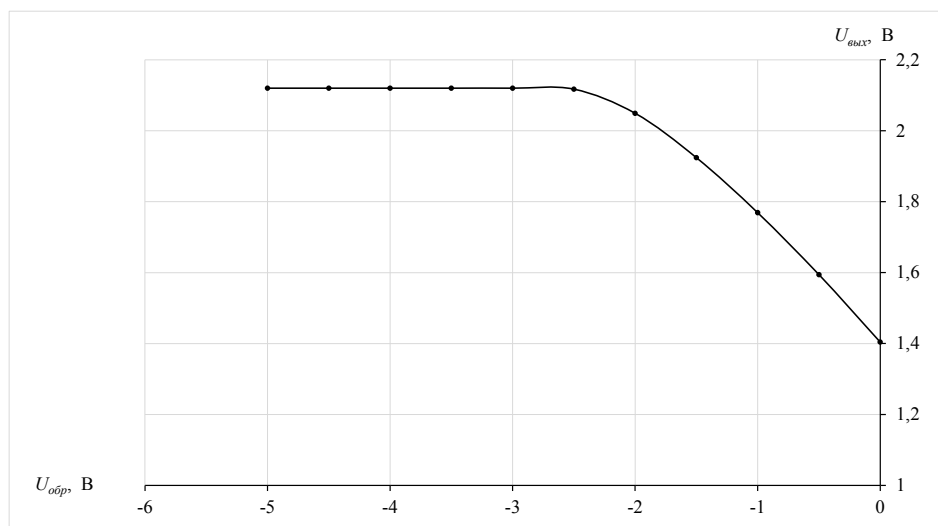


Рис. 3.7. Зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{обр}})$ для параллельного диодного ключа

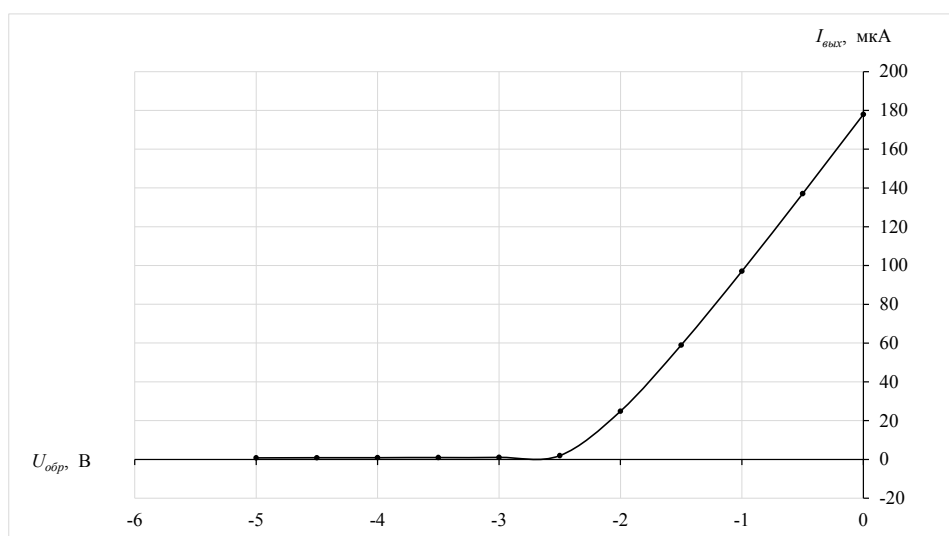


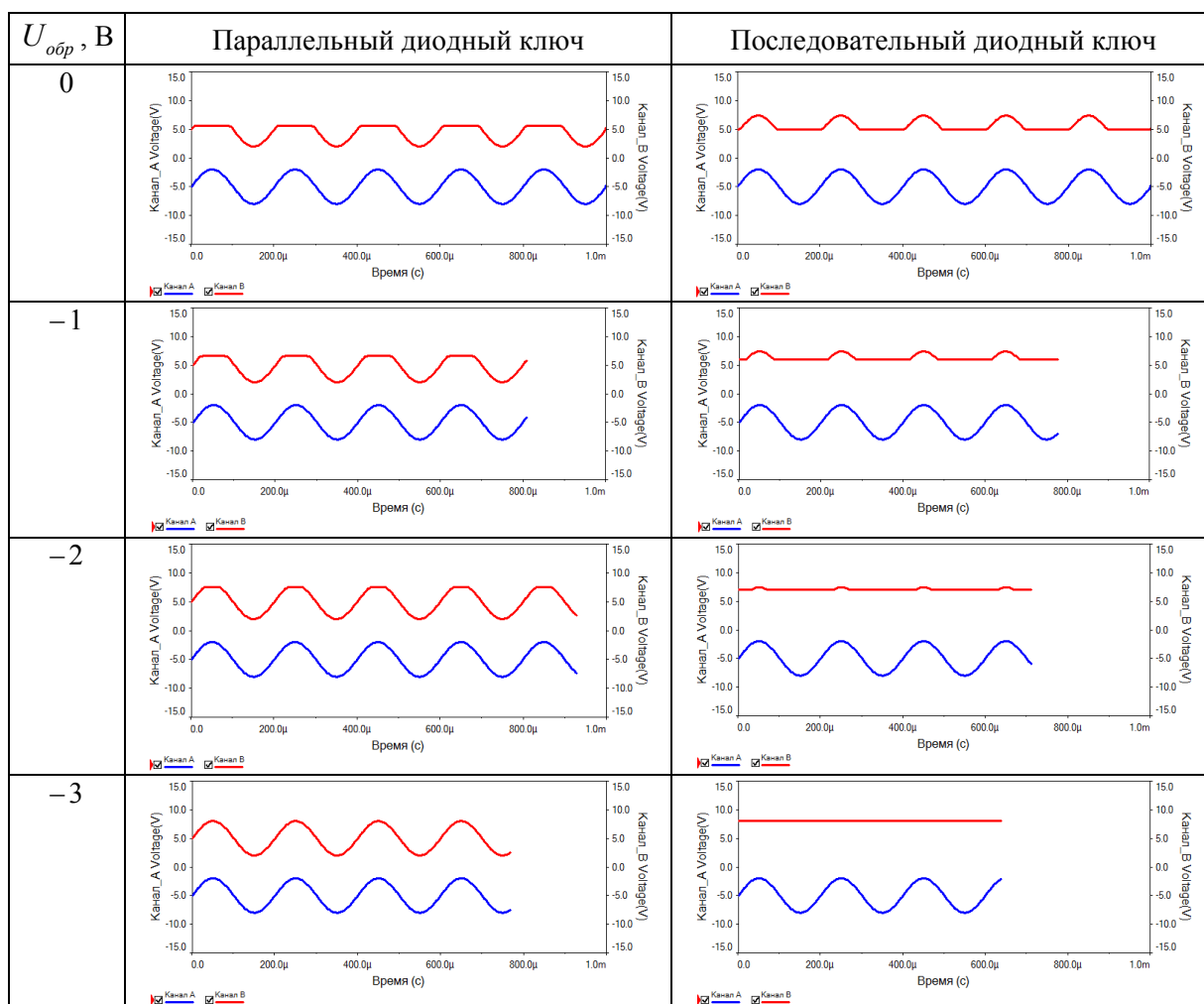
Рис. 3.8. Зависимость $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{обр}})$ для параллельного диодного ключа

1.6. Исследуем диод D2 в режиме последовательного ключа. Для этого устанавливаем при помощи переключателей S1 и S2 диод D2 в режим работы последовательного ключа (табл. 3.2). Задавая значение обратного напряжения на регулируемом источнике напряжения V2 при помощи клавиши «Р» с шагом 0,5 В от $U_{\text{обр}} = 0$ В до $U_{\text{обр}} = 5$ В, заносим показания приборов ХММ1, ХММ4, ХММ5 и ХММ6 в таблицу 3.4 (пример) в соответствующие строки. Осциллограммы процессов для значений обратных напряжений $U_{\text{обр}} = \{0, -1, -2, -3, -4\}$ В размещаем в таблице 3.5 (пример) в столбце, соответствующем режиму последовательного ключа.

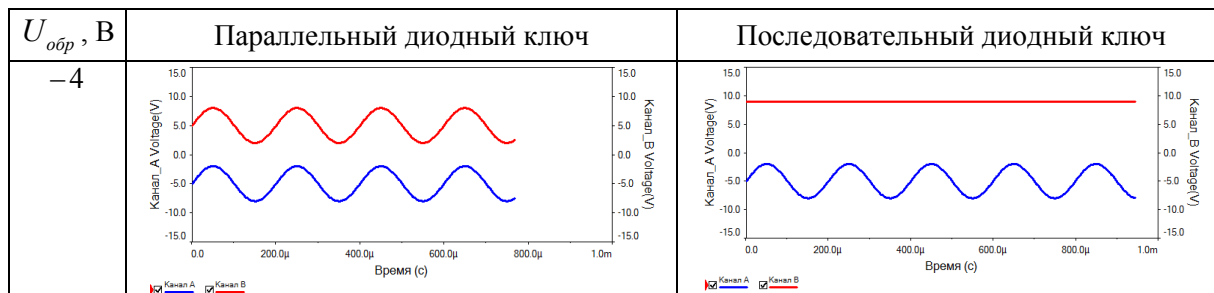
Таблица 3.4 (пример)

Последовательный ключ D2	V2 Обратное напряжение $U_{обр}$, В	XMM1, $U_{вх}$, В	XMM4, $U_{диода}$, В	XMM6 $U_{вых}$, мВ	XMM5 $I_{вых}$, мкА
Нулевой уровень включения	0	2,121	1,404	890,173	178,035
Ненулевой уровень включения	-0,5	2,121	1,594	686,242	137,248
	-1,0	2,121	1,769	486,305	97,261
	-1,5	2,121	1,924	295,942	59,188
	-2,0	2,121	2,048	125,490	25,098
	-2,5	2,121	2,117	10,337	2,067
	-3,0	2,121	2,120	5,361	1,072
	-3,5	2,121	2,120	4,960	0,992
	-4,0	2,121	2,120	4,679	0,936
	-4,5	2,121	2,120	4,440	0,888
	-5,0	2,121	2,120	4,251	0,850

Таблица 3.5 (пример)



Окончание табл. 3.5 (пример)



1.7. На рисунке 3.9 приведен график зависимости выходного напряжения диодного ограничителя от обратного напряжения $U_{вых} = f(U_{обр})$, а на рисунке 3.10 — тока, текущего через диодный ограничитель от обратного напряжения $I_{вых} = f(U_{обр})$.

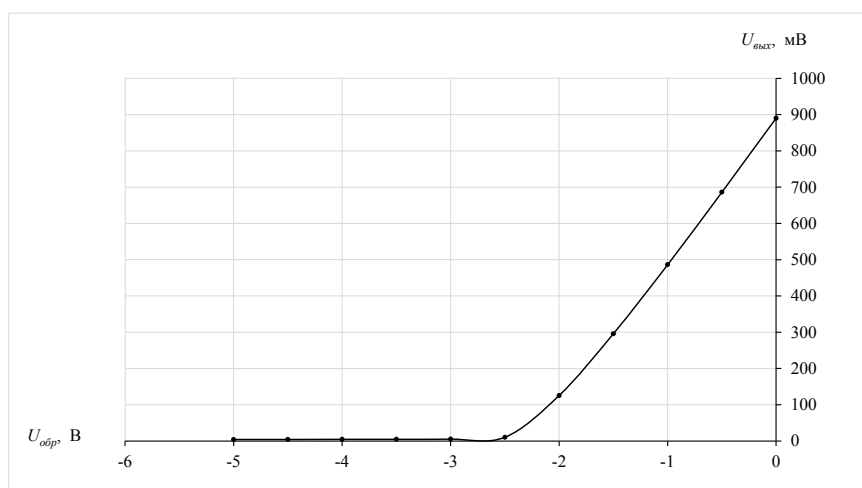


Рис. 3.9. Зависимость $U_{вых} = f(U_{обр})$ для последовательного диодного ключа

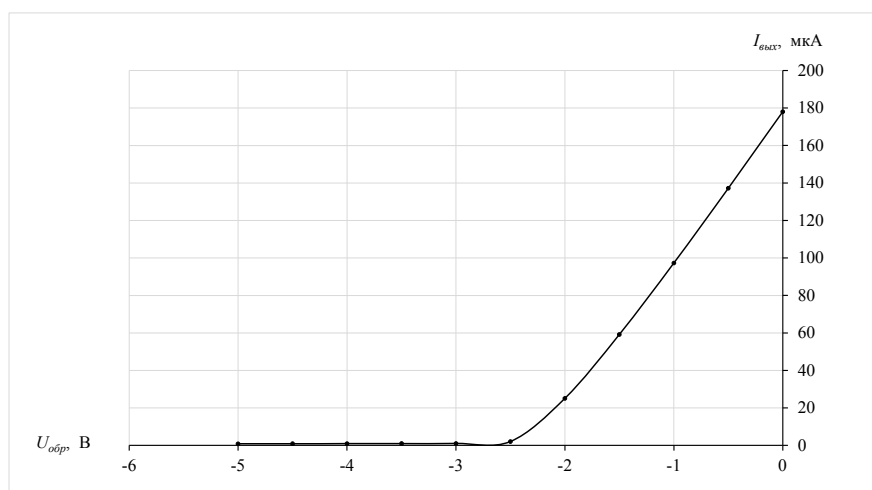


Рис. 3.10. Зависимость $I_{вых} = f(U_{обр})$ для последовательного диодного ключа

Задание 2. Исследовать работу амплитудного ограничителя на стабилитроне.

2.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 3.6.

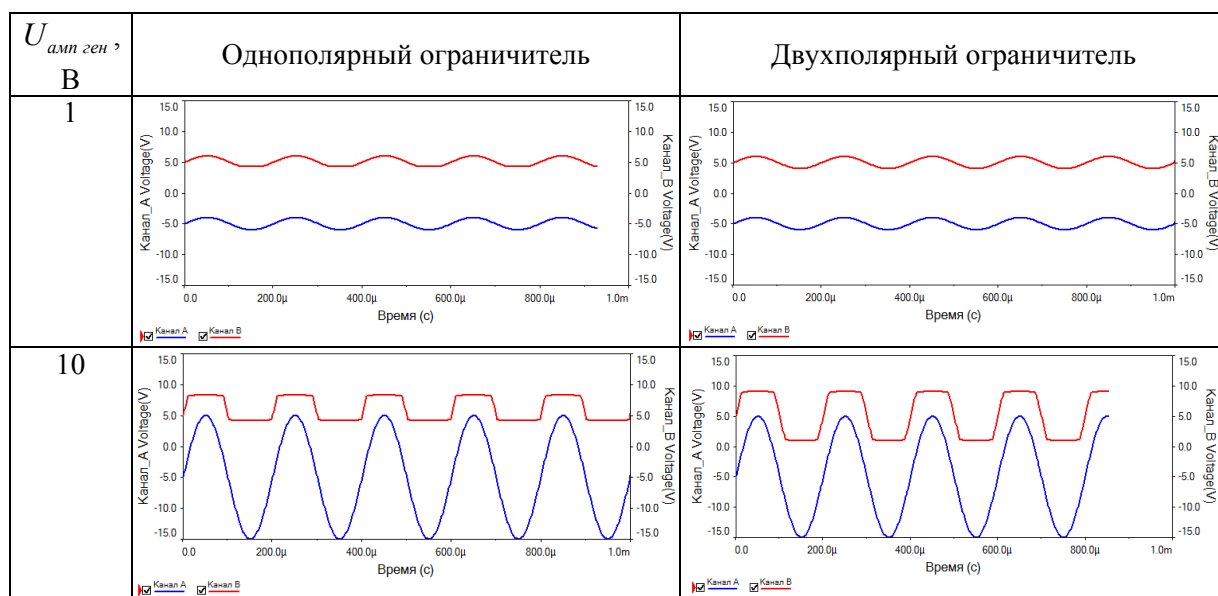
2.2. В качестве исследуемого примем кремниевый стабилитрон из таблицы 3.1, строка «ПР» — «Пример».

2.3—2.4. Исследуем однополярный ограничитель амплитуды. Для этого при помощи переключателя S1 устанавливаем однополярный режим работы схемы. Снимаем зависимости входного и выходного напряжений от напряжения на функциональном генераторе. Значения записываем в соответствующие строки таблицы 3.6 (пример) в столбец, соответствующий однополярному режиму работы. Осциллограммы процессов для значений напряжений на функциональном генераторе $U_{амп\ ген} = 1\text{ В}$ и $U_{амп\ ген} = 10\text{ В}$ размещаем в таблице 3.7 (пример) в столбце, соответствующем однополярному режиму работы.

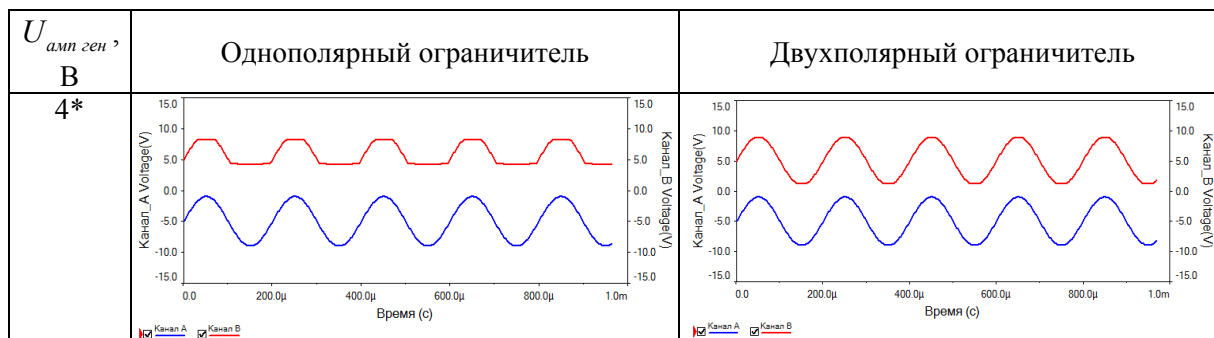
Таблица 3.6 (пример)

Амплитудное напряжение на функциональном генераторе $U_{амп\ ген}, \text{ В}$	XMM1 $U_{вх}, \text{ В}$	XMM2 $U_{вых}, \text{ В}$	
		Однополярный ограничитель амплитуды	Двухполярный ограничитель амплитуды
1	0,707	0,642	0,707
2	1,414	1,061	1,414
3	2,121	1,457	2,121
4*	2,828	1,680	2,796
5	3,536	1,768	3,135
6	4,243	1,819	3,318
7	4,950	1,854	3,437
8	5,657	1,879	3,524
9	6,364	1,898	3,589
10	7,071	1,914	3,641

Таблица 3.7 (пример)



Окончание табл. 3.7 (пример)



2.5—2.6. Исследуем двухполярный ограничитель амплитуды. Для этого при помощи переключателя S1 устанавливаем двухполярный режим работы схемы. Снимаем зависимости входного и выходного напряжений от напряжения на функциональном генераторе. Значения записываем в соответствующие строки таблицы 3.6 (пример) в столбец, соответствующий двухполярному режиму работы. Осциллограммы процессов для значений напряжений на функциональном генераторе $U_{амп\ ген} = 1$ В и $U_{амп\ ген} = 10$ В размещаем в таблице 3.7 (пример) в столбце, соответствующем двухполярному режиму работы.

В ходе эксперимента отмечаем, что начиная с напряжения $U_{амп\ ген} = 4$ В* на функциональном генераторе на осциллограмме становится заметно ограничение амплитуды. Этому напряжению соответствует входное напряжение на стабилитроне $U_{вх} \approx 2,8$ В. Для используемого стабилитрона согласно данным таблицы 3.1 номинальное напряжение стабилизации примерно равно $U_{ст\ ном} \approx 3,3$ В. Учитывая, что табличные данные приведены для реальных радиоэлементов, можно сделать вывод о том, что найденное значение напряжения стабилизации близко к табличному.

В таблице 3.7 (пример) также представлены осциллограммы, соответствующие амплитудному значению напряжения на функциональном генераторе 4 В.

2.7. На рисунке 3.11 приведены зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ для однополярного и двухполярного ограничителей амплитуды.

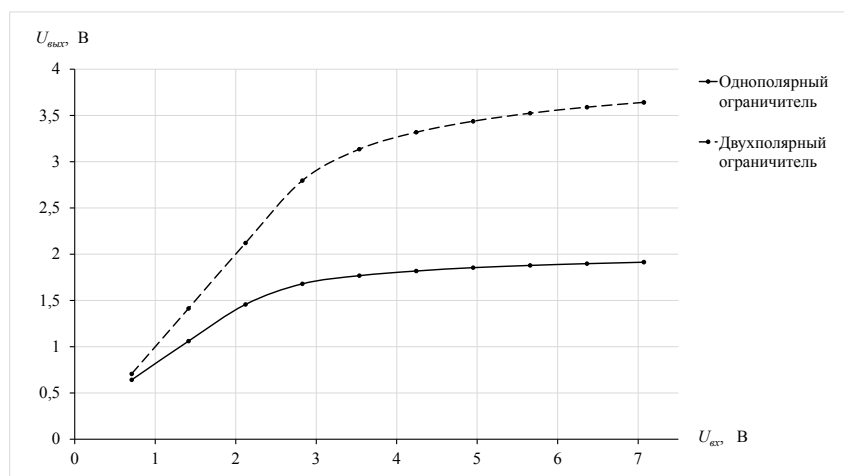


Рис. 3.11. Зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ для однополярного и двухполярного ограничителей амплитуды

4. Выпрямители напряжения

4.1. Темы для подготовки к лабораторной работе

Электрические переходы. Энергетические диаграммы и свойства $p-n$ -переходов. ВАХ $p-n$ -перехода. Устройство полупроводникового диода. Классификация диодов. ВАХ выпрямительного диода. Основные параметры выпрямительного диода. Влияние температуры на ВАХ выпрямительного диода. Назначение, типовая схема и принцип действия однополупериодного выпрямителя напряжения. Назначение, типовая схема и принцип действия мостового выпрямителя напряжения.

4.2. Контрольные вопросы

1. Как образуется электронно-дырочный переход?
2. Устройство и назначение полупроводниковых диодов.
3. Привести типовую ВАХ выпрямительного диода.
4. Привести основные параметры выпрямительного диода.
5. Как влияет температура на вид ВАХ выпрямительного диода?
6. Привести классификацию и области применения диодов и их типовые ВАХ.
7. Привести схему и объяснить принцип действия однополупериодного выпрямителя напряжения.
8. Привести схему и объяснить принцип действия мостового выпрямителя напряжения.
9. Как определяется коэффициент пульсации?

4.3. Лабораторная работа № 4

Исследование однополупериодного и мостового выпрямителей напряжения

Цель работы: экспериментально исследовать работу однополупериодного и мостового выпрямителей напряжения.

Задание 1. Исследовать работу однополупериодного выпрямителя напряжения.

1.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 4.1. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров, функционального генератора и осциллографа.

1.2. Диод, а также значения сопротивления резистора R_1 и емкости конденсатора C_1 следует выбрать в соответствии с номером своего варианта из таблицы 4.1. Установить параметры вольтметров ХММ1, ХММ2: MODE — AC, $R_V = 10 \text{ МОм}$; вольтметра ХММ3: MODE — DC, $R_V = 10 \text{ МОм}$. Параметры двухканального осциллографа ХСC1: режим работы «DC»; чувствительность по каналам «А» и «В» — 10 В/дел (V/Div); син-

хронизация — «Норм»; длительность развертки в режиме «Y/T» — 10 мс/дел (ms/Div). Для большего удобства работы с осциллографом в процессе эксперимента можно изменить его чувствительность по каналам «А» и «В» и (или) время развертки, а также рекомендуется установить смещения осциллограмм по каналам: «А» — смещение $Y = -2$, «В» — смещение $Y = 0$.

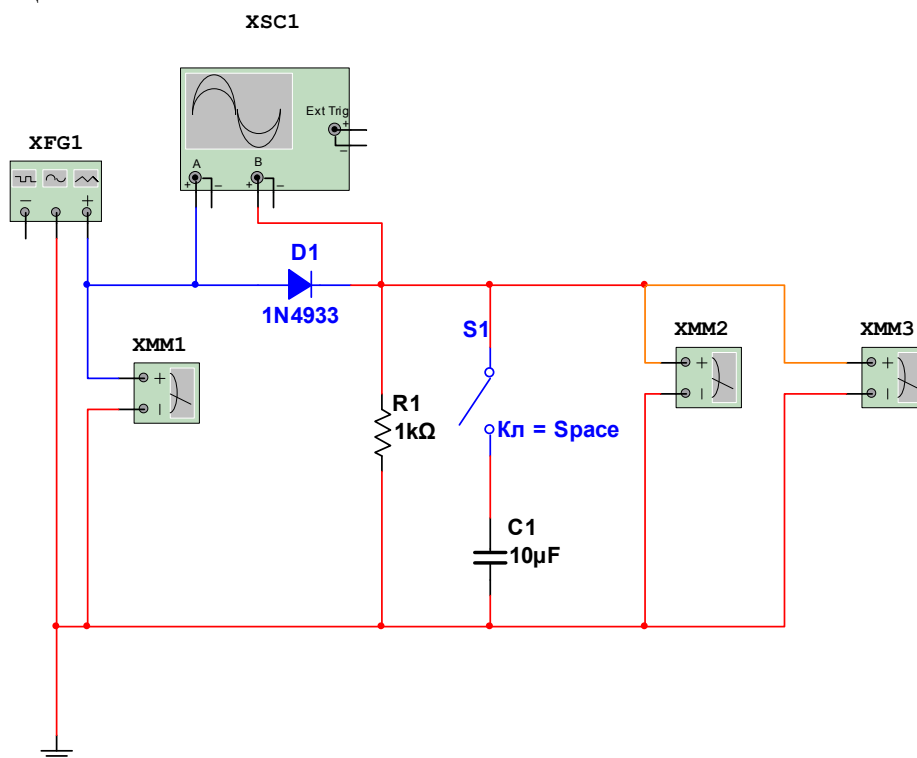


Рис. 4.1. Схема для исследования однополупериодного выпрямителя напряжения.

Начальные настройки функционального генератора XFG1:

- форма сигнала — синусоидальный;
- частота — 50 кГц (соответствует примеру);
- амплитуда — 10 В (V_p) (соответствует примеру);
- смещение — 0 В (V).

На рисунке 4.1 диод D1, значения сопротивления резистора R_1 и емкости конденсатора C_1 соответствуют исходным данным из таблицы 4.1, строка «ПР» — «Пример».

В ходе выполнения лабораторной работы будет требоваться сохранить вид осциллограмм в отчете. Для этой цели полезно воспользоваться рекомендациями из п. 1.8 лабораторной работы № 3 (функции графопостроителя).

Таблица 4.1

№	Кремниевые диоды (Si)	Максимальное прямое напряжение $U_{пр\max}$, В	Сопротивление резистора R_1 , кОм	Емкость конденсатора C_1 , мкФ	Частота сигнала с функционального генератора, Гц	Амплитуда сигнала с функционального генератора, В
1	1N4245GP	1,2	2	12	35	50
2	1N4246GP	1,2	1	8	60	35
3	1N4247GP	1,2	3	4	75	20
4	1N4248GP	1,2	2	5	40	30

Окончание табл. 4.1

№	Кремниевые диоды (Si)	Максимальное прямое напряжение $U_{пр\max}$, В	Сопротивление резистора R_1 , кОм	Емкость конденсатора C_1 , мкФ	Частота сигнала с функционального генератора, Гц	Амплитуда сигнала с функционального генератора, В
5	1N4249GP	1,2	3	7	15	25
6	1N4383GP	1	1	9	65	45
7	1N4384GP	1	1	13	30	55
8	1N4385GP	1	3	6	45	40
9	1N4585GP	1	2	11	70	60
10	1N4586GP	1	1	3	55	15
ПП	1N4933	1,2	1	10	50	10

1.3. Установить ключ S1 в разомкнутое положение. Включить схему и зафиксировать осциллограммы напряжений.

1.4. Установить ключ S1 в замкнутое положение, включить схему и зафиксировать полученные осциллограммы.

1.5. При замкнутом ключе S1, не изменяя значения емкости конденсатора C_1 , произвести измерения напряжений U_{\max} и U_{\min} и вычислить коэффициенты пульсации для различных значений сопротивлений резистора R согласно таблице 4.2. Для более точных измерений целесообразно варьировать чувствительностью по каналу «В» и смещением по оси Y.

Таблица 4.2

R , кОм	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
R_1			
$2 \cdot R_1$			
$3 \cdot R_1$			
$4 \cdot R_1$			
$5 \cdot R_1$			

Коэффициент пульсации вычисляется по следующей формуле:

$$K = \frac{U_{ПЕР}}{U_{ПОСТ}} \cdot 100\%,$$

где $U_{ПЕР} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}$ — амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения; $U_{ПОСТ} = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}$ — амплитуда постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

На рисунке 4.2 показаны напряжения U_{\max} и U_{\min} . Для более точного отсчета этих напряжений целесообразно использовать маркеры осциллографа. Для рассматриваемого примера $U_{\max} = 9,226$ В, $U_{\min} = 2,003$ В.

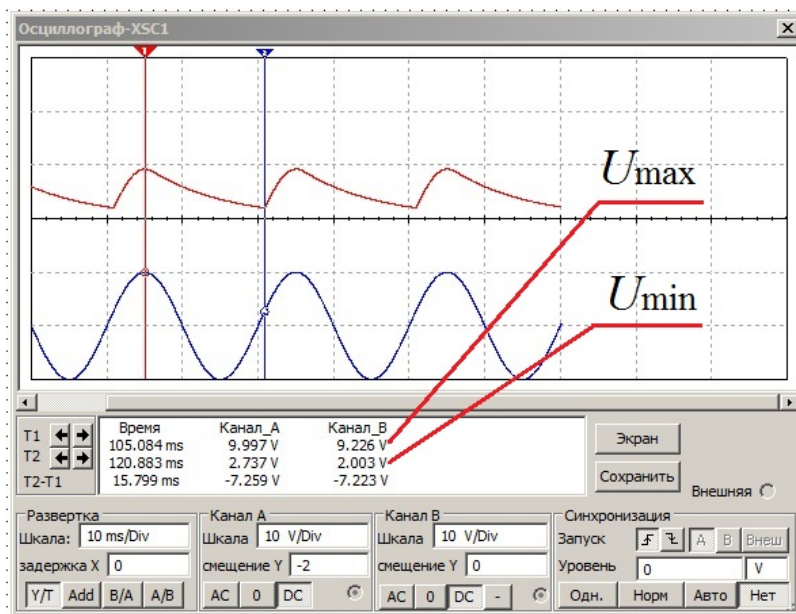


Рис. 4.2. Значения напряжений U_{\max} и U_{\min} (определяются для канала «В»)

1.6. По полученным данным построить график зависимости коэффициента пульсации от величины сопротивления резистора: $K = f(R)$.

1.7. Установить значение сопротивления резистора R_1 (в соответствии со своим вариантом) и, не изменяя его значение, произвести измерения напряжений U_{\max} и U_{\min} и вычислить коэффициенты пульсации для различных значений емкости конденсатора C согласно таблице 4.3. Для более точных измерений целесообразно варьировать чувствительностью по каналу «В» и смещением по оси Y.

Таблица 4.3

C , мкФ	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
C_1			
$2 \cdot C_1$			
$3 \cdot C_1$			
$4 \cdot C_1$			
$5 \cdot C_1$			

1.8. По полученным данным построить график зависимости коэффициента пульсации от величины емкости конденсатора: $K = f(C)$.

1.9. При замкнутом ключе S1 установить значения сопротивления резистора $R = 5 \cdot R_1$ и емкости конденсатора $C = 5 \cdot C_1$. Включить схему, зафиксировать полученные осциллограммы и вычислить коэффициент пульсации.

Задание 2. Исследовать работу мостового выпрямителя.

2.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 4.3. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов функционального генератора и осциллографа.

На рисунке 4.3 символами D1, D2, D3 и D4 обозначены диоды одной и той же марки, на основе которых собран мостовой выпрямитель.

2.2. Марку диодов (D1—D4), значения сопротивления резистора R_1 , емкости конденсатора C_1 , а также настройки осциллографа и функционального генератора выбрать в соответствии с п. 1.2.

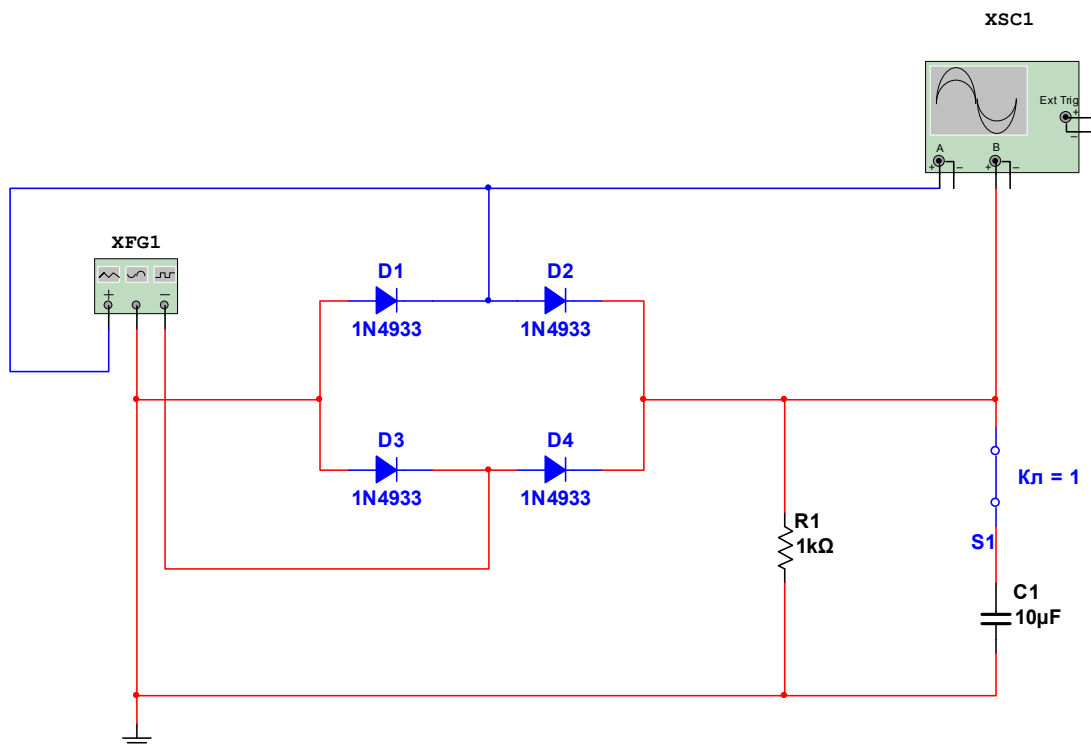


Рис. 4.3. Схема для исследования мостового выпрямителя напряжения

2.3. Установить ключ S1 в разомкнутое положение. Включить схему и зафиксировать осциллограммы напряжений.

2.4. Установить ключ S1 в замкнутое положение, включить схему и зафиксировать полученные осциллограммы.

2.5. Повторить действия п. 1.5 и 1.6.

2.6. Повторить действия п. 1.7 и 1.8.

2.7. Повторить действия п. 1.9.

2.8. Сравнить полученные зависимости коэффициента пульсации $K = f(R)$ и $K = f(C)$ для мостовой схемы с аналогичными зависимостями, полученными для однополупериодного выпрямителя. Сделать вывод о сравнительной эффективности рассмотренных схем выпрямления.

4.4. Пример выполнения лабораторной работы

Задание 1. Исследовать работу однополупериодного выпрямителя напряжения.

1.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 4.1.

1.2. В качестве исследуемого примем кремниевый диод из таблицы 4.1, строка «ПР» — «Пример».

1.3. При разомкнутом ключе S1 (конденсатор отключен) снимаем осциллограмму на выходе диода. Вид осциллограммы представлен на рисунке 4.4.

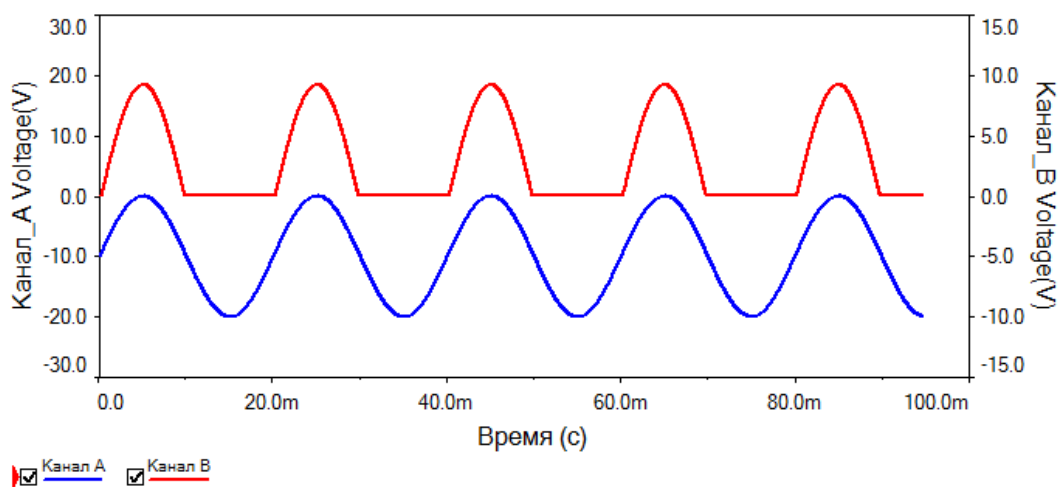


Рис. 4.4. Осциллограмма процесса при отключенном конденсаторе

1.4. При замкнутом ключе (конденсатор подключен) снимаем осциллограмму на выходе диода. Вид осциллограммы представлен на рисунке 4.5.

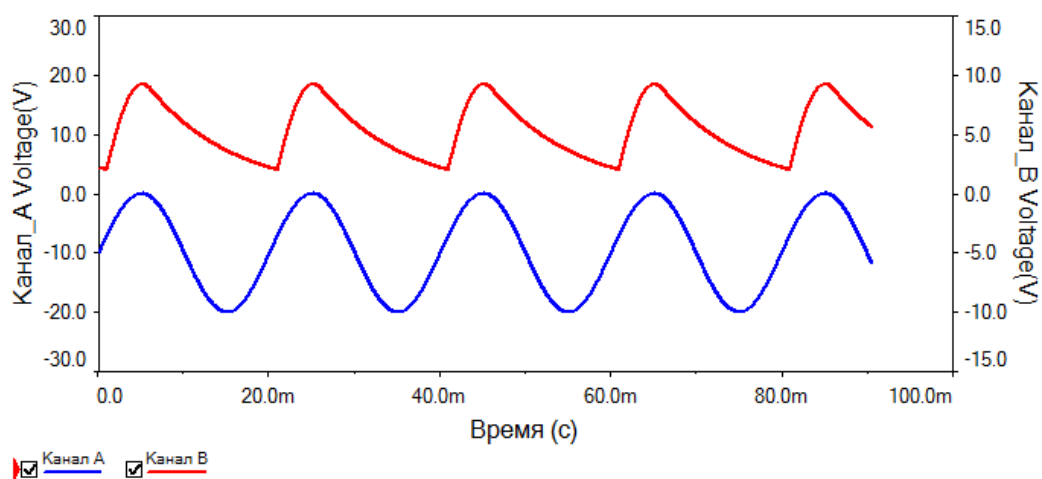


Рис. 4.5. Осциллограмма процесса при подключенном конденсаторе

1.5. При замкнутом ключе S1 (конденсатор подключен) для фиксированного значения емкости конденсатора C , равного C_1 , при различных значениях сопротивления резистора R вычисляем коэффициент пульсации. Результаты вычислений заносим в таблицу 4.2 (пример, диод).

Таблица 4.2 (пример, диод)

R , кОм	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
$R_1 = 1$	9,226	2,003	0,643
$2 \cdot R_1 = 2$	9,253	4,139	0,382
$3 \cdot R_1 = 3$	9,270	5,330	0,270
$4 \cdot R_1 = 4$	9,280	6,067	0,209
$5 \cdot R_1 = 5$	9,286	6,582	0,170

1.6. По полученным данным строим график зависимости коэффициента пульсации от величины сопротивления резистора: $K = f(R)$ (рис. 4.6).

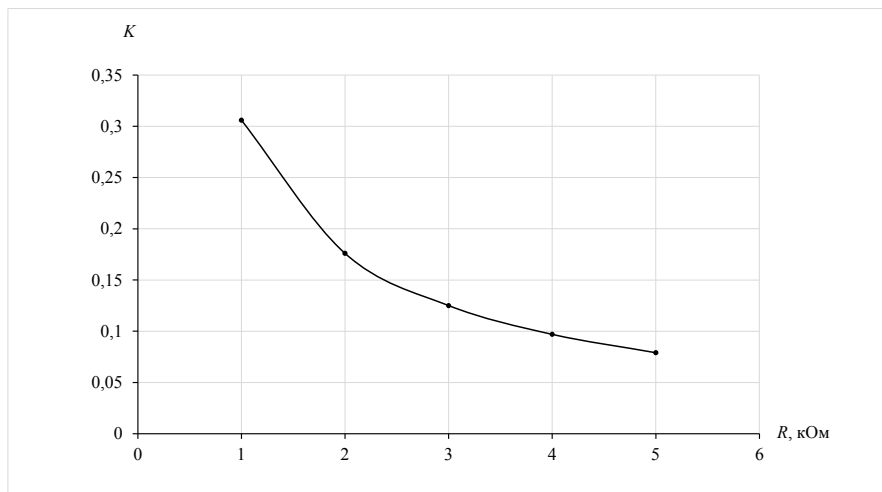


Рис. 4.6. Зависимость коэффициента пульсации K от значения сопротивления R

1.7. При замкнутом ключе S1 (конденсатор подключен) для фиксированного значения сопротивления резистора R , равного R_1 , при различных значениях емкости конденсатора C вычисляем коэффициент пульсации. Результаты вычислений заносим в таблицу 4.3 (пример, диод).

Таблица 4.3 (пример, диод)

C , мкФ	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
$C_1 = 10$	9,226	2,003	0,643
$2 \cdot C_1 = 20$	9,222	4,126	0,382
$3 \cdot C_1 = 30$	9,221	5,303	0,270
$4 \cdot C_1 = 40$	9,218	6,032	0,209
$5 \cdot C_1 = 50$	9,214	6,540	0,170

1.8. По полученным данным строим график зависимости коэффициента пульсации от величины емкости конденсатора: $K = f(C)$ (рис. 4.7).

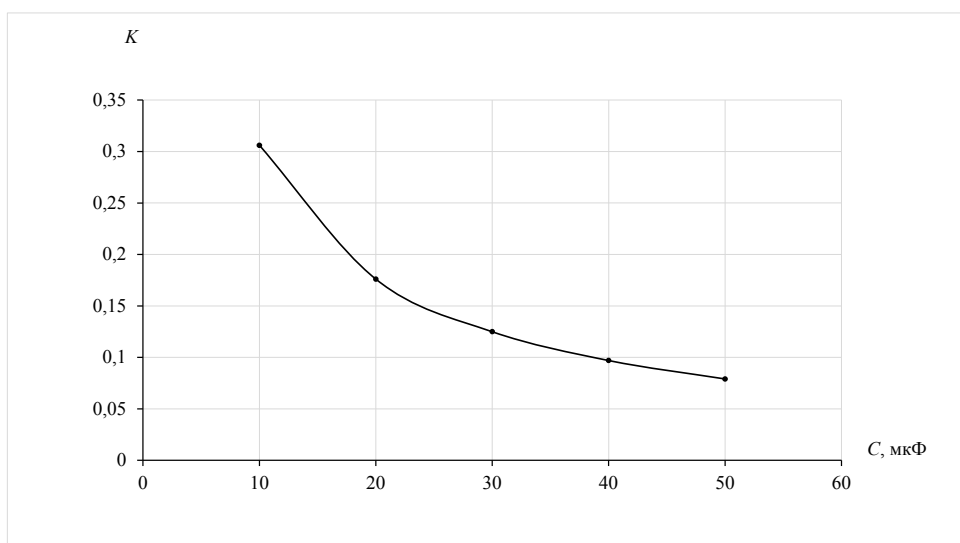


Рис. 4.7. Зависимость коэффициента пульсации K от значения емкости конденсатора C

1.9. При замкнутом ключе S1 (конденсатор подключен) устанавливаем значение сопротивления резистора $R = 5 \cdot R_1 = 50$ кОм и значение емкости конденсатора $C = 5 \cdot C_1 = 50$ мкФ. Вычисляем коэффициент пульсации и фиксируем осциллограмму процессов (рис. 4.8).

R_1 , кОм	C_1 , мкФ	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
$5R = 5$	$5C = 50$	9,248	8,594	0,037

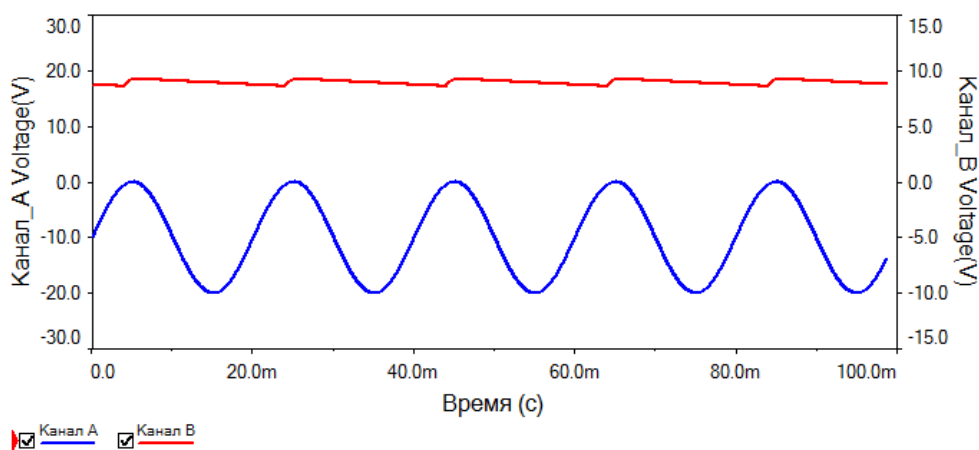


Рис. 4.8. Осциллограмма процесса при $R = 5 \cdot R_1 = 50$ кОм и $C = 5 \cdot C_1 = 50$ мкФ

Задание 2. Исследовать работу мостового выпрямителя.

2.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 4.3.

2.2. Исследуемый мостовой выпрямитель собираем на одинаковых кремниевых диодах, соответствующих диоду из таблицы 4.1, строка «ПР» — «Пример».

2.3. При разомкнутом ключе S1 (конденсатор отключен) снимаем осциллограмму на выходе диодного моста. Вид осциллограммы представлен на рисунке 4.9.

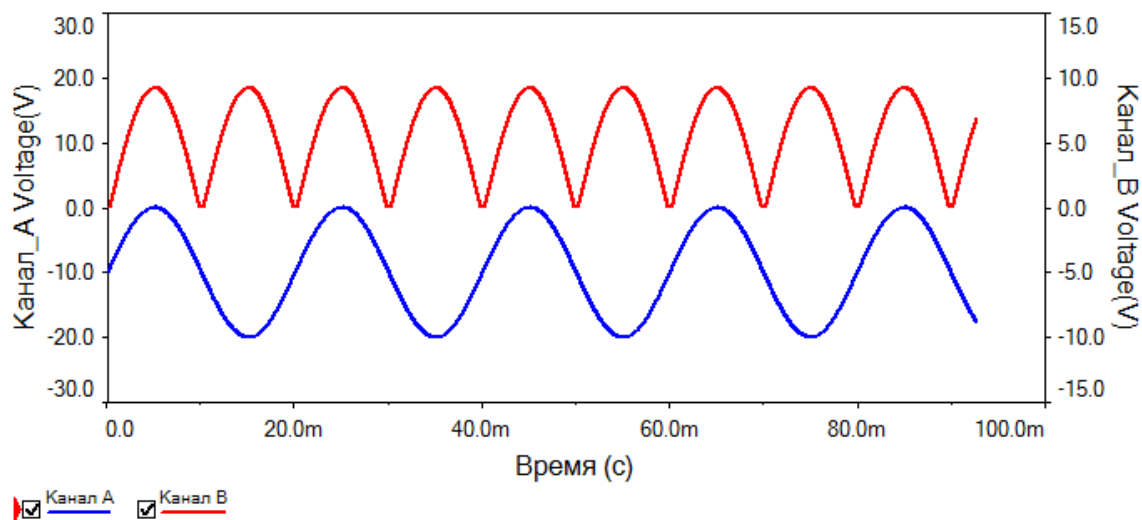


Рис. 4.9. Осциллограмма процесса при отключенном конденсаторе

2.4. При замкнутом ключе S1 (конденсатор подключен) снимаем осциллограмму на выходе диодного моста. Вид осциллограммы представлен на рисунке 4.10.

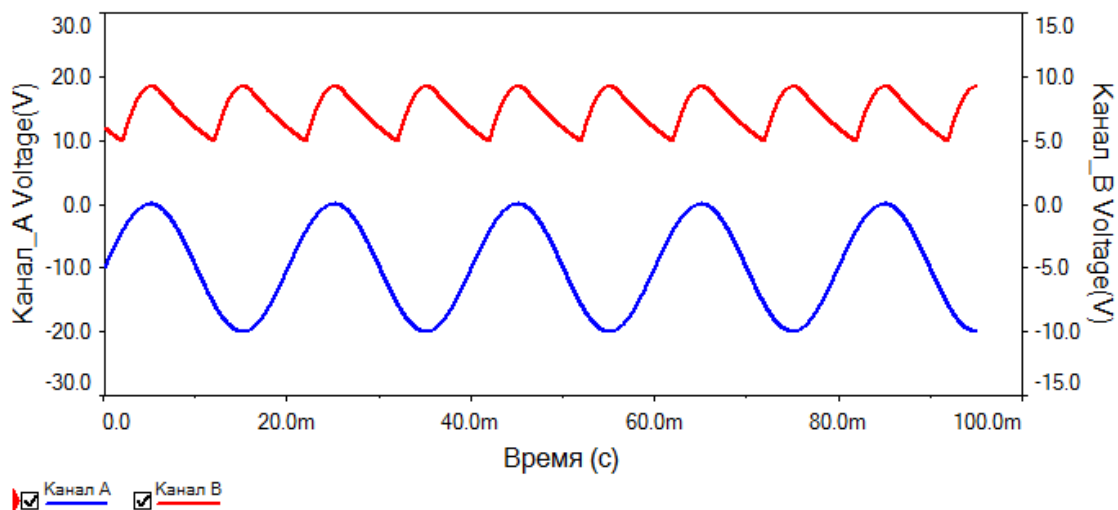


Рис. 4.10. Осциллограмма процесса при подключенном конденсаторе

2.5. При замкнутом ключе S1 (конденсатор подключен) для фиксированного значения емкости конденсатора C , равного C_1 , при различных значениях сопротивления резистора R вычисляем коэффициент пульсации.

Таблица 4.2 (пример, мост)

R , кОм	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
$R_1 = 1$	9,227	4,907	0,306
$2 \cdot R_1 = 2$	9,255	6,483	0,176
$3 \cdot R_1 = 3$	9,269	7,214	0,125
$4 \cdot R_1 = 4$	9,279	7,643	0,097
$5 \cdot R_1 = 5$	9,286	7,927	0,079

По полученным данным строим график зависимости коэффициента пульсации от величины сопротивления резистора: $K = f(R)$ (рис. 4.11).

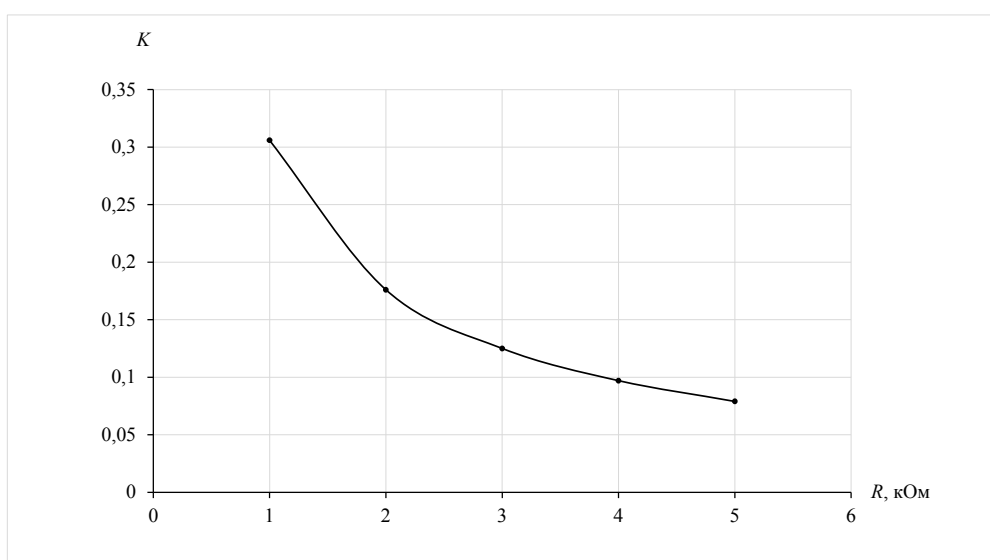


Рис. 4.11. Зависимость коэффициента пульсации K от значения сопротивления R

2.6. При замкнутом ключе S1 (конденсатор подключен) для фиксированного значения сопротивления резистора R , равного R_1 , при различных значениях емкости конденсатора C вычисляем коэффициент пульсации. Результаты вычислений заносим в таблицу 4.3 (пример, мост).

Таблица 4.3 (пример, мост)

C , мкФ	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
$C_1 = 10$	9,227	4,907	0,306
$2 \cdot C_1 = 20$	9,225	6,461	0,176
$3 \cdot C_1 = 30$	9,221	7,175	0,125
$4 \cdot C_1 = 40$	9,218	7,591	0,097
$5 \cdot C_1 = 50$	9,215	7,866	0,079

По полученным данным строим график зависимости коэффициента пульсации от величины емкости конденсатора: $K = f(C)$ (рис. 4.12).

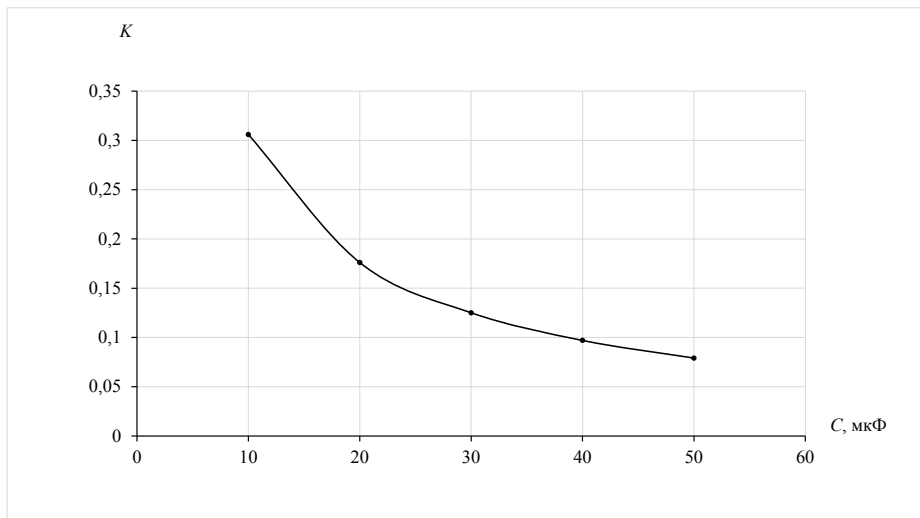


Рис. 4.12. Зависимость коэффициента пульсации K от значения емкости конденсатора C

2.7. При замкнутом ключе S1 (конденсатор подключен) устанавливаем значение сопротивления резистора $R = 5 \cdot R_1 = 50$ кОм и значение емкости конденсатора $C = 5 \cdot C_1 = 50$ мкФ. Вычисляем коэффициент пульсации и фиксируем осциллограмму процессов (рис. 4.13).

R_1 , кОм	C_1 , мкФ	U_{\max} , В	U_{\min} , В	K
$5R = 5$	$5C = 50$	9,248	8,933	0,017

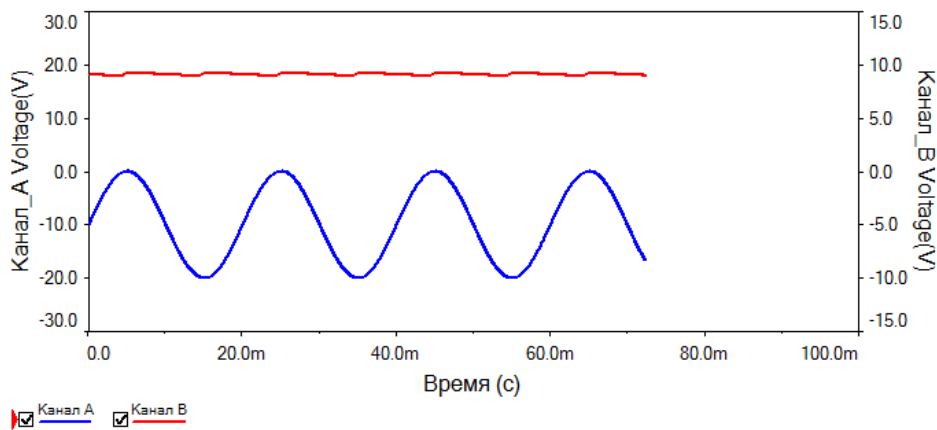


Рис. 4.13. Осциллограмма процесса при $R = 5 \cdot R_1 = 50$ кОм и $C = 5 \cdot C_1 = 50$ мкФ

2.8. На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что выпрямитель, собранный по мостовой схеме, обладает лучшими качествами (меньшим значением коэффициента пульсации). При увеличении значений сопротивления резистора R_1 и емкости конденсатора C_1 коэффициент пульсаций резко уменьшается. Но при этом зависимости коэффициента пульсации $K = f(R)$ и $K = f(C)$ для однополупериодной и мостовой схем выпрямления совпадают.

5. Биполярные транзисторы

5.1. Темы для подготовки к лабораторной работе

Электрические переходы. Энергетические диаграммы и свойства $p-n$ -переходов. Строение и физические процессы, происходящие в биполярном транзисторе. Виды биполярных транзисторов. Схемы включения и режимы работы биполярных транзисторов. Усилительные свойства биполярных транзисторов. Статические характеристики биполярных транзисторов для различных схем включения. Линия нагрузки. Предельные режимы работы биполярных транзисторов, гиперболола допустимых мощностей.

5.2. Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора.
2. Привести схемы включения биполярных транзисторов.
3. Назвать и охарактеризовать режимы работы биполярных транзисторов.
4. Каким образом происходит усиление электрических сигналов в биполярном транзисторе?
5. Изобразить и объяснить типовые выходные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой.
6. Изобразить и объяснить типовые выходные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
7. Изобразить и объяснить типовые входные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой.
8. Изобразить и объяснить типовые входные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

5.3. Лабораторная работа № 5

Исследование биполярных транзисторов

Цель работы: экспериментально исследовать работу биполярных транзисторов, включенных по схемам с общей базой и с общим эмиттером.

Задание 1. Исследовать работу биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой (ОБ). Снять статические характеристики.

1.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 5.1. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров и амперметров.

1.2. Транзистор следует выбрать в соответствии с номером своего варианта из таблицы 5.1. **Обратить внимание на тип проводимости биполярного транзистора!** В соответствии с типом проводимости руководствоваться рисунком 5.1, *а* или *б*. Установить параметры вольтметров ХММ2, ХММ4: MODE — DC, $R_V = 10 \text{ МОм}$; амперметров ХММ1, ХММ3: MODE — DC, $R_A = 10 \text{ мкОм}$. Для задания тока в цепи эмиттера

необходимо установить резистор, например с сопротивлением $R_1 = 1 \text{ кОм}$. На рисунке 5.1 транзисторы Q1 и Q2 соответствуют исходным данным из таблицы 5.1, строки «ПР» — «Пример».

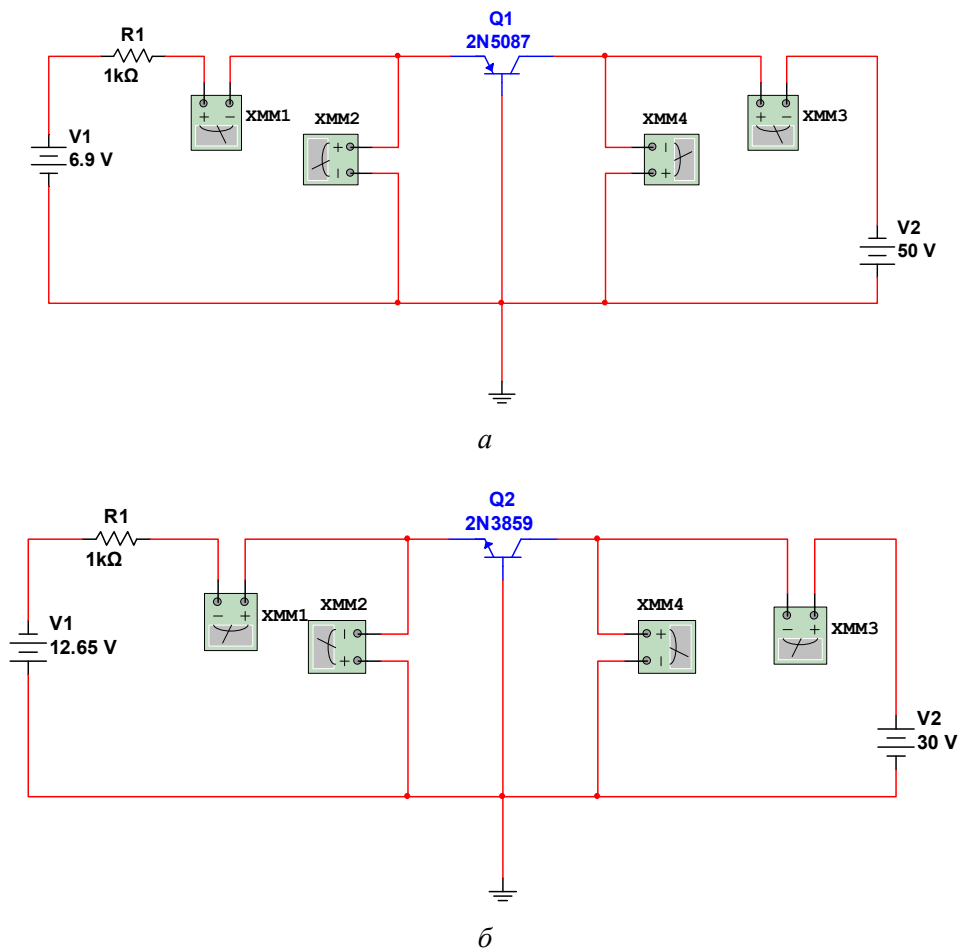


Рис. 5.1. Включение биполярных транзисторов по схеме с общей базой:
 а — *p-n-p* биполярный транзистор; б — *n-p-n* биполярный транзистор

В таблице 5.1 приведены максимальные значения токов эмиттера $I_{Э\max}$ и коллектора $I_{К\max}$, вычисленные по формулам

$$I_{Э\max} = \frac{P_{К\max}}{U_{КБ\max}}, \quad I_{К\max} = \frac{P_{К\max}}{U_{КЭ\max}}.$$

Величины $P_{К\max}$, $U_{КБ\max}$ и $U_{КЭ\max}$ являются паспортными данными транзисторов.

Таблица 5.1

№	Биполярный транзистор	Тип	$P_{К\max}$, Вт	$U_{КБ\max}$, В	$U_{КЭ\max}$, В	$I_{Э\max}$, А	$I_{К\max}$, А
1	2N2712	<i>n-p-n</i>	0,2	18	18	0,011	0,011
2	2N3702	<i>p-n-p</i>	0,36	40	25	0,009	0,014
3	2N2714	<i>n-p-n</i>	0,2	18	18	0,011	0,011

№	Биполярный транзистор	Тип	$P_{K\max}$, Вт	$U_{KB\max}$, В	$U_{KЭ\max}$, В	$I_{Э\max}$, А	$I_{K\max}$, А
4	2N3703	<i>p-n-p</i>	0,36	50	30	0,0072	0,012
5	2N2923	<i>n-p-n</i>	0,36	25	25	0,014	0,014
6	2N4061	<i>p-n-p</i>	0,36	30	30	0,012	0,012
7	2N2924	<i>n-p-n</i>	0,36	25	25	0,014	0,014
8	2N4062	<i>p-n-p</i>	0,36	30	30	0,012	0,012
9	2N3711	<i>n-p-n</i>	0,36	30	30	0,012	0,012
10	2N5086	<i>p-n-p</i>	0,31	50	50	0,0062	0,0062
ПР	2N3859	<i>n-p-n</i>	0,36	30	30	0,012	0,012
ПР	2N5087	<i>p-n-p</i>	0,31	50	50	0,0062	0,0062

1.3. Подготовить исходные данные для экспериментальных исследований в таблице 5.2. Для этого вычислить по формулам из столбца « $I_{Э}$, формула» таблицы 5.2 значения эмиттерных токов $I_{Э1}$, $I_{Э2}$, $I_{Э3}$, и $I_{Э4}$ и записать их в соответствующий столбец для « $I_{Э}$, значение». Величину $I_{Э\max}$ взять из таблицы 5.1 для транзистора, соответствующего своему варианту.

Таблица 5.2

U_{BX} , В (V1)	Транзистор МАРКА, <i>p-n-p</i> (или <i>n-p-n</i>), ОБ		$U_{KB0} =$, В (V2)		$U_{KB1} = \frac{U_{KB\max}}{5}$, В (V2)		$U_{KB2} = \frac{U_{KB\max}}{1,5}$, В (V2)		$U_{KB3} = U_{KB\max}$, В (V2)	
	$I_{Э}$, формула	$I_{Э}$, А, значение	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ
0,65	$I_{Э0} =$									
	$I_{Э1} = \frac{I_{Э\max}}{5} =$									
	$I_{Э2} = \frac{2 \cdot I_{Э\max}}{5} =$									
	$I_{Э3} = \frac{3 \cdot I_{Э\max}}{5} =$									
	$I_{Э4} = \frac{4 \cdot I_{Э\max}}{5} =$									
	$I_{Э5} = I_{Э\max} =$									

Вычислить значения напряжений U_{KB1} и U_{KB2} по формулам, имеющимся в верхней строке таблицы 5.2. Значения вычисленных напряжений записать в строку, расположенную ниже и подкрашенную серым цветом. Величину $U_{KB\max}$ взять из таблицы 5.1 для транзистора, соответствующего своему варианту.

Вычисленные значения эмиттерных токов $I_{\mathcal{E}}$ и напряжений между коллектором и базой U_{KBi} в процессе эксперимента можно контролировать по приборам. Значениям $I_{\mathcal{E}}$ и U_{KBi} соответствуют показания приборов, представленных в таблице 5.3.

Таблица 5.3

$I_{\mathcal{E}}$	U_{KBi}
ХММ1	ХММ4

1.4. Установить значение напряжения U_{KB} равным $U_{KB\max}$ (V2). Запустить схему и, плавно изменяя напряжение U_{BX} (V1), получить значение эмиттерного тока, равное $I_{\mathcal{E}\max}$ (показание амперметра ХММ1). Записать это значение в столбец « U_{BX} (V1)» таблицы 5.2 слева от значения эмиттерного тока $I_{\mathcal{E}\max}$.

Произвести аналогичные действия для остальных значений вычисленных эмиттерных токов $I_{\mathcal{E}1}$, $I_{\mathcal{E}2}$, $I_{\mathcal{E}3}$ и $I_{\mathcal{E}4}$. Найденные значения входных напряжений U_{BX} (V1) записать в столбец « U_{BX} (V1)» таблицы 5.2 слева от соответствующих значений эмиттерных токов. Значения эмиттерных токов $I_{\mathcal{E}1}$, $I_{\mathcal{E}2}$, $I_{\mathcal{E}3}$ и $I_{\mathcal{E}4}$ следует также контролировать при помощи амперметра ХММ1.

1.5. Установить величину входного напряжения U_{BX} (V1) равной 0,65 В (первое значение в столбце « U_{BX} , V1»). Установить значение напряжения U_{KB0} (V2) равным 0,1 В (первое значение в строке напряжений для U_{KB}). Запустить схему и записать в таблицу 5.2 значения коллекторного тока I_K и напряжения $U_{\mathcal{E}B}$ для установленных величин U_{BX} (V1) и U_{KB0} (V2). Значениям I_K и $U_{\mathcal{E}B}$ соответствуют показания приборов, представленных в таблице 5.4.

Таблица 5.4

I_K	$U_{\mathcal{E}B}$
ХММ3	ХММ2

1.6. Не изменяя величину входного напряжения U_{BX} (V1), последовательно устанавливать значения напряжения U_{KB} в соответствии с таблицей 5.2 и производить замеры коллекторного тока I_K и напряжения $U_{\mathcal{E}B}$. Измеренные значения величин вписывать в соответствующие ячейки таблицы 5.2.

1.7. Установить следующее значение входного напряжения из столбца « U_{BX} , (V1)» и повторить действия п. 1.6.

1.8. На основе полученных результатов построить следующие статические характеристики транзистора:

- входные $I_{\mathcal{E}} = f(U_{\mathcal{ЭБ}})$ для $U_{\mathcal{КБ0}}, U_{\mathcal{КБ1}}, U_{\mathcal{КБ2}}, U_{\mathcal{КБ3}}$;
- выходные $I_{\mathcal{К}} = f(U_{\mathcal{КБ}})$ для $I_{\mathcal{Э0}}, I_{\mathcal{Э1}}, I_{\mathcal{Э2}}, I_{\mathcal{Э3}}, I_{\mathcal{Э4}}, I_{\mathcal{Э5}}$;
- обратной передачи по напряжению $U_{\mathcal{ЭБ}} = f(U_{\mathcal{КБ}})$ для $I_{\mathcal{Э0}}, I_{\mathcal{Э1}}, I_{\mathcal{Э2}}, I_{\mathcal{Э3}}, I_{\mathcal{Э4}}, I_{\mathcal{Э5}}$;
- передачи по току $I_{\mathcal{К}} = f(I_{\mathcal{Э}})$ для $U_{\mathcal{КБ0}}, U_{\mathcal{КБ1}}, U_{\mathcal{КБ2}}, U_{\mathcal{КБ3}}$.

Одноименные характеристики следует выполнить на одном графическом поле (все-го четыре поля с графиками).

Задание 2. Исследовать работу биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ). Снять статические характеристики.

2.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 5.2. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров и амперметров.

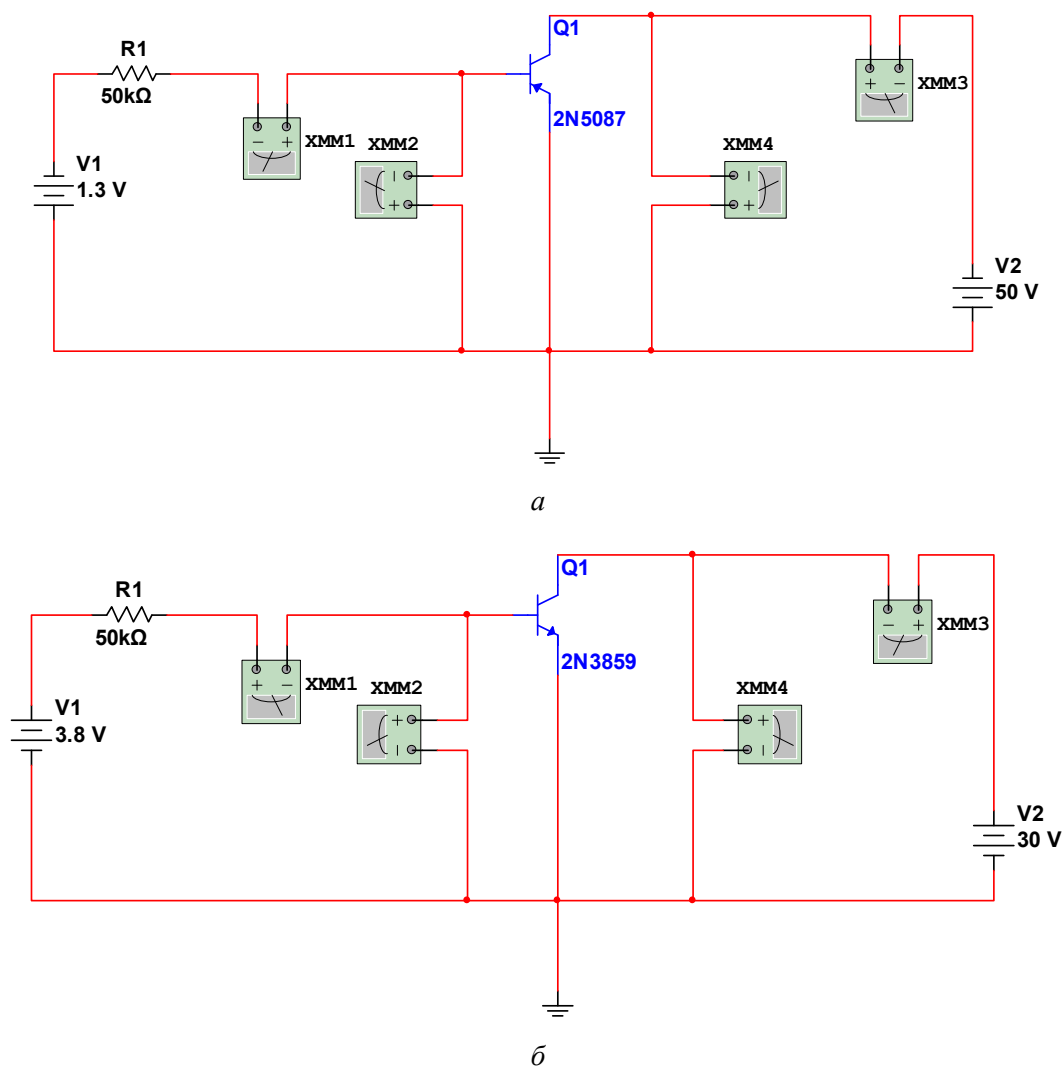


Рис. 5.2. Включение биполярных транзисторов по схеме с общим эмиттером: *а* — *p-n-p* биполярный транзистор; *б* — *n-p-n* биполярный транзистор

2.2. Марку транзистора следует оставить ту же, что и в задании 1, в соответствии с номером своего варианта из таблицы 5.1. **Обратить внимание на тип проводимости биполярного транзистора!** В соответствии с типом проводимости руководствоваться рисунком 5.2, *a* или *б*. Параметры измерительных приборов также оставить прежними — вольтметров ХММ2, ХММ4: MODE — DC, $R_V = 10$ МОм; амперметров ХММ1, ХММ3: MODE — DC, $R_A = 10$ мкОм. Для задания тока в цепи базы необходимо установить резистор, например с сопротивлением $R_1 = 50$ кОм. На рисунке 5.2 транзисторы Q1 соответствуют исходным данным из таблицы 5.1, строки «ПР» — «Пример».

2.3. Подготовить исходные данные для экспериментальных исследований в таблице 5.5. Сначала необходимо вычислить значения напряжений $U_{KЭ1}$ и $U_{KЭ2}$ по формулам, имеющимся в верхней строке таблицы 5.5. Значения вычисленных напряжений записать в строку, расположенную ниже и подкрашенную серым цветом. Величину $U_{KЭ\max}$ взять из таблицы 5.1 для транзистора, соответствующего своему варианту.

Таблица 5.5

U_{BX} , В (V1)	Транзистор МАРКА, <i>p-n-p</i> (или <i>n-p-n</i>), ОЭ		$U_{KЭ0} = 0,1$, В (V2)		$U_{KЭ1} = \frac{U_{KЭ\max}}{5}$, В (V2)		$U_{KЭ2} = \frac{U_{KЭ\max}}{1,5}$, В (V2)		$U_{KЭ3} = U_{KЭ\max}$, В (V2)	
			0,1							
	I_B , формула	I_B , мкА, значение	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ
0,65	$I_{B0} =$	0								
	$I_{B1} = \frac{I_{B\max}}{5} =$									
	$I_{B2} = \frac{2 \cdot I_{B\max}}{5} =$									
	$I_{B3} = \frac{3 \cdot I_{B\max}}{5} =$									
	$I_{B4} = \frac{4 \cdot I_{B\max}}{5} =$									
	$I_{B5} = I_{B\max} =$									

2.4. Установить значение напряжения $U_{KЭ}$ равным $U_{KЭ\max}$ (V2). Плавно изменяя напряжение U_{BX} (V1) от нуля, получить значение коллекторного тока, равное $I_{K\max}$ (показание амперметра ХММ3). Значение $I_{K\max}$ следует взять из таблицы 5.1 для транзистора, соответствующего своему варианту. При достижении коллекторным током ве-

личины $I_{K\max}$ зафиксировать показание тока базы $I_{B\max}$ и записать его в ячейку таблицы 5.5, соответствующую значению $I_{B5} = I_{B\max} =$ (последняя строка), в столбец « I_B , значение».

Для удобства работы в таблице 5.6 приведены измеряемые величины и обозначения соответствующих им приборов.

Таблица 5.6

$I_B, (I_{B\max})$	$I_K, (I_{K\max})$
ХММ1	ХММ3

2.5. Вычислить по формулам из столбца « I_B , формула» таблицы 5.5 значения токов базы I_{B1} , I_{B2} , I_{B3} и I_{B4} и записать их в соответствующую ячейку столбца « I_B , значение».

2.6. Для полученных значений токов базы I_B , не изменяя значение напряжения $U_{KЭ} = U_{KЭ\max}$, подобрать величины входных напряжений $U_{ВХ}$ (V1) и записать их значения в столбец « $U_{ВХ}$ (V1)» таблицы 5.5 слева от соответствующих значений токов базы. Значения токов базы I_{B1} , I_{B2} , I_{B3} и I_{B4} следует контролировать при помощи амперметра ХММ1.

2.7. Установить величину входного напряжения $U_{ВХ}$ (V1) равной 0,65 В (первое значение в столбце « $U_{ВХ}$ (V1)»). Установить значение напряжения $U_{KЭ0}$ (V2) равным 0,1 В (первое значение в строке напряжений для $U_{KЭ}$). Запустить схему и записать в таблицу 5.5 значения коллекторного тока I_K и напряжения $U_{ЭБ}$ для установленных величин $U_{ВХ}$ (V1) и $U_{KЭ0}$ (V2). Значениям I_K и $U_{ЭБ}$ соответствуют показания приборов, представленные в таблице 5.7:

Таблица 5.7

I_K	$U_{ЭБ}$
ХММ3	ХММ2

2.8. Не изменяя величину входного напряжения $U_{ВХ}$ (V1), последовательно устанавливать значения напряжения $U_{KЭ}$ в соответствии с таблицей 5.5 и производить замеры коллекторного тока I_K и напряжения $U_{ЭБ}$. Измеренные значения величин вписывать в соответствующие ячейки таблицы 5.5.

2.9. Установить следующее значение входного напряжения из столбца « $U_{ВХ}$ (V1)» и повторить действия п. 2.8.

2.10. На основе полученных результатов построить следующие статические характеристики транзистора:

- входные $I_B = f(U_{ЭБ})$ для $U_{KЭ0}$, $U_{KЭ1}$, $U_{KЭ2}$, $U_{KЭ3}$;
- выходные $I_K = f(U_{KЭ})$ для I_{B0} , I_{B1} , I_{B2} , I_{B3} , I_{B4} , I_{B5} ;

- обратной передачи по напряжению $U_{ЭБ} = f(U_{КЭ})$ для $I_{Б0}, I_{Б1}, I_{Б2}, I_{Б3}, I_{Б4}, I_{Б5}$;
- передачи по току $I_K = f(I_B)$ для $U_{КЭ0}, U_{КЭ1}, U_{КЭ2}, U_{КЭ3}$.

Одноименные характеристики следует выполнить на одном графическом поле (все-го четыре поля с графиками).

Задание 3. Исследовать усилительные свойства биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

3.1. Для определения коэффициентов передачи по напряжению K_U , по току K_I , а также коэффициента мощности K_P биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, необходимо в коллекторную цепь включить некоторое нагрузочное сопротивление R_H . Оценить величину этого нагрузочного сопротивления можно исходя из нагрузочной прямой, построенной для данного транзистора на основе его паспортных данных и снятых выходных характеристик $I_K = f(U_{КЭ})$.

Теоретически нагрузочная прямая должна пересекать ось $U_{КЭ}$ в точке, соответствующей напряжению нулевого коллекторного тока ($I_K = 0$). Поскольку точно определить экспериментальным путем это напряжение не представляется возможным, то приближенно можно принять его равным максимальному напряжению $U_{КЭ\max}$ для рассматриваемого транзистора. В этой связи следует отметить первую точку на оси $U_{КЭ3} = U_{КЭ\max}$, полагая, что в ней $I_K \approx 0$. Вторую точку нужно выбрать на выходной характеристике, соответствующей току базы насыщения. Эту точку также проблематично точно определить экспериментальным путем, поэтому примем в качестве второй точки точку на оси I_K , соответствующую максимальному значению коллекторного тока для данного транзистора $I_{K\max}$. Полученная линия будет являться приближенной нагрузочной прямой для данного транзистора. На рисунке 5.3 схематично представлены выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и соответствующая им нагрузочная прямая.

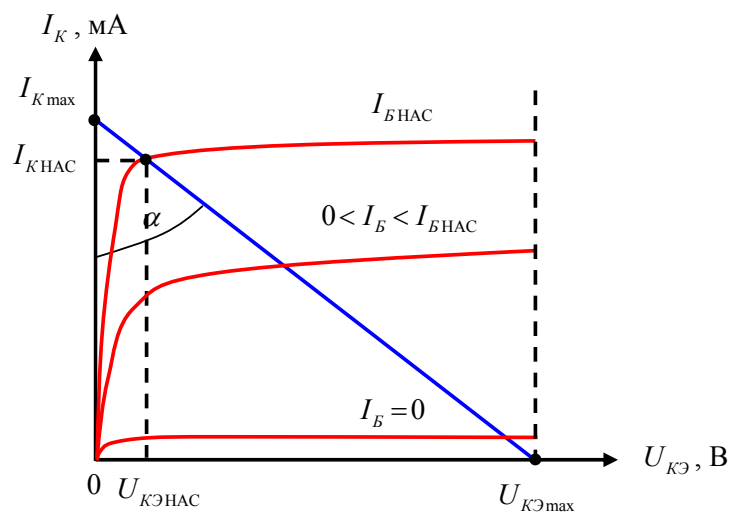


Рис. 5.3. Нагрузочная прямая биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером

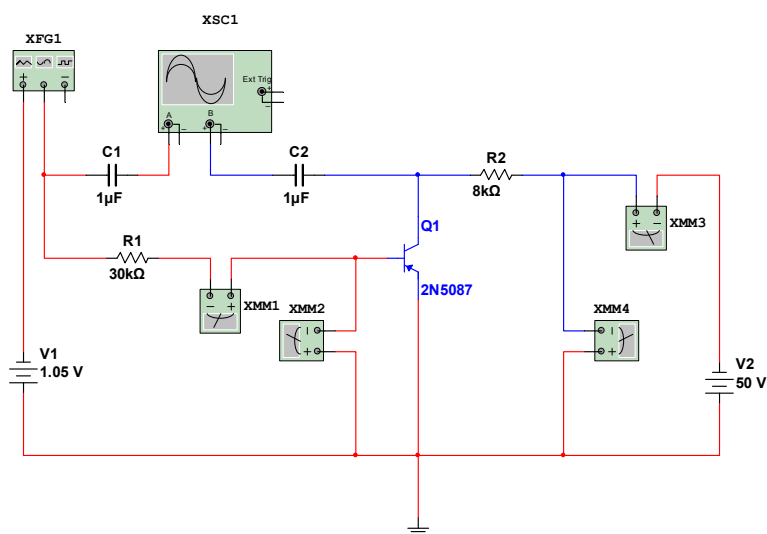
Определить величину нагрузочного сопротивления R_H можно из геометрических соображений по формуле (значение коллекторного тока $I_{K\max}$ подставлять в амперах, а напряжения $U_{KЭ\max}$ — в вольтах)

$$R_H = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{U_{KЭ\max}}{I_{K\max}}$$

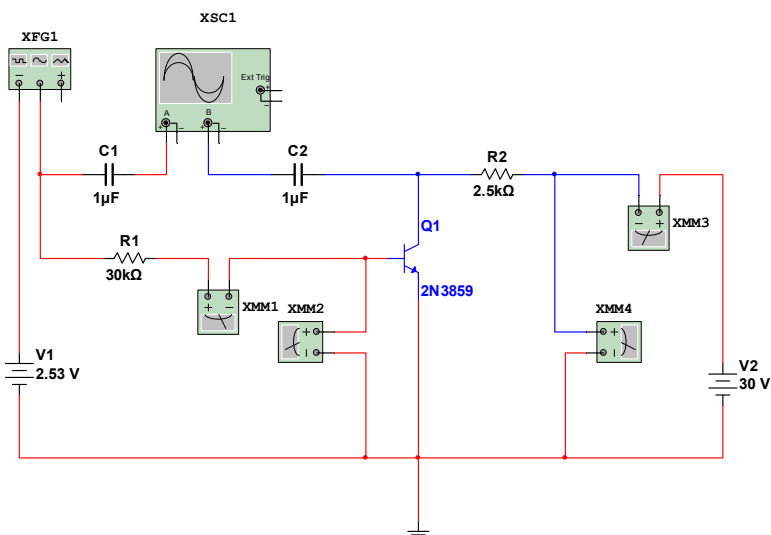
Значения $I_{K\max}$ и $U_{KЭ\max}$ следует взять из таблицы 5.1 для транзистора, соответствующего своему варианту.

Записать полученное значение.

3.2. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 5.4. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметра, амперметров и функционального генератора.



a



б

Рис. 5.4. Усилитель на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером: *a* — *p-n-p* биполярный транзистор; *б* — *n-p-n* биполярный транзистор

3.3. Марку транзистора следует оставить прежней в соответствии с номером своего варианта из таблицы 5.1. **Обратить внимание на тип проводимости биполярного транзистора!** В соответствии с типом проводимости руководствоваться рисунком 5.4, *a* или *б*. Параметры измерительных приборов также оставить прежними — вольтметров ХММ2, ХММ4: MODE — АС, $R_V = 10 \text{ МОм}$; амперметров ХММ1, ХММ3: MODE — АС, $R_A = 10 \text{ мкОм}$; сопротивление резистора $R_1 = 30 \text{ кОм}$, $R_2 = R_H$ — в соответствии с вычисленным в п. 3.1 значением. Емкости разделительных конденсаторов $C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ}$. Параметры двухканального осциллографа ХСC1: режим работы «DC»; чувствительность по каналу «А» 200 мВ/дел (mV/Div), по каналу «В» — 2 В/дел (V/Div); синхронизация — «Норм»; длительность развертки в режиме «Y/T» — 100 мкс/дел ($\mu\text{s}/\text{Div}$). Для большего удобства работы с осциллографом в процессе эксперимента можно изменять его чувствительность по каналам «А» и «В» и (или) время развертки.

Настройки функционального генератора ХFG1:

- форма сигнала — синусоидальный;
- частота — 5 кГц (соответствует примеру);
- амплитуда — 75 мВ (mVp) (соответствует примеру);
- смещение — 0 В (V).

Установить входное напряжение U_{BX} элемента V1, соответствующее току базы I_{B3} , а напряжение элемента V2 равным $U_{KЭ3} = U_{KЭ\max}$ (данные взять из таблицы 5.5).

На рисунке 5.4 значение сопротивлений резисторов R_2 и транзисторы Q1 соответствуют исходным данным из таблицы 5.1, строки «ПР» — «Пример».

3.4. Запустить схему и зафиксировать осциллограмму процесса. При помощи маркеров осциллографа ХСC1 определить амплитудные (максимальные) значения напряжений на входе (канал «А») и выходе (канал «В») транзистора. При помощи амперметров ХММ1 и ХММ3 определить величины базового и коллекторного токов соответственно. Вычислить коэффициенты передачи по напряжению K_U , по току K_I , а также коэффициент мощности K_P . **Обратить внимание на размерности напряжений и токов!** Размерности напряжений и токов должны быть одинаковы. Результаты занести в таблицу 5.8.

Таблица 5.8

Канал «А»	Канал «В»	ХММ1	ХММ3	$K_U = \frac{U_{\max B}}{U_{\max A}}$	$K_I = \frac{I_K}{I_B}$	$K_P = K_U \cdot K_I$
$U_{\max A}$, мВ	$U_{\max B}$, мВ	I_B , мкА	I_K , мкА			

5.4. Пример выполнения лабораторной работы

Задание 1. Исследовать работу биполярного транзистора, включенного по схеме с общей базой. Снять статические характеристики.

1.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 5.1.

1.2. Для определенности исследуем свойства биполярного транзистора типа *p-n-p* из строки «ПР» — «Пример» таблицы 5.1. Выбор транзистора с данным типом проводимости обусловлен целесообразностью рассмотрения различных примеров. (В схеме с общим эмиттером будет рассмотрен пример с транзистором, имеющим тип проводимости *n-p-n*.)

1.3. Подготовим исходные данные для экспериментальных исследований. В соответствии с таблицей 5.2 вычислим значения эмиттерных токов и напряжений база-коллектор. Результаты заносим в таблицу 5.2 (пример).

Таблица 5.2 (пример)

$U_{BX},$ В (V1)	Транзистор МАРКА, <i>p-n-p</i> (или <i>n-p-n</i>), ОБ		$U_{KB0} = ,$ В (V2)		$U_{KB1} = \frac{U_{KB\max}}{5},$ В (V2)		$U_{KB2} = \frac{U_{KB\max}}{1,5},$ В (V2)		$U_{KB3} = U_{KB\max},$ В (V2)	
	2N5087, тип <i>p-n-p</i>		0,1		10		33		50	
	$I_{\mathcal{E}},$ формула	$I_{\mathcal{E}},$ мА, значение	$I_K,$ мА	$U_{\mathcal{E}B},$ мВ	$I_K,$ мА	$U_{\mathcal{E}B},$ мВ	$I_K,$ мА	$U_{\mathcal{E}B},$ мВ	$I_K,$ мА	$U_{\mathcal{E}B},$ мВ
0,65	$I_{\mathcal{E}0} =$	0,072	0,058	592	0,063	588	0,071	581	0,077	578
1,89	$I_{\mathcal{E}1} = \frac{I_{\mathcal{E}\max}}{5} =$	1,24	1,215	670	1,221	666	1,234	657	1,241	652
3,15	$I_{\mathcal{E}2} = \frac{2 \cdot I_{\mathcal{E}\max}}{5} =$	2,48	2,451	689	2,459	684	2,473	675	2,48	670
4,40	$I_{\mathcal{E}3} = \frac{3 \cdot I_{\mathcal{E}\max}}{5} =$	3,72	3,686	700	3,694	695	3,709	686	3,717	680
5,65	$I_{\mathcal{E}4} = \frac{4 \cdot I_{\mathcal{E}\max}}{5} =$	4,96	4,923	707	4,932	702	4,949	693	4,957	688
6,90	$I_{\mathcal{E}5} = I_{\mathcal{E}\max} =$	6,20	6,162	713	6,172	708	6,190	699	6,199	694

1.4. Для полученных значений эмиттерных токов определим величины входных напряжений U_{BX} и запишем их значения в столбец « U_{BX} (V1)» таблицы 5.2 (пример) слева от соответствующих значений эмиттерных токов.

1.5—1.7. В соответствии с таблицей 5.2 (пример) производим замеры коллекторного тока I_K и напряжения $U_{\mathcal{E}B}$. Измеренные значения величин записываем в соответствующие ячейки таблицы 5.2 (пример).

1.8. На основе полученных результатов строим статические характеристики транзистора. Графики представлены на рисунках 5.5—5.8.

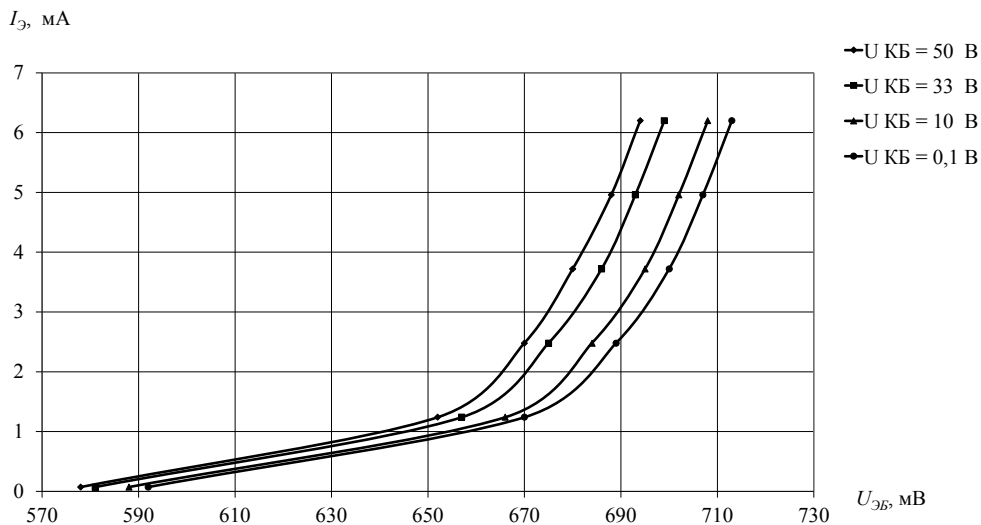


Рис. 5.5. Входные характеристики биполярного $p-n-p$ -транзистора, включенного по схеме с общей базой:

$$I_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}}) \text{ для различных значений } U_{\text{КБ}}$$

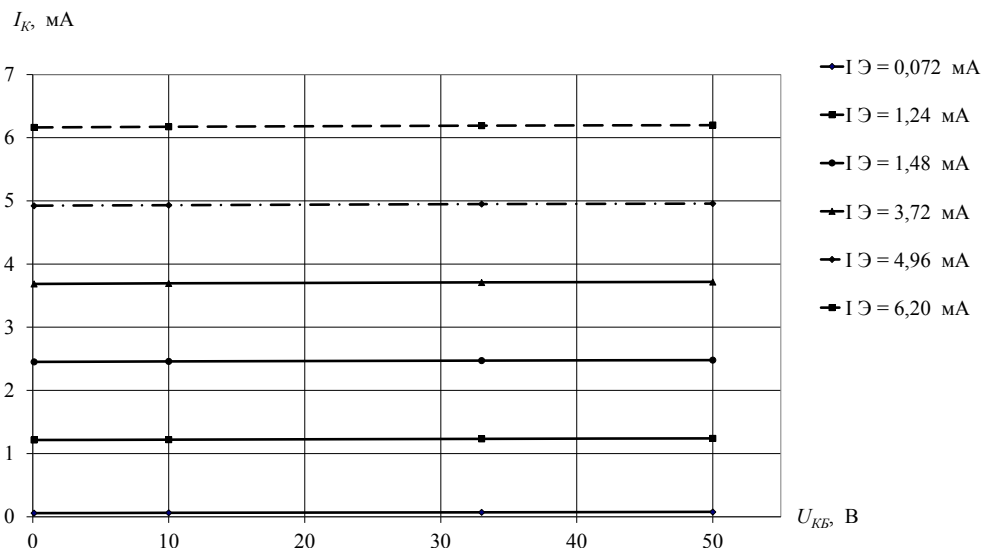


Рис. 5.6. Выходные характеристики биполярного $p-n-p$ -транзистора, включенного по схеме с общей базой:

$$I_{\text{К}} = f(U_{\text{КБ}}) \text{ для различных значений } I_{\text{Э}}$$

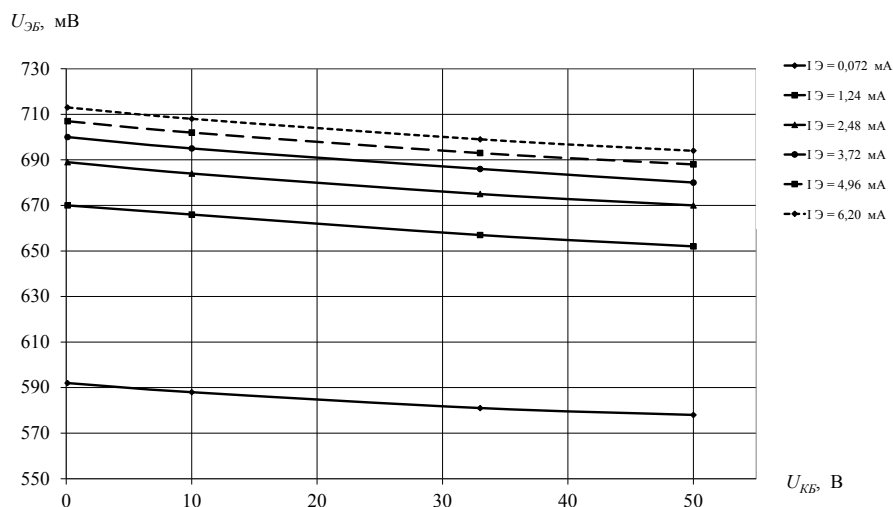


Рис. 5.7. Характеристика обратной передачи по напряжению биполярного $p-n-p$ -транзистора, включенного по схеме с общей базой:

$$U_{ЭБ} = f(U_{КБ}) \text{ для различных значений } I_{Э}$$

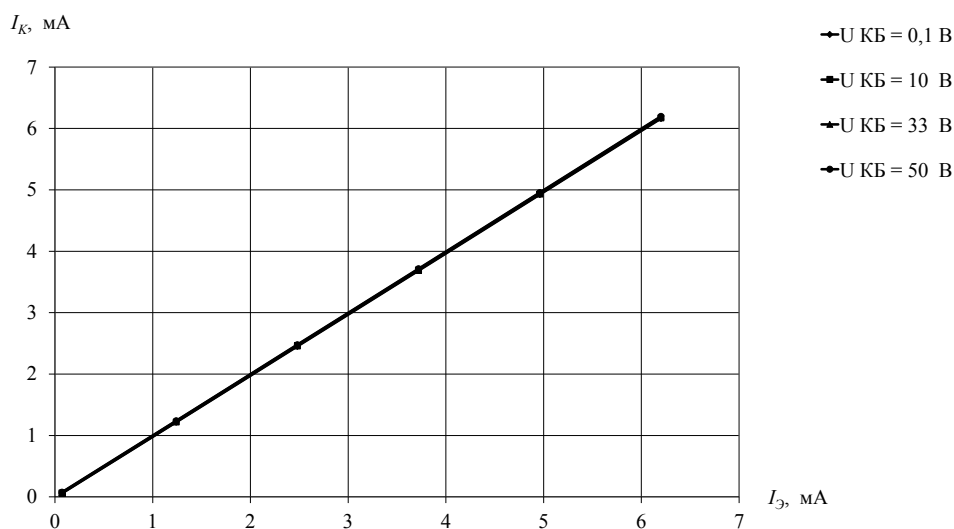


Рис. 5.8. Характеристика передачи по току биполярного $p-n-p$ -транзистора, включенного по схеме с общей базой:

$$I_{К} = f(I_{Э}) \text{ для различных значений } U_{КБ}$$

Задание 2. Исследовать работу биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Снять статические характеристики.

2.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 5.2.

2.2. Параметры измерительных приборов оставляем прежними. А в качестве исследуемого транзистора выберем транзистор типа $n-p-n$ из строки «ПР» — «Пример» таб-

лицы 5.1. Выбор транзистора с данным типом проводимости обусловлен целесообразностью рассмотрения различных примеров. (В схеме с общей базой был рассмотрен пример с типом проводимости $p-n-p$.)

2.3. Подготовим исходные данные для экспериментальных исследований. В соответствии с таблицей 5.5 (пример) вычислим значения напряжений $U_{KЭ1}$ и $U_{KЭ2}$.

Таблица 5.5 (пример)

U_{BX} , В (V1)	Транзистор МАРКА, $p-n-p$ (или $n-p-n$), ОЭ		$U_{KЭ0} = 0,1$, В (V2)		$U_{KЭ1} = \frac{U_{KЭmax}}{5}$, В (V2)		$U_{KЭ2} = \frac{U_{KЭmax}}{1,5}$, В (V2)		$U_{KЭ3} = U_{KЭmax}$, В (V2)	
	2N3859, тип $n-p-n$		0,1		6		20		30	
	I_B , формула	I_B , мкА, значение	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ	I_K , мА	$U_{ЭБ}$, мВ
0,65	$I_{B0} =$	0,002	0,021	512	0,166	559	0,205	559	0,232	559
1,24	$I_{B1} = \frac{I_{Bmax}}{5} =$	12,541	0,109	555	1,537	618	1,882	618	2,127	618
1,89	$I_{B2} = \frac{2 \cdot I_{Bmax}}{5} =$	25,082	0,209	572	3,314	638	4,055	638	4,584	638
2,53	$I_{B3} = \frac{3 \cdot I_{Bmax}}{5} =$	37,623	0,308	582	5,121	650	6,265	650	7,083	650
3,17	$I_{B4} = \frac{4 \cdot I_{Bmax}}{5} =$	50,165	0,405	589	6,937	658	8,486	658	9,539	658
3,80	$I_{B5} = I_{Bmax} =$	62,706	0,500	595	8,714	665	10,661	665	12,051	665

2.4. Устанавливаем значение напряжения $U_{KЭ} = U_{KЭmax} = 30$ В (V2). Плавно изменяя напряжение U_{BX} (V1) от нуля, получаем значение коллекторного тока, равное $I_{Kmax} \approx 12$ мА. (**Числовые значения приведены для данного исследуемого транзистора!**) Полученное значение U_{BX} заносим в таблицу 5.5 (пример) в нижнюю ячейку левого столбца « U_{BX} (V1)» слева от строки « $I_{B5} = I_{Bmax} =$ ». При этом также определяем значение тока базы I_{Bmax} и записываем его в ячейку таблицы 5.5 (пример), соответствующую значению « $I_{B5} = I_{Bmax} =$ », в столбец « I_B , значение».

2.5. Вычисляем по формулам из столбца « I_B , формула» таблицы 5.5 (пример) значения токов базы I_{B1} , I_{B2} , I_{B3} , и I_{B4} и записываем их в соответствующие ячейки столбца « I_B , значение».

2.6. Для полученных значений токов базы I_B определяем величины входных напряжений U_{BX} и записываем их значения в столбец « U_{BX} (V1)» таблицы 5.5 (пример) слева от соответствующих значений токов базы.

2.7—2.9. В соответствии с таблицей 5.5 (пример) производим замеры коллекторного тока I_K и напряжения $U_{ЭБ}$. Измеренные значения величин записываем в соответствующие ячейки таблицы 5.2 (пример).

2.10. На основе полученных результатов строим статические характеристики транзистора. Графики представлены на рисунках 5.9—5.12.

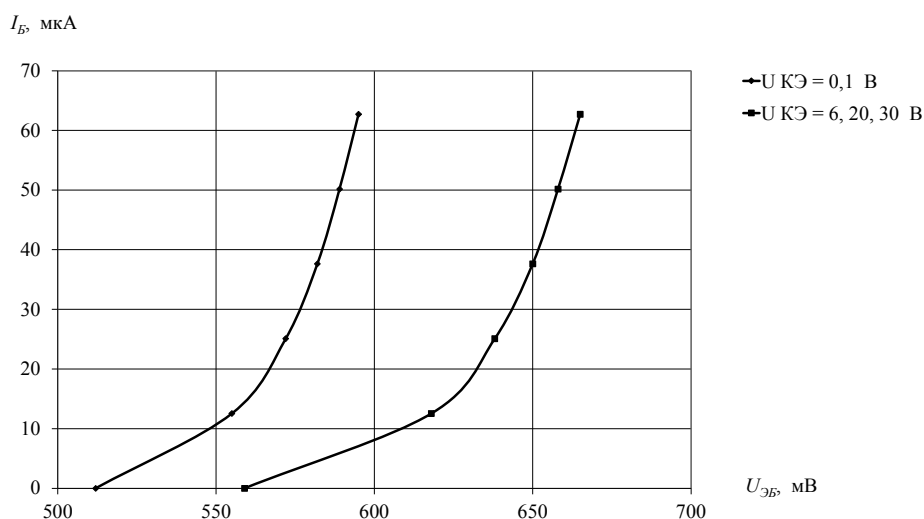


Рис. 5.9. Входные характеристики биполярного $n-p-n$ -транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

$$I_B = f(U_{ЭБ}) \text{ для различных значений } U_{КЭ}$$

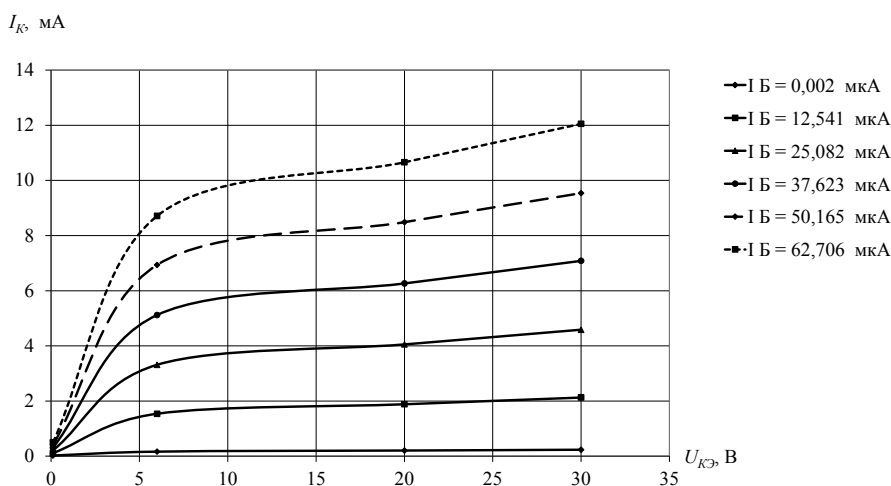


Рис. 5.10. Выходные характеристики биполярного $n-p-n$ -транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

$$I_K = f(U_{КЭ}) \text{ для различных значений } I_B$$

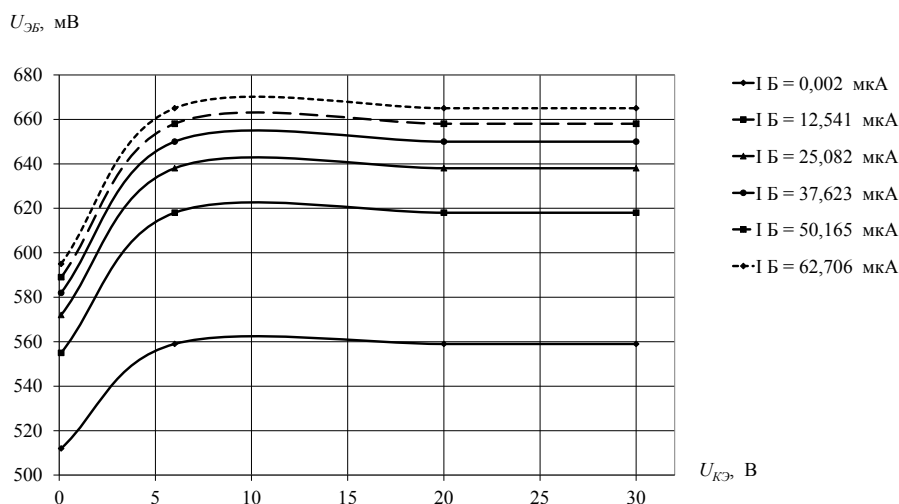


Рис. 5.11. Характеристики обратной передачи по напряжению биполярного $n-p-n$ -транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

$$U_{ЭБ} = f(U_{КЭ}) \text{ для различных значений } I_B$$

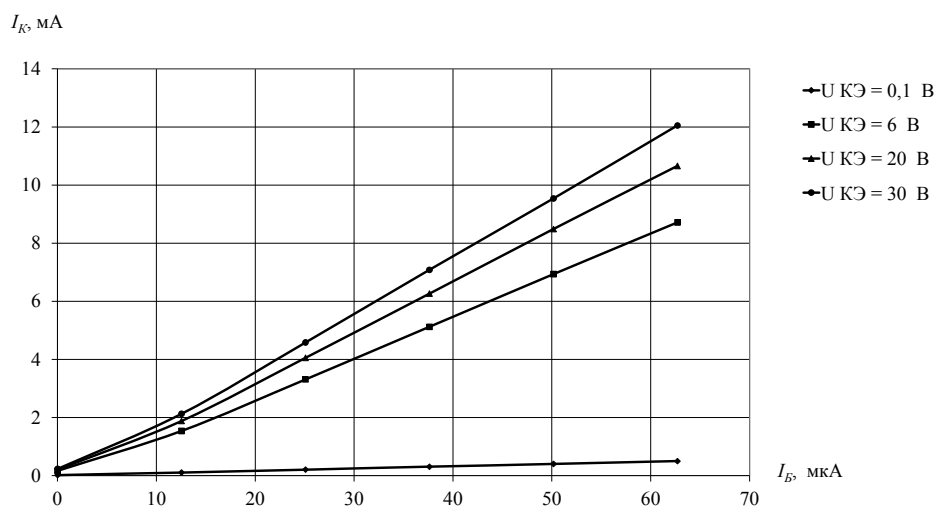


Рис. 5.12. Характеристики передачи по току биполярного $n-p-n$ -транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

$$I_K = f(I_B) \text{ для различных значений } U_{КЭ}$$

Задание 3. Исследовать усилительные свойства биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

3.1. В качестве исследуемого транзистора выберем транзистор типа $n-p-n$ из строки «ПР» — «Пример» таблицы 5.1, так как для него в задании 2 (схема с общим эмиттером) были проведены соответствующие измерения. Определяем величину нагрузочного сопротивления R_H по формуле

$$R_H = R_2 = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{U_{КЭ\max}}{I_{K\max}} = \frac{30}{0,012} \approx 2500 \text{ Ом}.$$

3.2. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 5.4, б (с. 68).

3.3. Устанавливаем входное напряжение U_{BX} элемента V1, соответствующее току базы I_{B3} , а напряжение элемента V2 равным $U_{KЭ3} = U_{KЭmax}$. Для значение $I_{B3} = 37,623$ мкА величина $U_{BX} = 2,53$ В.

3.4. Запускаем схему и заносим соответствующие значения в таблицу 5.8 (пример).

Таблица 5.8 (пример)

Канал «А»	Канал «В»	ХММ1	ХММ3	$K_U = \frac{U_{\max B}}{U_{\max A}}$	$K_I = \frac{I_K}{I_B}$	$K_P = K_U \cdot K_I$
$U_{\max A}$, мВ	$U_{\max B}$, мВ	I_B , мкА	I_K , мкА			
74,985	675	1,741	188,74	9	108,4	976

На рисунке 5.13 представлена осциллограмма процесса.

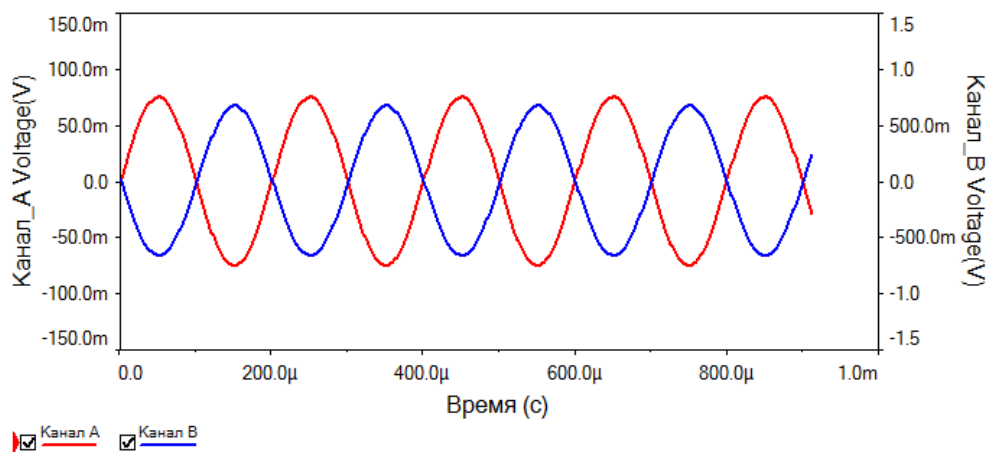


Рис. 5.13. Осциллограммы входного и выходного напряжений

6. Полевые транзисторы

6.1. Темы для подготовки к лабораторной работе

Электрические переходы. Энергетические диаграммы и свойства p - n -переходов. Строение и физические процессы, происходящие в полевом транзисторе с управляющим p - n -переходом. Схемы включения полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом. Усилительные свойства полевых транзисторов. Статические характеристики полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом для различных схем включения. Параметры полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом. Виды полевых транзисторов с изолированным затвором. Строение и физические процессы, происходящие в полевом транзисторе с изолированным затвором и встроенным каналом. Статические характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором и встроенным каналом. Строение и физические процессы, происходящие в полевом транзисторе с изолированным затвором и индуцированным каналом. Статические характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором и индуцированным каналом.

6.2. Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.
2. Привести схемы включения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом.
3. Объяснить, почему у полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом переход «затвор-исток» должен быть смещен в обратном направлении.
4. Объяснить, почему у полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом при подаче напряжения на переход «сток-исток» ширина канала изменяется неравномерно по длине.
5. Изобразить и объяснить типовые стоко-затворные (управляющие) характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, включенного по схеме с общим истоком.
6. Изобразить и объяснить типовые стоковые характеристики полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, включенного по схеме с общим истоком.
7. Почему полевые транзисторы с изолированным затвором и встроенным каналом могут работать в двух режимах: обеднения и обогащения?
8. Почему полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом могут работать только в режиме обогащения?
9. Изобразить и объяснить типовые стоко-затворные (управляющие) характеристики полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом, включенного по схеме с общим истоком.
10. Изобразить и объяснить типовые стоковые характеристики полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом, включенного по схеме с общим истоком.

6.3. Лабораторная работа № 6 Исследование полевых транзисторов

Цель работы: экспериментально исследовать работу полевых транзисторов.

Задание 1. Исследовать работу полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом. Снять стоко-затворные (управляющие) и стоковые (выходные) характеристики.

1.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 6.1. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров и амперметров.

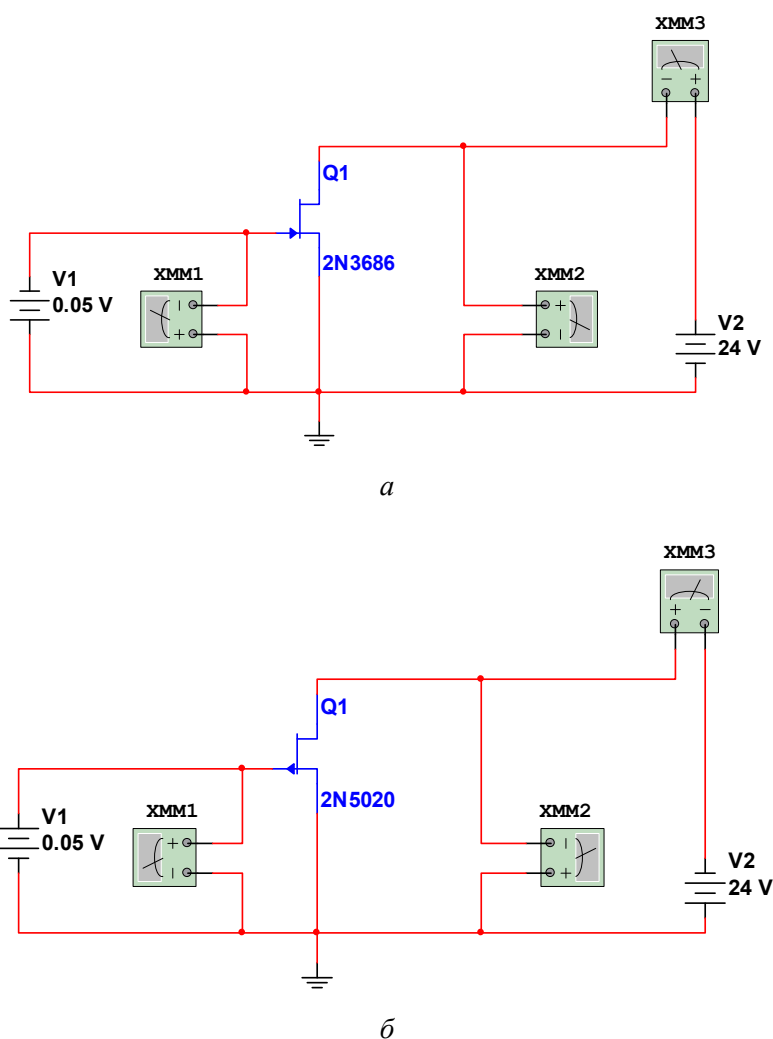


Рис. 6.1. Включение полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом:
 а — полевой транзистор n -типа; б — полевой транзистор p -типа

1.2. Транзистор следует выбрать в соответствии с номером своего варианта из таблицы 6.1. **Обратить внимание на тип проводимости полевого транзистора!** В соответствии с типом проводимости руководствоваться рисунком 6.1, а или б. Установить

параметры вольтметров ХММ1, ХММ2: MODE — DC, $R_V=10$ МОм; амперметра ХММ3: MODE — DC, $R_A = 10$ мкОм. На рисунке 6.1 транзисторы Q1 соответствуют исходным данным из таблицы 6.1, строки «ПР» — «Пример».

Обратить внимание! В таблице 6.1 указаны **модули** обратного порогового напряжения.

Таблица 6.1

№	Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом	Тип канала	Пороговое напряжение запириания канала $U_{з-н \max}$, В	Полевой транзистор с индуцированным каналом	Тип канала	Пороговое напряжение открытия канала $U_{з-н \max}$, В
1	2N3824	n	2,15	IRFP9141	p	3,09
2	2N2608	p	2,45	2N7012	n	3,05
3	2N3458	n	3,05	IRFP9142	p	3,09
4	2N2609	p	1,41	2N7071	n	3,89
5	2N3459	n	1,40	IRFP9241	p	3,71
6	2N5021	p	1,00	2N7072	n	2,71
7	2N3684	n	3,18	IRFR9110	p	2,65
8	2N5018	p	4,15	2N7073	n	3,34
9	2N3685	n	1,69	IRFR9024	p	3,78
10	2N5019	p	2,23	2N7074	n	3,47
ПР	2N3686	n	0,96	2N7075	n	3,20
ПР	2N5020	p	0,84	IRFP5210	p	3,80

1.3. Снять стоковые (выходные) характеристики. Для четырех значений напряжения затвор-исток $U_{з-н}$ (V1), устанавливая последовательно значения напряжения цепи стока $U_{с-н}$ (V2) из таблицы 6.2, регистрировать значения стокового тока по амперметру ХММ3. Значение напряжения $U_{з-н \max}$ взять из таблицы 6.1 для полевого транзистора в соответствии со своим вариантом. Показания амперметра записывать в таблицу 6.2 для соответствующих значений напряжения стока цепи. В таблице 6.2 напряжения $U_{з-н}$ приведены со знаком «-» (минус). Но поскольку в рабочей схеме (рис. 6.1) источник V1 включен так, что переход «затвор-исток» смещен в обратную сторону, то при задании в Multisim значений напряжения $U_{з-н}$ **знак «-» указывать не нужно!** На основе полученных экспериментальных результатов построить стоковые вольт-амперные характеристики $I_C = f(U_{с-н})$.

Таблица 6.2

Напряжение затвор-исток $U_{з-н}$, (V1), В	$U_{с-н}$, (V2), В	0	0,1	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10
$U_{з-н} = -0,05 \cdot U_{з-н \max}$	I_C , мкА										
$U_{з-н} = -0,25 \cdot U_{з-н \max}$	I_C , мкА										
$U_{з-н} = -0,5 \cdot U_{з-н \max}$	I_C , мкА										
$U_{з-н} = -0,75 \cdot U_{з-н \max}$	I_C , мкА										

Значениям $U_{3-И}$, $U_{C-И}$ и I_C соответствуют показания приборов, представленных в таблице 6.3.

Таблица 6.3

$U_{3-И}, (V1)$	$U_{C-И}, (V2)$	I_C
ХММ1	ХММ2	ХММ3

1.4. На основе полученных данных для стоковых характеристик на участках, соответствующих состоянию насыщения, определить для каждого напряжения $U_{3-И}$ дифференциальное сопротивление по формуле

$$R_{диф} = \left| \frac{\Delta U_{C-И}}{\Delta I_C} \right| = \left| \frac{2}{I_C(4) - I_C(2)} \right|.$$

В данной формуле $U_{C-И} = 4 - 2 = 2$ В. Выбор значений напряжений для вычисления $\Delta U_{C-И}$ не принципиален, а обусловлен только требованием линейности (насыщения) к стоковым ВАХ. В таблице 6.2 столбцы, соответствующие этим напряжениям, подкрашены серым цветом. Значения разности токов истока следует брать в амперах. Результаты занести в таблицу 6.4.

Таблица 6.4

Напряжение затвор-исток $U_{3-И}, (V1), В$	$R_{диф}, Ом$
$U_{3-И} = 0,05 \cdot U_{3-И\max}$	
$U_{3-И} = 0,25 \cdot U_{3-И\max}$	
$U_{3-И} = 0,5 \cdot U_{3-И\max}$	
$U_{3-И} = 0,75 \cdot U_{3-И\max}$	

1.5. Снять стоко-затворные (управляющие) характеристики. Для трех значений напряжения сток-исток $U_{C-И}$ (V2) из таблицы 6.5 (с. 84) регистрировать значения стокового тока по амперметру ХММ3 для различных значений напряжения затвор-исток $U_{3-И}$ (V1). Показания амперметра записывать в таблицу 6.5 для соответствующих значений напряжения стока цепи. На основе полученных экспериментальных результатов построить стоковые вольт-амперные характеристики $I_C = f(U_{3-И})$.

1.6. На основе полученных данных для стоко-затворных характеристик определить для каждого напряжения $U_{C-И}$ крутизну соответствующей стоко-затворной характеристики по формуле

$$S = \left| \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3-И}} \right| = \frac{I_C(0,4 \cdot U_{3-И\max}) - I_C(0,5 \cdot U_{3-И\max})}{0,5 \cdot U_{3-И\max} - 0,4 \cdot U_{3-И\max}} = \frac{I_C(0,4 \cdot U_{3-И\max}) - I_C(0,5 \cdot U_{3-И\max})}{0,1 \cdot U_{3-И\max}}.$$

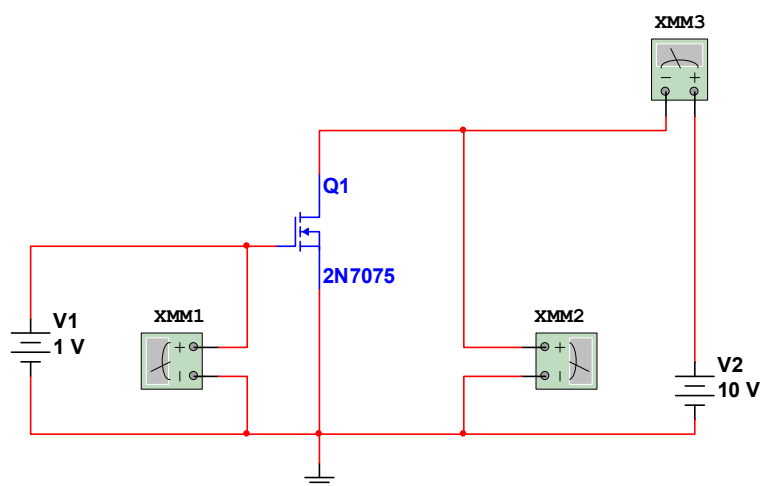
В данной формуле значения для вычислений следует брать из таблицы 6.2 из подкрашенных серым цветом столбцов. Результаты занести в таблицу 6.6.

Таблица 6.6

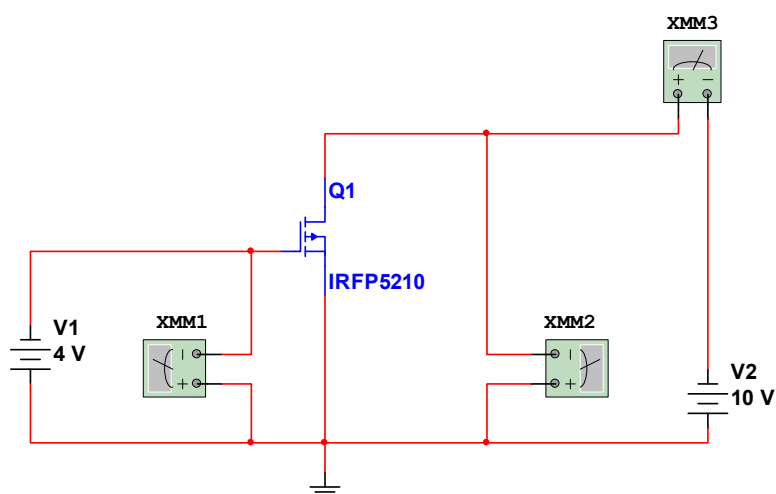
$U_{c-и}, (V2), B$	$S, \text{мкА/В}$
5	
10	
15	

Задание 2. Исследовать работу полевого транзистора с индуцированным каналом. Снять стоко-затворную (управляющую) и стоковые (выходные) характеристики.

2.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 6.2. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров и амперметров.



а



б

Рис. 6.2. Включение полевых транзисторов с индуцированным каналом:
а — с каналом n -типа; б — с каналом p -типа

2.2. Транзистор следует выбрать в соответствии с номером своего варианта из таблицы 6.1. **Обратить внимание на тип проводимости полевого транзистора!** В соответствии с типом проводимости руководствоваться рисунком 6.2, *a* или *б*. Установить параметры вольтметров ХММ1, ХММ2: MODE — DC, $R_V = 10 \text{ МОм}$; амперметра ХММ3: MODE — DC, $R_A = 10 \text{ мкОм}$. На рисунке 6.2 транзисторы Q1 соответствуют исходным данным из таблицы 6.1, строки «ПР» — «Пример».

Обратить внимание! В таблице 6.1 указаны модули обратного порогового напряжения.

2.3. Снять стоковые (выходные) характеристики. Для четырех значений напряжения затвор-исток $U_{з-И}$ (V1), устанавливая последовательно значения напряжения цепи стока $U_{с-И}$ (V2) из таблицы 6.7, регистрировать значения стокового тока по амперметру ХММ3. Показания амперметра записывать в таблицу 6.7 для соответствующих значений напряжения стока цепи. На основе полученных экспериментальных результатов построить стоковые вольт-амперные характеристики $I_C = f(U_{с-И})$.

Таблица 6.7

Напряжение затвор-исток $U_{з-И}$, (V1), В	$U_{с-И}$, (V2), В	0	1	2	3	4	5	6	9	12	15
$U_{з-И} = 0,5 \cdot U_{з-И \text{ max}}$	I_C , мкА										
$U_{з-И} = 0,75 \cdot U_{з-И \text{ max}}$	I_C , мкА										
$U_{з-И} = U_{з-И \text{ max}}$	I_C , мкА										
$U_{з-И} = 1,05 \cdot U_{з-И \text{ max}}$	I_C , mA										
$U_{з-И} = 1,1 \cdot U_{з-И \text{ max}}$	I_C , mA										
$U_{з-И} = 1,15 \cdot U_{з-И \text{ max}}$	I_C , mA										

2.4. Исходя из полученных данных для стоковых характеристик определить для каждого напряжения $U_{з-И}$ дифференциальное сопротивление по формуле

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{с-И}}{\Delta I_C} = \frac{1}{I_C(4) - I_C(3)}$$

В данной формуле $U_{с-И} = 4 - 3 = 1 \text{ В}$. В таблице 6.7 столбцы, соответствующие этим напряжениям подкрашены серым цветом. Значения разности токов истока следует брать в амперах. Результаты занести в таблицу 6.8.

Таблица 6.8

Напряжение затвор-исток U_{3-II} , (V1), В	$R_{диф}$, Ом
$U_{3-II} = 0,5 \cdot U_{3-II \max}$	
$U_{3-II} = 0,75 \cdot U_{3-II \max}$	
$U_{3-II} = U_{3-II \max}$	
$U_{3-II} = 1,05 \cdot U_{3-II \max}$	
$U_{3-II} = 1,1 \cdot U_{3-II \max}$	
$U_{3-II} = 1,15 \cdot U_{3-II \max}$	

2.5. Снять стоко-затворные (управляющие) характеристики. Для трех значений напряжения сток-исток U_{C-II} (V2) из таблицы 6.9 (с. 84) регистрировать значения стокового тока по амперметру ХММЗ для различных значений напряжения затвор-исток U_{3-II} (V1). Показания амперметра записывать в таблицу 6.9 для соответствующих значений напряжения стока цепи. На основе полученных экспериментальных результатов построить стоковые вольт-амперные характеристики $I_C = f(U_{3-II})$.

2.6. На основе полученных данных для стоко-затворных характеристик определить для каждого напряжения U_{C-II} крутизну соответствующей стоко-затворной характеристики по формуле

$$S = \left| \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3-II}} \right| = \frac{I_C(1,09 \cdot U_{3-II \max}) - I_C(1,06 \cdot U_{3-II \max})}{1,09 \cdot U_{3-II \max} - 1,06 \cdot U_{3-II \max}} = \frac{I_C(1,09 \cdot U_{3-II \max}) - I_C(1,06 \cdot U_{3-II \max})}{0,03 \cdot U_{3-II \max}}.$$

В данной формуле значения для вычислений следует брать из таблицы 6.9 из подкрашенных серым цветом столбцов. Результаты занести в таблицу 6.10.

Таблица 6.10

U_{C-II} , (V2), В	S , мА/В
2	
5	
12	

6.4. Пример выполнения лабораторной работы

Задание 1. Исследовать работу полевого транзистора с управляющим p - n -переходом. Снять стоко-затворные (управляющие) и стоковые (выходные) характеристики.

1.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 6.1.

1.2. Для определенности исследуем свойства полевого транзистора n -типа из строки «ПР» («Пример») таблицы 6.1.

1.3. Снимаем стоковые (выходные) характеристики, результаты измерений заносим в таблицу 6.2 (пример).

Таблица 6.2 (пример)

Напряжение затвор-исток $U_{з-И}$, (V1), В	$U_{с-И}$, (V2), В	0	0,1	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10
$U_{з-И} = -0,048$	I_C , мкА	0	124,1	476,6	598,7	599,4	600,1	603,1	606,1	609,1	612,1
$U_{з-И} = -0,24$	I_C , мкА	0	96,4	337,9	372,6	373,1	373,6	375,5	377,4	379,4	381,3
$U_{з-И} = -0,48$	I_C , мкА	0	61,8	164,8	165,0	165,3	165,5	166,4	167,4	168,4	169,4
$U_{з-И} = -0,72$	I_C , мкА	0	27,1	40,7	40,8	40,9	41,0	41,4	41,8	42,2	42,6

На рисунке 6.3 представлены стоковые ВАХ $I_C = f(U_{с-И})$, построенные исходя из полученных экспериментальных результатов.

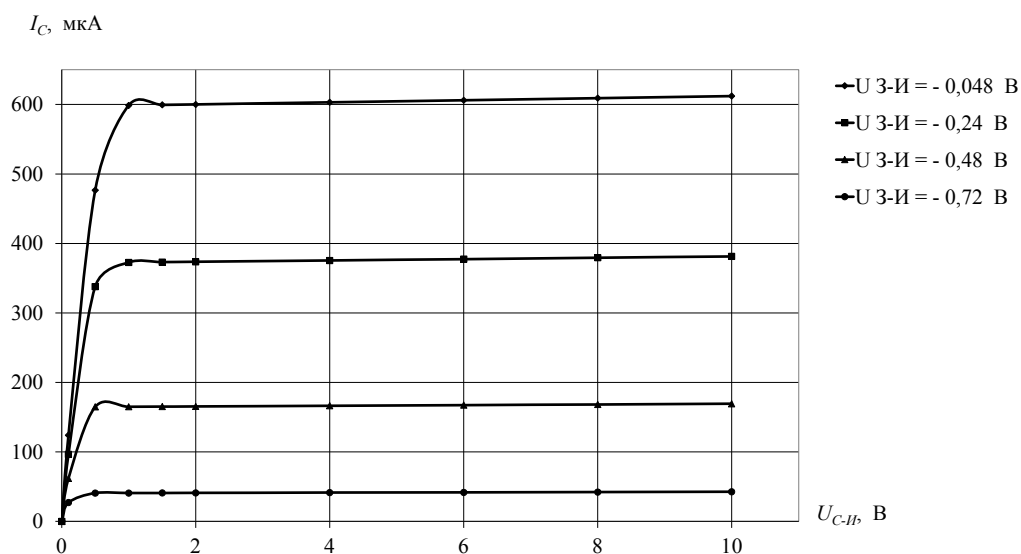


Рис. 6.3. Стоковые ВАХ полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

1.4. На основе полученных данных для стоковых характеристик вычисляем для каждого напряжения $U_{3-И}$ дифференциальное сопротивление по формуле

$$R_{диф} = \left| \frac{\Delta U_{C-И}}{\Delta I_C} \right| = \left| \frac{2}{I_C(4) - I_C(2)} \right|.$$

Результаты заносим в таблицу 6.4 (пример).

Таблица 6.4 (пример)

Напряжение затвор-исток $U_{3-И}$, (V1), В	$R_{диф}$, Ом
$U_{3-И} = -0,048$	666667
$U_{3-И} = -0,24$	1052632
$U_{3-И} = -0,48$	2222222
$U_{3-И} = -0,72$	5000000

1.5. Снимаем стоко-затворные (управляющие) ВАХ. Результаты измерений заносим в таблицу 6.5 (пример).

Таблица 6.5 (пример)

$U_{C-И}$, (V2), В	$U_{3-И}$, (V1), В	0	-0,096	-0,192	-0,288	-0,384	-0,480	-0,576	-0,768	-0,960	-1,460
5	I_C , мкА	670,1	542,6	428,5	327,9	240,7	166,9	106,7	26,6	0,5	0,5
10	I_C , мкА	678,3	549,3	433,9	332,1	243,9	169,4	108,4	27,4	1	1
15	I_C , мкА	686,5	556,1	439,3	336,4	247,2	171,8	110,2	28,2	1,5	1,5

На рисунке 6.4 представлены стоко-затворные (управляющие) ВАХ $I_C = f(U_{3-И})$, построенные исходя из полученных экспериментальных результатов.

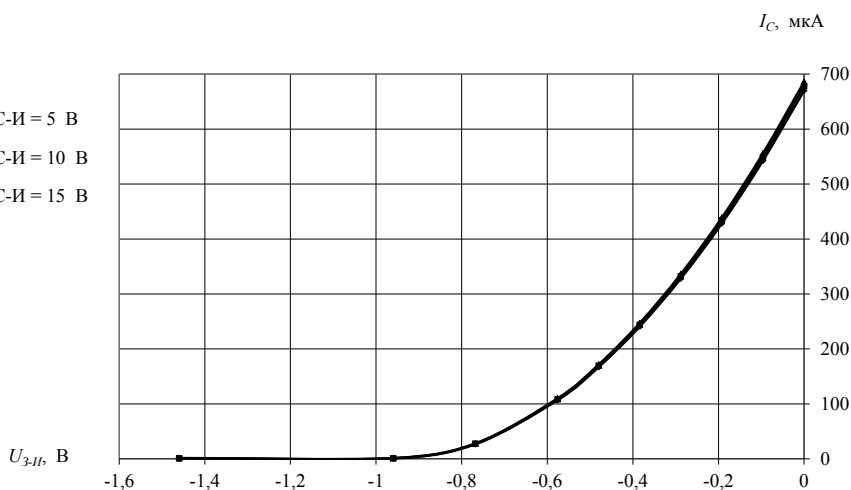


Рис. 6.4. Стоко-затворные (управляющие) ВАХ полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом

1.6. На основе полученных данных для стоко-затворных характеристик определяем для каждого напряжения U_{C-II} крутизну соответствующей стоко-затворной характеристики по формуле:

$$S = \left| \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3-II}} \right| = \frac{I_C(0,4 \cdot U_{3-II \max}) - I_C(0,5 \cdot U_{3-II \max})}{0,5 \cdot U_{3-II \max} - 0,4 \cdot U_{3-II \max}} = \frac{I_C(0,4 \cdot U_{3-II \max}) - I_C(0,5 \cdot U_{3-II \max})}{0,1 \cdot U_{3-II \max}}$$

Результаты заносим в таблицу 6.6 (пример).

Таблица 6.6 (пример)

U_{C-II} , (V2), В	S , мкА/В
5	768,7
10	776,0
15	785,4

Задание 2. Исследовать работу полевого транзистора с индуцированным каналом. Снять стоко-затворную (управляющую) и стоковые (выходные) характеристики.

2.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 6.2.

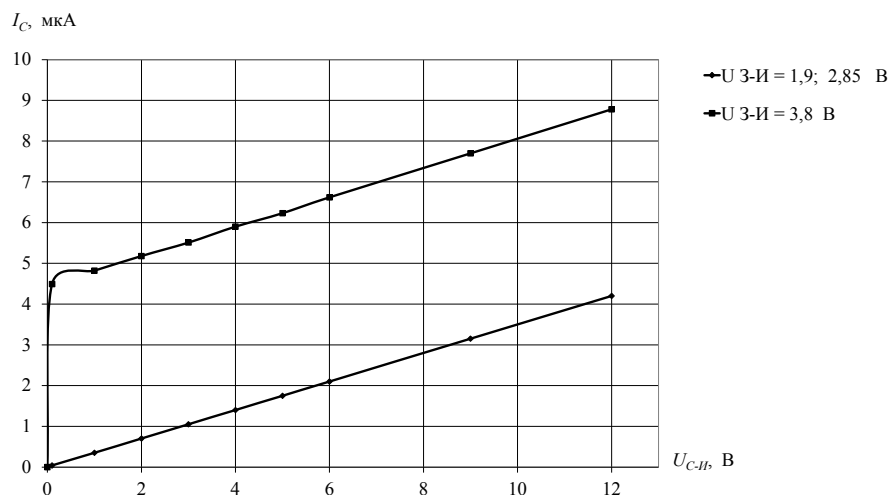
2.2. Исследуем свойства полевого транзистора с индуцированным каналом p -типа из строки «ПР» («Пример») таблицы 6.1.

2.3. Снимаем стоковые (выходные) характеристики, результаты измерений заносим в таблицу 6.7 (пример).

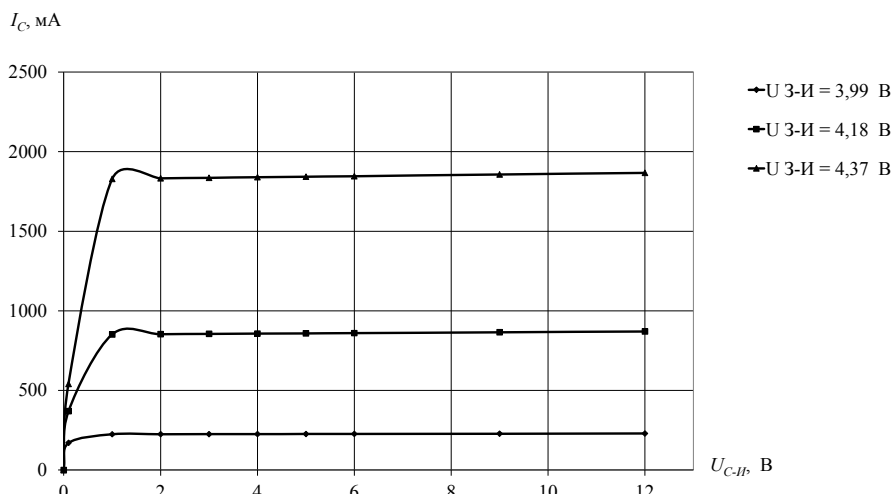
Таблица 6.7 (пример)

Напряжение затвор-исток U_{3-II} , (V1), В	U_{C-II} , (V2), В	0	0,1	1	2	3	4	5	6	9	12
$U_{3-II} = 1,9$	I_C , мкА	0	0,04	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	3,15	4,20
$U_{3-II} = 2,85$	I_C , мкА	0	0,04	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	3,15	4,20
$U_{3-II} = 3,8$	I_C , мкА	0	4,49	4,82	5,18	5,51	5,90	6,23	6,62	7,70	8,78
$U_{3-II} = 3,99$	I_C , мА	0	170,5	224,4	224,9	225,4	225,8	226,3	226,8	228,1	229,6
$U_{3-II} = 4,18$	I_C , мА	0	370,0	851,7	853,4	855,1	856,8	858,4	860,1	865,2	870,3
$U_{3-II} = 4,37$	I_C , мА	0	541,2	1829	1833	1836	1840	1843	1846	1857	1867

На основе полученных экспериментальных результатов строим стоковые вольт-амперные характеристики $I_C = f(U_{C-И})$. Нетрудно заметить, что токи I_C у первых трех стоковых вольт-амперных характеристик имеют порядки единиц мкА. Это означает, что при соответствующих им напряжениях затвор-исток $U_{з-И}$ полевой транзистор находится в закрытом состоянии. При этом первые две стоковые характеристики полностью друг с другом совпадают. В этой связи изобразим стоковые характеристики на двух графиках с разными масштабами по оси I_C . На рисунке 6.5, а представлены первые три стоковые ВАХ, а на рисунке 6.5, б — остальные.



а



б

Рис. 6.5. Стоковые ВАХ полевого транзистора с индуцированным каналом p -типа

2.4. На основе полученных данных для стоковых характеристик вычисляем для каждого напряжения $U_{з-И}$ дифференциальное сопротивление по формуле

$$R_{диф} = \frac{\Delta U_{C-И}}{\Delta I_C} = \frac{1}{I_C(4) - I_C(3)}$$

Результаты заносим в таблицу 6.8 (пример).

Таблица 6.8 (пример)

Напряжение затвор-исток $U_{з-И}, (V1), В$	$R_{диф}, Ом$
$U_{з-И} = 1,9$	2857143
$U_{з-И} = 2,85$	2857143
$U_{з-И} = 3,8$	2564103
$U_{з-И} = 3,99$	2500
$U_{з-И} = 4,18$	588
$U_{з-И} = 4,37$	250

2.5. Снимаем стоко-затворные (управляющие) характеристики. Результаты записываем в таблицу 6.9 (пример) для соответствующих значений напряжения стока цепи.

Таблица 6.9 (пример)

$U_{с-И}, (V2), В$	$U_{з-И}, (V1), В$	0	0,95	1,90	2,85	3,80	3,91	4,03	4,14	4,26	4,37
2	I_C	0	0,70 мкА	0,70 мкА	0,70 мкА	5,2 мА	77,5 мА	325,6 мА	690,3 мА	1230 мА	1830 мА
5	I_C	0	1,75 мкА	1,75 мкА	1,75 мкА	6,3 мА	78,0 мА	327,6 мА	694,5 мА	1230 мА	1840 мА
12	I_C	0	4,20 мкА	4,20 мкА	4,20 мкА	8,8 мА	79,2 мА	332,3 мА	704,1 мА	1250 мА	1870 мА

На рисунке 6.6 представлены стоко-затворные (управляющие) ВАХ $I_C = f(U_{з-И})$, построенные исходя из полученных экспериментальных результатов.

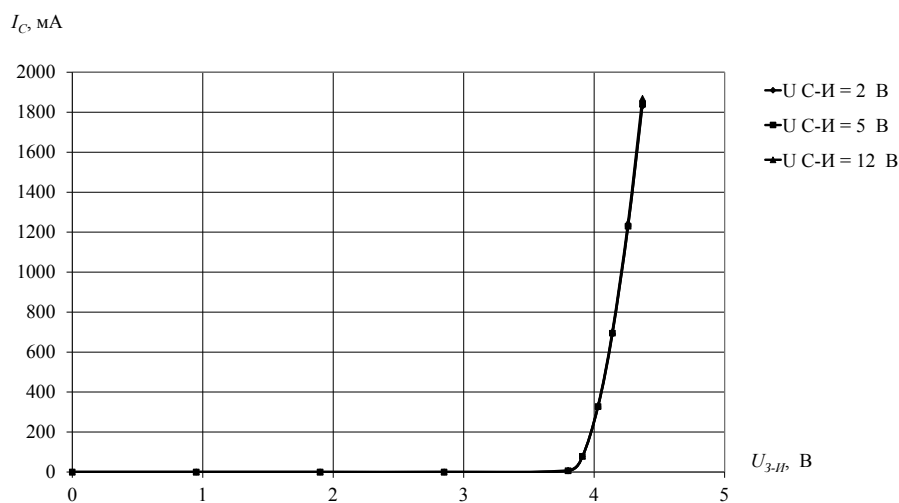


Рис. 6.6. Стоко-затворные (управляющие) ВАХ полевого транзистора с индуцированным каналом p -типа

Нетрудно заметить, что рост стокового тока I_C начинается со значения $U_{3-И\max} = 3,8$ В, соответствующего пороговому напряжению открытия канала (см. паспортные данные на транзистор в таблице 6.1).

2.6. На основе полученных данных для стоко-затворных характеристик вычисляем для каждого напряжения $U_{C-И}$ крутизну соответствующей стоко-затворной характеристики по формуле

$$S = \left| \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3-И}} \right| = \frac{I_C(1,09 \cdot U_{3-И\max}) - I_C(1,06 \cdot U_{3-И\max})}{1,09 \cdot U_{3-И\max} - 1,06 \cdot U_{3-И\max}} = \frac{I_C(1,09 \cdot U_{3-И\max}) - I_C(1,06 \cdot U_{3-И\max})}{0,03 \cdot U_{3-И\max}}.$$

Результаты заносим в таблицу 6.10 (пример).

Таблица 6.10 (пример)

$U_{C-И}, (V2), В$	$S, \text{ мА/В}$
2	3199
5	3218
12	3261

7. Транзисторные ключи

7.1. Темы для подготовки к лабораторной работе

Назначение и классификация электронных транзисторных ключей. Основные параметры электронных ключей. Нормально замкнутый и нормально разомкнутый ключи на биполярных транзисторах. Принципиальные схемы и их передаточные характеристики. Статические режимы работы ключей на биполярных транзисторах. Ключи на полевых транзисторах.

7.2. Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены электронные ключи?
2. Что понимается под нормально замкнутым ключом на биполярном транзисторе? Привести схему ключа.
3. Что понимается под нормально разомкнутым ключом на биполярном транзисторе? Привести схему ключа.
4. Что называется передаточной характеристикой ключа?
5. Привести основные параметры электронных ключей.
6. Особенности ключей, собранных на полевых транзисторах.

7.3. Лабораторная работа № 7

Исследование транзисторных ключей

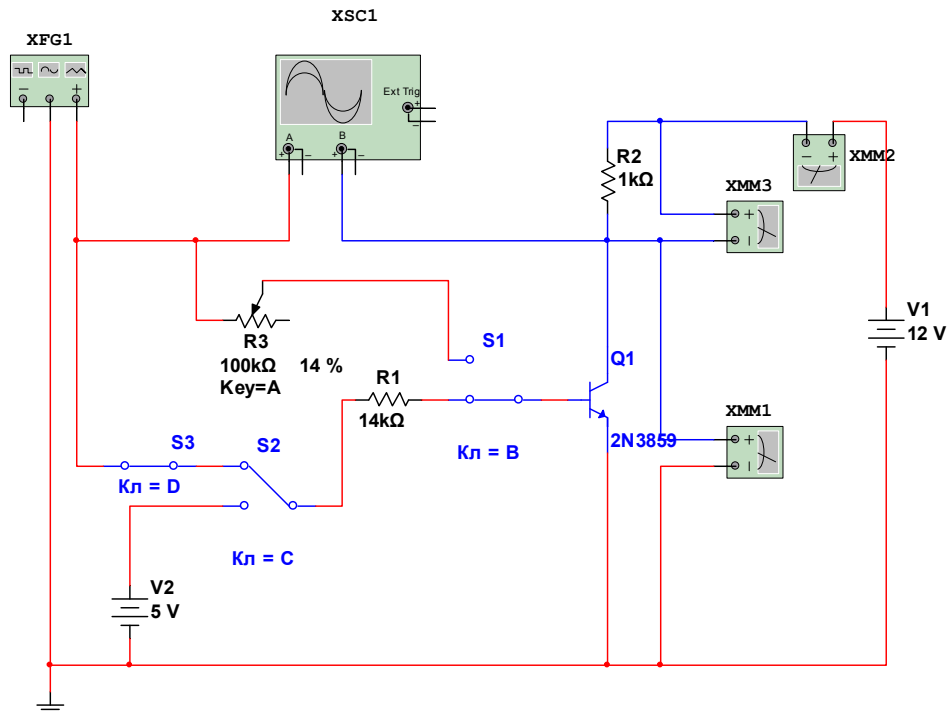
Цель работы: экспериментально исследовать работу транзисторных ключей, собранных на биполярных и полевых транзисторах.

Задание 1. Исследовать работу нормально разомкнутого ключа, собранного на биполярном транзисторе.

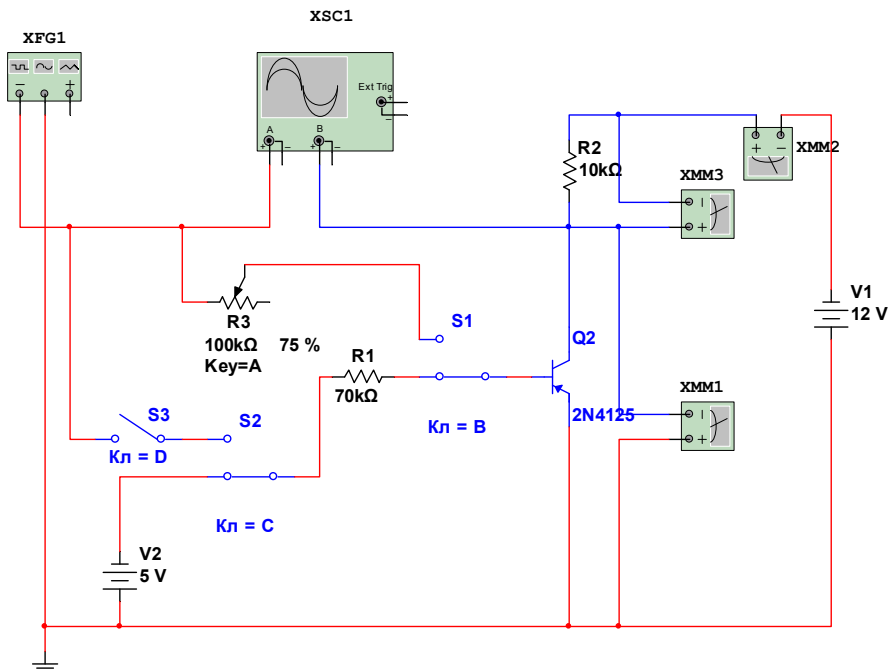
1.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 7.1. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров, амперметров, функционального генератора, осциллографа и источников питания.

1.2. Транзистор следует выбрать в соответствии с номером своего варианта из таблицы 7.1. **Обратить внимание на тип проводимости биполярного транзистора!** В соответствии с типом проводимости руководствоваться рисунком 7.1, *а* или *б*. Установить параметры вольтметров ХММ1, ХММ3: MODE — DC, $R_V = 10$ МОм; амперметра ХММ2: MODE — DC, $R_A = 10$ мкОм; сопротивления резисторов R_1 и R_2 определяются расчетным путем. На рисунке 7.1 транзисторы Q1 и Q2 соответствуют исходным данным из таблицы 7.1, строки «ПР» — «Пример». Величины сопротивлений R_1 и R_2 также рассчитаны для транзисторов из строк «ПР». Параметры двухканального осциллографа XSC1: режим работы «DC»; чувствительность по каналам «А» и «В» — 5 В/дел (V/Div); синхронизация — «Норм»; длительность развертки в режиме «Y/T» —

50 мкс/дел ($\mu\text{s}/\text{Div}$). Для большего удобства работы с осциллографом в процессе эксперимента можно изменять его чувствительность по каналам «А» и «В» и (или) изменять время развертки, а также можно установить удобные смещения осциллограмм по каналам.



а



б

Рис. 7.1. Схема для исследования нормально разомкнутого ключа: а — на биполярном $n-p-n$ транзисторе; б — на биполярном $p-n-p$ транзисторе

Таблица 7.1

№	Биполярный транзистор	Тип	$P_{K \max}$, Вт	$U_{KB \max}$, В	$U_{KЭ \max}$, В	$I_{Э \max}$, А	$I_{K \max}$, А	Коэффициент передачи по току при I_K и $U_{KЭ}$		
								$K_{I \min}$	I_K , мА	$U_{KЭ}$, В
1	2N2712	<i>n-p-n</i>	0,2	18	18	0,011	0,011	75	2	4,5
2	2N3702	<i>p-n-p</i>	0,36	40	25	0,009	0,014	60	50	5
3	2N2714	<i>n-p-n</i>	0,2	18	18	0,011	0,011	75	2	4,5
4	2N3703	<i>p-n-p</i>	0,36	50	30	0,0072	0,012	30	50	5
5	2N2923	<i>n-p-n</i>	0,36	25	25	0,014	0,014	90	10	2
6	2N4061	<i>p-n-p</i>	0,36	30	30	0,012	0,012	90	1	5
7	2N2924	<i>n-p-n</i>	0,36	25	25	0,014	0,014	150	10	2
8	2N4062	<i>p-n-p</i>	0,36	30	30	0,012	0,012	180	1	5
9	2N3711	<i>n-p-n</i>	0,36	30	30	0,012	0,012	180	1	5
10	2N5086	<i>p-n-p</i>	0,31	50	50	0,0062	0,0062	120	10	5
ПР	2N3859	<i>n-p-n</i>	0,36	30	30	0,012	0,012	100	2	4,5
ПР	2N4125	<i>p-n-p</i>	0,35	30	30	0,0012	0,0012	50	2	10

Начальные настройки функционального генератора XFG1:

- форма сигнала — прямоугольный импульс;
- частота — 10 кГц (соответствует примеру);
- длительность — 50 %;
- амплитуда — 5 (Vp) (соответствует примеру);
- смещение — 0 В (V).

В таблице 7.1 приведены максимальные значения токов эмиттера $I_{Э \max}$ и коллектора $I_{K \max}$, вычисленные по формулам

$$I_{Э \max} = \frac{P_{K \max}}{U_{KB \max}}, \quad I_{K \max} = \frac{P_{K \max}}{U_{KЭ \max}}.$$

Величины $P_{K \max}$, $U_{KB \max}$ и $U_{KЭ \max}$ являются паспортными данными транзисторов.

1.3. Рассчитать величины сопротивлений R_1 и R_2 . Для удобства определения значений сопротивлений резисторов полезно заполнить таблицу 7.2 необходимыми исходными данными. В таблице 7.2 для величин $U_{БЭ}$ (напряжение открытия между базой и эмиттером для кремниевых биполярных транзисторов), $U_{KЭ \text{ на с}}$ (напряжение между коллектором и эмиттером в режиме насыщения), $K_{\text{на с}}$ (коэффициент насыщения) представлены диапазоны возможных значений. В строке значений для этих величин представлены принятые (рекомендуемые) для расчета данные (отмечены звездочкой *). Напряжение питания $E_{\text{пит}}$ и входное напряжение $U_{\text{вх}}$ являются одинаковыми для всех вариантов и задаются источником V1 и амплитудой напряжения функционального генератора или источником V2 соответственно. В столбцы 6 и 7 занести данные для своего транзистора из таблицы вариантов 7.1, в столбцы 8 и 9 — результаты расчетов значений сопротивлений резисторов.

Таблица 7.2

$E_{ПИТ}$ (V1), В	$U_{ВХ}$, (V2) В	$U_{БЭ}$, (0,6—0,8), В	$U_{КЭ НАС}$ (0,2—0,3), В	$K_{НАС}$ (1,5—3)	$I_{К НАС} = I_{К max}$, А	$K_{I min}$	$R_2 = R_K$, Ом	$R_1 = R_B$, Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
12*	5*	0,8*	0,2*	2,5*				

Сопротивление коллекторной цепи:

$$R_2 = \frac{E_{ПИТ} - U_{КЭ НАС}}{I_{К НАС}}$$

Сопротивление базовой цепи:

$$R_1 = \frac{(U_{ВХ} - U_{БЭ}) \cdot K_{I min}}{K_{НАС} \cdot I_{К НАС}}$$

Для выполнения дальнейших исследований в таблице 7.3 для удобства приведены положения переключателей S1, S2 и S3 для разных режимов работы ключа.

Таблица 7.3

№	Режим нормально разомкнутого ключа	S1	S2	S3
1	Статический — ключ закрыт (управляющее напряжение на базе отсутствует)	Нижнее	Верхнее	Верхнее (разомкнут)
2	Статический — ключ открыт (на базу подано постоянное напряжение от источника V2)	Нижнее	Нижнее	Верхнее (разомкнут)
3	Динамический с резистором R_1 (на базу подается управляющее напряжение с функционального генератора)	Нижнее	Верхнее	Нижнее (замкнут)
4	Динамический с потенциометром R_3 (на базу подается управляющее напряжение с функционального генератора)	Верхнее	Верхнее	Верхнее (разомкнут)

1.4. Проверить работу нормально разомкнутого ключа в статическом режиме.

Перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие первой строке таблицы 7.3 (закрытое состояние ключа). Убедиться при помощи осциллографа и вольтметра ХММ1 в наличии напряжения между эмиттером и коллектором, приблизительно равного напряжению питания. Для *n-p-n* транзистора сплошная линия на осциллограмме будет выше нулевой линии, а для *p-n-p* транзистора — ниже. Зафиксировать в отчете скриншоты с показаниями вольтметра ХММ1, амперметров ХММ2, ХММ3 и вид осциллограммы.

Перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие второй строке таблицы 7.3 (открытое состояние ключа). Убедиться при помощи осциллографа и

вольтметра ХММ1 в отсутствии напряжения между эмиттером и коллектором. Для транзисторов обоих типов проводимости сплошная линия на осциллограмме должна практически совпадать с нулевой линией напряжений. При этом показание вольтметра ХММ1 может составлять несколько десятков милливольт. Зафиксировать в отчете скриншоты с показаниями вольтметра ХММ1, амперметров ХММ2, ХММ3 и вид осциллограммы.

1.5. Проверить работу нормально разомкнутого ключа в динамическом режиме.

Перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие третьей строке таблицы 7.3. Зафиксировать в отчете скриншоты с показаниями вольтметра ХММ1, амперметров ХММ2, ХММ3 и вид осциллограммы.

1.6. Оценить правильность расчета сопротивления базы R_1 . Для этого перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие четвертой строке таблицы 7.3. При помощи движка потенциометра R_3 получить на осциллограмме наиболее чистое и правильное изображение импульсов, приходящих на канал «В» осциллографа. Если искомое значение выходит за установленный предел потенциометра $R_3 = 100 \text{ кОм}$, следует выключить схему и в настройках потенциометра R_3 изменить его максимальное значение, установив его с некоторым запасом. Повторить эксперимент и сравнить полученное значение R_3 с вычисленным ранее R_1 . Результат занести в отчет.

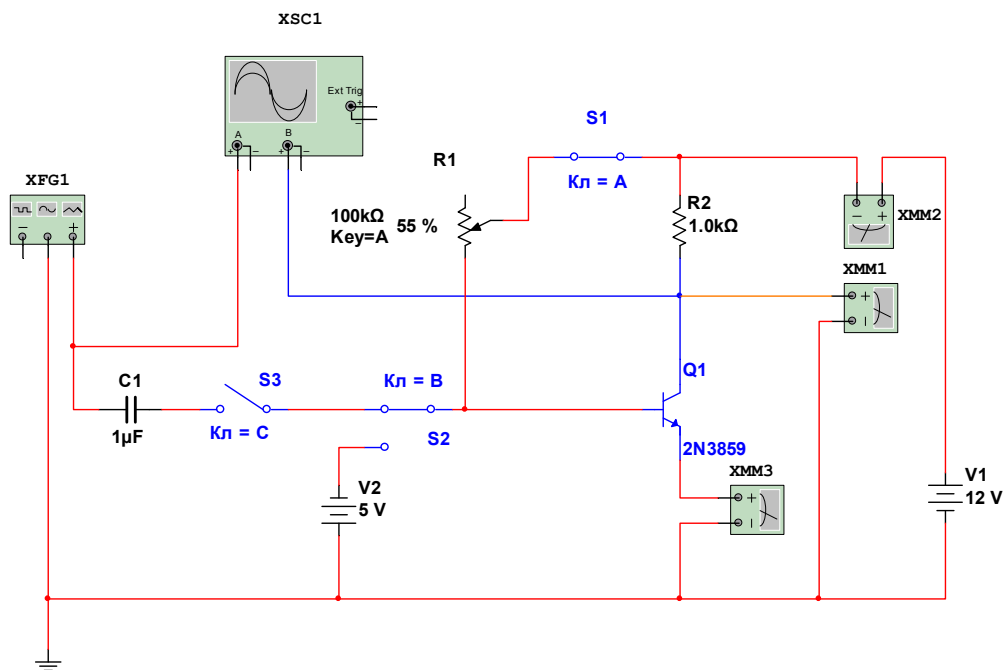
Задание 2. Исследовать работу нормально замкнутого ключа, собранного на биполярном транзисторе.

2.1. Тип транзистора оставить прежним, в соответствии со своим вариантом из таблицы 7.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 7.2. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов вольтметров, амперметров, функционального генератора, осциллографа и источников питания. Настройки и установки измерительных приборов взять из п. 1.2. Рассчитанное ранее сопротивление коллекторной цепи R_2 взять из п. 1.3. Емкость конденсатора $C_1 = 1 \text{ мкФ}$. Движок потенциометра R_1 установить на 50%.

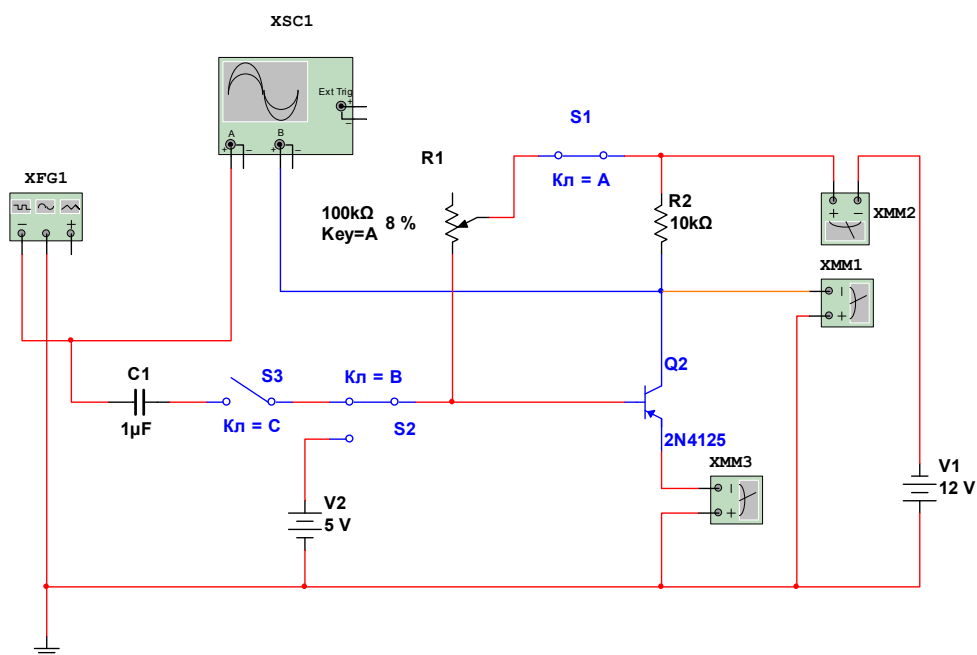
Для выполнения дальнейших исследований в таблице 7.4 для удобства приведены положения переключателей S1, S2 и S3 для разных режимов работы ключа.

Таблица 7.4

№	Режим нормально разомкнутого ключа	S1	S2	S3
1	Статический — ключ открыт (управляющее напряжение на базе отсутствует)	Нижнее (замкнут)	Верхнее	Верхнее (разомкнут)
2	Статический — ключ закрыт (на базу подано постоянное управляющее напряжение от источника V2)	Нижнее (замкнут)	Нижнее	Верхнее (разомкнут)
3	Динамический (на базу подается управляющее напряжение с функционального генератора)	Нижнее (замкнут)	Верхнее	Нижнее (замкнут)



a



б

Рис. 7.2. Схема для исследования нормально замкнутого ключа:
a — на биполярном *n-p-n* транзисторе; *б* — на биполярном *p-n-p* транзисторе

2.2. Проверить работу нормально разомкнутого ключа в статическом режиме.

Перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие первой строке таблицы 7.4 (открытое состояние ключа). Убедиться при помощи осциллографа и вольтметра XMM1 в отсутствии напряжения между эмиттером и коллектором. Для транзисторов обоих типов сплошная линия на осциллограмме должна

совпадать с нулевой линией напряжений. При этом показание вольтметра ХММ1 может составлять несколько десятков милливольт. Зафиксировать в отчете скриншоты с показаниями вольтметра ХММ1, амперметров ХММ2, ХММ3 и вид осциллограммы.

Перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие второй строке таблицы 7.4 (закрытое состояние ключа). Убедиться при помощи осциллографа и вольтметра ХММ1 в наличии напряжения между эмиттером и коллектором, приблизительно равного напряжению питания. Для *n-p-n* транзистора сплошная линия на осциллограмме будет выше нулевой линии, а для *p-n-p* транзистора — ниже. Зафиксировать в отчете скриншоты с показаниями вольтметра ХММ1, амперметров ХММ2, ХММ3 и вид осциллограммы.

2.3. Проверить работу ключа в динамическом режиме.

Перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие третьей строке таблицы 7.4. Зафиксировать в отчете скриншоты с показаниями вольтметра ХММ1, амперметров ХММ2, ХММ3 и вид осциллограммы.

2.4. Перевести переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие третьей строке таблицы 7.4. При помощи движка потенциометра R_1 получить на осциллограмме наиболее чистое и правильное изображение импульсов, приходящих на канал «В» осциллографа. Если искомое значение выходит за установленный предел потенциометра $R_1 = 100$ кОм, следует выключить схему и в настройках потенциометра R_1 изменить его максимальное значение, установив его с некоторым запасом. Повторить эксперимент и полученное значение сопротивления потенциометра R_1 занести в отчет.

Задание 3. Исследовать работу ключа, собранного на полевых транзисторах с индуцированным каналом.

3.1. Собрать на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 7.3. При включении измерительных приборов обратить внимание на полярность внешних полюсов функционального генератора и осциллографа.

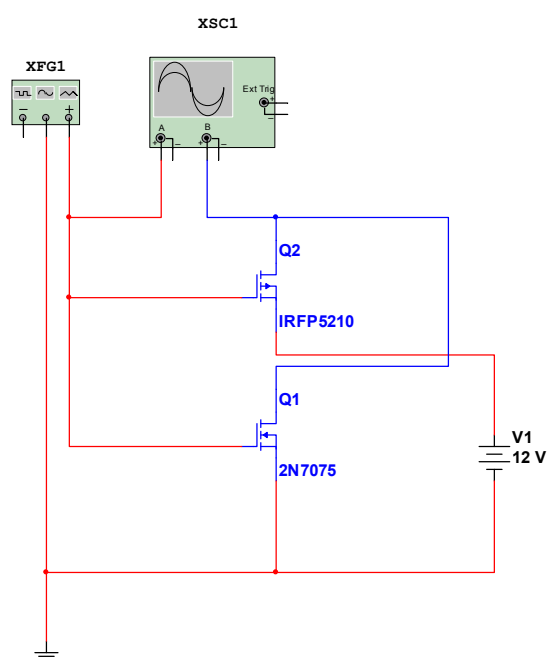


Рис. 7.3. Схема для исследования ключа на полевых транзисторах

3.2. Транзистор следует выбрать в соответствии с номером своего варианта из таблицы 7.5. **Обратить внимание на тип проводимости полевого транзистора!** На рисунке 7.3 транзисторы Q1 и Q2 соответствуют исходным данным из таблицы 7.5, строка «ПР» — «Пример».

Таблица 7.5

№	Полевой транзистор с индуцированным каналом	Тип канала	Пороговое напряжение открытия канала $U_{3-И \max}$, В
1	IRFP9141	<i>p</i>	3,09
	2N7012	<i>n</i>	3,05
2	IRFP9142	<i>p</i>	3,09
	2N7071	<i>n</i>	3,89
3	IRFP9241	<i>p</i>	3,71
	2N7072	<i>n</i>	2,71
4	IRFR9110	<i>p</i>	2,65
	2N7073	<i>n</i>	3,34
5	IRFR9024	<i>p</i>	3,78
	2N7074	<i>n</i>	3,47
ПР	2N7075	<i>n</i>	3,20
	IRFP5210	<i>p</i>	3,80

Параметры двухканального осциллографа XSC1: режим работы «DC»; чувствительность по каналам «А» и «В» — 5 В/дел (V/Div); синхронизация — «Норм»; длительность развертки в режиме «Y/T» — 50 мкс/дел ($\mu\text{s}/\text{Div}$). Для большего удобства работы с осциллографом в процессе эксперимента можно изменять его чувствительность по каналам «А» и «В» и (или) изменять время развертки, а также установить удобные смещения осциллограмм по каналам.

Начальные настройки функционального генератора XFG1:

- форма сигнала — прямоугольный импульс;
- частота — 10 кГц (соответствует примеру);
- длительность — 50 %;
- амплитуда — 10 (Vp) (соответствует примеру);
- смещение — 0 В (V).

3.3. Запустить схему и определить по виду осциллограммы, при каком управляющем импульсе (положительном или отрицательном) ключ открыт. Зафиксировать в отчете скриншот осциллограммы.

7.4. Пример выполнения лабораторной работы

Задание 1. Исследовать работу нормально разомкнутого ключа, собранного на биполярном транзисторе.

1.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 7.1.

1.2. Для определенности исследуем работу нормально разомкнутого ключа, собранного на биполярном *n-p-n* транзисторе, взятого из строки «ПР» — «Пример» таблицы 7.1.

1.3. Рассчитываем величины сопротивлений R_1 и R_2 . Для удобства определения значений сопротивлений резисторов заполняем таблицу 7.2 (пример 1).

Таблица 7.2 (пример 1)

$E_{ПИТ}$ (V1), В	$U_{ВХ}$ (V2), В	$U_{БЭ}$ (0,6—0,8), В	$U_{КЭ НАС}$ (0,2—0,3), В	$K_{НАС}$ (1,5—3)	$I_{К НАС} = I_{Kmax}$, А	$K_{I min}$	$R_2 = R_K$, Ом	$R_1 = R_B$, Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	5	0,8	0,2	2,5	0,012	100	1000	14000

Сопротивление коллекторной цепи:

$$R_2 = \frac{E_{ПИТ} - U_{КЭ НАС}}{I_{К НАС}} = \frac{12 - 0,2}{0,012} = 983 \text{ Ом} \approx 1 \text{ кОм}.$$

Сопротивление базовой цепи:

$$R_1 = \frac{(U_{ВХ} - U_{БЭ}) \cdot K_{I min}}{K_{НАС} \cdot I_{К НАС}} = \frac{(5 - 0,8) \cdot 100}{2,5 \cdot 0,012} = 14000 \text{ Ом} = 14 \text{ кОм}.$$

1.4. Проверяем работу нормально разомкнутого ключа в статическом режиме.

Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие первой строке таблицы 7.3 (закрытое состояние ключа). Включаем схему. На рисунке 7.4 представлены показания приборов и вид осциллограммы.

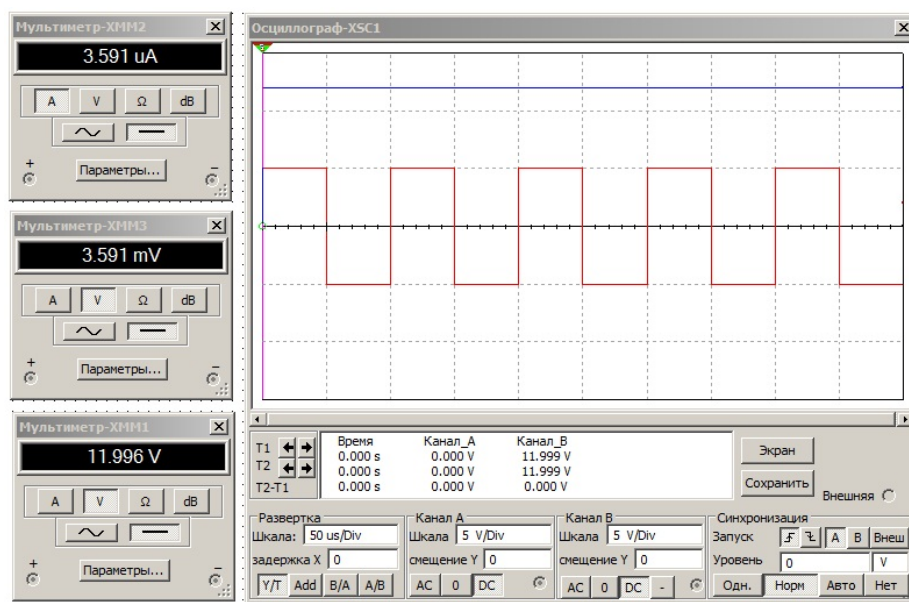


Рис. 7.4. Нормально разомкнутый ключ, статический режим, закрытое состояние

Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие второй строке таблицы 7.3 (открытое состояние ключа). Включаем схему. На рисунке 7.5 представлены показания приборов и вид осциллограммы.

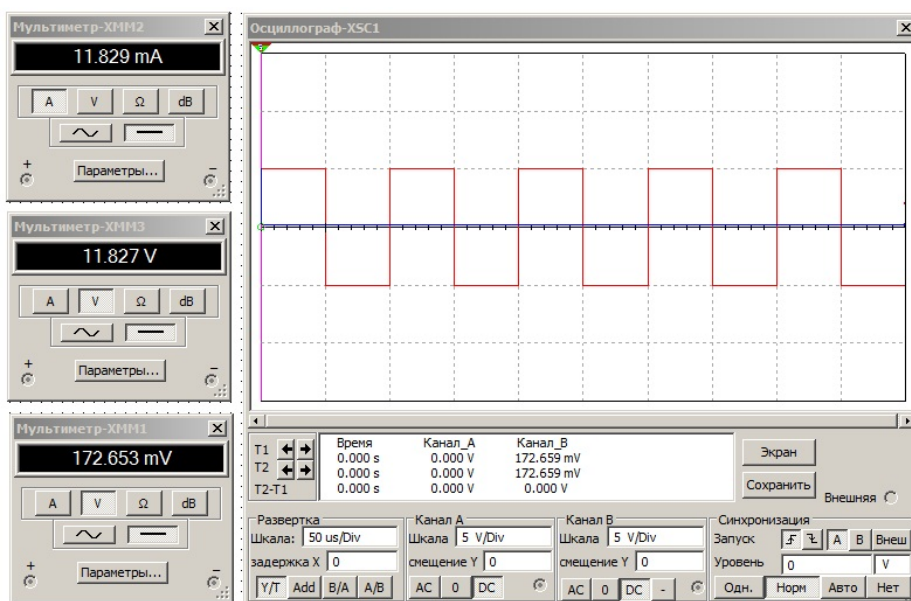


Рис. 7.5. Нормально разомкнутый ключ, статический режим, открытое состояние

1.5. Проверить работу нормально разомкнутого ключа в динамическом режиме.

Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие третьей строке таблицы 7.3. Включаем схему. На рисунке 7.6 представлены показания приборов и вид осциллограммы.

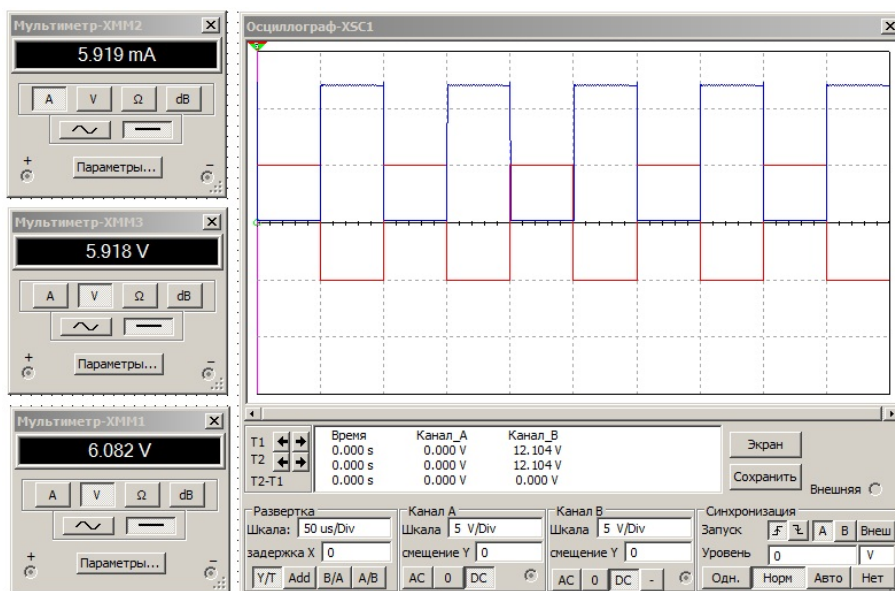


Рис. 7.6. Нормально разомкнутый ключ, динамический режим

1.6. Оценим правильность расчета сопротивления базы R_1 . Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие четвертой строке таблицы 7.3. При помощи движка потенциометра R_3 добиваемся на осциллограмме наиболее чистого и правильного изображения импульсов, приходящих на канал «В» осциллографа. Наи-

лучший вид импульсов получается при значении R_3 , составляющем 14% от 100 кОм, то есть 14000 Ом. Полученное значение хорошо согласуется с ранее вычисленным сопротивлением цепи базы.

Задание 2. Исследовать работу нормально замкнутого ключа, собранного на биполярном транзисторе.

2.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 7.2.

Для того чтобы рассмотреть примеры работы ключей, собранных на биполярных транзисторах обоих типов проводимости, исследуем работу нормально замкнутого ключа, собранного на биполярном $p-n-p$ транзисторе, взятого из строки «ПР» — «Пример» таблицы 7.1 (студентам рекомендуется оставить прежний тип транзистора, соответствующий своему варианту из таблицы 7.1). Для исследуемого $p-n-p$ транзистора вновь рассчитаем величину сопротивления коллекторной цепи R_2 . Для удобства исходные данные снова представим в виде таблицы 7.2 (пример 2).

Таблица 7.2 (пример 2)

$E_{ПИТ}$ (V1), В	$U_{ВХ}$ (V2), В	$U_{БЭ}$ (0,6—0,8), В	$U_{КЭ НАС}$ (0,2—0,3), В	$K_{НАС}$ (1,5—3)	$I_{К НАС} = I_{К max}$, А	$K_{I min}$	$R_2 = R_K$, Ом	$R_1 = R_B$, Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	5	0,8	0,2	2,5	0,0012	50	10000	—

Сопротивление коллекторной цепи:

$$R_2 = \frac{E_{ПИТ} - U_{КЭ НАС}}{I_{К НАС}} = \frac{12 - 0,2}{0,0012} = 9833 \text{ Ом} \approx 10 \text{ кОм}.$$

2.2. Проверяем работу нормально замкнутого ключа в статическом режиме.

Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие первой строке таблицы 7.4 (открытое состояние ключа). Включаем схему. На рисунке 7.7 представлены показания приборов и вид осциллограммы.

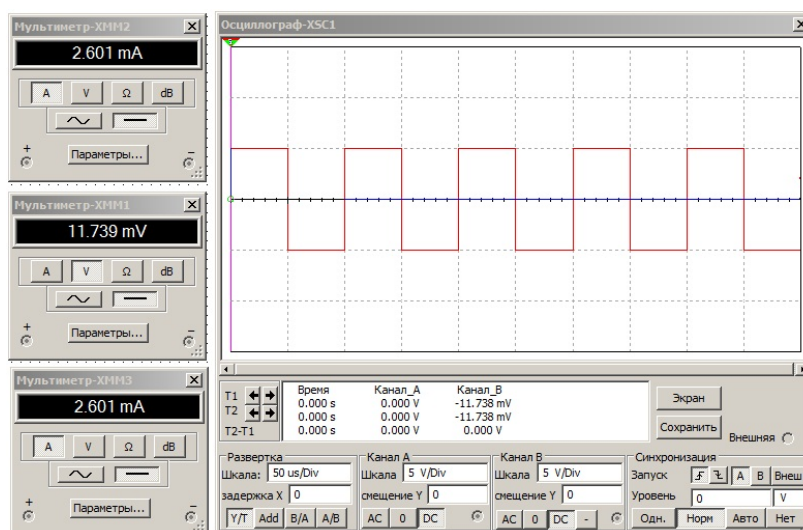


Рис. 7.7. Нормально замкнутый ключ, статический режим, открытое состояние

Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие второй строке таблицы 7.4 (закрытое состояние ключа). Включаем схему. На рисунке 7.8 представлены показания приборов и вид осциллограммы.

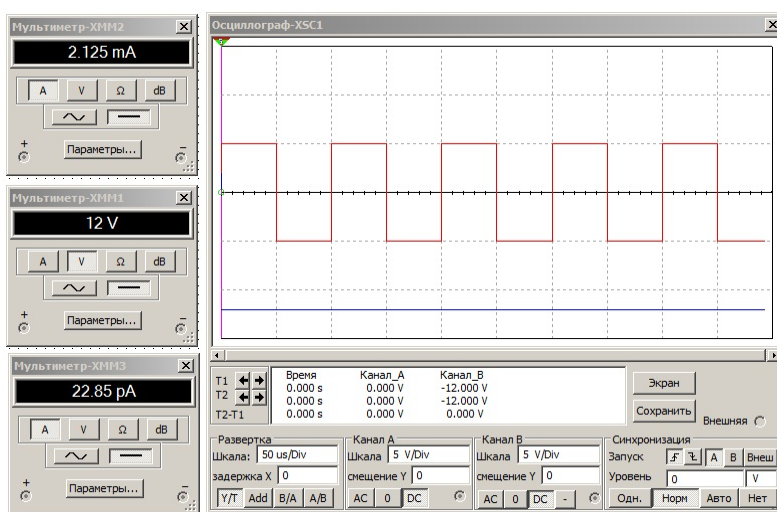


Рис. 7.8. Нормально замкнутый ключ, статический режим, закрытое состояние

2.3. Проверяем работу нормально замкнутого ключа в динамическом режиме.

Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие третьей строке таблицы 7.4. Включаем схему. На рисунке 7.9 представлены показания приборов и вид осциллограммы.

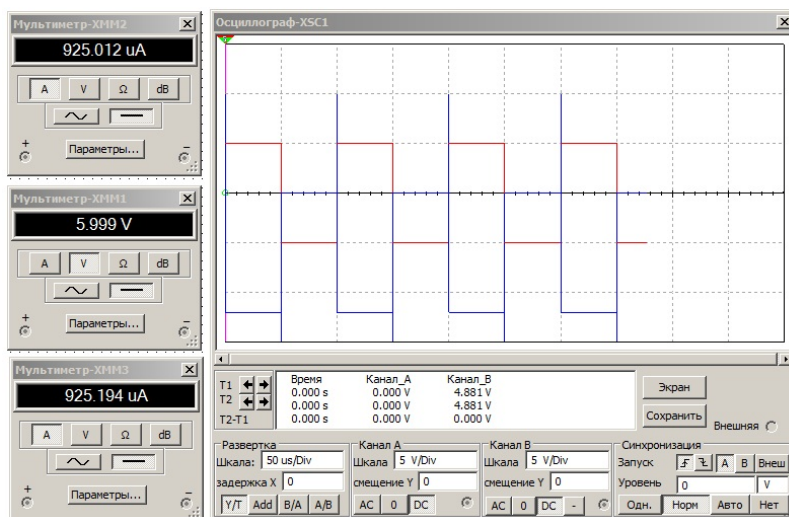


Рис. 7.9. Нормально замкнутый ключ, динамический режим

2.4. Переводим переключатели S1, S2 и S3 в положения, соответствующие третьей строке таблицы 7.4. При помощи движка потенциометра R_1 убеждаемся в том, что на осциллограмме получены наиболее чистые и правильные изображения импульсов, приходящих на канал «В» осциллографа при значении R_1 , составляющем более 50% от 100 кОм, то есть $R_1 > 50$ кОм.

Задание 3. Исследовать работу ключа, собранного на полевых транзисторах с индуцированным каналом.

3.1. Собираем на рабочем поле схему цепи с измерительными приборами в соответствии с рисунком 7.3.

3.2. В качестве транзисторов, на которых собран ключ, выбираем транзисторы из строк «ПР» — «Пример» таблицы 7.5.

3.3. Запускаем схему и наблюдаем процессы открытия и закрытия ключа. На рисунке 7.10 представлены осциллограммы процессов.

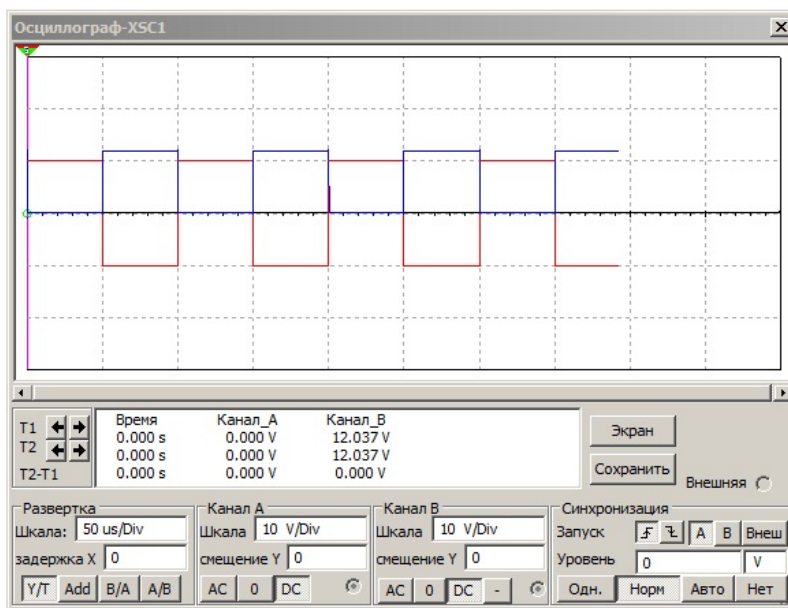


Рис. 7.10. Ключ, собранный на полевых транзисторах с индуцированным каналом

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гусев В. Г., Гусев Ю. М.* Электроника и микропроцессорная техника : учебник для вузов. 6-е изд., стер. М. : КноРус, 2013.
2. *Кучумов А. И.* Электроника и схемотехника : учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Гелиос АРВ, 2005.
3. *Марченко А. Л.* Основы электроники : учеб. пособие для вузов. М. : ДМК Пресс, 2008.
4. *Основы электроники, радиотехники и связи* : учеб. пособие для вузов / А. Д. Гуменюк, В. И. Журавлев, Ю. Ю. Мартюшев [и др.] ; под ред. Г. Д. Петрухина. М. : Горячая линия — Телеком, 2008.
5. *Павлов В. Н., Ногин В. Н.* Схемотехника аналоговых электронных устройств : учебник для студ. вузов, обучающихся по напр. «Радиотехника», «Электроника и микроэлектроника». 2-е изд., испр. М. : Горячая линия — Телеком, 2001.
6. *Прянишников В. А.* Электроника: полный курс лекций. 4-е изд. СПб. : Корона Принт, 2004 ; 5-е изд. М. : Бинوم-Пресс, 2006.
7. *Соколов С. В., Титов Е. В.* Электроника : учеб. пособие для вузов. М. : Горячая линия — Телеком, 2013.
8. *Сорокин В. С., Антипов Б. Л., Лазарева Н. П.* Материалы и элементы электронной техники : учебник для вузов : в 2 т. М. : Академия, 2006. Т. 1 : Проводники, полупроводники, диэлектрики ; Т. 2 : Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники.
9. *Марченко А. Л., Освальд С. В.* Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim + CD : учеб. пособие для вузов. М. : ДМК, 2010. + 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное издание

Горбачев Андрей Александрович
Ветров Игорь Анатольевич

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Часть 1

Электроника

Учебно-методическое пособие

Редактор *Д. А. Малеваная*. Корректор *С. В. Ильина*
Компьютерная верстка *Г. И. Винокуровой*

Подписано в печать 19.01.2023 г.
Формат 75×90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 8,2
Тираж 300 экз. (1-й завод 45 экз.). Заказ 3

Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
236001, г. Калининград, ул. Гайдара, 6