

Межрегиональный центр переподготовки специалистов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
Лабораторная работа №1

ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ»

Новосибирск, 2024

1. Цель работы: Изучить определяющие характеристики транзисторов

2 Теоретическое введение

Транзисторный ключ является основным элементом устройств цифровой электроники и очень многих устройств силовой электроники. Параметры и характеристики транзисторного ключа в очень большой степени определяют свойства соответствующих схем. Качественное улучшение параметров и характеристик транзисторных ключей приводит к радикальному улучшению электронных устройств.

Биполярный транзистор

Простейший ключ на биполярном транзисторе показан на рис. 2.1. Резистор $R_б$ в цепи базы служит для задания необходимого тока базы. Резистор $R_к$ является внутренней нагрузкой ключа, а резистор $R_н$ – его внешней нагрузкой. Величина внешней нагрузки может меняться в широких пределах. При $R_к = \infty$ ключ работает в режиме холостого хода. Предельной нагрузкой, при которой ключ еще должен сохранять свои параметры, считают величину $R_н = R_к$.

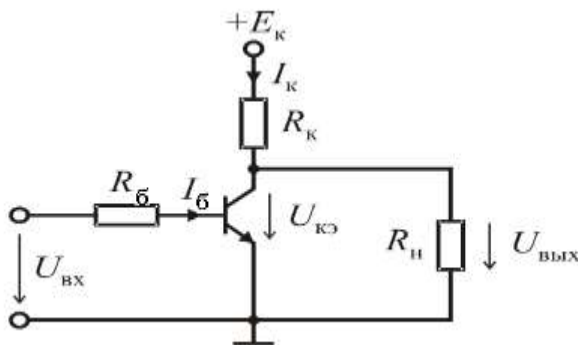


Рисунок 2.1 - Простейший ключ на биполярном транзисторе

Распространены ключевые схемы в цепях, управляемых электронными устройствами – цифровыми управляющими устройствами, микропроцессорными системами, в том числе в устройствах с импульсным регулированием или стабилизацией напряжения источников питания, потребляемой нагрузкой мощности. Назначение таких ключей – коммутация электрических цепей.

Рассмотрим статический (по постоянному току) и динамический режимы работы ключа:

Статический режим. В статическом режиме ключ может быть закрыт (транзистор находится в режиме отсечки) либо открыт (транзистор находится в режиме насыщения). Ключ закрыт, когда напряжение на входе меньше напряжения логического нуля $0 U_{вх}$. Для ключей на кремниевых биполярных транзисторах оно составляет 0.4–0.5 В. В этом режиме $I_к = I_б = 0$. Сопротивление закрытого ключа составляет сотни кОм. Если на входе

действует импульс напряжения такой величины, чтобы транзистор находился в режиме насыщения, то ток базы

$$I_{\bar{o},mp} = \frac{U_{вх} - U_{\bar{o}э}}{R_{\bar{o}}} . \quad (2.1)$$

В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, и ток коллектора возрастает до наибольшего значения:

$$I_{\kappa} = I_{\kappa нас} = \frac{E_{\kappa} - U_{\kappa э}}{R_{\kappa}} . \quad (2.2)$$

Напряжение $U_{\kappa э}$ в режиме насыщения составляет 0.2–0.3 В, а выходное сопротивление – несколько десятков Ом. Для насыщения транзистора необходимо, чтобы ток базы стал больше минимального значения, при котором начинается насыщение транзистора:

$$I_{\bar{o}} \succ \frac{I_{\kappa нас}}{\beta} \approx \frac{E_{\kappa}}{\beta \cdot R_{\kappa}}$$

Транзистор должен входить в режим насыщения, когда входное напряжение превышает напряжение логической единицы U_{1max} . Для ключей на биполярных транзисторах $U_{1max} = 2.7 - 5В$. Передаточная характеристика ключа на БТ показана на рисунке 2.2. Рабочими являются участки переходной характеристики, соответствующие отсечке и насыщению.

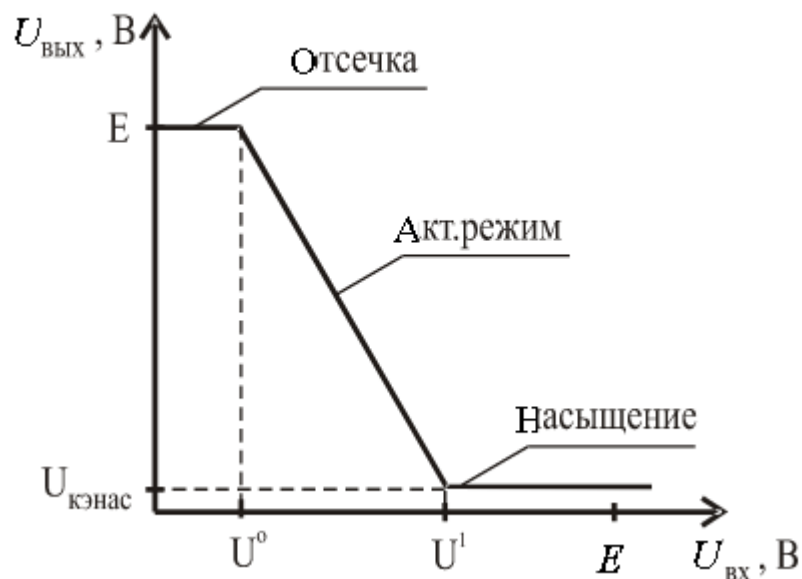


Рисунок 2.2 - Передаточная характеристика ключа на БТ

В данной работе исследуются примитивные ключевые схемы на биполярных транзисторах $p-n-p$ типа и $n-p-n$ типа.

В ключевом режиме транзистор может находиться в двух основных состояниях:

- состояние отсечки (ключ разомкнут), при этом через транзистор протекает минимальный ток;
- состояние насыщения (ключ замкнут), при этом ток, протекающий через транзистор, ограничен резистором коллекторной цепи транзистора.

Полевой транзистор

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на полевом эффекте – изменение электропроводимости поверхностного слоя под действием электрического поля, направленного перпендикулярно поверхности.

От биполярного транзистора полевой транзистор отличается:

- 1) принципом действия: в биполярном транзисторе управление выходным сопротивлением производится либо входным током, либо разностью потенциалов между входными выводами транзистора, а в полевом транзисторе - входным потенциалом затвора или электрическим полем;
- 2) полевой транзистор обладает *большим входным сопротивлением*.
- 3) в полевом транзисторе не происходит инжекции носителей заряда – отсюда уменьшение рекомбинационных явлений и низкий уровень шумов (особенно на низких частотах).

Таким образом:

– полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением сопротивления проводящего канала с помощью поперечного электрического поля. Ток полевого транзистора обусловлен потоком основных носителей.

– электроды полевого транзистора называют истоком (И), стоком (С) и затвором (З). Управляющее напряжение прикладывается между затвором и истоком. Полевой транзистор можно рассматривать как источник тока, управляемый напряжением затвор-исток.

– по конструкции полевые транзисторы можно разбить на две группы: с управляющим $p-n$ -переходом и с металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком.

Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

Принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом основан на изменении проводимости канала за счёт изменения его поперечного сечения. Между стоком и истоком включается напряжение такой полярности, чтобы основные носители заряда (электроны в канале n -типа) перемещались от истока к стоку. Между затвором и истоком включено отрицательное управляющее напряжение, которое запирает $p-n$ -переход. Чем больше это напряжение, тем шире запирающий слой и уже канал. С уменьшением поперечного сечения канала его сопротивление увеличивается, а ток в цепи сток – исток уменьшается. Это позволяет управлять током стока с помощью напряжения затвор-исток $U_{зи}$. При некоторой величине напряжения затвор-

исток запирающий слой полностью перекрывает канал, что приводит к уменьшению проводимости канала. Напряжение $U_{зи}$, при котором перекрывается канал, называют напряжением отсечки и обозначают $U_{отс}$. Для n-канального полевого транзистора напряжение отсечки отрицательно.

Полевой транзистор с металлическим затвором, изолированным от канала диэлектриком.

МДП транзисторы имеют один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала одним или несколькими слоями диэлектрика. При приложении электрического напряжения к участку затвор-исток в полупроводнике на границе с диэлектриком появляется электрический заряд противоположного знака, который влияет на электропроводность прилегающего слоя полупроводника, образующего канал. В виде дискретных элементов выпускаются транзисторы с изолированным затвором двух разновидностей: со встроенным и индуцированным каналом. Транзистор с индуцированным каналом характеризуется тем, что канал возникает только при подаче на затвор напряжения определенной полярности. При нулевом напряжении канал отсутствует. При этом между стоком и истоком включены два обратно смещенных p–n-перехода. Один p–n-переход образуется на границе между подложкой и стоком, а другой – между подложкой и истоком. Таким образом, при нулевом напряжении на затворе сопротивление между стоком и истоком очень велико, ток стока ничтожно мал и транзистор находится в состоянии отсечки.

Удельная крутизна транзистора с индуцированным каналом определяется по формуле (2.1).

$$b = \mu C_0 \frac{W}{L} \approx \frac{I_{c \max}}{U_{зи \min}^2}, \quad (2.1)$$

где μ – приповерхностная подвижность носителей, C_0 – удельная емкость затвор-канал, L – длина, W – ширина канала.

Если напряжение сток-исток мало, как часто бывает в импульсных и ключевых схемах, то выходная характеристика, соответствующая линейному режиму, аппроксимируется выражением (2.2).

$$I_C = b(U_{зи} - U_{отс})U_{си}. \quad (2.2)$$

Величину $b(U_{зи} - U_{отс})$ – называют проводимостью канала, а обратную величину – сопротивлением канала.

Таким образом, при малых напряжениях сток-исток транзистора с индуцированным каналом эквивалентен линейному резистору, сопротивление которого регулируется напряжением затвора.

Передаточная характеристика транзистора с индуцированным каналом представлена на рисунке 2.1.

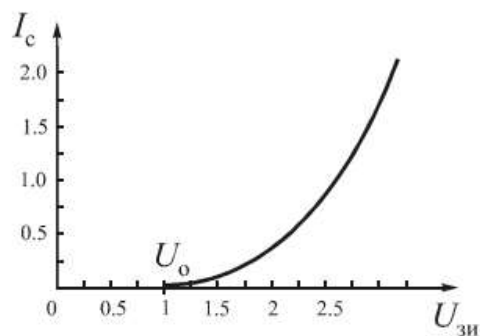


Рисунок 2.1 - Передаточная характеристика транзистора с индуцированным каналом

Транзистор со встроенным каналом n – типа при нулевом напряжении на затворе имеет ненулевое значение, называемое начальным $I_{с\text{ нач}}$. Если $U_{зи} > 0$, число электронов в канале увеличивается. Это приводит к увеличению проводимости канала. Такой режим работы транзистора со встроенным каналом, при котором концентрация носителей в канале больше равновесной, называют режимом обогащения. Передаточная характеристика транзистора со встроенным каналом представлена на рисунке 2.2.

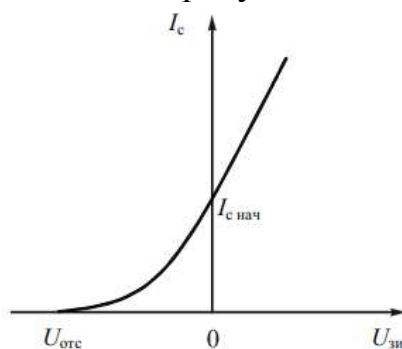


Рисунок 2.2 - Передаточная характеристика транзистора со встроенным каналом

3 Задание на выполнение лабораторной работы

1. Подобрать транзисторы и рассчитать параметры резисторов схем биполярного транзистора.
2. Рассчитать основные параметры и построить сток – затворную и характеристику полевого транзистора.

4 Рекомендации к выполнению исследований

4.1 Биполярный транзистор

1. Выбрать параметры на расчёт ключевой схемы в соответствии с вариантом - значения коммутируемых токов и напряжений ($I_{ком}$, E_2 соответственно), а также значение уровня логической «1» - $E1_{MAX}$.

Варианты приведены в Приложении А. вариант выбирается по последней цифре пароля.

2. Выбрать марку транзистора из предлагаемого набора – КТ3102Е, КТ3102D, КТ315А, 2N5551– по следующим критериям:

$$U_{кэ \max} > E2, \quad (4.1)$$

$$I_{к \max} > I_{ком}. \quad (4.2)$$

Параметры $U_{кэ\max}$ и $I_{к\max}$ выбрать из приложения Б с максимально близкими значениями к заданным.

Характеристики транзисторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 1 – Характеристики транзисторов

ТРАНЗИСТОР	СТАТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ ТОКА $h_{210э}$		
		$U_{кэ \max}$, В	$I_{к \max}$, мА
КТ 3102Е	400....1000	20	200
КТ 3102D	200....500	30	200
КТ 315 А	30....120	25	200
2N 5551	100...500	160	600

3. Рассчитать требуемый ток базы

$$I_{б,тр} = \frac{10 \cdot I_{ком}}{h_{210э}}, \quad (4.3)$$

где $h_{210э}$ - статический коэффициент передачи тока биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (выбрать максимальное значение из диапазона, приведенного в характеристиках транзистора).

4. Рассчитать номиналы резисторов по следующим выражениям

$$R_k \approx \frac{E2}{I_{ком}}, \quad (4.4)$$

$$R_б \approx \frac{E1_{\max}-0.7}{I_{б,тр}}. \quad (4.5)$$

Занести основные параметры транзисторного ключа на *n-p-n* транзисторе в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры транзисторного ключа на *n-p-n* транзисторе

НАИМЕНОВАНИЕ	КОММУТИРУЕМЫЙ ТОК $I_{ком}$	КОММУТИРУЕМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ E_2	ЗНАЧЕНИЕ УРОВНЯ ЛОГИЧЕСКОГО «1» $E1_{max}$	$H_{210Э}$	МАРКА ТРАНЗИСТОРА		ТОК БАЗЫ $I_{б упр}$	НОМИНАЛЫ РЕЗИСТОРОВ	
					$U_{кэ max}$	$I_k max$		R_k	R_b
ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ									
ПАРАМЕТР									

4. По данным, приведенным в таблице 4.3 построить графики входной $I_{\delta}(E1)$ и передаточной $U_n(E1)$ характеристики. Определить порог переключения ключа $E1_{пор}$.

Значение U_n определяется по формуле 4.6.

$$U_n = E2 - U_{кэ}, \quad (4.6)$$

Таблица 4.3 - Параметры транзисторного ключа на *n-p-n* транзисторе

№ п/п	$E1, В$	$I_{\delta}, мА$				$U_{кэ}, В$				U_n
		КТ 3102E	КТ 3102D	КТ 315 А	2N 5551	КТ 3102E	КТ 3102D	КТ 315 А	2N 5551	
1	0	0	0	0	0	13	22	25,99	130	
2	0.25	0,322	0	0,174	0,074	13	22	25,99	130	
3	0.5	0,838	0,004	0,398	0,098	12,23	20,09	25,5	120	
4	0.75	7,174	0,013	0,745	0,145	7,884	10,52	25	108	
5	1	37,63	0,087	1,173	1,173	3,687	2,24	20,2	100	
6	1.25	72,77	0,174	1,635	1,435	0,294	0,27	12,9	88	
7	2	185,2	0,265	3,098	3,198	0,284	0,25	12	70	
8	2.25	223	0,456	3,597	3,6	0,277	0,23	10,1	65,5	
9	2.5	0	0,636	4,099	4,199	0,266	0,2	8,8	44	
10	3	0,322	0,822	5,110	5,210	0,252	0,022	5,1	40	
11	$E1_{max}$	0,838	1,342	7,763	7,863	0.2	0,022	5	40	

По измеренным значениям построить передаточную характеристику транзисторного ключа на *n-p-n* транзисторе

4.2 Расчет характеристик транзисторов с индуцированным каналом

Выбрать тип (марку) полевого транзистора с индуцированным каналом в соответствии с вариантом. Вариант выбирается по последней цифре пароля.

Выписать параметры исследуемого транзистора:

- а) $I_{c \max}$, mA - максимально допустимый постоянный ток стока;
- б) $U_{cu \max}$, B - предельно допустимое напряжение между стоком и истоком;
- с) $U_{zu \max}$, B - предельно допустимое напряжение между затвором и истоком;
- д) $U_{zu \min}$, B - минимальное напряжение между затвором и истоком;
- е) $U_{zu \text{ пор}}$, B – пороговое напряжение для транзистора с индуцированным каналом(выбрать максимальное значение порогового напряжения);

*Характеристики транзистора приведены в Приложении Б.
Вариант соответствует последней цифре пароля.*

Занести значения и марку выбранного транзистора в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Характеристики транзистора с индуцированным каналом

Марка транзистора (тип канала)					
Параметры	$I_{c \max}$	$U_{cu \max}$	$U_{zu \max}$	$U_{zu \min}$	$U_{zu \text{ пор}}$
Ед.изм.	mA	B	B	B	B
Количественные значения					

Построить статическую стоко - затворную характеристику транзистора при 2-х фиксированных *рекомендуемых* значениях $U_{zu} = \text{const}$, вычисляемых по выражениям в первой строке таблицы 4.5:

- вычислить I_c по формуле (2.1) и (2.2) и записать данные таблицы 4.5;
- построить семейство сток-затворных ВАХ.

Таблица 4.2 – Семейство стоко – затворных характеристик транзистора с индуцированным каналом

№	$U_{zu \text{ пор}}$, В	U_{zu} , В	b	U_{zu}, B (рассчитанные значения)	$U_{cu} = 0.01 \cdot U_{cu \max}$, В	$U_{cu} = 0.5 \cdot U_{cu \max}$, В
					(рассчитанные значения)	(рассчитанные значения)
					I_c , mA	I_c , mA
1.		$U_{zu \text{ пор}}$				
2.		$2 \cdot U_{zu \text{ пор}}$				
3.		$3 \cdot U_{zu \text{ пор}}$				
4.		$0.5 \cdot U_{zu \max}$				
5.		$0.95 \cdot U_{zu \max}$				

5. Контрольные работы

1. Дайте определение транзистора. Перечислите типы транзисторов.
2. Какой транзистор называется полевым? Основное отличие полевого транзистора от биполярного.
3. Приведите условно-графическое отображение полевого транзистора, укажите названия выводов латинскими обозначениями и русскими обозначениями.

6 Содержание отчета

1. Тема и цель лабораторной работы.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Графические характеристики.
5. Ответы на контрольные вопросы

Приложение А

варианты	Биполярный транзистор
0.	$I_{КОМ} = 0,05 \text{ A}$; $E_2 = 18 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,0 \text{ В}$
1.	$I_{КОМ} = 0,5 \text{ A}$; $E_2 = 120 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,3 \text{ В}$
2.	$I_{КОМ} = 0,07 \text{ A}$; $E_2 = 22 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,4 \text{ В}$
3.	$I_{КОМ} = 0,05 \text{ A}$; $E_2 = 27 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,0 \text{ В}$
4.	$I_{КОМ} = 0,4 \text{ A}$; $E_2 = 152 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,3 \text{ В}$
5.	$I_{КОМ} = 0,06 \text{ A}$; $E_2 = 29 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,1 \text{ В}$
6.	$I_{КОМ} = 0,09 \text{ A}$; $E_2 = 13 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,2 \text{ В}$
7.	$I_{КОМ} = 0,09 \text{ A}$; $E_2 = 26 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,3 \text{ В}$
8.	$I_{КОМ} = 0,05 \text{ A}$; $E_2 = 21 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,0 \text{ В}$
9.	$I_{КОМ} = 0,05 \text{ A}$; $E_2 = 18 \text{ В}$; $E_{1\text{MAX}} = 4,0 \text{ В}$

Приложение Б

Варианты	Полевые транзисторы с индуцированным каналом
0.	Philips BF 904 $U_{ds}=7 \text{ В}$; $I_d=30 \text{ mA}$; $U_{th}=1 \text{ В}$
1.	Philips BF 904R $U_{ds}=5 \text{ В}$; $I_d=20 \text{ mA}$; $U_{th}=0,7 \text{ В}$
2.	Philips BF 904WR $U_{ds}=8 \text{ В}$; $I_d=35 \text{ mA}$; $U_{th}=1,5 \text{ В}$
3.	Philips BF 909 $U_{ds}=7 \text{ В}$; $I_d=40 \text{ mA}$; $U_{th}=0.8 \text{ В}$
4.	Philips BF 909R $U_{ds}=10 \text{ В}$; $I_d=35 \text{ mA}$; $U_{thoff}=2.5 \text{ В}$
5.	Philips BF 998 $U_{ds}=12 \text{ В}$; $I_d=30 \text{ mA}$; $U_{th}=1.5 \text{ В}$
6.	Philips BF 998R $U_{ds}=15 \text{ В}$; $I_d=20 \text{ mA}$; $U_{th}=3 \text{ В}$
7.	Philips BF 998WR $U_{ds}=10 \text{ В}$; $I_d=20 \text{ mA}$; $U_{th}=1 \text{ В}$
8.	Philips bsv 81 $U_{ds}=40 \text{ В}$; $I_d=50 \text{ mA}$; $U_{th}=3 \text{ В}$
9.	Philips BF 909R $U_{ds}=10 \text{ В}$; $I_d=35 \text{ mA}$; $U_{thoff}=2.5 \text{ В}$