

Григорьев Б.И.

*ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И УСТРОЙСТВА
АНАЛОГОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ*



Санкт-Петербург

2008

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

Б.И. Григорьев

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА И УСТРОЙСТВА АНАЛОГОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



Санкт-Петербург

2008

Григорьев Б.И. Элементная база и устройства аналоговой электроники. Учебное пособие: СПб: СПбГУ ИТМО, 2008, 82с.

Учебное пособие содержит методические указания к шести виртуальным лабораторным работам по исследованию статических характеристик полупроводниковых приборов и переходных процессов в ряде устройств на их основе.

В пособии отражены необходимые сведения о характеристиках и параметрах полупроводниковых диодов и стабилитронов, биполярных и полевых транзисторов, о работе выпрямителей и ограничителей напряжения, об особенностях работы транзисторных ключей и схемотехнического моделирования процессов в электронных устройствах.

Пособие ориентировано на элементную базу, приборы и устройства программы Electronics Workbench 4.0 и составлено с учётом проведения лабораторных работ фронтальным методом в учебных лабораториях кафедры ЭЛЕКТРОНИКИ.

Методические указания пособия рекомендованы студентам всех специальностей, изучающих дисциплины ЭЛЕКТРОНИКА, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ, ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА.

Рекомендовано к печати Советом ИФФ от 02 октября 2006г., протокол №2.



© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2008

© Б.И. Григорьев, 2008

Лабораторная работа №1

Вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов и стабилитронов

Цель работы: определение вольтамперных характеристик (ВАХ) и основных электрических параметров выпрямительных диодов, светодиодов и стабилитронов.

Основные положения. Условные обозначения выпрямительных диодов и светодиодов приведены на рис. 1.1, а и 1.1, б соответственно,

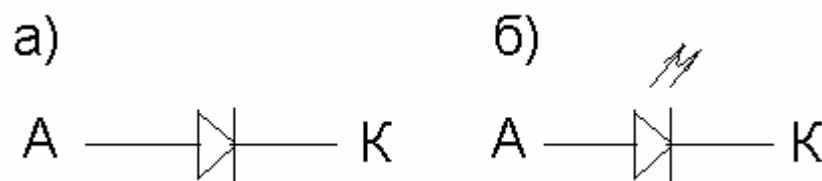


Рис. 1.1. Условные обозначения полупроводниковых диодов:
а – выпрямительных диодов, б – светодиодов

где А – анод и К – катод – металлические выводы, посредством которых диод может быть подсоединен к внешней электрической цепи. Подобие стрелки в условных обозначениях показывает, в каком направлении диод пропускает электрический ток (в противоположном направлении – не пропускает).

Основное назначение выпрямительных диодов – разделение по току ветвей сложных электрических цепей, а светодиодов – преобразование электрической энергии (тока) в световое излучение (поток фотонов).

Диоды изготавливают из разных полупроводниковых материалов (выпрямительные диоды – из германия и кремния, светодиоды – из так называемых широкозонных материалов, например, арсенида галлия). Предпочтительным полупроводниковым материалом при изготовлении выпрямительных диодов является кремний, так как приборы на его основе способны работать при больших, нежели германиевые диоды, температурах окружающей среды. Для изготовления светодиодов, помимо арсенида галлия, применяют фосфид галлия, карбид кремния и твердые растворы арсенида галлия и фосфида галлия.

Основой диода является р-п-переход, состоящий из двух полупроводниковых областей с разным типом проводимости (электронной и дырочной). При этом электроны – основные носители электрического тока в п-области и неосновные – в р-области, а дырки – основные носители электрического тока в р-области и неосновные – в п-области. Схематические изображения двух возможных вариантов р-п-переходов (полупроводниковых диодов) показаны на рис. 1.2, где

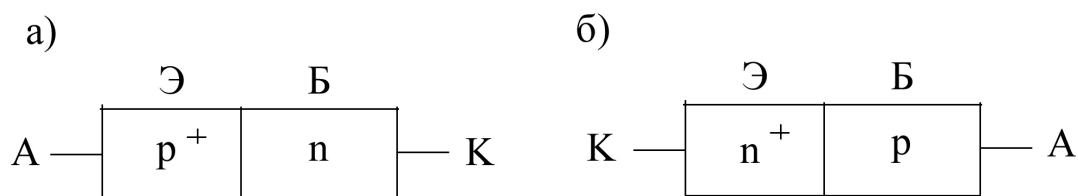


Рис. 1.2 Схематические изображения р-п-переходов:
а – p^+-n -перехода, б – n^+-p -перехода

Э – эмиттер, Б – база.

В диодах и биполярных транзисторах с большими рабочими напряжениями, а также, в полевых транзисторах с изолированным затвором содержатся, кроме того, изотипные контактные соединения, показанные на рис. 1.3.

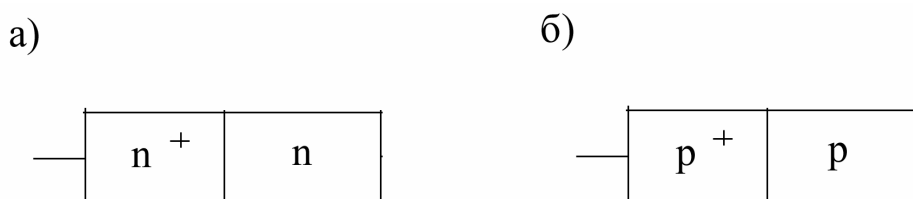


Рис. 1.3. Изотипные контактные соединения:
а – n^+-n -типа, б – p^+-p -типа

Схематические изображения полупроводниковых диодов с большими пробивными напряжениями приведены на рис. 1.4.

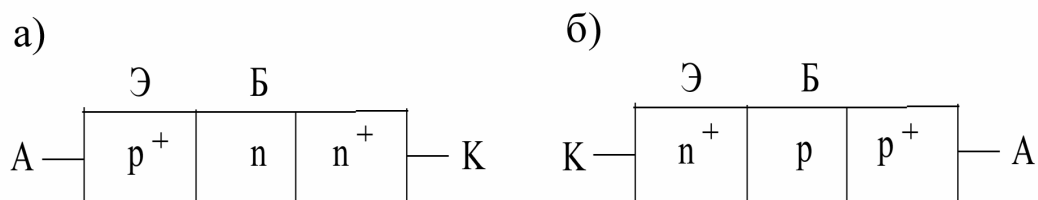


Рис. 1.4. Схематические изображения высоковольтных диодов:
а – с n -базой, б – с p -базой

Дополнительные n^+ - или p^+ - области в этих диодах не оказывают существенного влияния на физические процессы, протекающие в диоде, а служат лишь для возможности создания металлического контакта со стороны высокоомной базы прибора.

Для изготовления выпрямительных диодов чаще всего применяют кремний n -типа. Его выращивают в специальных печах и получают в виде слитков цилиндрической формы. Слитки разрезают на пластины, которые и являются основой полупроводникового диода. Пластины шлифуют и полируют для того, чтобы ликвидировать образовавшиеся в них после разрезания слитка механически и физически разрушенные слои. Далее в пластину n -типа в специальных печах вводят атомы примеси – акцепторы (бор+алюминий), что и

приводит к созданию p^+-n -перехода. При изготовлении n^+-p -перехода исходным материалом является кремний p -типа, а атомами примеси (донорами) – фосфор. По аналогичной технологии изготавливают полупроводниковые структуры высоковольтных диодов, показанные на рис. 1.4.

Знак «+» в схематических изображениях p^+-n - и n^+-p -переходов указывает на то, что концентрации атомов примеси в эмиттерных областях существенно выше, нежели в базах приборов. Следовательно, основных носителей электрического тока в эмиттерах намного больше, чем в базах (на 2-3 порядка). При создании определенных условий эти носители можно перевести (инжектировать) из эмиттера в базу, что приведет к резкому уменьшению сопротивления базы и к протеканию тока через диод. Эффект инжекции лежит в основе работы любого биполярного полупроводникового прибора, в том числе, и выпрямительного диода.

Принцип действия выпрямительного диода поясним, обратившись к схеме на рис. 1.5, где E – источник, формирующий постоянное напряжение U .

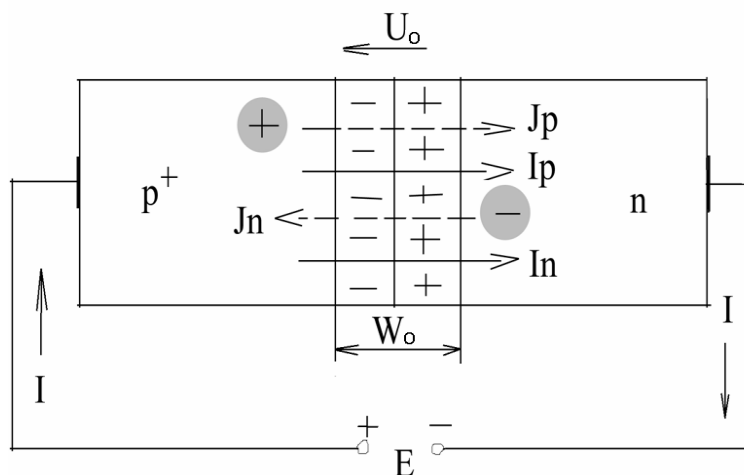


Рис. 1.5. Схема, поясняющая принцип работы выпрямительного диода

В условиях теплового равновесия и при $U=0$, в приконтактной области p^+-n -перехода образуется область, обедненная основными носителями электрического тока шириной W_0 – область пространственного заряда (ОПЗ). Это приводит, в свою очередь, к образованию внутри p^+-n -перехода потенциального барьера с напряжением U_0 («встроенный потенциал»), препятствующего протеканию электрического тока от анода к катоду диода по цепи $(+)E$ – диод – $(-)E$. Если к аноду диода приложить «+», а к катоду «-» напряжения источника E , как это показано на рис. 1.5, и увеличивать напряжение U , то это приведет к понижению потенциального барьера и уменьшению ширины ОПЗ. При $U=U_0$ потенциальный барьер будет полностью скомпенсирован. При дальнейшем увеличении U , p^+-n -переход сместится в прямом направлении и ток I , протекающий через диод, начнет резко возрастать (прямая ветвь ВАХ диода). Если полярность источника E изменить на противоположную, как это показано на рис. 1.6, то с ростом U ширина ОПЗ W будет возрастать, распространяясь, главным образом, в сторону высокоомной базы и создавая еще большее препятствие протеканию электрического тока

от катода к аноду диода. При этом током диода будет ток обратно смещенного p^+-n -перехода, который с ростом U будет слабо возрастать (обратная ветвь ВАХ диода). При увеличении U до значения $U_{\text{проб}}$ диод выйдет из строя из-за электрического пробоя p^+-n -перехода. Таким образом, ВАХ диода – зависимость тока I , протекающего через диод, от приложенного к нему напряжения U – будет иметь вид, показанный на рис.1.7. Здесь кривая этой зависимости в правом верхнем квадранте – прямая ветвь ВАХ, а кривая в левом нижнем квадранте – обратная ветвь ВАХ, U_0 и $U_{\text{проб}}$ – «встроенный потенциал» и напряжение пробоя p^+-n -перехода (диода)

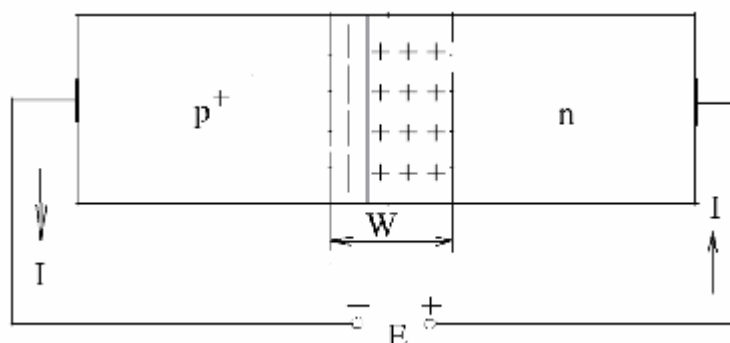


Рис. 1.6. Схема, поясняющая работу диода при смещении p^+-n -перехода в обратном направлении

соответственно. Пунктиром на рис. 1.7 показана ВАХ диода после его выхода из строя, при котором диод пробивается по фаске полупроводниковой пластины и становится «перемычкой». На

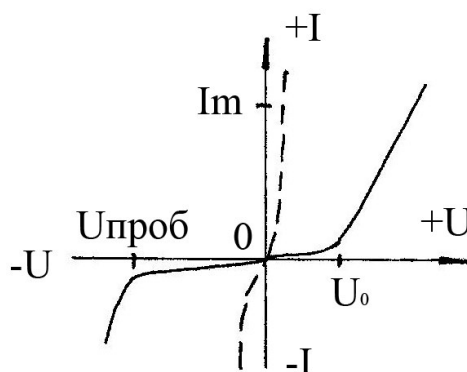


Рис. 1.7. Вольтамперная характеристика полупроводникового диода

практике, для избежания пробоя p^+-n -перехода, диоды применяют при напряжениях, не превышающих значения $U=U_m=0.7U_{\text{проб}}$. Кроме того, для предотвращения выхода диода из строя из-за тепловых потерь, ток через диод, находящемся в проводящем состоянии, ограничивают на уровне, не превышающем значения $I=I_m$. Параметры диода U_m и I_m указаны в справочных данных как максимально допустимые.

Параметры U_0 и $U_{\text{проб}}$ диодов из разных полупроводниковых материалов приведены в таблице 1.1, где Ge – германий, Si –

Таблица. 1.1. Значения «встроенного потенциала» (U_0) и напряжения пробоя ($U_{\text{проб}}$) полупроводниковых диодов

Диоды	Выпрямительные		Светодиоды		
Материал	Ge	Si	GaAs	GaP	SiC
U_0 , В	0,5	0,6	1,2	1,5	2,3
$U_{\text{проб}}$, В	до сотен	до 6000	-	-	-

кремний, GaAs – арсенид галлия, GaP – фосфид галлия, SiC – карбид кремния. В этой таблице не приведены значения $U_{\text{проб}}$ светодиодов, так как они не превышают единиц вольт. На практике, для избежания электрического пробоя светодиода его соединяют встречно-параллельно с кремниевым диодом, как это показано на рис. 1.8. При этом обратное напряжение, приложенное к светодиоду, незначительно превышает напряжение U_0 шунтирующего его кремниевого диода.

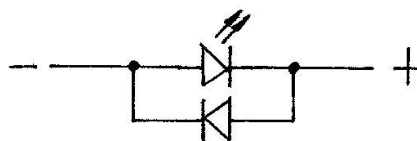


Рис. 1.8. Схема предотвращения электрического пробоя светодиода

Диоды относят к классу биполярных полупроводниковых приборов, так как ток, протекающий через диод, обусловлен носителями обоих знаков – электронами и дырками. Действительно, при смещении p^+ - n -перехода в прямом направлении за счет подачи на диод от источника E напряжения U , превышающего значение U_0 , рис. 1.5, из эмиттера в базу поступает поток дырок J_p , образующий протекающий в том же направлении ток дырок I_p . Так как p^+ - n -переход неидеальный, то навстречу потоку дырок из базы в эмиттер поступает поток электронов J_n , образуя ток электронов I_n , протекающий в том же направлении, что и ток дырок. При этом $I_n \ll I_p$. Поток и ток электронов направлены встречно вследствие отрицательного заряда электрона. Поэтому результирующий ток I в диоде равен сумме электронного и дырочного токов:

$$I = I_p + I_n. \quad (1.1)$$

Процесс поступления неосновных носителей электрического тока из эмиттера в базу называют инжекцией, а эффективность этого процесса характеризуют коэффициентом инжекции p^+ - n -перехода

$$\gamma = \frac{I_p}{I} \quad (1.2)$$

В случае n^+ - p -перехода, $\gamma = I_n / I$. При смещении p^+ - n -перехода в обратном направлении, рис.1.6, ток через диод практически отсутствует.

Рассмотренные выше физические процессы, протекающие в p^+ - n -переходе выпрямительного диода, реализуются и в светодиодах. Отличие состоит в том, что в светодиоде при смещении p^+ - n -перехода в прямом направлении, в результате рекомбинации электронно-дырочных пар в базе прибора, излучаются фотоны, образующие видимый свет, который через «окно» в полупроводниковой пластине светодиода выводится за его пределы. Площадь излучающего p^+ - n -перехода светодиода не превышает 1 мм². Поэтому ток светодиода, обеспечивающий световое излучение, находится в пределах 5-50 мА.

Условное обозначение стабилитрона показано на рис. 1.9. Основой



Рис. 1.9. Обозначение стабилитрона на электрических схемах

стабилитрона также является p^+ - n -переход и его ВАХ, рис 1.10, практически такая же, как у диода. Вместе с тем, в отличие от диода,

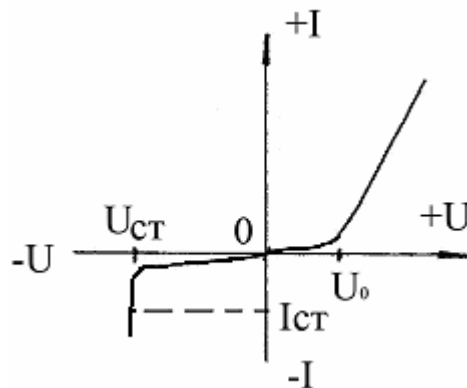


Рис. 1.10. Вольтамперная характеристика стабилитрона

стабилитрон способен работать без выхода из строя в области обратных напряжений, превышающих напряжение пробоя $U_{проб}$, которое в случае стабилитронов называют напряжением стабилизации $U_{ст}$. При этом необходимо лишь ограничивать мощность, рассеиваемую стабилитроном, на уровне, не превышающем максимально допустимого значения

$$P_{ст} = I_{ст} U_{ст}, \quad (1.3)$$

где $I_{ст}$ – максимально допустимый ток стабилизации стабилитрона. Значения $U_{ст}$ и $I_{ст}$ приведены в справочных данных. При $P > P_{ст}$

стабилитрон может выйти из строя из-за тепловых потерь. Возможность работы стабилитрона без выхода его из строя при $P \leq P_{ст}$ обусловлена тем, что он, в отличие от диода, имеет сильнолегированную (низкоомную) базу. Благодаря этому, при $U > U_{проб} = U_{ст}$ в стабилитроне реализуется не электрический пробой, как в диоде, а лавинный (лавинное умножение носителей электрического тока в объеме полупроводниковой структуры прибора).

Из рис. 1.10 видно, что в области обратных токов $0 < I \leq I_{ст}$ напряжение на стабилитроне сохраняется практически неизменным и равным $U_{ст}$. Эта особенность и предопределила основное назначение стабилитрона – ограничение (стабилизация) напряжения внешней электрической цепи на уровне $U_{ст}$. При напряжениях $U < U_{ст}$ стабилитрон можно применять в качестве диода.

Напряжения стабилизации разных типов стабилитронов находятся в пределах $U_{ст} = 3.3 \div 180$ В. Для получения выходных стабилизированных напряжений больших 180В, стабилитроны соединяют последовательно, как это показано на рис. 1.11. При этом выходное

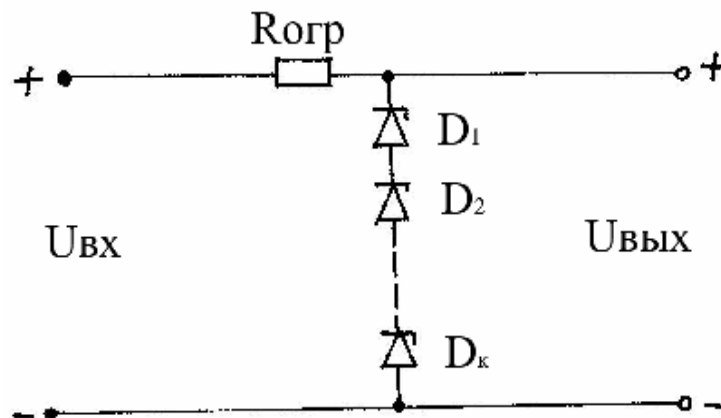


Рис. 1.11. Схема получения больших значений стабилизированных напряжений

стабилизированное напряжение

$$U_{вых} = U_{ст1} + U_{ст2} + \dots + U_{стк}, \quad (1.4)$$

где $U_{ст1}, U_{ст2}, \dots, U_{стк}$ – напряжения стабилизации стабилитронов D_1, D_2, \dots, D_k . Ограничительный резистор $R_{огр}$ в схеме на рис. 1.11 задает обратный ток через стабилитроны на уровне, не превышающем предельно допустимого значения. Для получения малых значений стабилизированных напряжений, меньших 3.3В, применяют стабилитроны – полупроводниковые диоды, предназначенные для работы в ограничителях напряжения. При этом, в отличие от стабилитронов, стабилитроны включают в схему ограничителя не в обратном направлении, а в прямом, как это показано на рис.1.12.

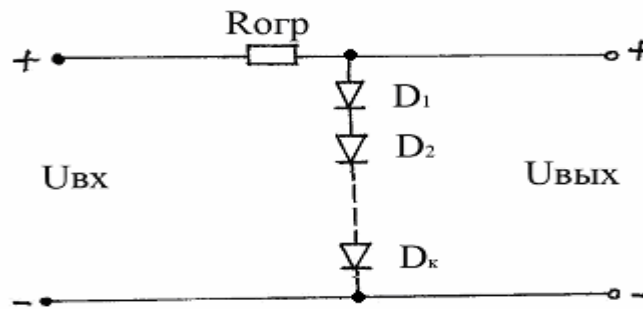


Рис. 1.12. Схема получения малых значений стабилизированных напряжений

Выходное стабилизированное напряжение этого ограничителя

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{D1} + U_{D2} + \dots + U_{Dk}, \quad (1.5)$$

где $U_{D1}, U_{D2}, \dots, U_{Dk}$ – падения напряжения на включенных в прямом направлении стабилиторах D_1, D_2, \dots, D_k . Стабилиторы изготавливают из кремния и имеют напряжение стабилизации $U_D \approx 0.7 \text{ В}$. Исходя из этого значения U_D и заданного значения выходного стабилизированного напряжения определяют необходимое число стабилиторов в ограничителе. Так, например, для получения $U_{\text{ВЫХ}} = 2.1 \text{ В}$, схема на рис. 1.12 должна содержать три стабилитора.

Из прямых ветвей ВАХ на рис 1.7 и 1.10 видно, что в некоторой области токов напряжения на диоде и стабилитроне слабо зависят от тока. Поэтому в схеме ограничителя напряжения на рис. 1.12 можно использовать не только стабилиторы, но и обычные диоды и стабилитроны. Очевидно, что приведенные выше ограничители напряжения могут содержать и последовательно соединенные стабилиторы и стабилитроны, как это показано на рис. 1.13. Такой

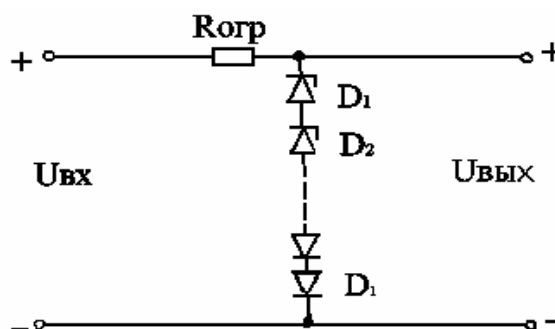


Рис. 1.13. Схема получения произвольных значений стабилизированных напряжений

ограничитель позволяет получить любое значение выходного стабилизированного напряжения.

Порядок выполнения работы

1. Прямые ветви ВАХ полупроводниковых диодов

1.1. Открыть файл С9_011 со схемой измерительной установки (ИУ), показанной на рис. 1.14. Файл открыть, используя алгоритм:

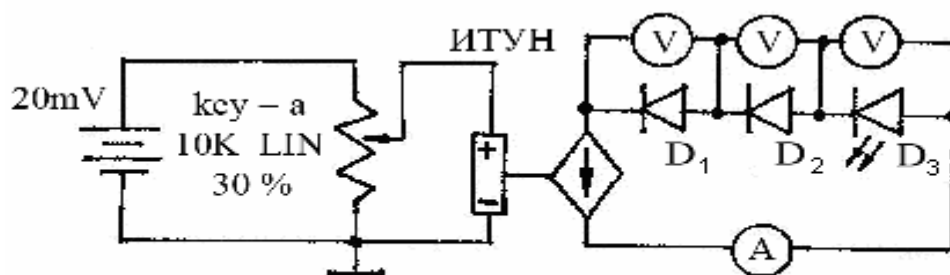


Рис. 1.14. Схема измерительной установки для определения прямых ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

Multisim 2001 – File – Open – LABY – 09 – C9_011 – C9_011. msm. Расширить окно. Из схемы ИУ видно, что объектами исследований являются два выпрямительных диода (D_1 и D_2) и один светодиод (D_3). Значения токов через последовательно соединенные испытуемые диоды с шагом 5% от максимального тока задает источник тока управляемый напряжением (ИТУН). Эти токи измеряются амперметром, а падения напряжения на диодах при этих токах – вольтметрами. Каждое новое значение тока получают, нажимая на А клавиатуры при нажатом Shift (A+Shift).

1.2. Нажав на А клавиатуры "обнулить" ИТУН, т.е. задать первое значение тока через диоды $I=0$.

1.3. Включить ИУ, для чего перевести переключатель в правом верхнем углу окна из положения "0" в положение "1". При этом амперметр покажет ноль, а вольтметры - близкие к нулю падения напряжения на испытуемых диодах (первая точка прямых ветвей ВАХ).

1.4. Последовательно нажимая A+Shift, снять показания измерительных приборов и внести их в таблицу 1.2, где отметить, при каком минимальном значении тока светодиод начинает излучать свет.

Таблица 1.2. Экспериментальные данные для определения прямых ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

I, mA	U, B		
	D ₁	D ₂	D ₃

1.5. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой.

2. Обратные ветви ВАХ полупроводниковых диодов

2.1. Открыть файл C9_012 со схемой ИУ, показанной на рис. 1.15. Здесь значения напряжения на тех же, что и в п. 1, испытуемых диодах с шагом 8% от максимального напряжения задает источник напряжения управляемый напряжением (ИНУН). Каждое новое значение напряжения получают посредством A+Shift.

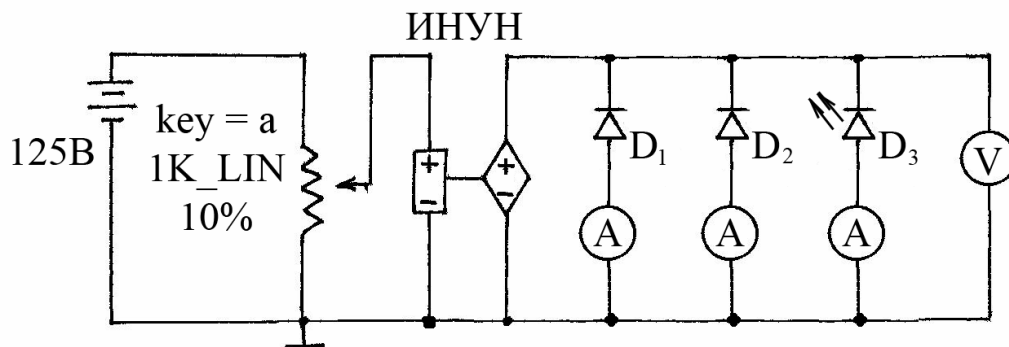


Рис. 1.15. Схема измерительной установки для определения обратных ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

2.2. Нажав на А клавиатуры "обнулить" ИНУН, т.е. задать первое значение напряжения на диодах $U=0$.

2.3. Включить ИУ. При этом вольтметр покажет ноль, а амперметры – близкие к нулю значения токов через испытуемые диоды (первая точка обратных ветвей ВАХ).

2.4. Последовательно нажимая А+Shift, снять показания измерительных приборов и внести их в таблицу 1.3.

Таблица 1.3. Экспериментальные данные для определения обратных ветвей ВАХ полупроводниковых диодов

U, В	I, mA		
	D1	D2	D3

2.5. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой.

3. ВАХ стабилитронов

3.1. Открыть файл C9_013 со схемой ИУ, показанной на рис. 1.16.

Из схемы ИУ видно, что объектами исследований являются два стабилитрона (напр. 1N4729A и 1N4735A). Значения токов через испытуемые стабилитроны задаются так же, как и в п. 1.1., но с тем отличием, что половина из этих токов имеет положительное направление (прямые ветви ВАХ), а другая половина – отрицательное (обратные ветви ВАХ). Это позволяет с помощью ИУ файла C9_013 определить ВАХ стабилитронов полностью, а не порознь, как в случае диодов.

3.2. Нажав на А клавиатуры "обнулить" ИТУН.

3.3. Включить ИУ.

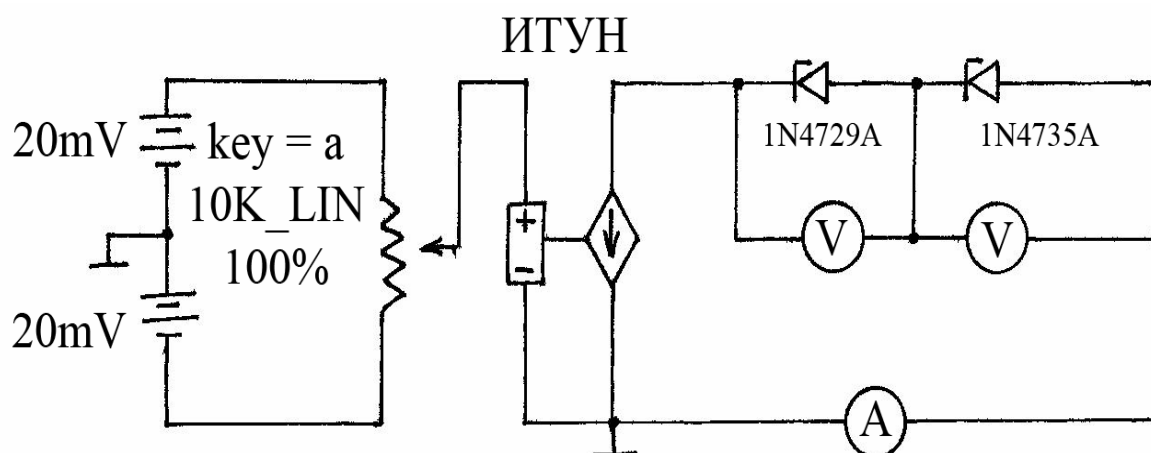


Рис. 1.16. Схема измерительной установки для определения ВАХ стабилизаторов

3.4. Последовательно нажимая A+Shift, снять показания измерительных приборов и внести их в таблицу 1.4. Положительные значения I и U в таблице 1.4 соответствуют прямой ветви ВАХ стабилизаторов, отрицательные значения – обратной ветви.

3.5. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой.

Таблица 1.4. Экспериментальные данные для определения ВАХ стабилизаторов

I , mA	U , В	
	1N4729A	1N4735A

4. Определение ВАХ диодов и стабилизаторов посредством осциллографа

4.1. Открыть файл C9_014 со схемой ИУ, показанной на рис. 1.17. Здесь вспомогательный источник формирует синусоидальное напряжение амплитудой 125 В, которое посредством резистора 1 кОм задает ток через испытуемые приборы (ИП). Объектами исследований являются те же ИП, что и в п.п. 1-3. На канал А осциллографа через источник напряжения управляемый ток (ИНУТ) подается напряжение, пропорциональное току через ИП, а на канал В посредством ИНУН – падение напряжения на ИП. В результате, на экране осциллографа отображается ВАХ ИП.

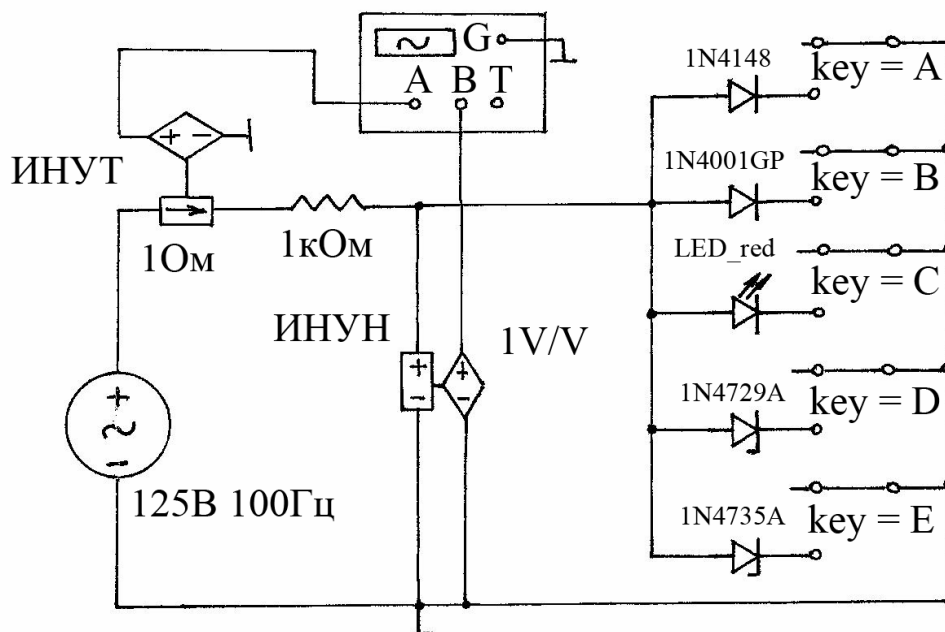


Рис. 1.17. Схема измерительной установки для определения ВАХ диодов и стабилитронов осциллографическим методом

Примечания.

1. При определении ВАХ ИП осциллографическим методом кнопки осциллографа A/B, DC, DC, Auto должны быть "утоплены".
2. В исходном состоянии ключи А – Е должны быть разомкнуты. При этом все ИП отсоединены от ИУ.

4.2. Нажать на А клавиатуры, подсоединив тем самым к ИУ первый из ИП (напр., 1N4148).

4.2.1. Включить ИУ и осциллограф. При этом на экране осциллографа отобразится ВАХ диода 1N4148. Зарисовать ВАХ этого диода и посредством осциллографа измерить ее параметры (значения I и U).

Примечание. Напряжение, пропорциональное току через ИП, снимается на канал А с сопротивления 1 Ом. Поэтому токи ВАХ ИП определяются посредством деления напряжений на этом канале на 1 Ом и переводом полученных результатов в единицы тока.

4.2.2. Выключить осциллограф и ИУ и нажать на А клавиатуры, отсоединив тем самым первый из ИП от ИУ.

4.3. Повторить п. 4.2 для остальных ИП, используя соответствующие ключи (B, C, D, E).

4.4. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой.

5. Выйти из программы Multisim 2001, выключить компьютер и монитор.

Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.

2. Результаты экспериментов п.п. 1-3 в виде таблиц и графиков ВАХ.
3. Числовые значения основных параметров выпрямительных диодов ($U_{проб}$ и U_0), светодиодов (ток, при котором светодиод начинает излучать свет, и U_0) и стабилитронов ($U_{ст}$).
4. Графики ВАХ ИП по п.4.
5. Словесная сравнительная оценка ВАХ ИП, полученная методом амперметра и вольтметра (п.п. 1-3) и осциллографическим методом (п.4).
6. Выводы.

Лабораторная работа № 2

Типовые схемы на основе полупроводниковых диодов и стабилитронов

Цель работы: изучение наиболее распространенных видов выпрямителей и ограничителей напряжения и определение основных параметров этих электронных устройств.

Основные положения. Выпрямители предназначены для преобразования синусоидального входного напряжения $U_{вх}$ в практически постоянное (неизменное во времени) выходное напряжение $U_{вых}$. Широкое распространение получили однополупериодный выпрямитель, двухполупериодный выпрямитель на основе диодного моста и двухполупериодный выпрямитель на основе трансформатора со средней точкой. Последние два сложнее по построению, но, в отличие от однополупериодного выпрямителя, формируют выходное напряжение с меньшими пульсациями, т.е. более близкое к постоянному. Основными параметрами выпрямителей являются значение выходного напряжения, коэффициент пульсации выходного напряжения и нагрузочная характеристика.

Схемы и временные диаграммы работы перечисленных видов выпрямителей содержатся в файлах С9_031, С9_032 и С9_041. В этих схемах резистор 100 кОм имитирует сопротивление нагрузки выпрямителя, а резистор 1 кОм служит для визуализации и измерения тока подзаряда конденсатора. В реальных схемах выпрямителей измерительный резистор отсутствует. Каждая из схем выпрямителей содержит трансформатор – преобразователь синусоидального напряжения в синусоидальное той же частоты, но возможно другой амплитуды (большей или меньшей), полупроводниковый диод (диоды), конденсатор, уменьшающий пульсации выходного напряжения и сопротивление нагрузки, как потребитель электрической энергии. Реальные схемы выпрямителей могут содержать, кроме того, шунтирующий конденсатор высокоомный резистор, позволяющий разряжаться конденсатору до нуля в отсутствие входного синусоидального напряжения. Наличие этого резистора продиктовано мерами техники безопасности.

Схема и временные диаграммы работы однофазного однополупериодного выпрямителя напряжения приведены на рис. 2.1,

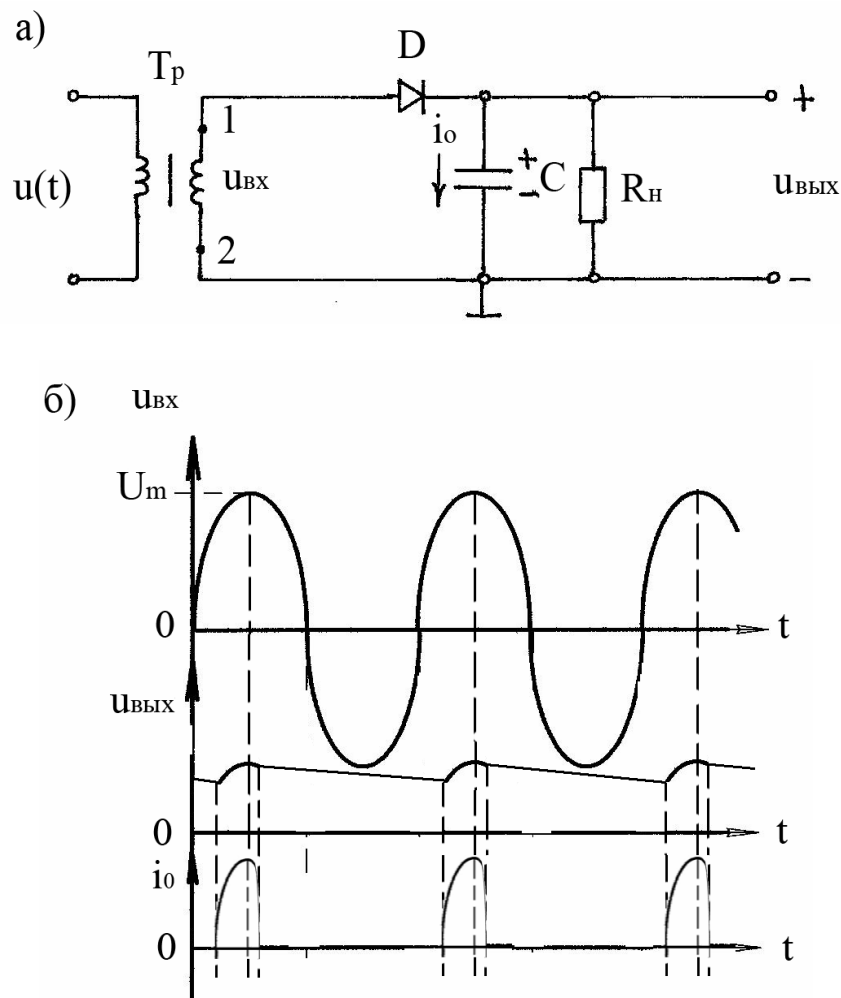


Рис. 2.1. Схема (а) и временные диаграммы работы (б) однофазного однополупериодного выпрямителя напряжения

где T_p – трансформатор, D – полупроводниковый диод, C – фильтрующий конденсатор, R_H – сопротивление нагрузки (потребитель электрической энергии), $u(t)$ – синусоидальное напряжение на первичной обмотке трансформатора (напряжение питающей сети), u_{BX} – синусоидальное напряжение на вторичной обмотке трансформатора (входное напряжение), $u_{ВЫХ}$ – близкое к постоянному выходное напряжение, i_0 – ток подзаряда конденсатора. Работа выпрямителя состоит в следующем. При подаче напряжения $u(t)$ на вход выпрямителя, за несколько периодов этого напряжения конденсатор заряжается до значения, близкого к максимальному значению U_m входного напряжения u_{BX} . При этом ток i_0 , заряжающий конденсатор, замыкается по контуру 1 – D – C – 2. Ток i_0 протекает только при положительных полуволнах входного напряжения и только в те короткие промежутки времени, когда $u_{BX} > u_{ВЫХ}$, т.е. когда диод открыт. На всех остальных промежутках времени, в том числе, и при отрицательных полуволнах входного напряжения диод закрыт и конденсатор разряжается по контуру $(+)C - R_H - (-)C$.

Таким образом, выходное напряжение выпрямителя получается пульсирующим, т.е. изменяющимся от минимального значения $U_{ВЫХ \min}$

до максимального $U_{\text{вых max}}$, и наоборот. Размах пульсации выходного напряжения

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых max}} - U_{\text{вых min}} \quad (2.1)$$

Для неслишком больших пульсаций, среднее значение выходного напряжения можно определить в виде

$$U_{\text{вых ср}} = \frac{U_{\text{вых max}} + U_{\text{вых min}}}{2} \quad (2.2)$$

Приращение по модулю среднего значения выходного напряжения

$$\Delta U_{\text{вых ср}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{2} \quad (2.3)$$

Используя приведенные соотношения, определим коэффициент пульсации выходного напряжения в виде

$$K_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{вых ср}}}{U_{\text{вых ср}}} \cdot 100 (\%) \quad (2.4)$$

Или, с учетом (2.1) – (2.3),

$$K_{\text{п}} = \frac{1 - K}{1 + K} \cdot 100 (\%) \quad (2.5)$$

где $K = U_{\text{вых min}} / U_{\text{вых max}}$. Коэффициент пульсации один из основных параметров выпрямителя, так как отражает качество выпрямления входного синусоидального напряжения, т.е. близость выходного напряжения к постоянному – неизменному во времени. Из выражения (2.5) видно, что в отсутствие пульсации (идеальное выпрямление), т.е. когда $U_{\text{вых min}} = U_{\text{вых max}}$, $K_{\text{п}} = 0$. При $U_{\text{вых min}} = 0$ (наихудший вариант выпрямления) $K_{\text{п}} = 100\%$. Пульсации тем меньше, чем больше емкость конденсатора и сопротивление нагрузки выпрямителя. Так, например, если в схеме на рис. 2.1,а сопротивление нагрузки бесконечно велико, то выходное напряжение неизменно во времени ($K_{\text{п}} = 0$) и равно

амплитудному значению входного напряжения ($U_{\text{вых}}=U_m$). Та же ситуация реализуется и при бесконечно большой емкости конденсатора. Если в схеме на рис. 2.1,а отсутствует конденсатор, то $U_{\text{вых}}$ имеет вид положительных полуволн входного напряжения и $K_p=100\%$.

Другим важным параметром выпрямителя является нагрузочная характеристика – зависимость среднего значения выходного напряжения от сопротивления нагрузки:

$$U_{\text{вых ср}} = f(R_H) \quad (2.6)$$

Нагрузочная характеристика показывает, какой ток можно отбирать от выпрямителя во внешнюю электрическую цепь. Вид нагрузочной характеристики приведен на рис. 2.2, из которой следует, что при уменьшении сопротивления нагрузки выходное напряжение может измениться до недопустимо малых значений. Это связано с тем, что

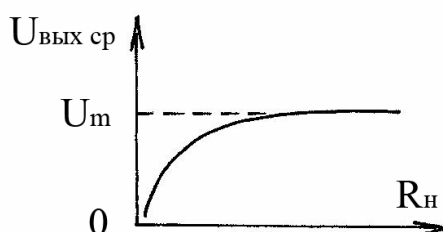


Рис. 2.2. Нагрузочная характеристика выпрямителя

при уменьшении R_H возрастает ток, отбираемый от выпрямителя во внешнюю электрическую цепь (в цепь сопротивления нагрузки R_H).

Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя на основе диодного моста приведена на рис. 2.3,а. Временные диаграммы, поясняющие работу этого выпрямителя, показаны на рис. 2.3,б. Здесь диоды $D_1 - D_4$ соединены по мостовой схеме. Работа выпрямителя состоит в следующем. При подаче напряжения $u(t)$ на вход выпрямителя, за несколько периодов этого напряжения конденсатор заряжается до значения, близкого к максимальному значению U_m входного напряжения $U_{\text{вх}}$. При этом при положительных полуволнах входного напряжения, ток i_0 , заряжающий конденсатор, замыкается по контуру $1 - D_2 - C - D_3 - 2$, а при отрицательных полуволнах – по контуру $2 - D_4 - C - D_1 - 1$. Видно, что как при положительной, так и при отрицательной полуволнах входного напряжения, ток i_0 протекает через конденсатор в одном и том же направлении и только в те

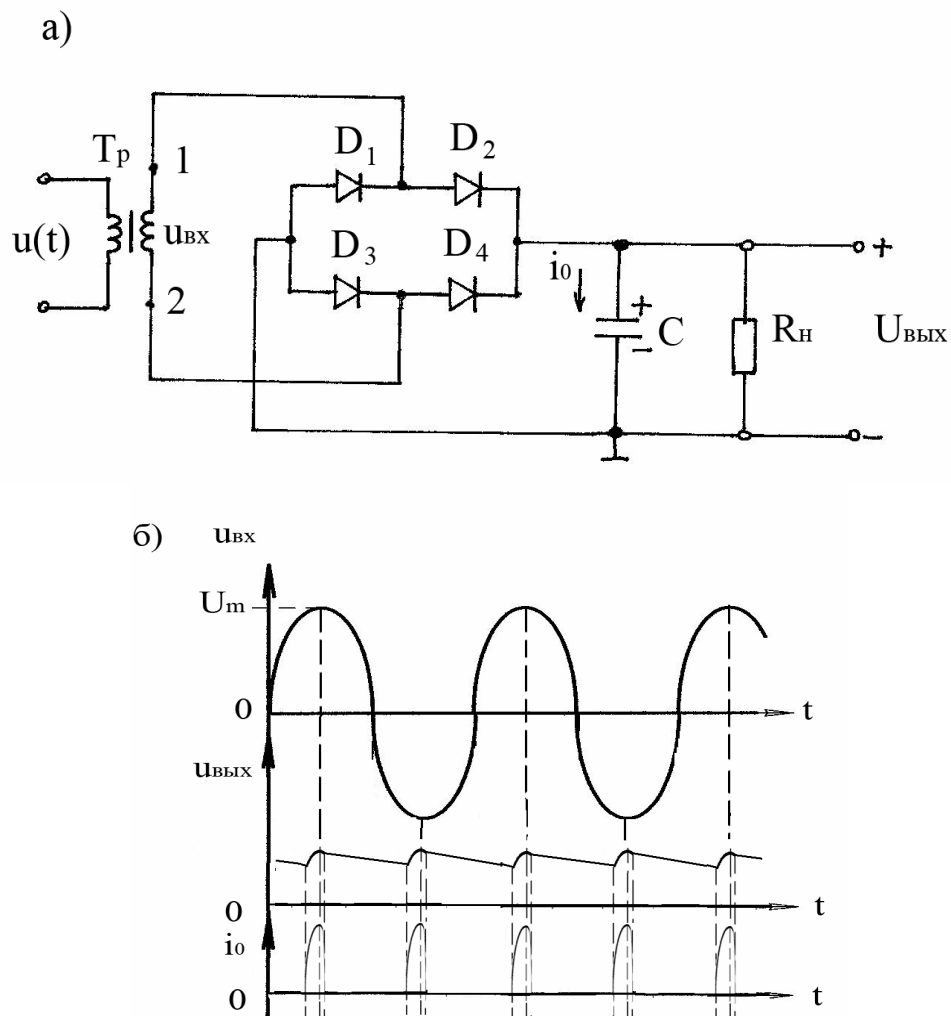


Рис. 2.3. Схема (а) и временные диаграммы работы (б) однофазного двухполупериодного выпрямителя напряжения на основе диодного моста

короткие промежутки времени, когда $U_{вх} > U_{вых}$. Таким образом, в двухполупериодном выпрямителе частота подзаряда конденсатора вдвое выше, нежели в однополупериодном, и, как следствие, лучше качество выпрямления входного синусоидального напряжения. В промежутках времени, когда диоды моста закрыты, конденсатор разряжается по контуру $(+) C - R_{н} - (-)C$.

Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя на основе трансформатора со средней точкой приведена на рис. 2.4. Временные диаграммы, поясняющие работу этого выпрямителя, те же, что и на рис. 2.3,б. При положительной полуволне входного напряжения, ток i_0 , заряжающий конденсатор, замыкается по контуру $1 - D_1 - C - 0$, а при отрицательной – по контуру $2 - D_2 - C - 0$. Качество выпрямления входного синусоидального напряжения этим выпрямителем такое же, как и у выпрямителя на основе диодного моста.

Отметим, что при прочих равных условиях, выпрямители, собранные по схемам на рис. 2.1,а и 2.4, обладают меньшими достижимыми значениями выходного напряжения, нежели выпрямители с мостовой

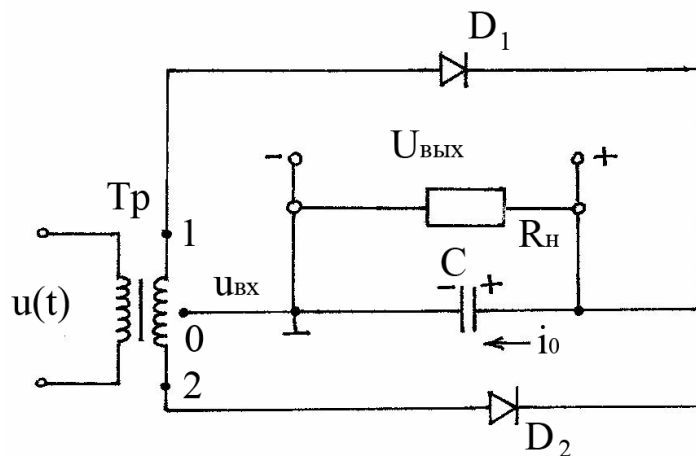


Рис. 2.4. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя напряжения на основе трансформатора со средней точкой

схемой соединения диодов. Действительно, в схеме на рис.2.3,а в промежутках времени, когда диоды закрыты, выходное напряжение прикладывается в обратном направлении к парам диодов, а не к одному, как в однополупериодном выпрямителе и в выпрямителе на основе трансформатора со средней точкой. Поэтому, с практической точки зрения, выпрямитель на основе диодного моста является предпочтительным, по сравнению с другими выпрямителями, рассмотренными выше.

Ограничители напряжения предназначены для установки постоянного или переменного входного напряжения на заданном уровне при возможных колебаниях входного напряжения в известных пределах. Широкое распространение получили диодные ограничители напряжения и ограничители напряжения на основе стабилитронов. По функциональному назначению указанные ограничители делят на односторонние и двухсторонние. Применительно к постоянным входным напряжениям используют, естественно, только односторонние ограничители напряжения, а применительно к переменным напряжениям – оба вида ограничителей. Число диодов и стабилитронов в ограничителях обусловлено решаемой технической задачей и задается схемотехническими способами, например, такими, как на рис. 1.11 – 1.13.

Схемы и временные диаграммы работы перечисленных видов ограничителей напряжения содержатся в файлах C9_051, C9_052, C9_061 и C9_062. В этих схемах генератор импульсов напряжения формирует входные напряжения трех форм – синусоидальной, пилообразной и меандр, а резистор 1 кОм ограничивает на допустимом уровне ток через диод или стабилитрон ограничителя напряжения.

Схема одностороннего диодного ограничителя напряжения приведена на рис. 2.5,а. Временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 2.5,б. Здесь $u_{вх}$ – входное напряжение, $U_{вых}$ – ограниченное на заданном уровне (уровне $U_{оп}$) выходное напряжение, $R_{огр}$ – резистор, ограничивающий ток в цепи $D_{оп}$ – $U_{оп}$; $U_{оп}$ – опорный источник постоянного напряжения, $D_{оп}$ – диод в цепи этого источника,

D – диод, компенсирующий в составе выходного напряжения падение напряжения на диоде $D_{оп}$; R_H – сопротивление нагрузки (потребитель

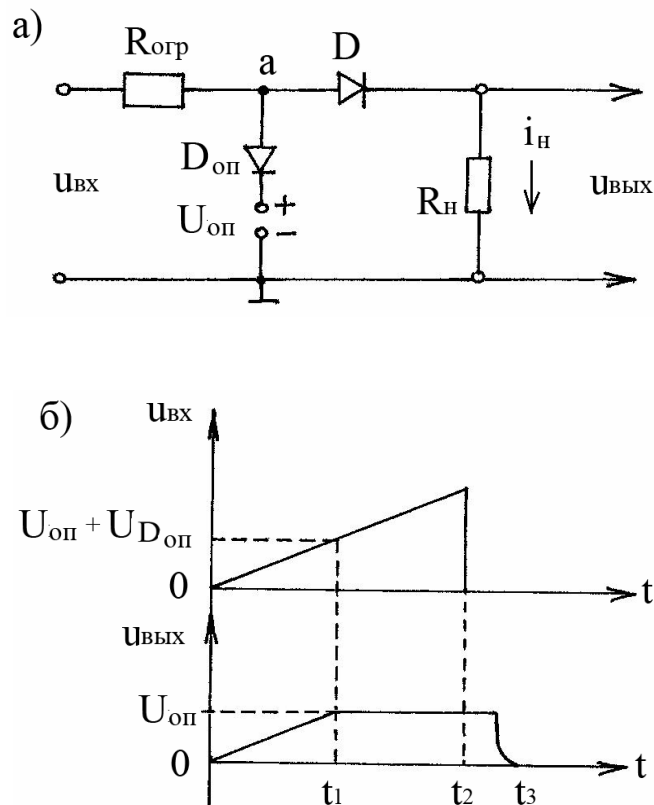


Рис. 2.5. Схема (а) и временные диаграммы работы (б) одностороннего диодного ограничителя напряжения

электрической энергии); i_H – ток нагрузки, т.е. ток, отбираемый от ограничителя во внешнюю электрическую цепь. Параметры входного линейного нарастающего напряжения следующие:

$$U_{вх} = at \text{ при } 0 \leq t \leq t_2$$

и

$$U_{вх} = 0 \text{ при } t > t_2, \quad (2.7)$$

где a – скорость нарастания входного напряжения. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$ $U_{вх} < (U_{оп} + U_{D_{оп}})$, диод $D_{оп}$ закрыт, то нагрузки

$$i_H = \frac{U_{вх}}{R_{огр} + R_H} \quad (2.8)$$

и выходное напряжение

$$u_{\text{вых}} = i_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = \frac{u_{\text{вх}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{огр}} + R_{\text{н}}} \quad (2.9)$$

повторяет форму входного напряжения, т.е. нарастает по линейному закону. В интервале времени $t_1 \leq t \leq t_2$ $U_{\text{вх}} > (U_{\text{оп}} + U_{\text{Доп}})$, диод $D_{\text{оп}}$ открыт и потенциал (\cdot)а

$$U_{\text{а}} = U_{\text{оп}} + U_{\text{Доп}}, \quad (2.10)$$

где $U_{\text{Доп}}$ - падение напряжения на открытом диоде $D_{\text{оп}}$. При этом ток нагрузки

$$i_{\text{н}} = \frac{U_{\text{оп}}}{R_{\text{н}}} \quad (2.11)$$

и

$$u_{\text{вых}} = U_{\text{оп}}, \quad (2.12)$$

т.е. ограничено на уровне напряжения опорного источника. В момент времени t_2 $u_{\text{вх}}$ скачком уменьшается до нуля, а $u_{\text{вых}}$ еще некоторое время сохраняется неизменным, после чего так же уменьшается до нуля. Это обусловлено инерционными свойствами диода $D_{\text{оп}}$, который из открытого состояния в запертое мгновенно перейти не может.

Если на вход рассмотренного ограничителя подать постоянное напряжение $U_{\text{вх}} > (U_{\text{оп}} + U_{\text{Доп}})$, то выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} \quad (2.13)$$

будет так же неизменным во времени. В подавляющем большинстве случаев $U_{\text{оп}} \gg U_{\text{Доп}}$. Поэтому в приведенных выше соотношениях напряжением $U_{\text{Доп}}$ можно пренебречь, а диод D в схему на рис. 2.5,а не включать.

Схема двухстороннего диодного ограничителя напряжения приведена на рис. 2.6,а. Временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 2.6,б. Здесь цепь $D_{\text{оп1}} - U_{\text{оп1}}$ ограничивает положительную полуволну входного синусоидального напряжения на уровне $U_{\text{оп1}}$, а цепь $D_{\text{оп2}} - U_{\text{оп2}}$ - отрицательную полуволну на уровне $U_{\text{оп2}}$.

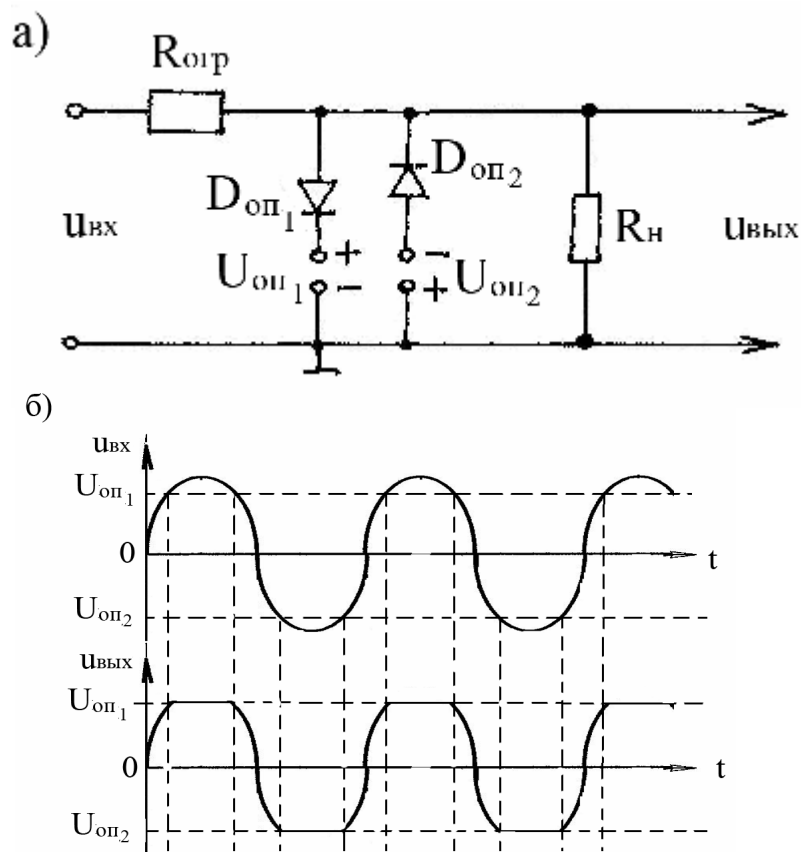


Рис. 2.6. Схема (а) и временные диаграммы работы (б) двухстороннего диодного ограничителя напряжения

Схема одностороннего ограничителя напряжения на основе стабилитрона приведена на рис. 2.7,а. Временные диаграммы,

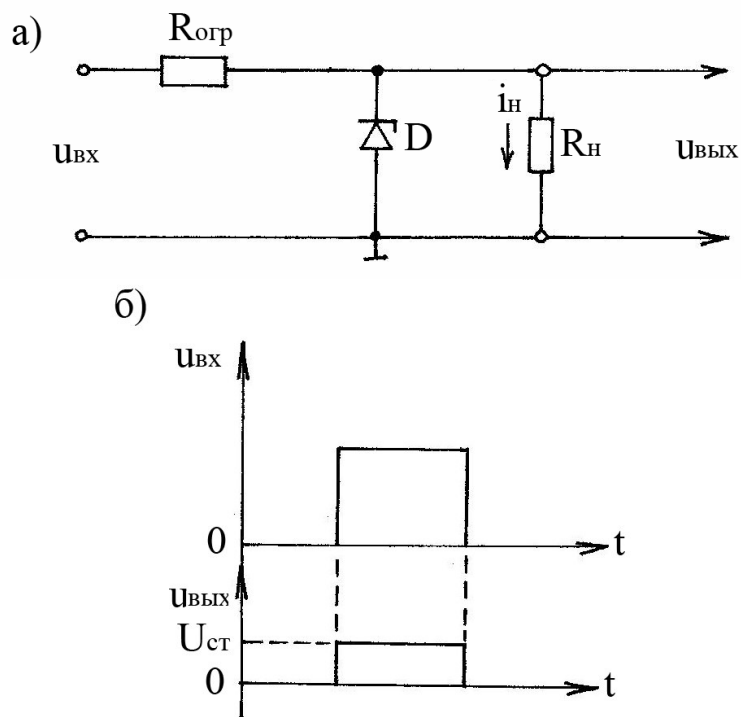


Рис. 2.7. Схема (а) и временные диаграммы работы (б) одностороннего ограничителя напряжения на основе стабилитрона

поясняющие его работу, показаны на рис. 2.7,б.

В этой схеме входное напряжение прямоугольной формы $U_{ВХ}$ ограничивается стабилитроном D на уровне

$$U_{ВЫХ} = U_{СТ}, \quad (2.14)$$

где $U_{СТ}$ – напряжение стабилизации стабилитрона. Если на вход этого ограничителя подать постоянное напряжение $U_{ВХ} > U_{СТ}$, то

$$U_{ВЫХ} = U_{СТ} \quad (2.15)$$

будет так же неизменным во времени.

Схема двустороннего ограничителя напряжения на основе стабилитронов приведена на рис. 2.8,а. Временные диаграммы, поясняющие его работу, показаны на рис. 2.8,б. На временных

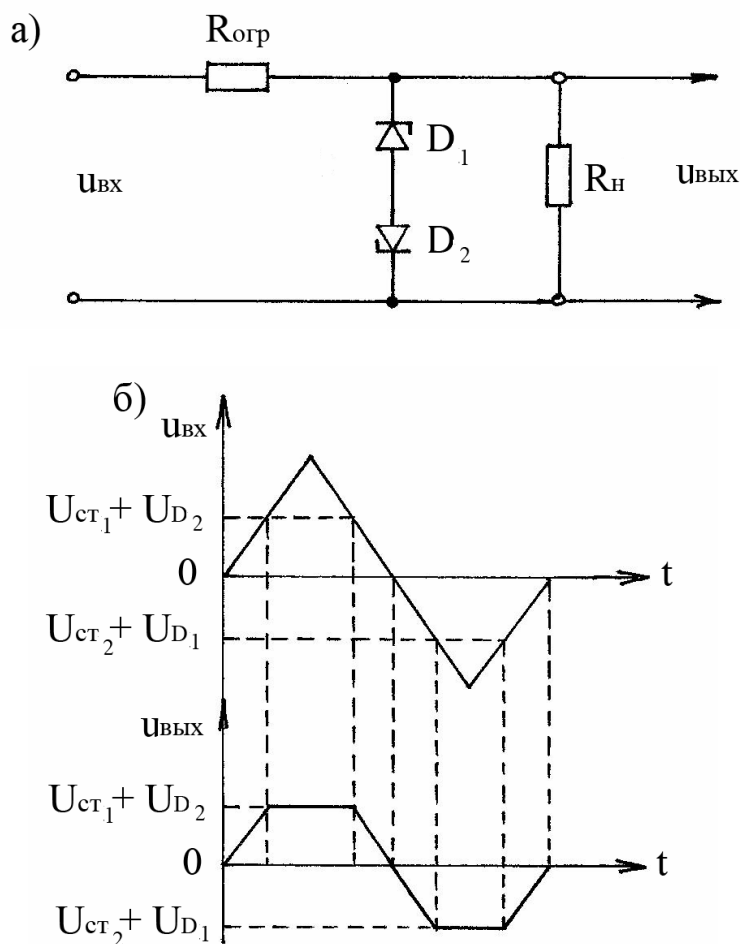


Рис. 2.8. Схема (а) и временные диаграммы работы (б) двустороннего ограничителя напряжения на основе стабилитронов

диаграммах $U_{СТ1}$ и $U_{СТ2}$ – напряжения стабилизации стабилитронов D_1 и D_2 , U_{D1} и U_{D2} – падения напряжения на этих стабилитронах при их включении в прямом направлении. Положительную полуволну входного пилообразного напряжения ограничивает стабилитрон D_1 на уровне

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СТ1}} + U_{D2} , \quad (2.16)$$

а отрицательную – стабилитрон D_2 на уровне

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СТ2}} + U_{D1} . \quad (2.17)$$

В заключение отметим, что диодные ограничители напряжения целесообразно применять в тех случаях, когда в нагрузку от ограничителя отбираются относительно большие токи, а ограничители напряжения на основе стабилитронов – в электронных устройствах, где требуется высокое качество выходного напряжения. Один из вариантов подобных схем показан на рис. 2.9, где В – однофазный однополупериодный выпрямитель, ОН – ограничитель напряжения, П – потребитель электрической энергии (сопротивление нагрузки R_H). В схеме на рис.2.9 выходное напряжение в точности равно напряжению

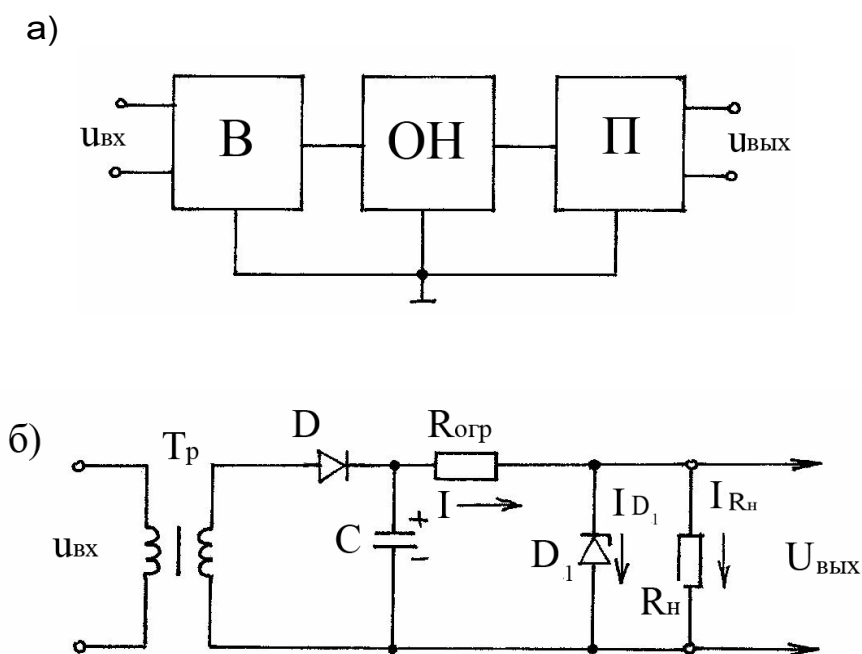


Рис. 2.9. Блок-схема (а) и развернутая схема (б) преобразователя синусоидального напряжения $U_{\text{ВХ}}$ в постоянное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ с заданным значением и высоким качеством

стабилизации стабилитрона D_1 и не зависит от пульсации напряжения на выходе выпрямителя. Протекающий через ограничительный резистор ток

$$I = \frac{U_c - U_{\text{СТ}}}{R_{\text{огр}}} , \quad (2.18)$$

а ток нагрузки

$$I_H = I - I_{D1}, \quad (2.19)$$

где U_c – напряжение на выходе выпрямителя (на конденсаторе C), I_{D1} – ток, замыкающийся в цепь стабилитрона D_1 . Если в схеме на рис. 2.9 стабилитрон заменить на последовательное соединение стабилитронов, то можно получить несколько значений выходных напряжений, не зависящих от пульсации напряжения на выходе выпрямителя. Этот вариант преобразователя показан на рис. 2.10

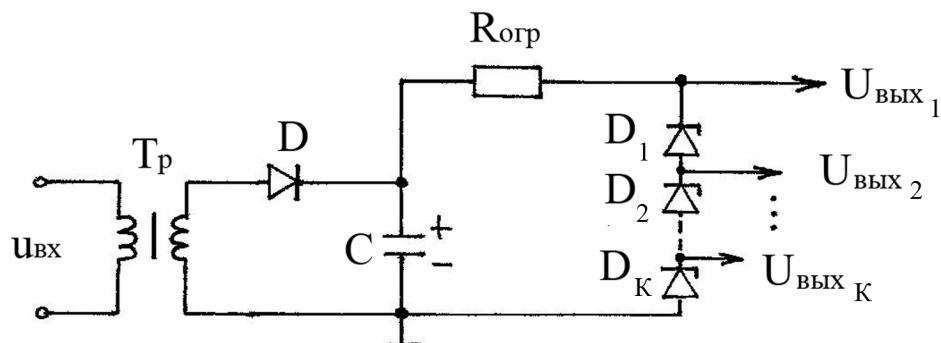


Рис. 2.10. Преобразователь синусоидального напряжения в несколько значений постоянного напряжения

Порядок выполнения работы

1. Однополупериодный выпрямитель

1.1. Открыть файл C9_031 со схемой однополупериодного выпрямителя, содержащейся в этом файле. Здесь вспомогательный источник формирует синусоидальное напряжение амплитудой 100В, которое посредством трансформатора преобразуется во входное синусоидальное напряжение $U_{вх}$. Осциллографы XSC1 и XSC2 не входят, естественно, в состав выпрямителя, а служат для визуального наблюдения протекающих в нем переходных процессов и измерения его основных параметров. На канал А осциллографа XSC1 подается $U_{вх}$, а на канал В – выходное напряжение $U_{вых}$; на канал А осциллографа XSC2 – $U_{вых}$, а на канал В – напряжение, пропорциональное току подзаряда конденсатора. Ток подзаряда i_0 определяется косвенным методом, как в п. 4.2.1 лабораторной работы №1 (см. примечание п. 4.2.1).

Зарисовать схему реального однополупериодного выпрямителя, отличающуюся от схемы в файле C9_031 отсутствием осциллографов и измерительного резистора и имеющую вид, показанный на рис. 2.1,а.

1.2. Включить схему и осциллографы, на экранах которых отобразятся временные диаграммы переходных процессов, протекающих в выпрямителе. Выключив схему, зафиксировать эти диаграммы на экранах осциллографов. Зарисовать временные

диаграммы $U_{вх}$, $U_{вых}$ и i_0 , расположив их в этой же последовательности одну под другой, как это показано на рис. 2.1,б. Для смещения диаграмм в вертикальных направлениях на экранах, использовать Y position осциллографов. Посредством осциллографа XSC1 измерить максимальные значения напряжений $U_{вх}$ и $U_{вых}$, а также, минимальное значение выходного напряжения; посредством осциллографа XSC2 – максимальное значение тока подзаряда конденсатора i_0 . Используя полученные результаты измерений, из соотношений (2.2) и (2.5) рассчитать среднее значение и коэффициент пульсации выходного напряжения этого выпрямителя.

1.3. Снять нагрузочную характеристику однополупериодного выпрямителя – $U_{вх\text{ ср}} = f(R_n)$. Для этого замкнуть резистор 1 кОм, подключить к выходу выпрямителя (параллельно конденсатору) вольтметр и, изменяя R_n в диапазоне 100 Ом – 1 МОм, заполнить таблицу 2.1. По данным этой таблицы построить график зависимости

Таблица 2.1. Экспериментальные данные для определения нагрузочной характеристики однофазного однополупериодного выпрямителя

R_n , кОм	
$U_{вых\text{ ср}}$, В	

$U_{вых\text{ ср}}$ от R_n и сравнить характер этой зависимости с показанным на рис. 2.2.

Примечание. Замена номинала R_n : щелкнуть мышкой по R_n дважды, установить новое значение R_n и нажать ОК.

1.4. Выключить схему и закрыть окно с этой схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

2. Двухполупериодный выпрямитель (мостовая схема)

2.1. Открыть файл C9_032 со схемой этого выпрямителя. Так как вспомогательный источник и трансформатор этого выпрямителя те же, что и у однополупериодного в файле C9_031, то то же и входное напряжение $U_{вх}$. Поэтому для исследования переходных процессов в данном двухполупериодном выпрямителе используется только один осциллограф XSC1. При этом на канал А осциллографа подается выходное напряжения $U_{вых}$, а на канал В – напряжение, пропорциональное току подзаряда конденсатора.

Зарисовать реальную схему данного выпрямителя, отличающуюся от схемы в файле C9_032 отсутствием осциллографа и измерительного резистора и имеющую вид, показанный на рис. 2.3,а.

2.2. Включить схему и осциллограф, зафиксировать и зарисовать временные диаграммы в виде, показанном на рис. 2.3,б (диаграмму входного напряжения $U_{вх}$ взять из п. 1.2). По аналогии с п. 1.2 определить основные параметры выпрямителя.

2.3. Снять нагрузочную характеристику этого выпрямителя так же, как и в п. 1.3.

2.4. Выключить схему и закрыть окно с этой схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

3. Двухполупериодный выпрямитель на основе трансформатора со средней точкой

3.1. Открыть файл C9_041 со схемой этого выпрямителя. Здесь на канал В осциллографа XSC2 подается входное напряжение $U_{вх}$, а на канал А – выходное напряжение $U_{вых}$; на канал А осциллографа SXC1 – $U_{вых}$, а на канал В – напряжение, пропорциональное току подзаряда конденсатора.

Зарисовать реальную схему данного выпрямителя, имеющую вид, показанный на рис. 2.4.

3.2. Включить схему и осциллографы, зафиксировать и зарисовать временные диаграммы в виде, показанном на рис. 2.3,б. По аналогии с п. 1.2 определить основные параметры выпрямителя.

3.3. Снять нагрузочную характеристику этого выпрямителя так же, как и в п. 1.3.

3.4. Выключить схему и закрыть окно с этой схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

4. Односторонний диодный ограничитель напряжения

4.1. Открыть файл C9_051 со схемой этого ограничителя. Здесь напряжение, поступающее на вход ограничителя, формируют генератор импульсов и диод на выходе этого генератора. При этом диод пропускает только положительные полуволны напряжения генератора импульсов. На канал А осциллографа подается входное напряжение $U_{вх}$, а на канал В – выходное напряжение $U_{вых}$. Зарисовать схему одностороннего диодного ограничителя напряжения, имеющую вид, показанный на рис. 2.5,а. Установить нужную форму входного напряжения (синусоидальную, пилообразную, меандр). Для этого щелкнуть мышкой по генератору дважды и утопить соответствующую кнопку. Попутно, установить амплитуду входного напряжения $U_m=10$ В.

4.2. Включить схему и осциллограф, на экране которого отобразятся временные диаграммы переходных процессов, протекающих в ограничителе. Выключив схему, зафиксировать эти диаграммы на экране осциллографа. Зарисовать временные диаграммы $U_{вх}$ и $U_{вых}$, расположив их в этой же последовательности одну под другой, как это показано на рис. 2.5,б. Для смещения диаграмм на экране в вертикальном направлении, использовать Y position осциллографа. Посредством осциллографа измерить максимальные значения входного и выходного напряжений.

4.3. Повторить п. 4.2 при других формах входного напряжения.

4.4. Выключить осциллограф и схему и закрыть окно с этой схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

5. Двухсторонний диодный ограничитель напряжения

5.1. Открыть файл C9_052 со схемой этого ограничителя. Здесь напряжение, поступающее на вход ограничителя, формирует непосредственно генератор импульсов (отсутствует диод на выходе генератора). На канал А осциллографа поступает входное напряжение $U_{вх}$, а на канал В – выходное напряжение $U_{вых}$. Установить нужную форму входного напряжения и его амплитуду так же, как и в п. 4.1.

Зарисовать схему двухстороннего диодного ограничителя напряжения, имеющую вид, показанный на рис. 2.6,а.

5.2. Повторить п.п. 4.2 – 4.4 применительно к этому ограничителю.

6. Односторонний ограничитель напряжения на основе стабилитрона

6.1. Открыть файл C9_061 со схемой этого ограничителя. Зарисовать его схему, имеющую вид, показанный на рис. 2.7,а.

6.2. Повторить операции п. 4.1 и п.п. 4.2 – 4.4 применительно к этому ограничителю. При выполнении п. 6.2 необходимо иметь в виду, что отрицательная полуволна входного напряжения замыкается через стабилитрон в прямом направлении и создает на нем падение напряжения в несколько десятых долей вольта. Учесть это обстоятельство при построении временных диаграмм работы данного ограничителя и измерить указанное значение падения напряжения.

7. Двухсторонний ограничитель напряжения на основе стабилитронов

7.1. Открыть файл C9_062 со схемой этого ограничителя. Зарисовать его схему, имеющую вид, показанный на рис. 2.8,а.

7.2. Повторить операции п. 4.1 и п.п. 4.2 – 4.4 применительно к этому ограничителю.

8. Выйти из программы Multisim 2001, выключить компьютер и монитор.

Содержание отчета

1. Схемы и временные диаграммы работы выпрямителей и ограничителей напряжения.

2. Графики нагрузочных характеристик выпрямителей и их другие основные параметры (средние значения выходных напряжений, коэффициенты пульсации выходного напряжения).

3. Словесная сравнительная оценка работы разных видов выпрямителей, базирующаяся на основе полученных экспериментальных данных.

4. Выводы.

Лабораторная работа №3

Схемотехника

Цель работы: получение навыков предварительного моделирования переходных процессов в полупроводниковых электронных устройствах с последующей экспериментальной проверкой полученных результатов.

Основные положения и поясняющие примеры. Разработка большинства электронных устройств связана с необходимостью предварительного моделирования переходных процессов, протекающих в этих устройствах, и получения числовых значений основных электрических параметров на различных участках схемы данного конкретного устройства.

В этой лабораторной работе моделируются переходные процессы и определяются основные параметры готовых абстрактных электронных устройств на основе полупроводниковых диодов и стабилитронов. Процедура моделирования сводится к следующему:

1) определение основных параметров электронного устройства (напряжений и токов) посредством методов расчета электрических цепей,

2) построение временных диаграмм функционирования устройства с учетом особенностей работы содержащихся в нем полупроводниковых приборов и полученных выше значений основных параметров.

После предварительного моделирования, осциллографическим методом осуществляется экспериментальная проверка полученных результатов и, в случае необходимости, их корректировка.

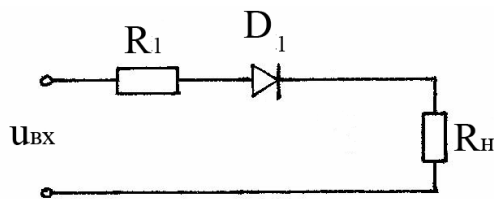
Примеры моделирования.

Пример 1. Пусть на цепь, содержащую последовательно соединенные резистор R_1 , диод D_1 и резистор R_H , параметры которых известны, воздействует синусоидальное входное напряжение

$$u_{BX}(t) = U_m \sin \omega t$$

с заданной амплитудой U_m (рис. 3.1,а). Определить максимальное значение тока в этой цепи, максимальные значения падений

а)



б) u_{BX}

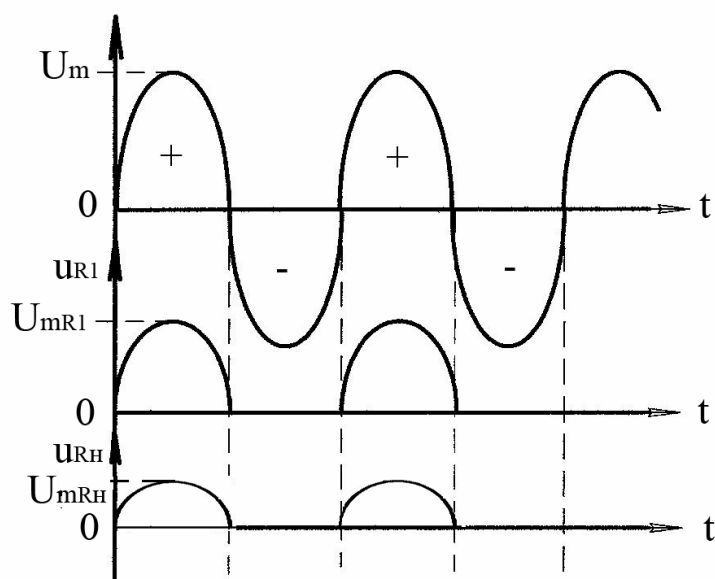


Рис. 3.1. Цепь с последовательно соединенными элементами R_1 , D_1 и R_H (а) и временные диаграммы, отражающие переходные процессы в этой цепи (б)

напряжения на резисторах R_1 и R_H и построить временные диаграммы входного напряжения и напряжений на этих резисторах, расположив их в той же последовательности одну под другой.

Так как данная цепь не содержит реактивных элементов (катушек индуктивности и конденсаторов), то для определения ее электрических параметров можно использовать методы расчета цепей постоянного тока. При анализе таких цепей с источником входного напряжения разнополярной формы, нужно рассматривать отдельно процессы в цепи при положительной и отрицательной полуволнах этого напряжения. При этом достаточно записать необходимые уравнения для определения только максимальных значений искомых величин.

При положительной полуволне входного напряжения в схеме на рис. 3.1,а, т.е. при $u_{вх} > 0$, диод D_1 открыт. Поэтому, согласно второму закону Кирхгофа, максимальное значение этого напряжения

$$U_m = I_m R_1 + U_{D1} + I_m R_H ,$$

откуда максимальное значение тока в цепи

$$I_m = \frac{U_m - U_{D1}}{R_1 + R_H} .$$

При получении числового значения тока I_m , значение падения напряжения на открытом диоде U_{D1} берем из экспериментальных данных лабораторной работы №1 или из справочных данных на этот диод. Используя закон Ома, определим максимальные значения напряжений на резисторах R_1 и R_H из соотношений

$$U_{mR1} = I_m R_1$$

и

$$U_{mR_H} = I_m R_H .$$

При отрицательной полуволне входного напряжения, т.е. при $u_{вх} < 0$, диод D_1 закрыт. Поэтому

$$I_m = 0, \quad U_{mR1} = 0 \quad \text{и} \quad U_{mR_H} = 0.$$

Далее строим временные диаграммы функционирования этого устройства $u_{вх}$, u_{R1} и u_{R_H} . Очевидно, что напряжения на резисторах R_1 и R_H , максимальные значения которых определены выше, будут иметь вид положительных полуволн синусоидального входного напряжения, показанный на рис. 3.1,б.

Пример 2. Пусть в цепи из примера 1 резистор R_H шунтирован диодом D_2 , как это показано на рис. 3.2,а. Тогда при положительной

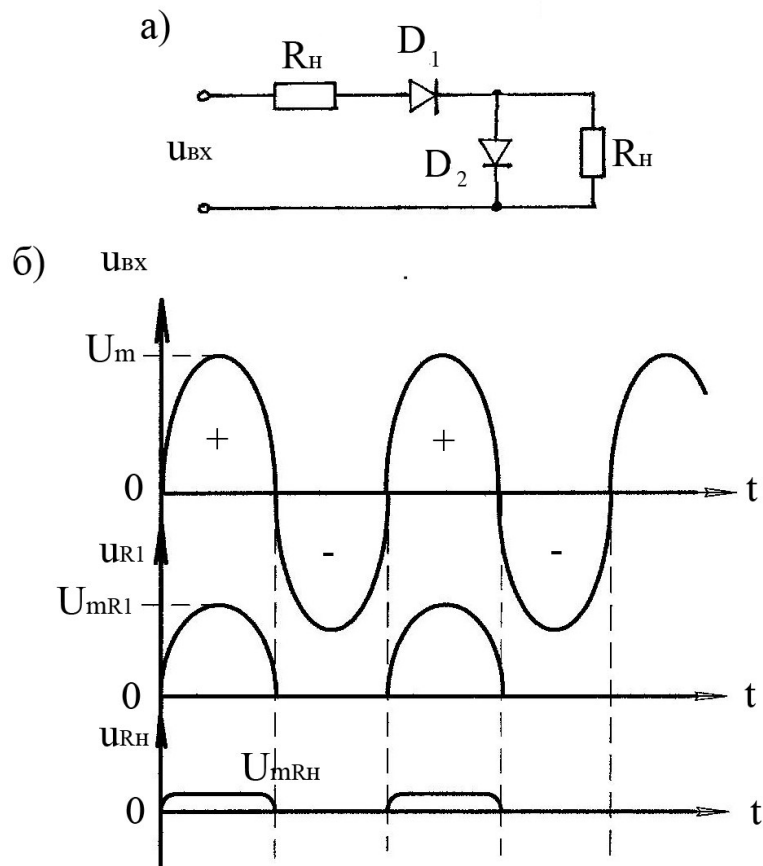


Рис. 3.2. Двухконтурная электрическая цепь (а) и временные диаграммы, отражающие переходные процессы в этой цепи (б)

половине входного напряжения

$$U_m = I_m R_1 + U_{D1} + U_{D2} ,$$

откуда

$$I_m = \frac{U_m - U_{D1} - U_{D2}}{R_1} ,$$

а

$$U_{mR1} = I_m R_1$$

Так как ветви с диодом D_2 и резистором R_H соединены параллельно, то падения напряжения на этих ветвях одинаковы и на протяжении практически всей положительной полуволны входного напряжения

$$U_{mR_H} = U_{D2} ,$$

где U_{D2} – падение напряжения на открытом диоде D_2 .

При отрицательной полуволне входного напряжения, как и в примере 1, диод D_1 закрыт и

$$I_m = 0, U_{mR1} = 0 \text{ и } U_{mR_H} = 0.$$

Таким образом, напряжение на резисторе R_1 будет иметь вид положительных полувольт синусоидального входного напряжения (рис. 3.2,б), а напряжение на резисторе R_H в течение этих полувольт неизменно и равно падению напряжения на открытом диоде D_2 . Максимальное значение напряжения на резисторе R_1 в схеме на рис. 3.2,а можно определить из выражения

$$U_{mR1} = U_m - U_{D1} - U_{D2}$$

и без предварительного вычисления максимального значения тока I_m .

Пример 3. Заменяем в цепи из примера 2 диод D_1 на стабилитрон, как это показано на рис. 3.3,а. При этом будем считать, что напряжения стабилизации стабилитрона $U_{ст}$ существенно меньше амплитуды U_m синусоидального входного напряжения. В противном случае, т.е. при $U_{ст} > U_m$, стабилитрон будет функционировать как диод и никакого различия в работе цепей на рис. 3.2,а и 3.3,а не будет.

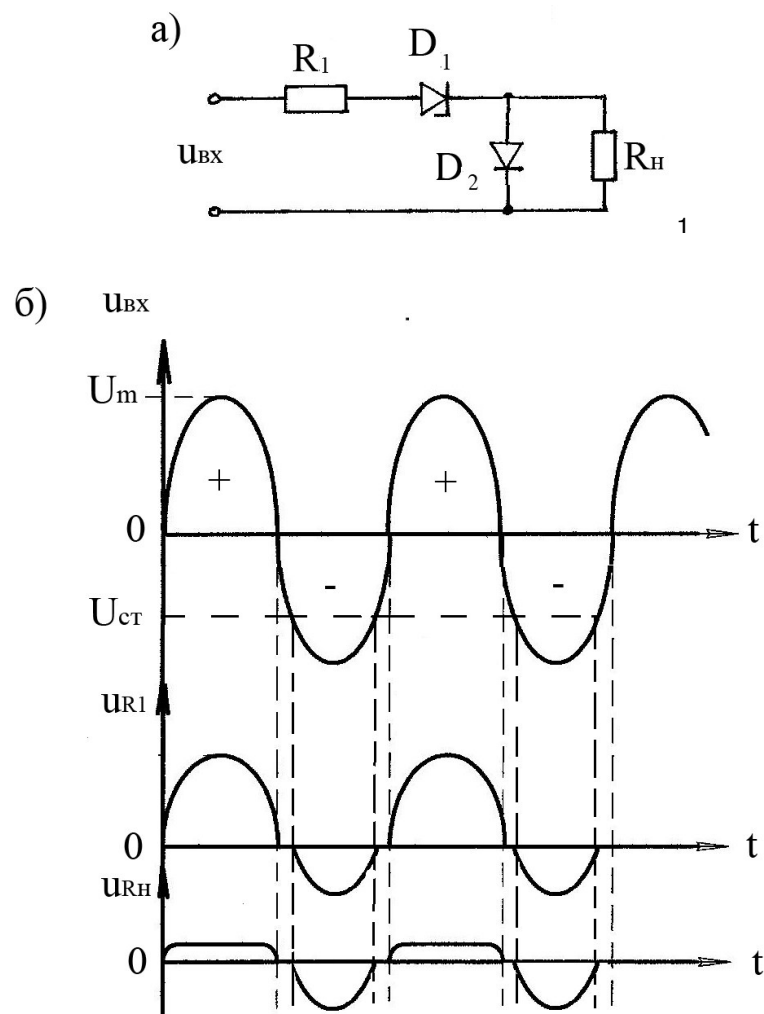


Рис. 3.3. Электрическая цепь со стабилитроном (а) и временные диаграммы, отражающие переходные процессы в этой цепи (б)

При положительной полуволне входного напряжения стабилитрон включен в прямом направлении, работает как диод и на этом интервале времени используем те же расчетные соотношения, что и в примере 2. В результате, получим те же, что и в примере 2, временные диаграммы напряжений на резисторах R_1 и R_H .

При отрицательной полуволне входного напряжения, согласно второму закону Кирхгофа, имеем

$$U_m = I_m R_H + U_{ст} + I_m R_1,$$

откуда

$$I_m = \frac{U_m - U_{ст}}{R_1 + R_2}.$$

При получении числового значения этого тока напряжение стабилизации стабилитрона $U_{ст}$ берем из экспериментальных данных лабораторной работы №1 или из справочных данных на этот прибор. Используя закон Ома, определим максимальное значение напряжения на резисторах R_1 и R_H из соотношений

$$U_{mR1} = I_m R_1 \quad \text{и} \quad U_{mR_H} = I_m R_H.$$

Очевидно, что при отрицательной полуволне входного напряжения, стабилитрон открыт только в интервале времени, когда $U_{вх} \geq U_{ст}$. Это обстоятельство учтено при построении временных диаграмм на рис. 3.3,б, где показано, что стабилитрон открывается в момент времени, когда $U_{вх}$ возрастает до значения $U_{ст}$ и закрывается в момент времени, когда $U_{вх}$ уменьшается до значения напряжения $U_{ст}$.

Порядок выполнения работы

1. Открыть файл C9_021 со схемой электронного устройства, подобной, приведенной на рис. 3.4. Осциллографы XSC1 и XSC2 не входят, естественно, в состав моделируемого устройства, а служат для визуализации протекающих в нем переходных процессов и измерения его параметров. На канал А осциллографа XSC2 подается входное синусоидальное напряжение моделируемого устройства, формируемое генератором импульсов, а на канал В – напряжение на резисторе R_H ; на канал В осциллографа XSC1 – напряжение на резисторе R_1 .

В схеме на рис. 3.4 содержатся две самостоятельные задачи:

1) при разомкнутом ключе А – одноконтурное электронное устройство, подобное рассмотренному выше в примере 1;

2) при замкнутом ключе А – двухконтурное электронное устройство, аналогичное рассмотренным в примерах 2 и 3.

Зарисовать схему ИУ, содержащуюся в файле C9_021 и, щелкнув мышкой дважды по генератору импульсов, определить амплитуду синусоидального входного напряжения.

2. Разомкнуть ключ А, зарисовать схему полученного таким образом первого моделируемого электронного устройства и определить его электрические параметры аналогично тому, как это показано в примере 1. Используя результаты расчетов и учтя особенности работы содержащихся в устройстве полупроводниковых приборов, построить временные диаграммы напряжений U_{Bx} , U_{R1} и U_{RH} в виде, подобном показанному на рис. 3.1,б.

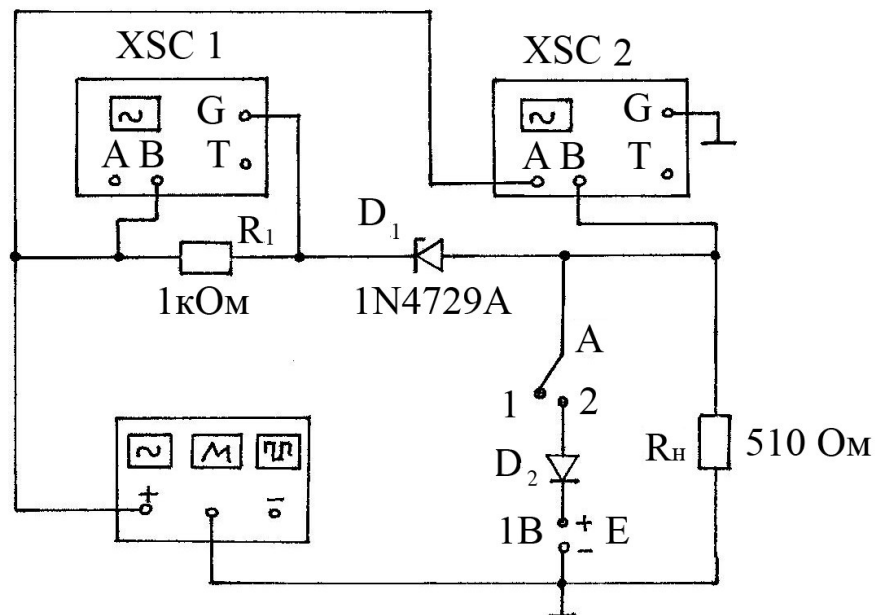


Рис. 3.4. Схема измерительной установки моделируемого электронного устройства

Включить схему и осциллографы, зафиксировать осциллограммы напряжений на экранах, после чего провести количественную и качественную сравнительную оценку этих осциллограмм с временными диаграммами напряжений, полученными при предварительном моделировании переходных процессов в данном электронном устройстве. В случае неидентичности результатов сравнительной оценки, найти и устранить ошибки, допущенные при моделировании. Выключить схему.

3. Замкнуть ключ А и далее повторить п. 2 в этом положении ключа применительно ко второму электронному устройству, опираясь на данные примеров 2 и 3.

4. Выключить осциллографы и схему и закрыть окно с ее содержимым. Выйти из программы Multisim 2001, выключить компьютер и монитор.

Содержание отчета

1. Схемы измерительной установки и моделируемых электронных устройств.

2. Расчетные соотношения и результаты расчетов, временные диаграммы работы (U_{Bx} , U_{R1} и U_{RH}) каждого из этих устройств.

3. Словесная сравнительная оценка результатов предварительного моделирования и экспериментальных данных.

4. Выводы.

Лабораторная работа №4

Статические характеристики биполярных транзисторов

Цель работы: экспериментальное определение основных статических параметров и характеристик биполярных транзисторов (БТ) и исследование их работы в схеме транзисторного ключа.

Основные положения. БТ – это полупроводниковый прибор, состоящий из трех областей с двумя взаимодействующими р-п-переходами. В зависимости от чередования областей с разным типом проводимости различают n-р-п- и р-п-р-транзисторы, условные обозначения и структурные схемы которых приведены на рис. 4.1, а и 4.1, б, соответственно. Здесь Б – база, К – коллектор, Э – эмиттер –

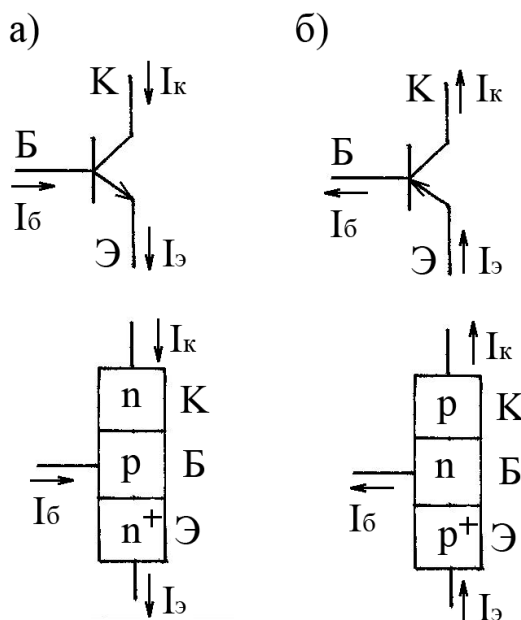


Рис. 4.1. Условные обозначения и структурные схемы биполярных транзисторов:
а – n-р-п⁺-типа, б – р-п-р⁺-типа

– выводы, посредством которых БТ может быть подсоединен к внешней электрической цепи (эти же названия имеют и области полупроводниковых структур БТ), I_B – ток базы, I_K – ток коллектора, I_E – ток эмиттера. Стрелки в условных обозначениях БТ показывают, в каком направлении БТ пропускает электрический ток. Эмиттеры БТ (n⁺- и p⁺-) предназначены для инжекции, соответственно, электронов и дырок в базовые области (средние слои структур), а коллекторы – для экстракции (вытягивания) этих носителей электрического тока из базы в коллектор. Р-п-переходы, образованные базами и эмиттерами (n⁺-р- и p⁺-п-), называют эмиттерными р-п-переходами, а р-п-переходы, состоящие из коллекторных и базовых областей, коллекторными р-п-переходами.

Возможны следующие режимы работы БТ:

- 1) режим отсечки, когда оба перехода транзистора смещены в обратном направлении;
- 2) режим насыщения, когда оба перехода смещены в прямом направлении;
- 3) активный режим, когда эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном;
- 4) инверсный активный режим, когда коллекторный переход смещен в прямом направлении, а эмиттерный – в обратном.

В качестве примера рассмотрим n-p-n-транзистор (рис. 4.2), у которого напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ} = 0,6 \text{ В}$, а напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ} = 0,4 \text{ В}$. Так как $U_{бэ} = 0,6 \text{ В}$ положительно, то эмиттерный переход смещен в прямом

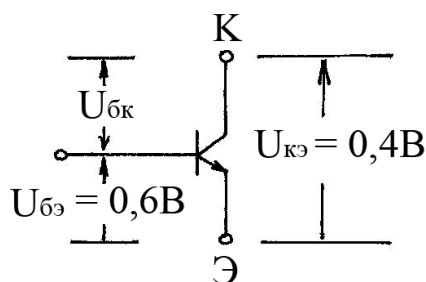


Рис. 4.2. Схема, поясняющая работу n-p-n-транзистора в режиме насыщения

направлении. Согласно второму закону Кирхгофа

$$U_{кэ} = U_{бэ} + U_{кб} = U_{бэ} - U_{бк},$$

откуда напряжение между базой и коллектором

$$U_{бк} = U_{бэ} - U_{кэ} = 0,6 - 0,4 = 0,2 \text{ В}.$$

Так как $U_{бк} = 0,2 \text{ В}$ положительно, то и коллекторный переход смещен в прямом направлении. Следовательно, транзистор работает в режиме насыщения.

Режимы отсечки и насыщения используются при работе БТ в ключевых схемах, где реализуются два устойчивых состояния: «включено» (режим насыщения), «выключено» (режим отсечки). Активный режим – при работе БТ в усилителях и генераторах; инверсный активный режим – в схемах двунаправленных переключателей, построенных на основе симметричных n^+ -p- n^+ - и p^+ -n-p $^+$ - транзисторов, имеющих одинаковую степень легирования эмиттера и коллектора.

В электронных схемах один вывод БТ используется для подачи входного сигнала ($I_{вх}$), другой – для получения выходного сигнала ($I_{вых}$). Третий вывод является общим для входного и выходного сигналов. В зависимости от того, какой именно вывод используется в качестве общего, различают три схемы включения БТ:

- 1) с общим эмиттером (ОЭ),
- 2) с общей базой (ОБ),
- 3) с общим коллектором (ОК).

Эти схемы приведены на рис. 4.3. Видно, что в схеме с ОЭ входным током является ток базы, а выходным – ток коллектора; входным напряжением – напряжение база-эмиттер, а выходным – напряжение коллектор-эмиттер. В схеме с ОБ входным током является ток эмиттера, а выходным – ток коллектора; входным напряжением – напряжение база-эмиттер, а выходным – напряжение коллектор-база.

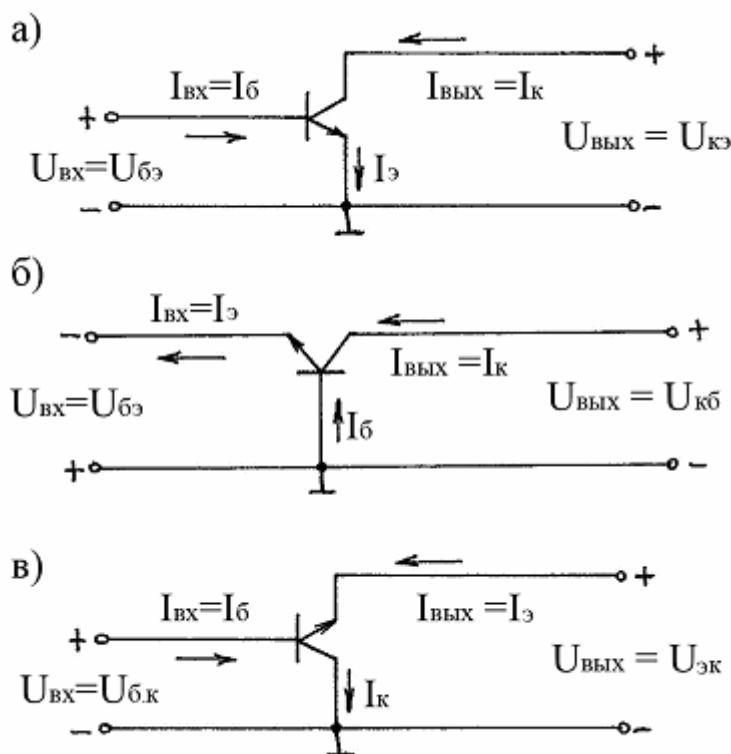


Рис. 4.3. Три схемы включения n+ -p-n-транзистора:
а – с общим эмиттером, б – с общей базой, в – с общим коллектором

В схеме с ОК входным током является ток базы, а выходным – ток эмиттера; входным напряжением – напряжение база-коллектор, а выходным – напряжение эмиттер-коллектор.

Перечисленные входные и выходные параметры при включении БТ по этим схемам сведены в таблице 4.1, где

$$\beta = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} \quad (4.1)$$

- коэффициент усиления по току БТ.

Таблица 4.1. Входные и выходные параметры n+ -p-n-транзисторов в схемах с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором

Схема включения БТ	Входные параметры	Выходные параметры	Коэффициент усиления по току
ОЭ	$I_Б, U_{БЭ}$	$I_К, U_{КЭ}$	$B = (I_К / I_Б) \gg 1$
ОБ	$I_Э, U_{БЭ}$	$I_К, U_{КБ}$	$B = (I_К / I_Э) < 1$
ОК	$I_Б, U_{БК}$	$I_Э, U_{ЭК}$	$B = (I_Э / I_Б) \gg 1$

Отметим, что в случае p^+-n-p -БТ, полярности всех токов и напряжений в схемах на рис. 4.3 следует изменить на противоположные. Из таблицы 4.1 видно, что основное назначение БТ – усиление электрического тока – реализуется при работе транзистора в схеме с ОЭ, а в случае симметричных БТ и в схеме с ОК.

Ниже, для конкретности, рассмотрим работу, основные параметры и характеристики $n-p-n$ -транзистора при его включении по схеме с общим эмиттером.

Принцип действия транзистора поясним, обратившись к схеме на рис. 4.4, полагая, что БТ находится в активном режиме. На рис.4.4

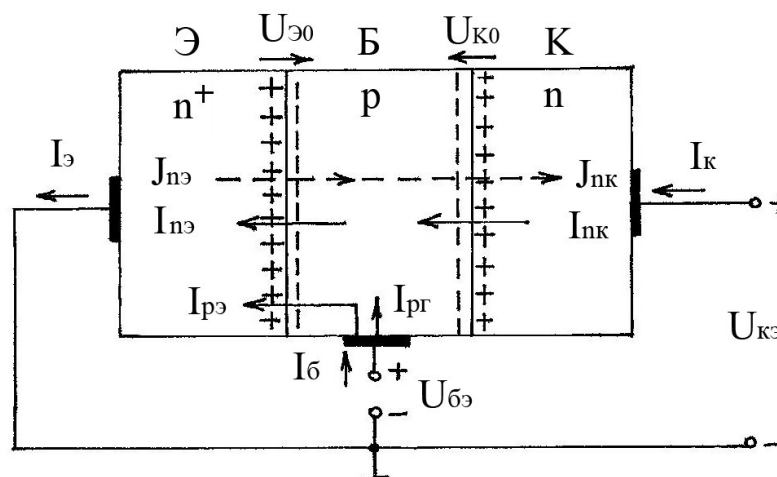


Рис. 4.4. Схема, поясняющая принцип работы биполярного транзистора

сплошными стрелками показаны токи электронов и дырок в различных областях транзистора: $I_{nэ}$ – ток электронов через эмиттерный переход, $I_{pэ}$ – ток дырок через эмиттерный переход, $I_{nк}$ – ток электронов через коллекторный переход, $I_{пр}$ – ток дырок, поступающий в базу с базового контакта. Пунктирными стрелками на рис. 4.4 показаны соответствующие токам потоки электронов: $J_{nэ}$ – поток электронов через эмиттерный переход, $J_{nк}$ – поток электронов через коллекторный переход. Потоки и токи электронов направлены встречно вследствие отрицательного заряда электрона.

В отсутствие напряжений $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$, у эмиттерного и коллекторного переходов образуются потенциальные барьеры с напряжениями $U_{Э0}$ и $U_{К0}$ аналогично тому, как и напряжение U_0 в полупроводниковом диоде (см. пояснения к рис. 1.5). При подаче напряжений $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$ на транзистор так, как это показано на рис. 4.4, эмиттерный переход смещается в прямом направлении, а коллекторный переход еще больше в обратном направлении. При этом эмиттер поставляет (инжектирует) в базу электроны, образующие электронный ток $I_{nэ}$, а из базы в эмиттер поступают дырки, образующие дырочный ток $I_{pэ} \ll I_{nэ}$. В результате, через эмиттерный переход протекает ток

$$I_{Э} = I_{nэ} + I_{pэ} \quad (4.2)$$

В идеальном случае $I_{pэ} = 0$ и $I_э = I_{nэ}$. В реальных же БТ $I_{pэ} \neq 0$. Поэтому коэффициент инжекции эмиттерного перехода

$$\gamma = \frac{I_{nэ}}{I_{nэ} + I_{pэ}} = \frac{I_{nэ}}{I_э} \approx 0,95 \div 0,995. \quad (4.3)$$

Электроны, инжектированные эмиттером в базу, движутся по направлению к коллекторному переходу, достигают его и поступают в коллектор, образуя коллекторный ток

$$I_k = I_{n_k} \quad (4.4)$$

Отметим, что не все из этих электронов достигают коллектора, т.к. часть их рекомбинирует в базе с основными носителями (дырками). Количественно рекомбинационные потери в базе определяются коэффициентом переноса

$$h = \frac{I_{n_k}}{I_{nэ}} \approx (chW_б)^{-1}, \quad (4.5)$$

где $W_б = \omega_б / L_n$, $\omega_б$ – ширина базы; $L_n = (D_n T_n)^{1/2}$, D_n и T_n – диффузионная длина, коэффициент диффузии и время жизни электронов в базе соответственно. Соотношение

$$\alpha = \gamma \cdot h \quad (4.6)$$

называют коэффициентом передачи электронов в базе, который и определяет основное свойство БТ как усилителя электрического тока. Действительно, в схеме с ОЭ входной ток $I_б$ и выходной ток I_k суммируются в эмиттерном выводе БТ, т.е.

$$I_э = I_k + I_б \quad (4.7)$$

Из выражений (4.3) – (4.6) следует, что

$$I_k = \alpha \cdot I_э, \quad (4.8)$$

а из (4.7) и (4.8) – коэффициент усиления по току

$$\beta = \frac{I_k}{I_б} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (4.9)$$

Видно, что β растет с ростом α и резко падает при его уменьшении. Так при $\alpha = 0.95$, $\beta = 19$; а при $\alpha = 0.995$, $\beta = 199$.

Важной характеристикой БТ, которую нужно учитывать при разработке электронных устройств на основе этих приборов, является зависимость β от I_k , показанная на рис. 4.5. Видно, что при увеличении тока коллектора от нуля до относительно небольших значений коэффициент усиления по току резко возрастает, а затем в некоторой области токов I_k сохраняется практически неизменным. При дальнейшем увеличении тока коллектора, β монотонно уменьшается.

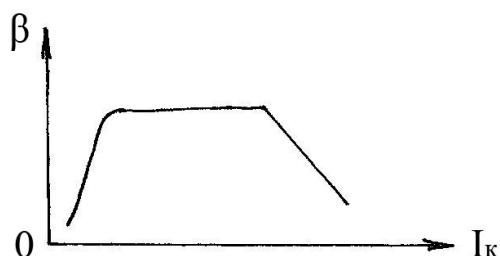


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента усиления по току биполярного транзистора от тока коллектора

Рост β обусловлен, главным образом, увеличением времени жизни электронов в базе, а его спад — уменьшением коэффициента инжекции эмиттерного n^+ - p -перехода.

Отметим, что как в полупроводниковых диодах, так и в БТ, $\gamma \sim (N_3/N_6)$, где N_3 и N_6 — концентрации атомов примеси в эмиттере и базе соответственно. При этом в n^+ - p - n -БТ $N_3 = N_d$ — концентрация донорной примеси, а $N_6 = N_a$ — концентрация акцепторной примеси. В p^+ - n - p -БТ — $N_3 = N_a$, а $N_6 = N_d$.

К основным статическим характеристикам БТ относятся входные, передаточные и выходные.

Входная характеристика — зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер при неизменном напряжении коллектор-эмиттер:

$$I_6 = f(U_{63}) \text{ при } U_{к3} = \text{const}. \quad (4.10)$$

Эта характеристика, рис. 4.6, имеет вид прямой ветви ВАХ полупроводникового диода (рис. 1.7), так как, в сущности, является характеристикой прямосмещенного эмиттерного n^+ - p -перехода БТ.

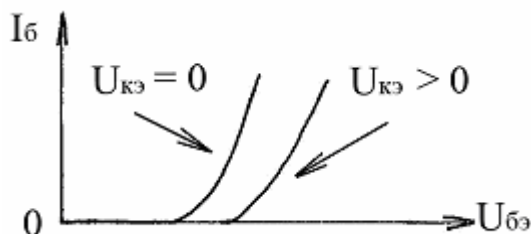


Рис. 4.6. Входная характеристика биполярного транзистора

Передаточная характеристика — зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер при неизменном напряжении коллектор-эмиттер:

$$I_K = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = \text{const} . \quad (4.11)$$

Эта характеристика, показанная на рис. 4.7, где ток коллектора в β -раз

$$I_K = I_s \exp (U_{бэ}/\varphi_T) \quad (4.12)$$

превышает ток базы, имеет тот же вид, что и входная характеристика БТ. В выражении (4.12) I_s — ток насыщения, $\varphi_T = 0.026\text{В}$ —

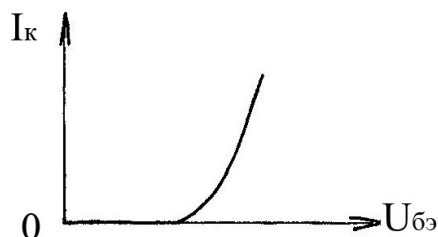


Рис. 4.7. Передаточная характеристика биполярного транзистора

термодиффузионный потенциал. К передаточным характеристикам относится и зависимость ток коллектора от тока базы при неизменном напряжении коллектор-эмиттер:

$$I_K = f(I_б) \text{ при } U_{кэ} = \text{const} . \quad (4.13)$$

Эта характеристика, показанная на рис. 4.8, где

$$I_K = \beta \cdot I_б, \quad (4.14)$$

имеет вид прямой линии в области токов коллектора, где β практически не зависит от I_K (см. рис. 4.5).

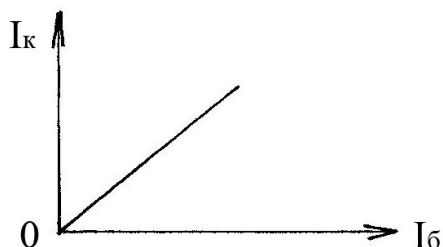


Рис. 4.8. Передаточная характеристика биполярного транзистора

Выходная характеристика — зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при неизменных напряжении база-эмиттер, или токе базы:

$$I_K = f(U_{кэ}) \text{ при } U_{бэ} = \text{const}, \text{ или } I_б = \text{const} . \quad (4.15)$$

На этой характеристике I_K возрастает приблизительно по линейному закону при изменении $U_{KЭ}$ от нуля до нескольких десятых долей вольта, достигает максимального значения и сохраняется неизменным при дальнейшем увеличении $U_{KЭ}$. При другом значении тока $I_Б = \text{const}$, выходная характеристика будет иметь тот же вид, но I_K достигнет другого максимального значения. Семейство выходных характеристик БТ показано на рис. 4.9,

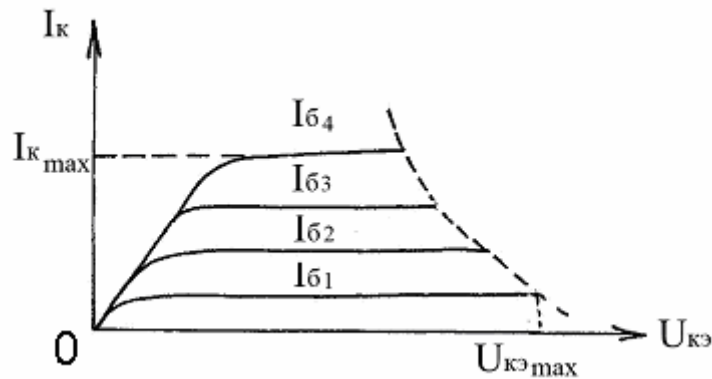


Рис. 4.9. Выходные характеристики биполярных транзисторов

где $I_{Б4} > I_{Б3} > I_{Б2} > I_{Б1}$. На выходных характеристиках БТ можно выделить два принципиально отличающихся друг от друга участка:

- 1) участок, где I_K зависит от $U_{KЭ}$;
- 2) участок, где I_K почти не зависит от $U_{KЭ}$.

На первом из этих участков БТ находится в режиме насыщения, а на втором – в активном режиме. Пунктиром на рис. 4.9 показана кривая мощности, ограничивающая область допустимых режимов работы БТ. Там же показаны максимально допустимые для БТ значения тока коллектора $I_{K \max}$ и напряжения коллектор-эмиттер $U_{KЭ \max}$.

Статические характеристики р-п-р-транзисторов будут иметь тот же вид, что и п-р-п-БТ на рис. 4.6-4.9, но в области отрицательных значений напряжений и токов.

По приведенным на рис. 4.6-4.9 статическим характеристикам можно определить все малосигнальные параметры БТ, информация о значениях которых необходима при расчете усилителей малого синусоидального сигнала и других устройств на основе БТ. Так, по передаточной характеристике на рис. 4.7 можно определить крутизну

$$S = \frac{dI_K}{dU_{БЭ}} \quad (4.16)$$

Подставив в (4.16) ток коллектора из выражения (4.12), получим

$$S = I_K / \Phi_T \quad (4.17)$$

Дифференциальный коэффициент усиления по току

$$\beta = \frac{dI_K}{dI_6} \quad (4.18)$$

можно определить по передаточной характеристике на рис. 4.8. Входная характеристика на рис. 4.6 позволяет определить дифференциальное входное сопротивление

$$r_{6\bar{3}} = \frac{dU_{6\bar{3}}}{dI_6} = \frac{dU_{6\bar{3}}}{dI_K} \cdot \frac{dI_K}{dI_6} = \frac{\beta}{S} \quad (4.19)$$

Учитывая выражение (4.17), установим связь $r_{6\bar{3}}$ с током коллектора в виде

$$r_{6\bar{3}} = \frac{\beta \varphi_T}{I_K} \quad (4.20)$$

Дифференциальное выходное сопротивление

$$r_{K\bar{3}} = \frac{dU_{K\bar{3}}}{dI_K} \quad (4.21)$$

можно определить по выходным характеристикам на рис.4.9. У $n^+ - p - n^-$ -БТ

$$r_{K\bar{3}} = U_a / I_K, \quad (4.22)$$

где $U_a \approx 100V$ – напряжение Эрли. По передаточной характеристике на рис. 4.7 можно определить дифференциальное сопротивление эмиттера

$$r_{\bar{3}} = \frac{dU_{6\bar{3}}}{dI_{\bar{3}}} \quad (4.23)$$

Так как $I_{\bar{3}} \approx I_K$, то

$$r_{\bar{3}} \approx \frac{dU_{6\bar{3}}}{dI_K} = \frac{1}{S} = \frac{r_{6\bar{3}}}{\beta} = \frac{\varphi_T}{I_K} \quad (4.24)$$

Из выражений (4.20), (4.22) и (4.24) видно, что с ростом тока коллектора, $r_{6\bar{3}}$, $r_{K\bar{3}}$ и $r_{\bar{3}}$ уменьшаются по закону обратно пропорциональной зависимости.

Рассмотрим теперь стационарные режимы работы транзисторного ключа, схема которого приведена на рис. 4.10. Работу транзисторного

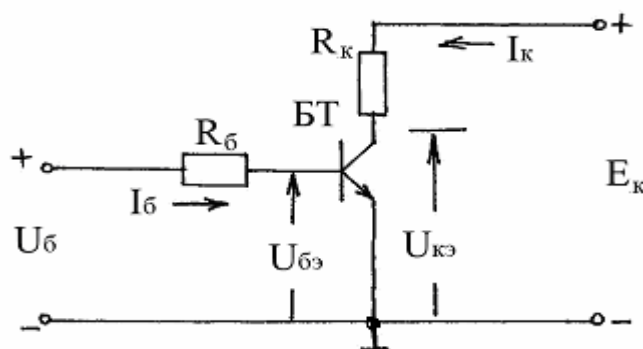


Рис. 4.10. Схема транзисторного ключа

ключа в полном объеме отражают его передаточные характеристики:

- 1) зависимость тока коллектора от тока базы,
- 2) зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер,
- 3) зависимость напряжения коллектор-эмиттер от напряжения база-эмиттер. Первая из этих характеристик показана на рис. 4.11. Видно,

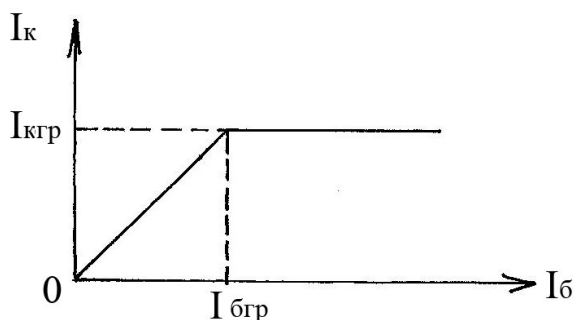


Рис. 4.11. Передаточная характеристика транзисторного ключа – зависимость тока коллектора от тока базы

что при $I_Б = 0$ БТ закрыт (находится в режиме отсечки) и $I_К = 0$. При изменении тока базы от нуля до значения $I_{Бгр}$, где $I_{Бгр}$ – граничный ток базы, $I_К$ возрастает по линейному закону в соответствии с выражением (4.14). При этом БТ находится в активном режиме – режиме усиления тока базы. При дальнейшем увеличении тока базы, БТ переходит в режим насыщения и ток коллектора сохраняется неизменным на уровне $I_{Кгр}$. Отметим, что на входной характеристике транзистора значению $I_Б = I_{Бгр}$, при котором БТ находится на границе между активным режимом и режимом насыщения, соответствует напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ} = U_{КЭгр}$.

Определим перечисленные граничные параметры БТ.

Как отмечалось выше, из схемы на рис. 4.2 видно, что

$$U_{КЭ} = U_{БЭ} + U_{КБ}. \quad (4.25)$$

В граничном режиме, т.е. при $I_Б = I_{Бгр}$, $U_{КБ} = 0$. Поэтому, непосредственно из (4.25), имеем

$$U_{КЭгр} = U_{БЭгр}. \quad (4.26)$$

Очевидно, что $U_{КЭгр} > U_{Э0}$, см. рис. 4.4, и у германиевых и кремниевых БТ (табл. 1.1) находится в пределах

$$(0,5 - 0,6) \text{ В} < U_{КЭгр} < 1 \text{ В}. \quad (4.27)$$

Согласно второму закону Кирхгофа, падение напряжения на БТ в схеме транзистора ключа

$$U_{КЭ} = E_К - I_К R_К, \quad (4.28)$$

а с учетом выражения (4.14)

$$U_{кэ} = E_k - \beta I_b R_k, \quad (4.29)$$

откуда видно, что с ростом I_b напряжение коллектор-эмиттер уменьшается. При $I_b = I_{бгр}$ это напряжение снижается до значения $U_{кэгр}$, составляющего, согласно (4.27), несколько десятых долей вольта и пренебрежимо малого по сравнению с напряжением источника E_k . Положив в (4.28) $I_k = I_{кгр}$ и $U_{кэ} = U_{кэгр}$, получим выражение граничного тока коллектора, которое с учетом (4.26) принимает вид

$$I_{кгр} = \frac{E_k - U_{бэгр}}{R_k} \approx \frac{E_k}{R_k}. \quad (4.30)$$

Положив в (4.29) $I_b = I_{бгр}$ и $U_{кэ} = U_{кэгр} = U_{бэгр}$, граничный ток базы определим в виде

$$I_{бгр} = \frac{E_k - U_{бэгр}}{\beta R_k} \approx \frac{E_k}{\beta R_k}. \quad (4.31)$$

В качестве примера рассмотрим транзисторный ключ на рис. 4.10, у которого $E_k=100В$ и $R_k=100Ом$, и определим в каком режиме находится транзистор с $\beta=100$ при $I_b=5мА$. Согласно выражению (4.31),

$$I_{бгр} = \frac{E_k}{\beta R_k} = \frac{100}{100 \cdot 100} = 10 \text{ мА}.$$

Так как $I_b < I_{бгр}$, то транзистор находится в активном режиме. При этом, как следует из (4.14) и (4.28), $I_k=0.5А$ и $U_{кэ}=50В$.

Передаточные характеристики $I_k = f(U_{бэ})$ и $U_{кэ} = f(U_{бэ})$ приведены на рис.4.12. Видно, что при изменении напряжения $U_{бэ}$ от нуля до

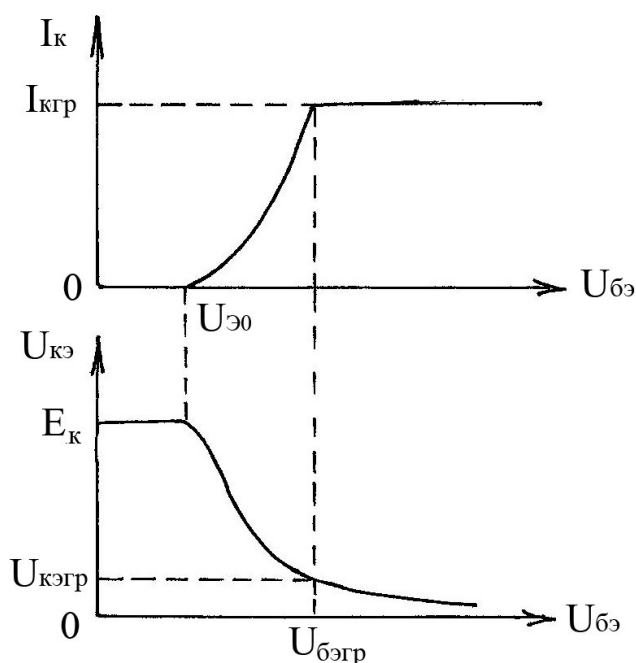


Рис. 4.12. Передаточные характеристики транзисторного ключа: зависимость тока коллектора от напряжения база-эмиттер (а), зависимость напряжения коллектор-эмиттер от напряжения база-эмиттер (б)

значения $U_{э0}$, где $U_{э0}$ – напряжение потенциального барьера эмиттерного n^+ -р-перехода, I_k близок к нулю и, согласно выражению (4.28), $U_{кэ} = E_k$ (БТ в режиме отсечки). Это обусловлено тем, что в указанном диапазоне напряжений $U_{бэ}$, близок к нулю ток базы БТ (рис. 4.6). При дальнейшем увеличении напряжения $U_{бэ}$, I_b начинает возрастать, что приводит к росту I_k и уменьшению $U_{кэ}$ (БТ в активном режиме). Указанные изменения I_k и $U_{кэ}$ продолжаются до тех пор, пока I_b не достигнет значения $I_{бгр}$, при превышении которого БТ переходит в режим насыщения. При I_b , существенно большем $I_{бгр}$, $U_{кэ}$ достигнет значения $0.1 \div 0.2$ В из-за уменьшения сопротивления n -коллектора БТ и, как следствие, падения напряжения на теле коллектора.

Порядок выполнения работы

1. Коэффициент усиления по току БТ в схеме с ОЭ

1.1. Открыть файл C10_001 со схемой ИУ, показанной на рис. 4.13. Из

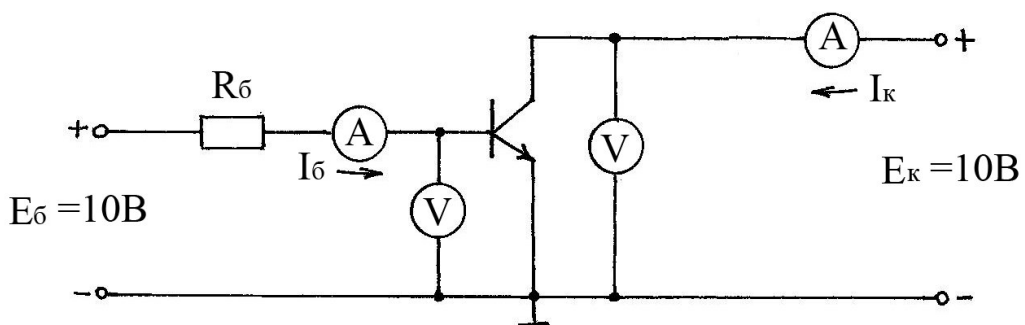


Рис. 4.13. Схема измерительной установки для определения статических параметров и характеристик биполярных транзисторов

схемы ИУ видно, что объектом исследований является БТ n^+ -р- n -типа. В этой схеме значения тока базы задаются изменением номинала резистора R_b в цепи базы БТ и измеряются амперметром, включенным в эту цепь. Ток коллектора измеряется амперметром в цепи коллектора БТ. Вольтметрами измеряются напряжения $U_{бэ}$ и $U_{кэ}$. Так как амперметры обладают практически нулевыми сопротивлениями, то в этой схеме $U_{кэ} = E_k = 10$ В и при наличии тока базы транзистор может находиться только в активном режиме.

1.2. Включить ИУ. Устанавливая значения R_b в соответствии с данными таблицы 4.2, для каждого значения R_b снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу. По данным таблицы 4.2 построить график зависимости β от I_k в диапазоне токов коллектора от 1 до 60 мА.

Таблица 4.2. Экспериментальные данные для определения статических параметров и характеристик биполярного транзистора

R_b , кОм	$U_{кэ}$, В	$U_{бэ}$, В	I_b , мА	I_k , мА	$\beta = I_k / I_b$
1000					
500					
400					
300					
250					
200					
150					
125					
100					
50					
40					
30					
20					
10					
2					
1					

На этом графике выделить область токов I_k , в которой β изменяется не более чем на 5% от своего максимального значения.

2. Входные характеристики БТ в схеме с ОЭ

2.1. В схеме ИУ файла C10_001 установить $E_k = 0$ В. Изменяя значения R_b в соответствии с данными таблицы 4.3, для каждого значения R_b снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 4.3. Экспериментальные данные для определения входных характеристик биполярного транзистора

R_b , кОм	I_b , мА	$U_{бэ}$, В
50		
5		
2		
1		

По данным таблиц 4.2 и 4.3 построить графики зависимостей I_b от $U_{бэ}$ при $U_{кэ} = 10$ В и при $U_{кэ} = 0$ В (входные характеристики БТ).

2.2. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

2.3. Открыть файл C10_003 со схемой ИУ, показанной на рис. 4.14 и позволяющей получить входные характеристики БТ посредством осциллографа. Здесь ветвь, содержащая последовательно

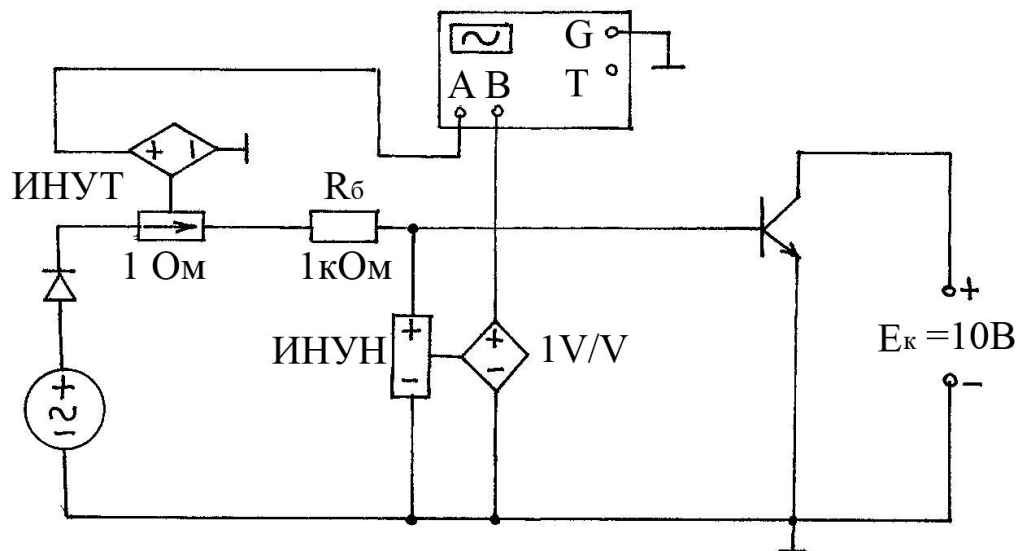


Рис. 4.14. Схема измерительной установки для определения входных характеристик биполярных транзисторов осциллографическим методом

соединенные вспомогательный источник и полупроводниковый диод, формирует положительные полуволны синусоидального напряжения, которые посредством резистора 1 кОм задают ток базы через испытуемый БТ. Объектом исследований является тот же БТ, что и в п.п.1 и 2.1. На канал А осциллографа через ИНУТ подается напряжение, пропорциональное току базы БТ, а на канал В посредством ИНУН – напряжение база-эмиттер БТ. В результате, на экране осциллографа отображается входная характеристика испытуемого транзистора.

2.4. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать входную характеристику БТ, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры входной характеристики (I_b и $U_{бэ}$) и сравнить ее с построенной в п. 2.1 при $U_{кэ} = 10$ В.

2.5. Повторить п. 2.4, предварительно установив в схеме $E_k = 0$ В, т.е. при $U_{кэ} = 0$ В.

2.6. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

3. Передачные характеристики БТ в схеме с ОЭ

3.1. По данным таблицы 4.2 построить график зависимости I_k от $U_{бэ}$ при $U_{кэ} = 10$ В (передаточную характеристику БТ).

3.2. Открыть файл C10_004 со схемой ИУ, показанной на рис. 4.15 и позволяющей получить передаточные характеристики БТ посредством осциллографа. Здесь на канал А осциллографа поступает напряжение $U_{бэ}$, а на канал В через ИНУТ – напряжение, пропорциональное току коллектора.

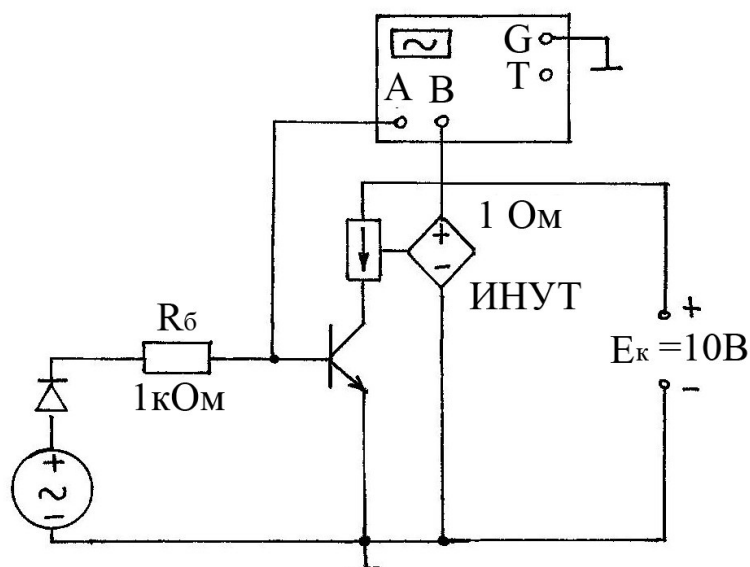


Рис. 4.15. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик биполярных транзисторов осциллографическим методом

3.3. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать передаточную характеристику БТ, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры передаточной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 3.1.

3.4. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

4. Выходные характеристики БТ в схеме с ОЭ

4.1. Открыть файл C10_001 со схемой ИУ на рис. 4.13.

4.2. Включить ИУ. Устанавливая значения E_k в соответствии с данными таблицы 4.4, для каждого значения E_k снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 4.4. Экспериментальные данные для определения выходных характеристик биполярных транзисторов

$R_b = 100 \text{ кОм}$ ($I_b = 0,1 \text{ мА}$)	$E_k = U_{кэ}, \text{ В}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	1	2	5
	$I_k, \text{ мА}$									

4.3. Повторить п. 4.2, предварительно установив $R_b = 50 \text{ кОм}$ ($I_b = 0,2 \text{ мА}$).

4.4. Повторить п. 4.2, предварительно установив $R_b = 25 \text{ кОм}$ ($I_b = 0,4 \text{ мА}$).

4.5. По данным таблиц 4.4. в п.п. 4.2 - 4.4 построить графики семейства выходных характеристик БТ: $I_k = f(U_{кэ})$ при $I_b = \text{const}$.

4.6. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

4.7. Открыть файл C10_002 со схемой ИУ, показанной на рис 4.16 и позволяющей получить выходные характеристики БТ посредством осциллографа. Здесь на канал А осциллографа посредством ИНУТ

подается напряжение, пропорциональное току коллектора, а на канал В, непосредственно с коллектора испытуемого транзистора, поступает напряжение $U_{кэ}$. В результате, на экране осциллографа отображается выходная характеристика БТ.

4.8. Установить в этой схеме $R_б = 100 \text{ кОм}$ ($I_б = 0.1 \text{ мА}$). Включить ИУ и осциллограф, зарисовать выходную характеристику БТ, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры выходной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 4.5 при $I_б = 0.1 \text{ мА}$.

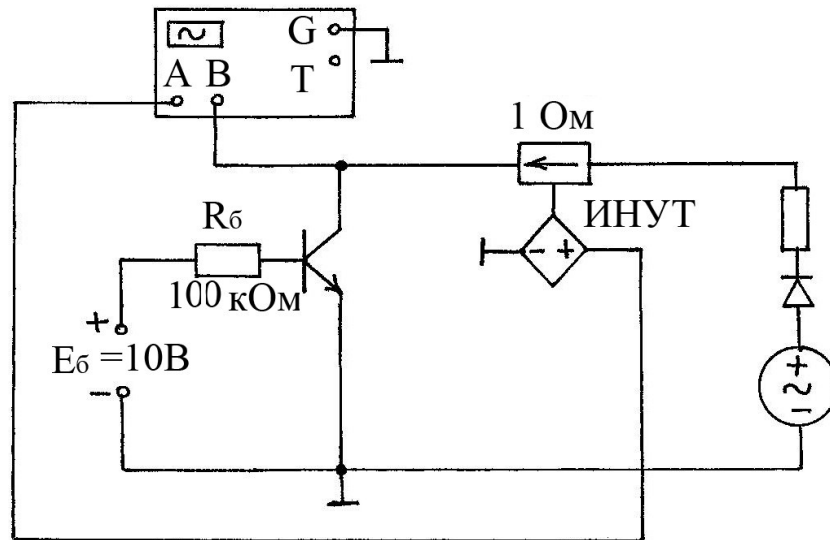


Рис. 4.16. Схема измерительной установки для определения выходных характеристик биполярных транзисторов осциллографическим методом

4.9. Повторить п. 4.8, но при $R_б = 50 \text{ кОм}$ ($I_б = 0.2 \text{ мА}$).

4.10. Повторить п. 4.8, но при $R_б = 25 \text{ кОм}$ ($I_б = 0.4 \text{ мА}$).

4.11. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

5. Передаточные характеристики транзисторного ключа

5.1. Открыть файл C10_005 со схемой ИУ, показанной на рис. 4.17.

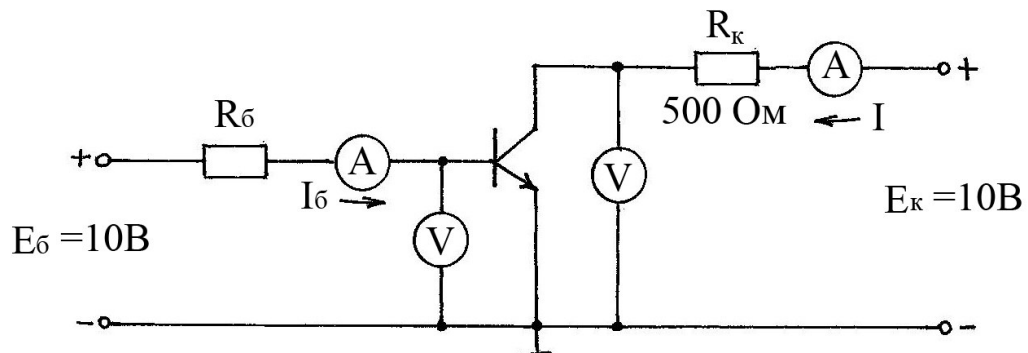


Рис. 4.17. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик транзисторного ключа

Назначение амперметров и вольтметров в этой схеме то же, что и в ИУ, показанной на рис. 4.13.

5.2. Включить ИУ. Устанавливая значения R_6 в соответствии с данными таблицы 4.5, для каждого значения R_6 снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 4.5. Экспериментальные данные для определения передаточных характеристик транзисторного ключа

R_6 , кОм	1000	500	200	100	80	75	50	25	2
I_6 , мА									
I_k , мА									
$U_{6э}$, В									
$U_{6э}$, В									

5.3. По данным таблицы 4.5 построить передаточные характеристики транзисторного ключа, аналогичные показанным на рис. 4.11 и 4.12.

5.4. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

5.5. Открыть файл C9_063 со схемой ИУ, показанной на рис. 4.18 и позволяющей получить передаточные характеристики транзисторного ключа посредством осциллографов.

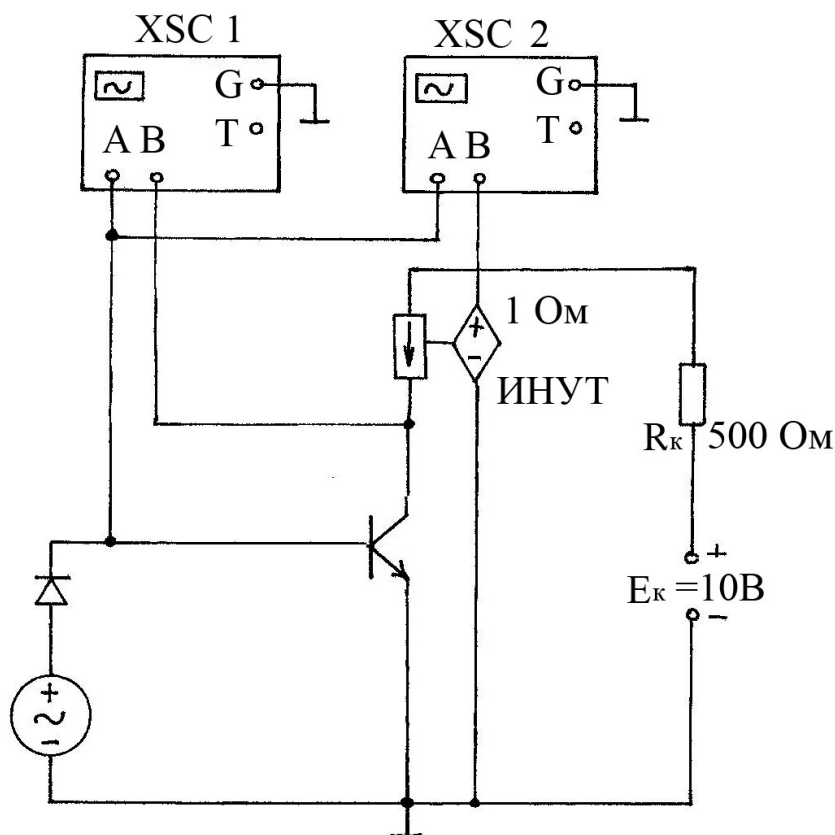


Рис. 4.18. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик транзисторного ключа на основе БТ осциллографическим методом

Здесь на каналы А осциллографов подается напряжение $U_{бэ}$, на канал В XSC1 – напряжение $U_{кэ}$, а на канал В XSC2 через ИНУТ – напряжение, пропорциональное току коллектора. В результате, на экране осциллографа XSC1 отображается передаточная характеристика $U_{кэ} = f(U_{бэ})$, а на экране XSC2 – передаточная характеристика $I_k = f(U_{бэ})$. Включить ИУ и осциллографы, зарисовать передаточные характеристики транзисторного ключа, посредством осциллографов измерить параметры передаточных характеристик и сравнить их с построенными в п. 5.3.

6. Выйти из программы Multisim 2001, выключить компьютер и монитор.

Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.
2. Результаты экспериментов в виде таблиц и построенных по их данным графиков статических характеристик биполярных транзисторов и передаточных характеристик транзисторного ключа.
3. Графики статических характеристик БТ (входных, передаточных и выходных), полученных осциллографическим методом.
4. Словесная сравнительная оценка результатов измерений методом амперметра и вольтметра и осциллографическим методом.
5. Числовые значения основных параметров биполярных транзисторов (β , α и $U_{эо}$), а также малосигнальных параметров БТ.
6. Числовые значения основных параметров транзисторного ключа ($I_{бгр}$, $U_{бэгр}$, $I_{к гр}$, $U_{кэгр}$ и $U_{эо}$).
7. Выводы.

Лабораторная работа №5

Статические характеристики полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом

Цель работы: экспериментальное определение основных статических параметров и характеристик полевых транзисторов (ПТ) и исследование их работы в схеме транзисторного ключа.

Основные положения. ПТ – это полупроводниковый прибор, сопротивление которого регулируется электрическим полем (напряжением). ПТ имеет проводящий канал, по которому протекает электрический ток, и три вывода, посредством которых он может быть подсоединен к внешней электрической цепи (затвор, исток, сток). Сопротивление канала и, как следствие, ток, протекающий через ПТ, регулируются изменением напряжения между затвором и истоком прибора. По практическому назначению выводов ПТ, можно провести следующую аналогию с назначением выводов биполярных транзисторов: затвор – база, исток – эмиттер, сток – коллектор. Однако, в отличие от БТ, в ПТ отсутствует инжекция неосновных носителей, ток в проводящем канале обусловлен носителями только одного знака и поэтому ПТ относят к классу униполярных полупроводниковых приборов. ПТ имеют существенно большие входные сопротивления, нежели БТ, что облегчает их сопряжение со

стандартными СВЧ-устройствами. При больших токах, ПТ имеют отрицательный температурный коэффициент, т.е. ток в этих приборах уменьшается с ростом температуры. Благодаря этому в ПТ реализуется более однородное распределение температуры по площади прибора и снижается вероятность развития теплового и вторичного пробоя, характерного для БТ. Поскольку ПТ являются униполярными приборами, они не чувствительны к эффектам накопления неосновных носителей, благодаря чему имеют более высокие граничные частоты и скорости переключения. ПТ широко применяются в аналоговых переключателях, усилителях с высокоомным входом, в СВЧ-усилителях и интегральных схемах.

Основное назначение ПТ – усиление входного сигнала как по напряжению, так и по току, и, как следствие, по мощности.

Классификация ПТ приведена на рис. 5.1.

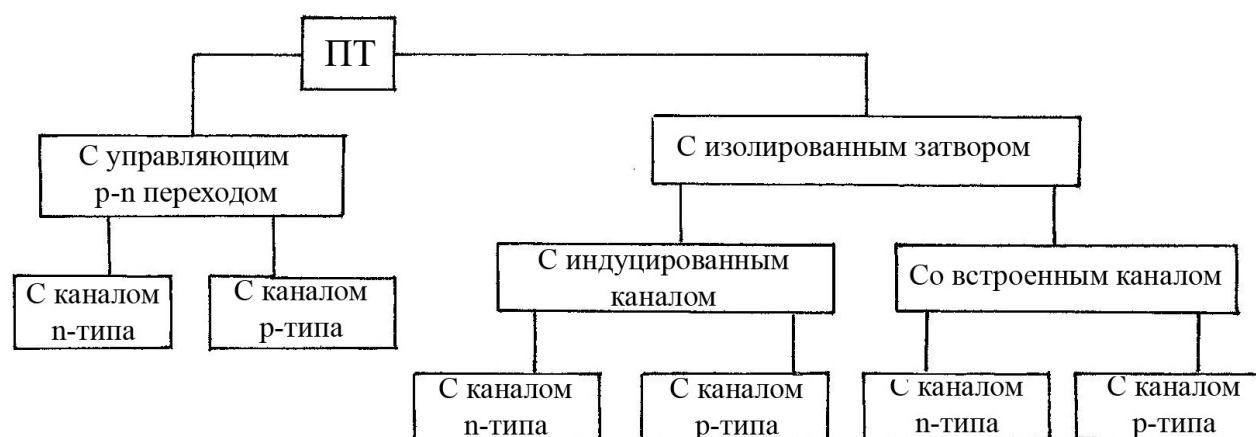


Рис. 5.1. Классификация полевых транзисторов

Условные обозначения и структурные схемы полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом (ПТУП) показаны на рис. 5.2, где З – затвор, И – исток, С – сток, $U_{зи}$ – напряжение затвор-исток, $U_{си}$ – напряжение сток-исток; знаками «+» и «-» показано, какой полярности относительно истока должны быть внешние напряжения, приложенные к затвору и стоку ПТ. В схеме на рис. 5.2,а р-подложка – полупроводниковый материал, на основе которого изготовлен ПТ; n-проводящий канал, который со стороны истока и стока легирован несколько выше (n^+ -слои); p^+-n – управляющий р-п-переход. Аналогично, в схеме на рис. 5.2,б n-подложка, р – проводящий канал с дополнительными p^+ -слоями, n^+-p – управляющий р-п-переход. В ряде ПТУП от подложки делают вывод, который может быть использован как дополнительный затвор. Подавая, например, на этот вывод некоторое постоянное напряжение той же полярности, что и на основной затвор, устанавливают начальную толщину проводящего канала. В ПТУП затвор отделен в электрическом отношении от канала управляющим р-п-переходом.

Все ПТУП относятся к разряду нормально открытых ПТ, у которых проводящий канал и, следовательно, ток в канале, близкий к максимально возможному, существуют при нулевом напряжении на затворе ($U_{зи} = 0$). Эти ПТ называют приборами обедненного типа, так

как при подаче напряжения на затвор канал обедняется носителями электрического тока и ток в канале уменьшается.

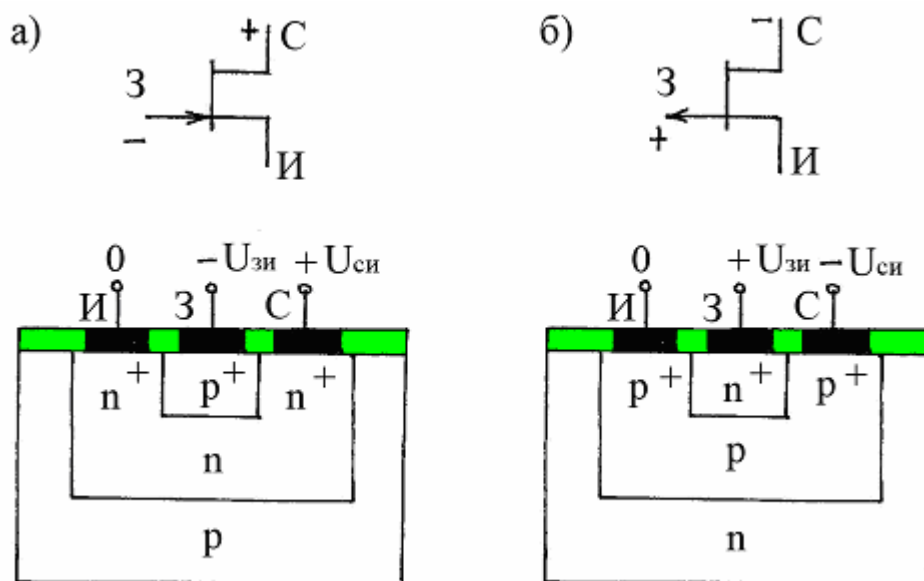


Рис. 5.2. Условные обозначения и структурные схемы полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом: а – с каналом n-типа, б – с каналом р-типа; ■ - SiO₂

Подобно биполярным транзисторам, ПТ можно включать по одной из трех основных схем:

- 1) с общим истоком (ОИ),
- 2) с общим затвором (ОЗ),
- 3) с общим стоком (ОС).

Ниже, для конкретности, рассмотрим принцип действия, параметры и статические характеристики ПТУП с каналом n-типа при работе ПТ в схеме с ОИ. Для этого обратимся к схеме на рис. 5.3, где I_c – ток стока, l – длина проводящего канала, d – толщина проводящего канала при $U_{зи} = 0$, ω – толщина проводящего канала при $U_{зи} < 0$. На этом рисунке не показаны n^+ -слои канала (см. рис. 5.2,а), так как они не оказывают заметного влияния на работу ПТУП. Из рис. 5.3 видно, что ПТУП, в сущности, представляет собой полупроводниковый резистор, сопротивление которого – сопротивление проводящего канала

$$R_{си} = \rho_{си} \frac{l}{S} \quad (5.1)$$

где $\rho_{си}$ – удельное сопротивление материала n-типа, l и S – длина и площадь проводящего канала. Поэтому ток стока

$$I_c = \frac{U_{си}}{R_{си}} \quad (5.2)$$

Заштрихованная область на рис. 5.3 – ОПЗ. Ее толщина регулируется

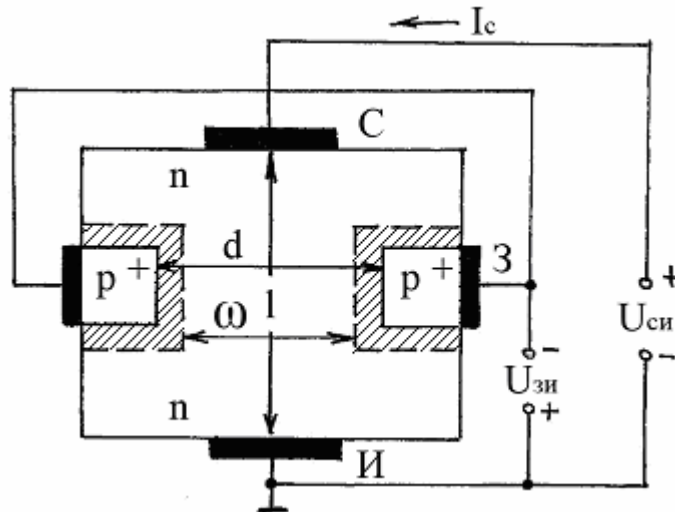


Рис. 5.3. Схема, поясняющая принцип работы полевого транзистора с управляющим р-n-переходом

напряжением $U_{зи}$ и определяет ω , S , $R_{си}$ и, в конечном итоге, ток стока прибора.

В отсутствие напряжения $U_{зи}$, т.е. при $U_{зи} = 0$, толщина ОПЗ минимальна, $\omega \approx d$, $R_{си}$ минимально и ток стока ПТУП близок к максимальному. При подаче напряжения $U_{зи}$ минусом на затвор и плюсом на исток, как это показано на рис. 5.3, образуется наведенная этим напряжением ОПЗ, уменьшающая толщину проводящего канала

$$\omega = d - 2(|U_{зи}|/a)^{1/2} \quad (5.3)$$

где $a \sim Nd$ – постоянная материала n-типа проводящего канала, N_d – концентрация легирующей примеси в этом материале. Из выражений (5.3), (5.1) и (5.2) видно, с ростом отрицательных значений $U_{зи}$ уменьшается толщина и, следовательно, площадь проводящего канала, возрастает его сопротивление и уменьшается ток стока ПТУП. При некотором напряжении $U_{зи}$, называемом напряжением отсечки, толщина проводящего канала и его площадь становятся равными нулю, сопротивление канала – бесконечно большим и $I_c = 0$. Положив в (5.3) $\omega = 0$, напряжение отсечки определим в виде

$$|U_{зиотс}| = \frac{d^2 a}{4} \quad (5.4)$$

Это напряжение пропорционально N_d в канале и сильно (по квадратичному закону) зависит от начальной толщины канала d . Таким образом, при изменении $U_{зи}$ от $U_{зиотс}$ до нуля, ток стока в этом ПТУП возрастает от нуля до значения, близкого к максимально возможному. Если в схеме на рис. 5.3 изменить полярность напряжения $U_{зи}$ на противоположную и увеличивать это напряжение от нуля до некоторых положительных значений, то ток стока продолжит возрастать, достигнет максимального значения, после чего перестанет зависеть от $U_{зи}$. Это связано с тем, что при $U_{зи} = 0$ толщина ОПЗ не равна нулю, так как обусловлена «встроенным потенциалом» U_0

управляющего p^+-n -перехода (см. рис. 1.5). При $U_{зи} \geq 0$ толщина ОПЗ станет равной нулю, p^+-n -переход сместится в прямом направлении, резко возрастет ток в цепи затвор-исток ПТУП, а ток стока перестанет зависеть от $U_{зи}$. Этот режим работы ПТУП, при котором управляющий p^+-n -переход смещен в прямом направлении, недопустим, так как приводит к резкому уменьшению коэффициента усиления по мощности прибора.

К основным статическим характеристикам ПТ относятся передаточные и выходные.

Передаточная характеристика – зависимость тока от напряжения затвор-исток при неизменном напряжении сток-исток:

$$I_c = f(U_{зи}) \text{ при } U_{си} = \text{const} \quad (5.5)$$

Эта характеристика ПТУП приведена на рис.5.4. Физические процессы

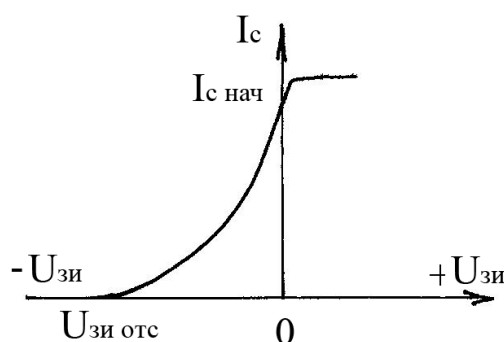


Рис. 5.4. Передаточная характеристика n-канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

в n-канальном ПТУП, определяющие его передаточную характеристику, рассмотрены выше при анализе принципа действия прибора. Передаточная характеристика ПТУП хорошо аппроксимируется выражением

$$I_c = I_{c \text{ нач}} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зиотс}}\right)^2 \quad (5.6)$$

в интервале напряжений на затворе от $U_{зи \text{ отс}}$ до 0, где $I_{c \text{ нач}}$ – значение тока стока при $U_{зи} = 0$ (начальный ток стока).

Крутизна передаточной характеристики

$$S = \left| \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right| \text{ при } U_{си} = \text{const} \quad (5.7)$$

определяет усилительные свойства ПТ при его работе в режиме малого сигнала и может быть определена по этой характеристике. Крутизна показывает, насколько эффективно управляющее действие затвора и составляет несколько миллиампер на вольт. Так, например, $S = 3 \text{ мА/В}$ означает, что изменение напряжения затвор-исток на 1В вызывает изменение тока стока на 3 мА.

Выходная характеристика – зависимость тока стока от напряжения сток-исток при неизменном напряжении затвор-исток:

$$I_c = f(U_{си}) \text{ при } U_{зи} = \text{const} \quad (5.8)$$

Семейство выходных характеристик n-канального ПТУП приведено на рис. 5.5. Видно, что на любой из выходных характеристик семейства можно выделить три области:

1) начальную (крутую), где I_c сублинейно растет при увеличении $U_{си}$ от нуля до нескольких единиц вольт;

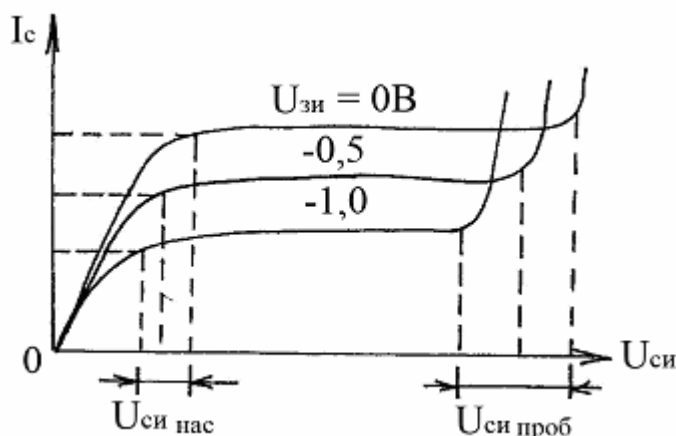


Рис. 5.5. Выходные характеристики n-канального полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

2) пологую, где I_c практически не зависит от $U_{си}$ (слабо возрастает);

3) пробоя, где I_c резко возрастает даже при незначительном приращении $U_{си}$.

В первой области, по мере увеличения I_c с ростом $U_{си}$, усиливается неэквивалентность проводящего канала, что приводит к расширению ОПЗ управляющего p⁺-n-перехода преимущественно со стороны стока ПТУП (рис. 5.6). При этом толщина и площадь канала в этой части прибора уменьшаются, а его сопротивление возрастает. В результате, I_c замедленно (сублинейно) растет по отношению к росту $U_{си}$. При $U_{си} = U_{си \text{ нас}}$, называемом напряжением насыщения тока стока, происходит перекрытие проводящего канала со стороны стока областью пространственного заряда и I_c достигает своего практически максимального значения при заданном значении $U_{зи}$. Из рис. 5.5 видно, что чем больше отрицательное напряжение на затворе, тем при меньших значениях $U_{си \text{ нас}}$ наступает насыщение тока стока. Это связано с начальной толщиной и площадью проводящего канала, которые с ростом $U_{зи}$ уменьшаются. Как следствие, перекрытие канала со стороны стока и насыщение I_c происходит при меньших значениях $U_{си \text{ нас}}$.

Во второй области, по мере увеличения $U_{си}$, растет длина перекрытой областью пространственного заряда части канала, что приводит к почти пропорциональному $U_{си}$ увеличению сопротивления $R_{си}$. При этом, согласно (5.2), ток стока сохраняется практически неизменным.

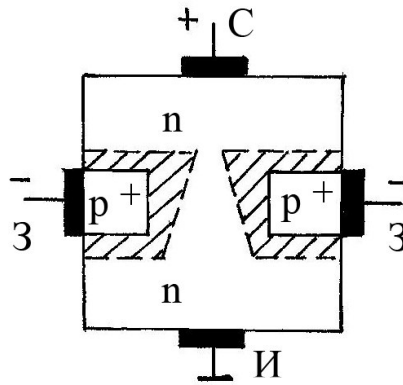


Рис. 5.6. Схема, поясняющая влияние неэквипотенциальности проводящего канала на толщину области пространственного заряда

В третьей области, I_c резко возрастает даже при незначительном приращении $U_{си}$ из-за пробоя управляющего p^+-n -перехода со стороны стока ПТУП. Это связано с тем, что обратное напряжение U_{p^+-n} , приложенное к p^+-n -переходу, изменяется вдоль длины канала, достигая максимального значения у стокового конца канала. Из рис. 5.3 видно, что при полностью перекрытом канале

$$U_{си} = U_{p^+-n} - U_{зи} \quad (5.9)$$

откуда обратное напряжение, приложенное к p^+-n -переходу у стокового конца канала

$$U_{p^+-n} = U_{си} + U_{зи} \quad (5.10)$$

Положив в (5.9) $U_{p^+-n} = U_{проб}$ и $U_{си} = U_{си\ проб}$, получим напряжение пробоя ПТУП в виде

$$U_{си\ проб} = U_{проб} - U_{зи} \quad (5.11)$$

где $U_{проб}$ — напряжение пробоя p^+-n -перехода. Из выражения (5.11) видно, что пробой ПТУП будет происходить при разных значениях напряжения на стоке в зависимости от значения напряжения на затворе. Чем больше напряжение на затворе, тем меньше напряжение на стоке, при котором произойдет пробой управляющего p^+-n -перехода.

По выходным характеристикам можно определить крутизну S , используя выражение (5.7), выходное сопротивление

$$R_{вых} = \frac{dU_{си}}{dI_c} \quad \text{при } U_{зи} = \text{const} \quad (5.12)$$

и коэффициент усиления по напряжению ПТУП

$$K_u = - \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} = - \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \cdot \frac{dI_c}{dI_c} = SR_{вых} \quad (5.13)$$

На пологих участках выходных характеристик $R_{\text{вых}}$ достигает сотен кОм, а K_u – сотен и даже тысяч. На начальных участках этих характеристик (при малых напряжениях $U_{\text{си}}$) значения параметров S , $R_{\text{вых}}$ и K_u существенно ниже.

К статическим характеристикам ПТ относится и входная характеристика – зависимость тока затвора I_3 от напряжения затвор-исток при неизменном напряжении сток-исток:

$$I_3 = f(U_{\text{зи}}) \text{ при } U_{\text{си}} = \text{const.} \quad (5.14)$$

Эта характеристика ПТУП показана на рис. 5.7.

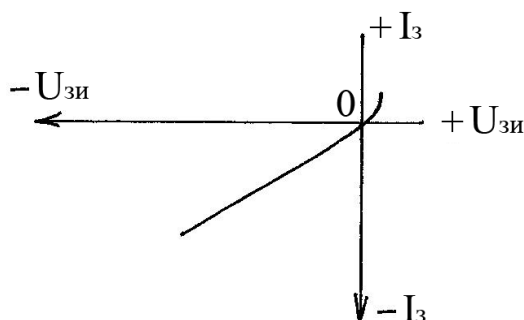


Рис. 5.7. Входная характеристика n-канального полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

По входной характеристике можно определить входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = \frac{dU_{\text{зи}}}{dI_3} \text{ при } U_{\text{си}} = \text{const} \quad (5.15)$$

Поскольку ток затвора мал, так как является током управляющего p^+ - n -перехода, смещенного в обратном направлении, то входное сопротивление достигает единиц и десятков МОм.

Рассмотрим теперь стационарные режимы работы транзисторного ключа, схема которого приведена на рис.5.8. Работу транзисторного

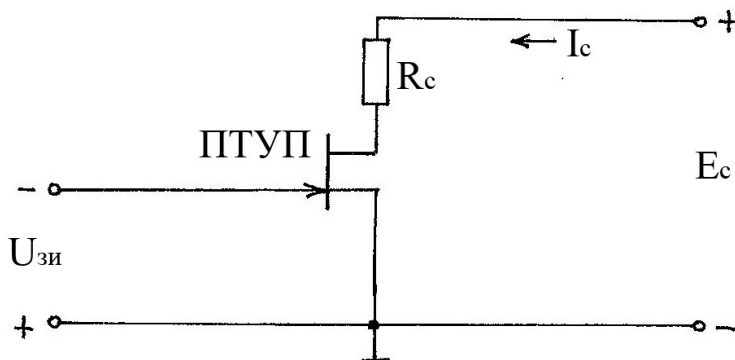


Рис. 5.8. Транзисторный ключ, где полевой транзистор включен по схеме с общим истоком

ключа в полном объеме отражают его передаточные характеристики:

- 1) зависимость тока стока от напряжения затвор-исток,
- 2) зависимость напряжения сток-исток от напряжения затвор-исток.

Эти характеристики показаны на рис. 5.9. Видно, что при уменьшении

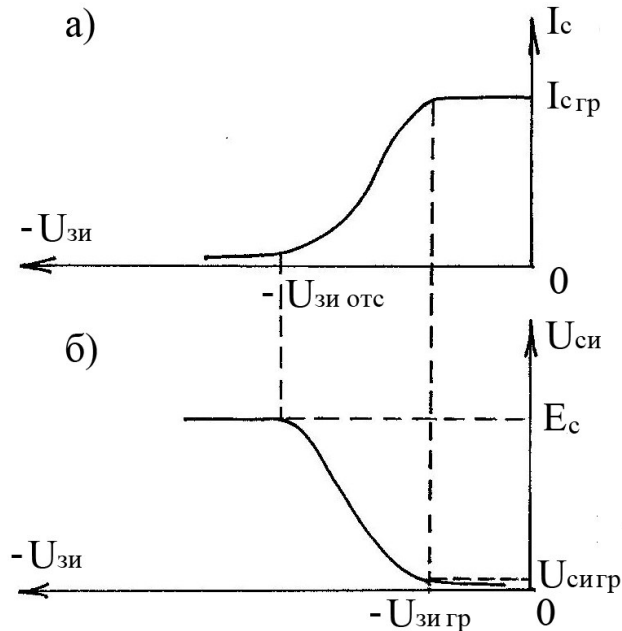


Рис. 5.9. Передаточные характеристики транзисторного ключа: зависимость тока стока от напряжения затвор-исток (а), зависимость напряжения сток-исток от напряжения затвор-исток (б)

отрицательного напряжения на затворе до значения напряжения отсечки, ток стока сохраняется неизменным и близким к нулю и, согласно выражению

$$U_{си} = E_c - I_c R_c \quad (5.16)$$

аналогичному (4.28), $U_{си} = E_c$ (ПТУП в режиме отсечки). Это обусловлено тем, что в указанном диапазоне напряжений $U_{зи}$, проводящий канал ПТУП полностью перекрыт и его сопротивление велико. При дальнейшем снижении $U_{зи}$, в ПТУП образуется проводящий канал, сопротивление которого уменьшается. Это приводит к росту тока стока и уменьшению напряжения сток-исток (активный режим). Указанные изменения I_c и $U_{си}$ продолжают до тех пор, пока напряжение затвор-исток не снизится до граничного значения ($-U_{зи\text{ гр}}$), после чего транзисторный ключ перейдет в режим насыщения тока стока из-за ограничения этого тока внешней электрической цепью на уровне

$$I_{с\text{ гр}} = \frac{E_c - U_{сигр}}{R_c} \approx \frac{E_c}{R_c} \quad (5.17)$$

где граничное напряжение сток-исток

$$U_{\text{сигр}} \approx |U_{\text{зигр}}| \quad (5.18)$$

а граничное напряжение затвор-исток

$$U_{\text{зигр}} = U_{\text{зиотс}} \left[1 - \left(\frac{E_c}{R_c I_{c \text{ нач}}} \right)^{1/2} \right] \quad (5.19)$$

Уравнение (5.19) следует из аппроксимации (5.6), если в (5.6) положить $I_c = I_{c \text{ гр}} \approx E_c / R_c$.

В качестве примера рассмотрим транзисторный ключ на рис. 5.8, у которого $E_c = 10 \text{ В}$ и $R_c = 2 \text{ кОм}$, и определим, в каком режиме находится транзистор с $U_{\text{зиотс}} = -3.5 \text{ В}$ и $I_{c \text{ нач}} = 7.5 \text{ мА}$ при $U_{\text{зи}} = -0.5 \text{ В}$. Согласно выражению (5.19),

$$U_{\text{зигр}} = -3.5 \left[1 - \left(\frac{10}{2 \cdot 10^3 \cdot 7.5 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/2} \right] = -0.7 \text{ В}$$

Так как $|U_{\text{зи}}| < |U_{\text{зигр}}|$, то транзистор находится в режиме насыщения тока стока. При этом, как следует из (5.17), ток стока ограничен на уровне

$$I_{c \text{ гр}} \approx \frac{E_c}{R_c} \approx 5 \text{ мА}$$

Порядок выполнения работы

1. Передаточная и входная характеристики n-канального ПТУП в схеме с ОИ

1.1. Открыть файл C10_006 со схемой ИУ, показанной на рис. 5.10.

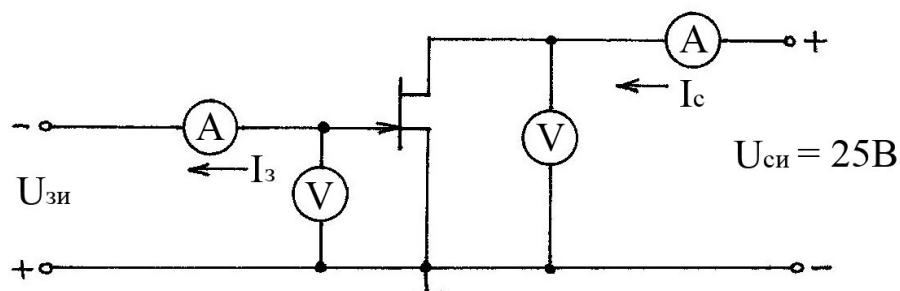


Рис. 5.10. Схема измерительной установки для определения передаточной и входной характеристик n-канальных полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом

Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{зи}$ в соответствии с данными таблицы 5.1, для каждого значения $U_{зи}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 5.1. Экспериментальные данные для определения передаточной и входной характеристик n-канальных полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом

$U_{зи}$, В	-4	-3,5	-3	-2	-1	-0,5	0	0,5	1	2
$U_{си}$, В	25									
I_z , мА										
I_c , мА										

По данным таблицы 5.1 построить зависимости $I_c = f(U_{зи})$ и $I_z = f(U_{зи})$ при $U_{си} = 25$ В.

1.2. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

1.3. Открыть файл C10_007 со схемой ИУ, показанной на рис. 5.11 и позволяющей получить передаточные характеристики ПТУП посредством осциллографа. Здесь на канал А осциллографа поступает напряжение $U_{зи}$, а на канал В через ИНУТ – напряжение пропорциональное тока стока.

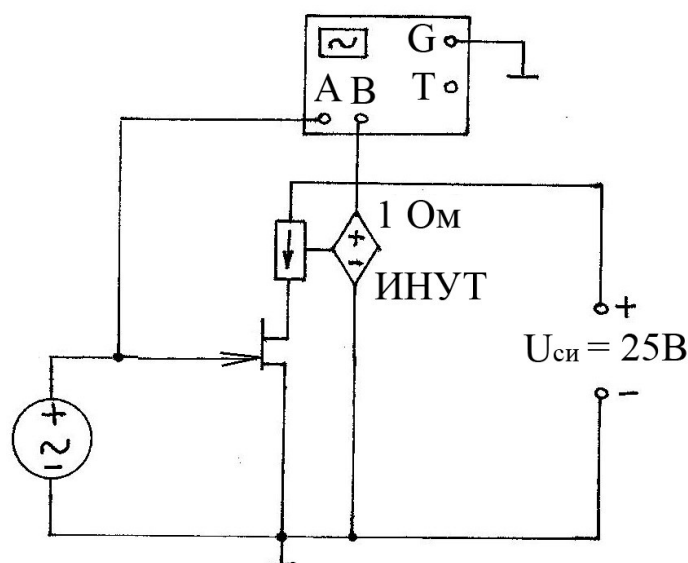


Рис. 5.11. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик n-канальных полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом осциллографическим методом

1.4. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать передаточную характеристику ПТУП, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры передаточной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 1.1.

1.5. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

2. Выходные характеристики n-канального ПТУП в схеме с ОИ

2.1. Открыть файл C10_006 со схемой ИУ на рис. 5.10.

2.2. Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{си}$ в соответствии с данными таблицы 5.2, для каждого значения $U_{си}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 5.2. Экспериментальные данные для определения выходных характеристик n-канальных полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом

$U_{зи} = 0 \text{ В}$	$U_{си}, \text{ В}$	0	0,5	1	2	3	5	10	25
	$I_c, \text{ мА}$								

2.3. Повторить п. 2.2, предварительно установив $U_{зи} = -0.5 \text{ В}$.

2.4. Повторить п. 2.2, предварительно установив $U_{зи} = -1 \text{ В}$.

2.5. По данным таблиц 5.2 в п.п. 2.2 - 2.4 построить графики семейства выходных характеристик ПТУП: $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$.

2.6. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

2.7. Открыть файл C10_008 со схемой ИУ, показанной на рис. 5.12 и

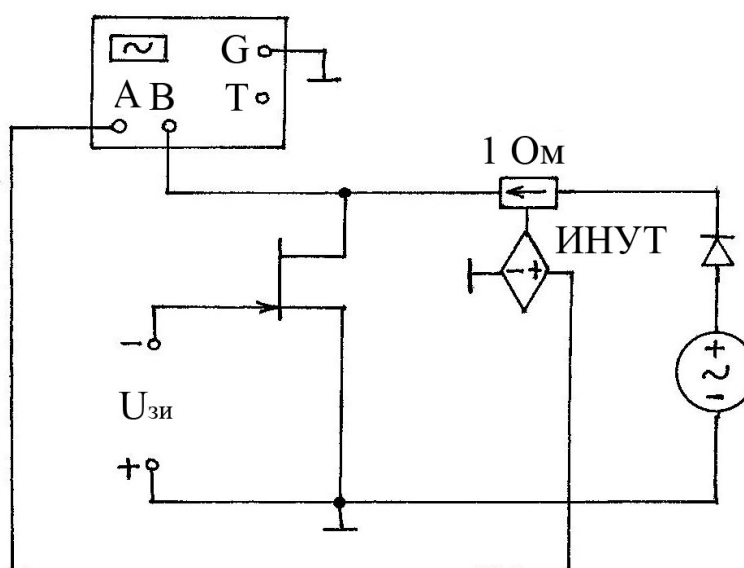


Рис. 5.12. Схема измерительной установки для определения выходных характеристик n-канальных полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом осциллографическим методом

позволяющей получить выходные характеристики ПТУП посредством осциллографа. Здесь на канал А осциллографа посредством ИНУТ подается напряжение, пропорциональное току стока, а на канал В – напряжение сток-исток.

2.8. Установить в этой схеме $U_{зи} = 0 \text{ В}$. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать выходную характеристику ПТУП, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры выходной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 2.5 при $U_{зи} = 0 \text{ В}$.

- 2.9. Повторить п. 2.8, но при $U_{зи} = -0.5 \text{ В}$.
 2.10. Повторить п. 2.8, но при $U_{зи} = -1 \text{ В}$.
 2.11. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

3. Передаточные характеристики транзисторного ключа на основе n-канального ПТУП

- 3.1. Открыть файл C10_009 со схемой ИУ, показанной на рис. 5.13.

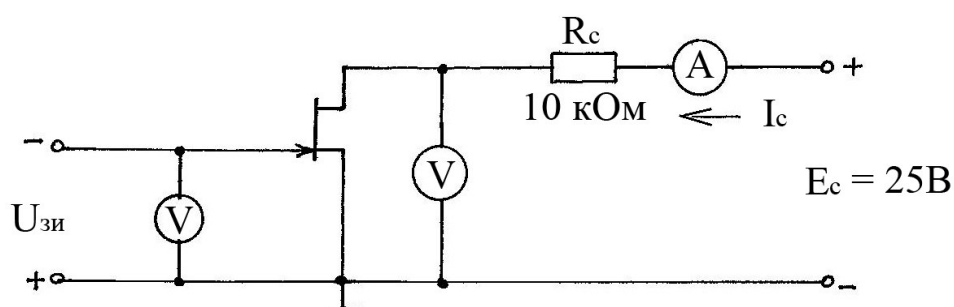


Рис. 5.13. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик транзисторного ключа на основе n-канального ПТУП

Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{зи}$ в соответствии с данными таблицы 5.3, для каждого значения $U_{зи}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 5.3. Экспериментальные данные для определения передаточных характеристик транзисторного ключа на основе n-канального ПТУП

$U_{зи}, \text{ В}$	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0
$I_c, \text{ мА}$									
$U_{си}, \text{ В}$									

- 3.2. По данным таблицы 5.3 построить передаточные характеристики транзисторного ключа, аналогичные показанным на рис.5.9.

3.3. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

3.4. Открыть файл C10_011 со схемой ИУ, показанной на рис.5.14 и позволяющей получить передаточные характеристики транзисторного ключа на основе n-канального ПТУП посредством осциллографов. Здесь на каналы А осциллографов подается напряжение $U_{зи}$, на канал В ХСC1 – напряжение $U_{си}$, а на канал В ХСC2 через ИНУТ – напряжение, пропорциональное току стока. В результате, на экране осциллографа ХСC1 отображается передаточная характеристика $U_{си} = f(U_{зи})$, а на экране ХСC2 – передаточная характеристика $I_c = f(U_{зи})$. Включить ИУ и осциллографы, зарисовать передаточные характеристики транзисторного ключа, посредством осциллографов измерить параметры передаточных характеристик и сравнить их с построенными в п. 3.2.

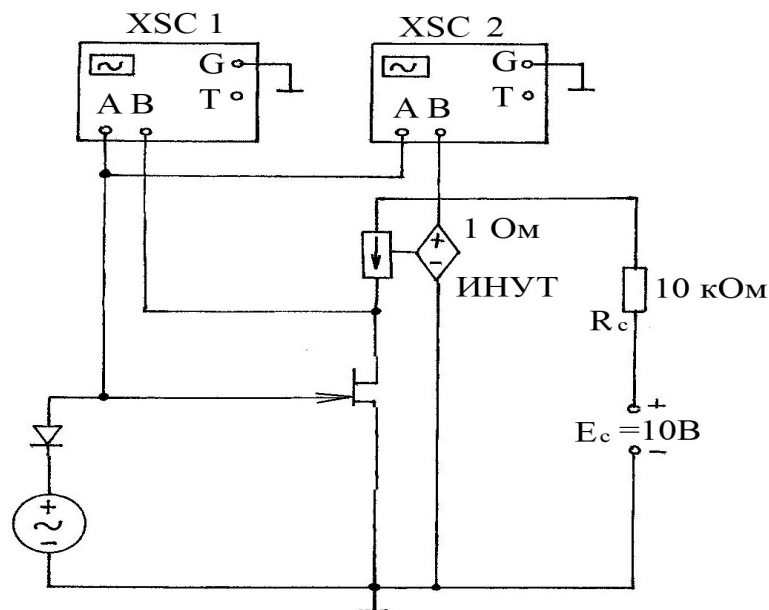


Рис. 5.14. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик транзисторного ключа на основе n-канального ПТУП осциллографическим методом

3.5. Выйти из программы Multisim 2001, выключить компьютер и монитор.

Содержание отчета

1. Схемы измерительных установок.
2. Результаты экспериментов в виде таблиц и построенных по их данным графиков статических характеристик исследованного полевого транзистора и передаточных характеристик транзисторного ключа.
3. Графики статических характеристик ПТУП (входных, передаточных и выходных), полученных осциллографическим методом.
4. Словесная сравнительная оценка результатов измерений методом амперметра и вольтметра и осциллографическим методом.
5. Числовые значения основных параметров [$U_{зи\text{ отс}}$, $I_{с\text{ нач}}$ при $U_{зи} = 0$, $R_{си} = f(I_{с})$ при $U_{зи} = 0$], а также малосигнальных параметров исследованного ПТУП (S , $R_{вых}$ при $U_{зи} = 0$, K_u , $R_{вх}$).
6. Числовые значения основных параметров транзисторного ключа ($U_{зи\text{ отс}}$, $U_{зи\text{ гр}}$, $I_{с\text{ гр}}$, $U_{си\text{ гр}}$).
7. Выводы.

Лабораторная работа №6

Статические характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором

Цель работы: изучение особенностей работы полевых транзисторов с изолированным затвором (ПТИЗ) и экспериментальное определение их основных статических параметров и характеристик, исследование работы ПТИЗ в схеме транзисторного ключа.

Основные положения. Классификация ПТИЗ, приведена на рис. 5.1, откуда видно, что эти ПТ подразделяются на два вида: со встроенным (собственным) каналом и с индуцированным (инверсным) каналом. У каждого из этих видов транзисторов проводящий канал может быть n- или p-типа. В ПТИЗ затвор отделен в электрическом отношении от канала тонким слоем диэлектрика (МДП-транзисторы) или окисла (МОП-транзисторы) и ток в канале, как и в ПТУП, регулируется электрическим полем (напряжением $U_{зи}$). ПТ с индуцированным каналом относятся к разряду нормально закрытых приборов, у которых при $U_{зи}=0$ проводящий канал и ток в канале отсутствуют. Эти ПТ называют приборами обогащенного типа, так как при подаче напряжения на затвор канал обогащается носителями электрического тока и ток в канале возрастает с ростом $U_{зи}$. ПТ со встроенным каналом могут работать в двух режимах: в режиме обеднения и в режиме обогащения проводящего канала носителями электрического тока.

Условные обозначения и структурные схемы ПТ со встроенным каналом показаны на рис. 6.1, где Si-p и Si-n – кремниевые подложки, n- и p- – встроенные каналы, n⁺- и p⁺- – области стоков и истоков,

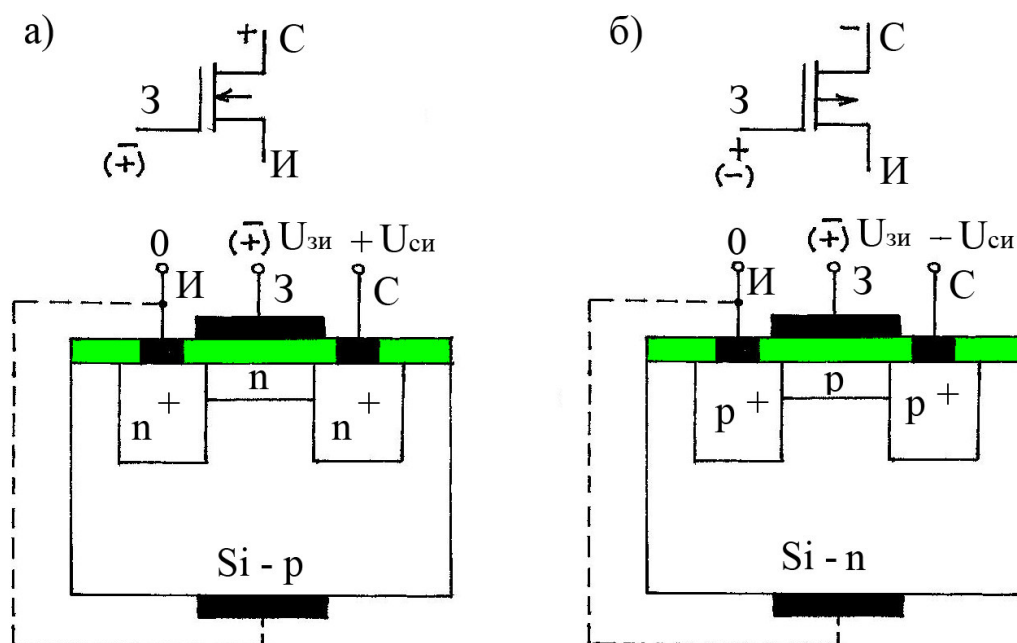


Рис. 6.1. Условные обозначения и структурные схемы полевых транзисторов с собственным каналом: а – с каналом n-типа, б – с каналом p-типа

области зеленого цвета – диэлектрик, области черного цвета – металлические контакты. У большинства из этих ПТИЗ подложка соединена с истоком, как это показано пунктиром на рис. 6.1. При этом потенциал подложки принимается за нулевой. На рис. 6.2 приведены условные графические изображения таких ПТ. Внутреннее соединение



Рис. 6.2. Условные обозначения полевых транзисторов с собственным каналом и внутренним соединением подложки и истока: а – n-канального, б – p-канального

или, при наличии вывода от подложки, внешнее соединение подложки и истока позволяет более эффективно управлять работой транзистора.

Принцип действия ПТ со встроенным каналом поясним, обратившись к схеме на рис. 6.3, где показан n-канальный ПТ с короткозамкнутыми подложкой и истоком, включенный по схеме с ОИ.

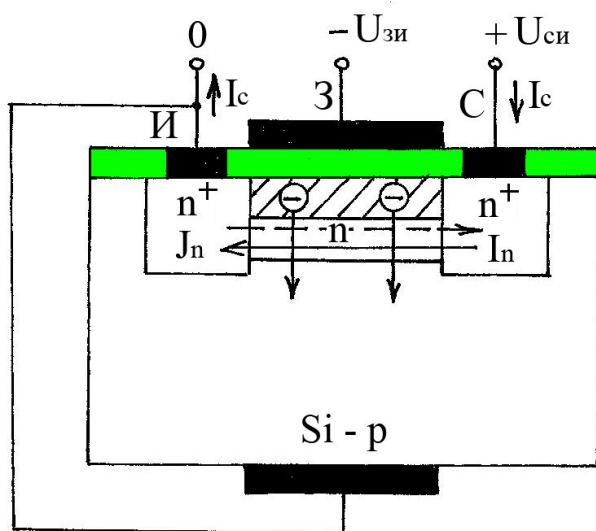


Рис. 6.3. Схема, поясняющая принцип работы полевого транзистора со встроенным каналом n-типа

Здесь J_n (пунктирная линия) – поток электронов от истока к стоку, $I_n = I_c$ (сплошная линия) – ток электронов от стока к истоку, заштрихованная область – ОПЗ в канале. В отсутствие напряжения на затворе, т.е. при $U_{зи} = 0$, и при $U_{си} > 0$ толщина ОПЗ минимальна, сопротивление канала относительно невелико и ток стока, протекающий по каналу, близок к значению $I_{c \text{ нач}}$. При подаче напряжения $U_{зи}$ минусом на затвор, как это показано на рис. 6.3, электроны, инжектированные в канал n^+ -истоком, оттесняются электрическим полем, созданным этим напряжением, от границы раздела диэлектрик-полупроводник вглубь канала и выталкиваются в подложку. Металлический контакт затвора не в состоянии компенсировать уход электронов из-за наличия диэлектрика. Одновременно с этим процессом, повышается потенциальный барьер истокового n^+ - n -перехода, что приводит к уменьшению числа электронов, поставляемых n^+ -истоком в канал (режим обеднения канала основными носителями). В результате, в канале, со стороны диэлектрика, образуется область, обедненная основными носителями электрического тока (ОПЗ), толщина которой

тем больше, чем больше отрицательное напряжение на затворе. Это приводит к уменьшению толщины проводящего канала и его площади, вследствие чего, сопротивление канала растет, а ток стока, согласно выражению (5.2), падает. При $U_{зи}=U_{зи\text{ отс}}$ канал полностью перекрыт и $I_c=0$. Если полярность напряжения $U_{зи}$ на затворе изменить на противоположную, как это показано на рис. 6.4, то толщина ОПЗ в канале близка к нулю, так как ОПЗ обратносмещенного n^+ - p -перехода смещается лишь в сторону высокоомной подложки. При этом с ростом

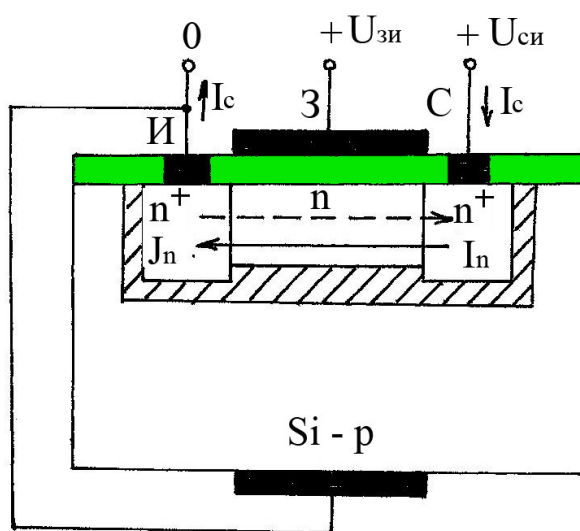


Рис. 6.4. Схема, поясняющая принцип работы полевого транзистора со встроенным каналом n-типа

положительных значений $U_{зи}$ понижается потенциальный барьер истокового n^+ - n -перехода, что приводит к увеличению числа электронов, поставляемых n^+ -исток в канал (режим обогащения канала основными носителями), уменьшению сопротивления канала и росту тока стока относительно $I_{c\text{ нач}}$.

Таким образом, в области отрицательных значений $U_{зи}$, ПТ со встроенным каналом n-типа работает точно так же, как и n-канальный ПТУП, а в области положительных значений — как прямосмещенный изотипный n^+ - n -переход. Этот вывод подтверждают статические характеристики транзистора, показанные на рис. 6.5. Видно, что в отличие от ПТУП (рис. 5.4), с ростом положительных значений $U_{зи}$ ток стока в ПТ со встроенным n-каналом не ограничивается на уровне, близком к значению $I_{c\text{ нач}}$, а продолжает возрастать. Этот факт отражен и в семействе выходных характеристик на рис. 6.5,б. Основные параметры ПТ со встроенным n-каналом идентичны параметрам ПТ с управляющим p^+ - n -переходом. В частности в области отрицательных напряжений $U_{зи}$ передаточная характеристика на рис.6.5а хорошо аппроксимируется выражением (5.6), а коэффициент усиления по напряжению можно рассчитать по формуле (5.13). Поэтому, в указанной области $U_{зи}$ аналогичной будет и работа этих ПТ в

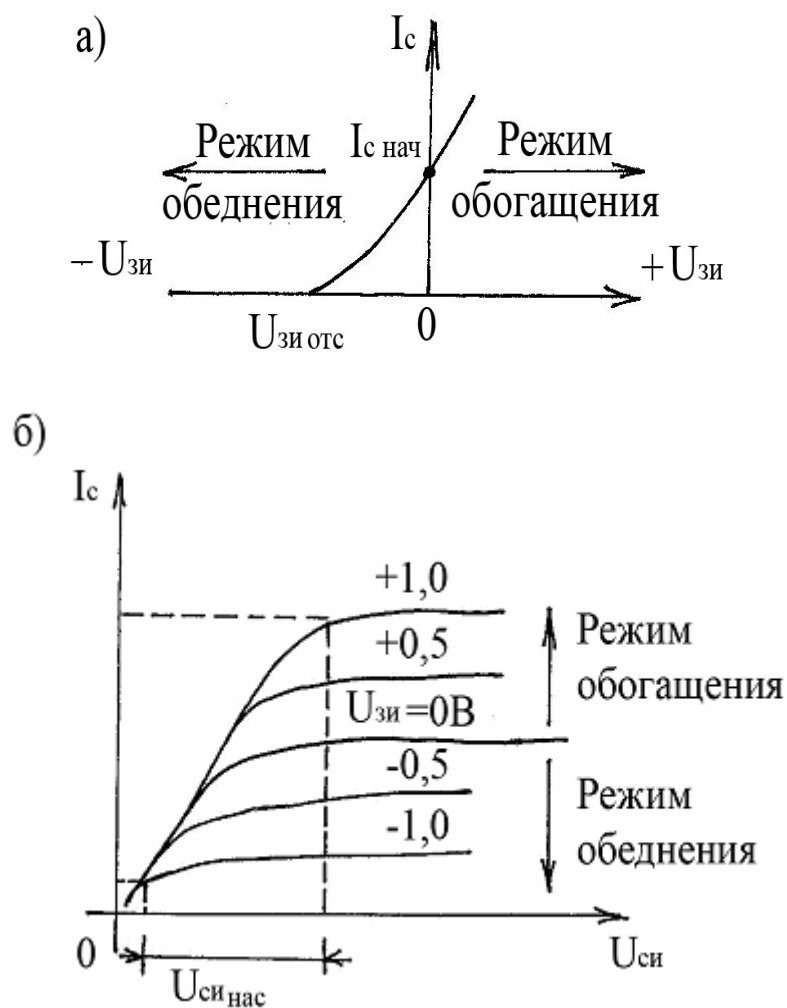


Рис. 6.5. Статические характеристики полевых транзисторов со встроенным каналом n-типа: а – передаточная, б – семейство выходных

электронных устройствах, например, в схеме транзисторного ключа.

Передаточные характеристики транзисторного ключа на основе ПТ со встроенным n-каналом имеют вид, подобный показанному на рис. 5.9, но насыщение тока стока в этом ключе реализуется в области положительных значений $U_{зи}$. Это связано с тем, что ПТ со встроенным каналом могут работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения канала основными носителями электрического тока.

Условные обозначения и структурные схемы ПТ с индуцированным каналом показаны на рис. 6.6, где все обозначения те же, что и на рис. 6.1. У большинства из этих ПТИЗ, как и у ПТ со встроенным каналом, подложка соединена с истоком и потенциал этого соединения принимается за нулевой. На рис. 6.7 приведены условные графические

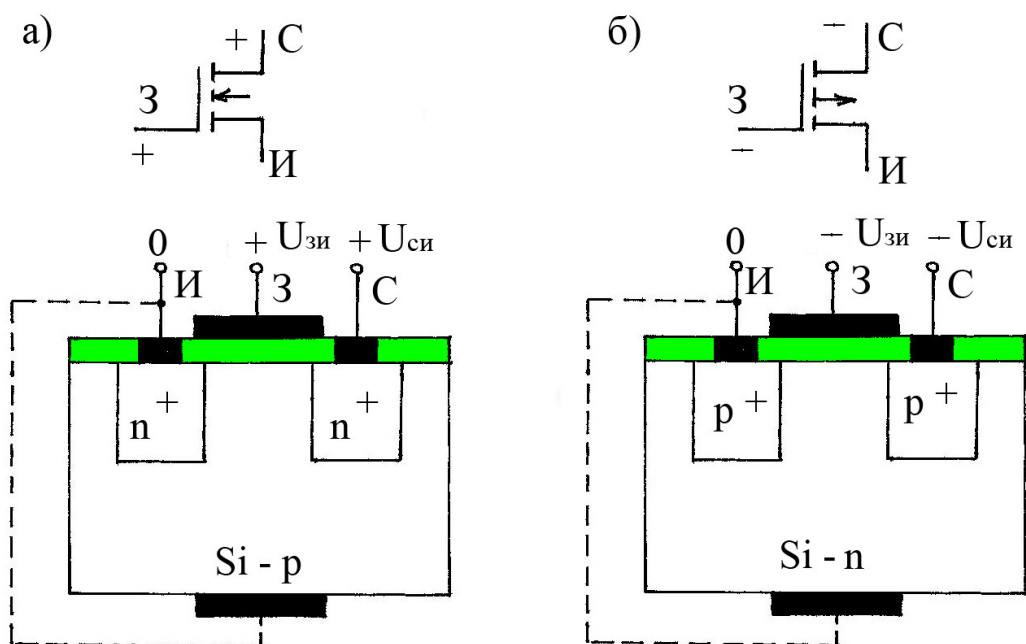


Рис. 6.6. Условные обозначения и структурные схемы полевых транзисторов с инверсным каналом: а – с каналом n-типа, б – с каналом p-типа

изображения таких ПТ.



Рис. 6.7. Условные обозначения полевых транзисторов с инверсным каналом и внутренним соединением подложки и истока: а – n-канальных, б – p-канальных

Принцип действия ПТ с индуцированным каналом поясним, обратившись к схеме на рис. 6.8, где показан n-канальный ПТ с короткозамкнутыми подложкой и истоком, включенный по схеме с ОИ.

В отсутствие напряжения на затворе, т.е. при $U_{зи}=0$, и при $U_{си}>0$ проводящего канала нет и ток стока ничтожно мал, так как представляет собой ток электронов обратносмещенного стокового n^+ -p-перехода. При подаче напряжения $U_{зи}$ плюсом на затвор, как это показано на рис. 6.8, дырки подложки оттесняются электрическим полем, созданным этим напряжением, от границы раздела диэлектрик-полупроводник вглубь подложки. Одновременно с этим процессом, понижается потенциальный барьер истокового n^+ -p-перехода, что приводит к росту числа электронов, поставляемых n^+ -истоком к границе раздела. Туда же поступают, хотя и в меньшем количестве, электроны из подложки. С ростом $U_{зи}$ концентрация электронов на границе раздела растет, главным образом, за счет понижения потенциального барьера истокового n^+ -p-перехода и увеличения потока электронов к границе из n^+ -истока. При некотором напряжении

$U_{зи}$, называемом пороговым и составляющем единицы вольт, концентрация электронов под затвором увеличится настолько, что

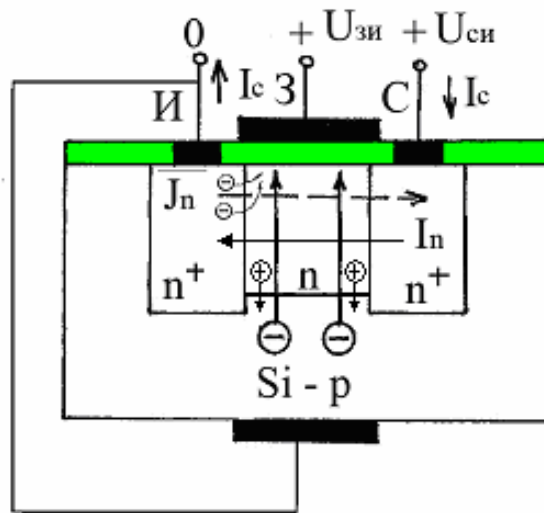


Рис. 6.8. Схема, поясняющая принцип работы полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа

превысит концентрацию дырок в этой области, где и произойдет так называемая инверсия типа электропроводности подложки, т.е. образование тонкого проводящего канала n-типа (индуцированный канал). Таким образом, при $U_{зи} = U_{зи\text{ пор}}$, где $U_{зи\text{ пор}}$ — пороговое напряжение, исходный $n^+ - p - n^+$ -транзистор преобразуется в $n^+ - n - n^+$ -структуру с изотипными $n^+ - n$ -переходами, подобную структуре ПТ со встроенным каналом n-типа (см. рис. 6.1,а). При дальнейшем увеличении $U_{зи}$, т.е. при $U_{зи} > U_{зи\text{ пор}}$, понижается потенциальный барьер уже изотипного истокового $n^+ - n$ -перехода, что приводит к существенному увеличению числа электронов, поставляемых n^+ -исток в канал (режим обогащения канала), уменьшению сопротивления канала за счет увеличения его толщины и площади и, согласно (5.2), к росту тока стока.

Качественное описание физических процессов в ПТ с индуцированным каналом адекватно отражает его передаточная характеристика, показанная на рис. 6.9,

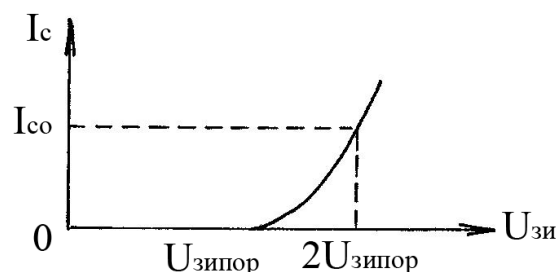


Рис. 6.9. Передаточная характеристика полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа

которая хорошо аппроксимируется выражением

$$I_c = I_{c0} \left(\frac{U_{зи}}{U_{зи\text{ пор}}} - 1 \right)^2 \quad (6.1)$$

при $U_{зи} \geq U_{зи\text{ пор}}$. На рис. 6.9 I_{c0} и $U_{зи\text{ пор}}$ – параметры аппроксимации. Так как ПТ с индуцированным каналом может работать только в режиме обогащения, то его выходные характеристики имеют вид, показанный на рис. 6.10, где $U_{зи3} > U_{зи2} > U_{зи1} > U_{зи\text{ пор}}$. Основные

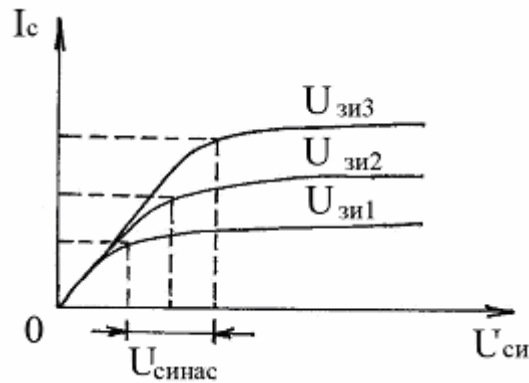


Рис. 6.10. Выходные характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом

параметры этого ПТ идентичны параметрам ПТ с управляющим p^+ - n -переходом.

Все вышеизложенное о физических процессах в n -канальных ПТ, их характеристик и параметров справедливо и по отношению к p -канальным приборам. В частности, статические характеристики p -канальных ПТ будут иметь тот же вид, что и n -канальных, но в своих областях напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$. Так, например, передаточная характеристика p -канального ПТУП, приведенная на рис. 6.11, расположена в области положительных значений $U_{зи}$ и отрицательных значений $U_{си}$ и I_c . Отметим, что предпочтительными для применения в

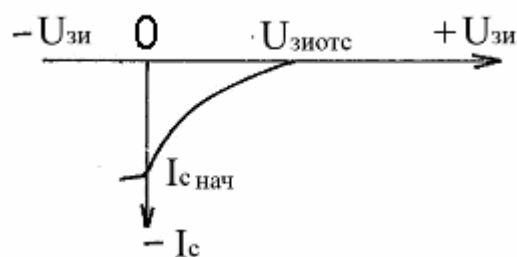


Рис. 6.11. Передаточная характеристика p -канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

электронных схемах являются n -канальные ПТ, обладающие лучшим сочетанием выходных характеристик по сравнению с p -канальными приборами из-за большей, чем у дырок, подвижности электронов.

Передаточные характеристики транзисторного ключа на основе ПТ с индуцированным n -каналом приведены на рис. 6.12, где все

параметры те же, что и на рис. 5.9, кроме порогового напряжения $U_{зи\text{ пор}}$ (см. рис. 6.9) . Из рис. 6.12 видно, что в области напряжений

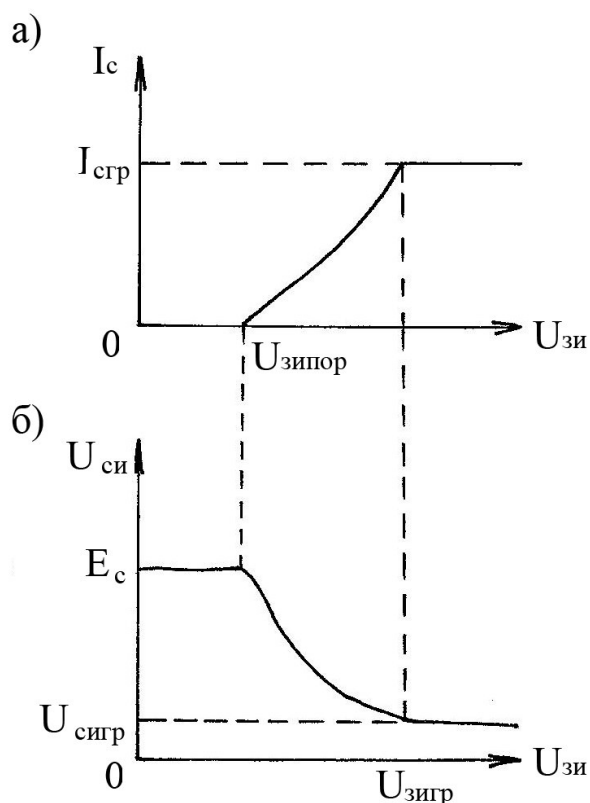


Рис. 6.12. Передаточные характеристики транзисторного ключа: зависимость тока стока от напряжения затвор-исток (а), зависимость напряжения сток-исток от напряжения затвор-исток (б)

$0 \leq U_{зи} \leq U_{зи\text{ пор}}$ ПТ находится в режиме отсечки, при напряжениях $U_{зи\text{ пор}} < U_{зи} \leq U_{зи\text{ гр}}$ — в активной области, а при $U_{зи} > U_{зи\text{ гр}}$ — в области насыщения тока стока.

Порядок выполнения работы

1. Передаточная характеристика ПТ со встроенным каналом n-типа в схеме с ОИ

1.1. Открыть файл C9_064 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.13.

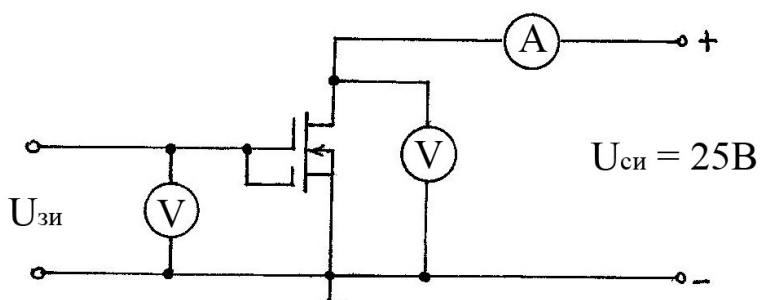


Рис. 6.13. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик полевых транзисторов со встроенным n-каналом

Здесь объектом исследований является ПТ с короткозамкнутыми истоком и подложкой и двумя затворами. Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{зи}$ в соответствии с данными таблицы 6.1, для каждого значения $U_{зи}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу. По данным таблицы 6.1 построить зависимость $I_c=f(U_{зи})$

Таблица 6.1. Экспериментальные данные для определения передаточных характеристик полевых транзисторов со встроенным n-каналом

$U_{зи}, В$	-1	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,5	1	2
$I_c, мА$												

при $U_{си}=25В$.

1.2. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

1.3. Открыть файл C9_065 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.14 и позволяющей получить передаточную характеристику ПТИЗ посредством осциллографа. Здесь на канал А осциллографа поступает напряжение $U_{зи}$, поданное на затворы ПТИЗ, а на канал В через ИНУТ – напряжение, пропорциональное току стока.

1.4. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать передаточную характеристику ПТИЗ, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры передаточной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 1.1.

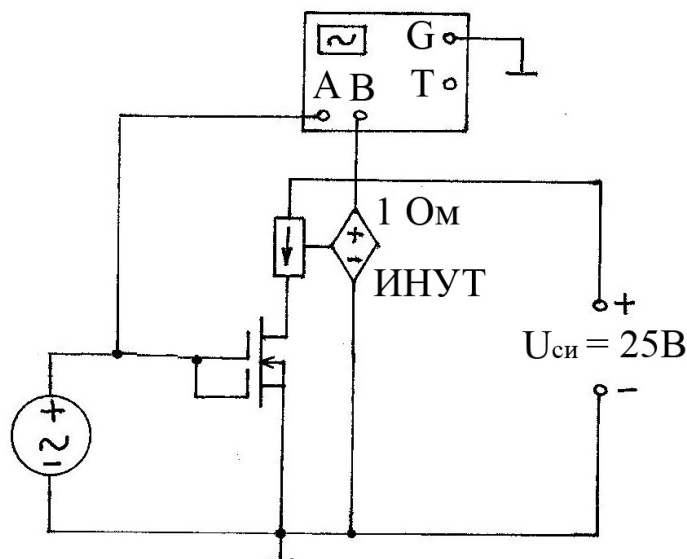


Рис. 6.14. Схема ИУ для определения осциллографическим методом передаточных характеристик полевых транзисторов со встроенным n-каналом

1.5. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

2. Выходные характеристики ПТ со встроенным каналом n-типа в схеме с ОИ

2.1. Открыть файл C9_064 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.13.

2.2. Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{си}$ в соответствии с данными таблицы 6.2, для каждого значения $U_{си}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 6.2. Экспериментальные данные для определения выходных характеристик полевых транзисторов со встроенным n-каналом

$U_{зи} = 0 \text{ В}$	$U_{си}, \text{ В}$	0	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
	$I_c, \text{ мА}$								

2.3. Повторить п. 2.2, предварительно установив $U_{зи} = -0.1 \text{ В}$.

2.4. Повторить п. 2.2, предварительно установив $U_{зи} = 0.2 \text{ В}$.

2.5. По данным таблиц 6.2 в п.п. 2.2-2.4 построить графики семейства выходных характеристик: $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$.

2.6. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

2.7. Открыть файл C9_071 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.15 и позволяющей получить выходные характеристики ПТИЗ посредством осциллографа.

2.8. Установить в этой схеме $U_{зи} = 0 \text{ В}$. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать выходную характеристику ПТИЗ, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры выходной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 2.5 при $U_{зи}=0 \text{ В}$.

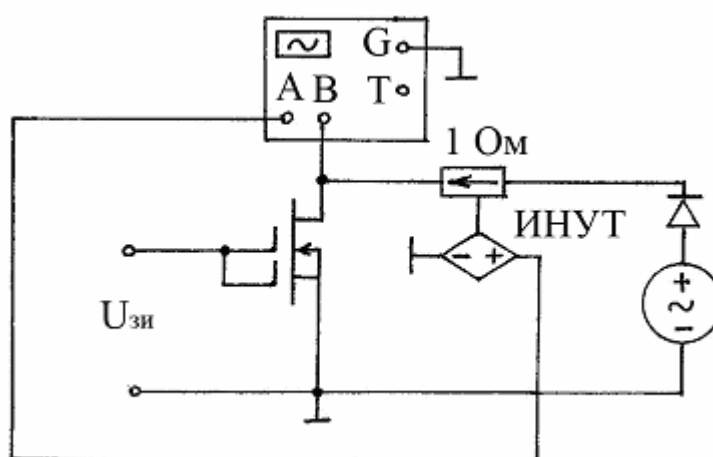


Рис. 6.15. Схема ИУ для определения осциллографическим методом выходных характеристик полевых транзисторов со встроенным n-каналом

2.9. Повторить п. 2.8, но при $U_{зи} = -0.1 \text{ В}$.

2.10. Повторить п. 2.8, но при $U_{зи} = 0.2 \text{ В}$.

2.11. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

3. Передаточная характеристика ПТ с индуцированным каналом n-типа в схеме с ОИ

3.1. Открыть файл C9_066 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.16.

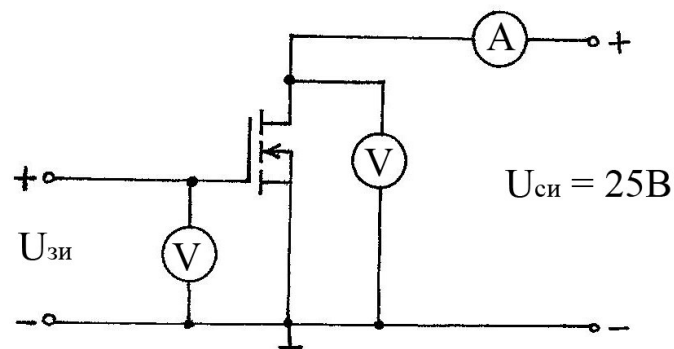


Рис. 6.16. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик полевых транзисторов с индуцированным n-каналом

Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{зи}$ в соответствии с данными таблицы 6.3, для каждого значения $U_{зи}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу. По данным таблицы 6.3 построить

Таблица 6.3. Экспериментальные данные для определения передаточных характеристик полевых транзисторов с индуцированным n-каналом

$U_{зи}, \text{ В}$	0	2	2,1	2,2	2,3	2,5	3	5	10
$I_c, \text{ мА}$									

зависимость $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = 25 \text{ В}$.

3.2. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

3.3. Открыть файл C9_080 со схемой ИУ, показанной на рис.6.17 и позволяющей получить передаточную характеристику ПТИЗ с индуцированным n-каналом. Здесь на канал А осциллографа поступает напряжение $U_{зи}$, а на канал В через ИНУТ – напряжение, пропорциональное току стока.

3.4. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать передаточную характеристику ПТИЗ, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры передаточной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 3.1.

3.5. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

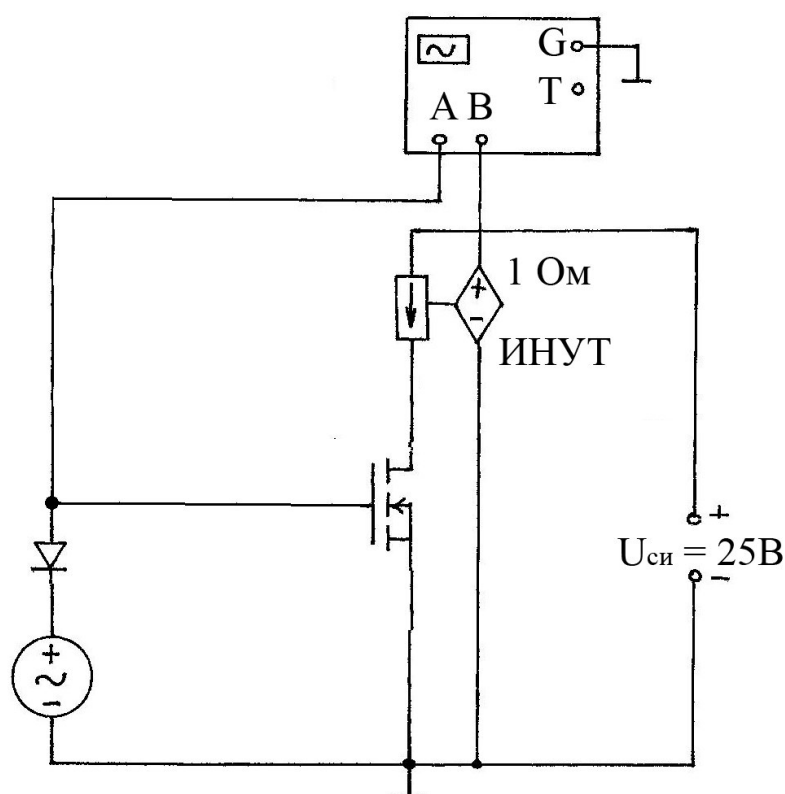


Рис. 6.17. Схема измерительной установки для определения осциллографическим методом передаточных характеристик полевых транзисторов с индуцированным n-каналом

4. Выходные характеристики ПТ с индуцированным каналом n-типа в схеме с ОИ

4.1. Открыть файл C9_066 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.16.

4.2. Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{си}$ в соответствии с данными таблицы 6.4, для каждого значения $U_{си}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу.

Таблица 6.4. Экспериментальные данные для определения выходных характеристик полевых транзисторов с индуцированным n-каналом

$U_{зи} = 2,5 \text{ В}$	$U_{си}, \text{ В}$	0	0,05	0,1	0,2	0,5	1	5	10
	$I_c, \text{ мА}$								

4.3. Повторить п. 4.2, предварительно установив $U_{зи} = 3 \text{ В}$.

4.4. Повторить п. 4.2, но при $U_{зи} = 5 \text{ В}$.

4.5. По данным таблиц 6.4 в п.п. 4.2-4.4 построить графики семейства выходных характеристик испытуемого ПТ: $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$.

4.6. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

4.7. Открыть файл C9_081 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.18 и позволяющей получить выходные характеристики ПТИЗ посредством осциллографа.

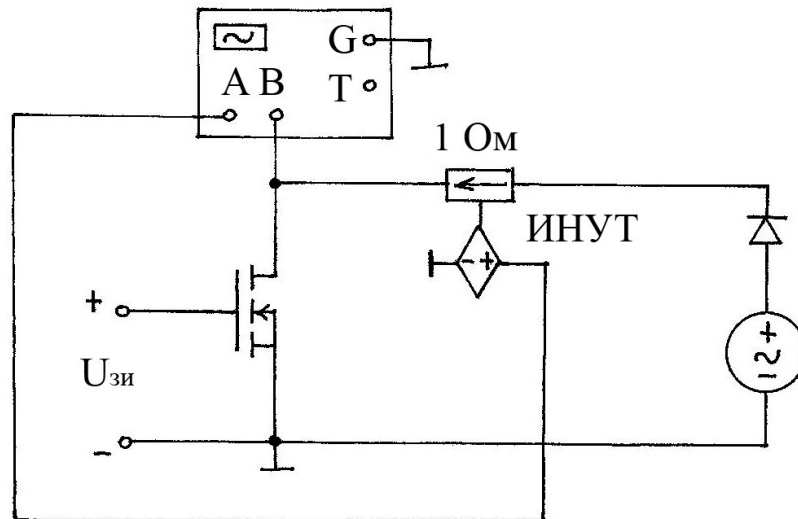


Рис. 6.18. Схема измерительной установки для определения осциллографическим методом выходных характеристик полевых транзисторов с индуцированным n-каналом

4.8. Установить в этой схеме $U_{зи} = 2.5$ В. Включить ИУ и осциллограф, зарисовать выходную характеристику ПТИЗ, отображенную на экране осциллографа, посредством осциллографа измерить параметры выходной характеристики и сравнить ее с построенной в п. 4.5 при $U_{зи} = 2.5$ В.

4.9. Повторить п. 4.8, но при $U_{зи} = 3$ В.

4.10. Повторить п. 4.8, но при $U_{зи} = 5$ В.

4.11. Выключить ИУ и осциллограф и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

5. Передаточные характеристики транзисторного ключа на основе ПТИЗ с индуцированным n-каналом

5.1. Открыть файл C9_066 со схемой ИУ, показанной на рис. 6.19. Включить ИУ. Устанавливая значения $U_{зи}$ в соответствии с данными таблицы 6.5, для каждого значения $U_{зи}$ снять показания измерительных приборов и внести их в эту таблицу. По данным таблицы 6.5 построить передаточные характеристики транзисторного ключа, аналогичные показанным на рис. 6.12.

5.2. Выключить ИУ и закрыть окно с ее схемой, ответив «НЕТ» на вопрос компьютера.

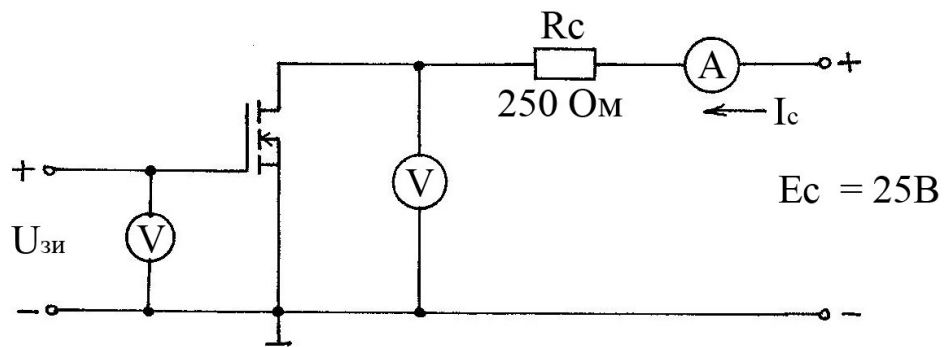


Рис. 6.19. Схема измерительной установки для определения передаточных характеристик транзисторного ключа на основе ПТИЗ с индуцированным n-каналом

Таблица 6.5. Экспериментальные данные для определения передаточных характеристик транзисторного ключа на основе ПТИЗ с индуцированным n-каналом

$U_{зи}, \text{ В}$	0	2	2,1	2,2	2,3	2,5	3	5
$I_c, \text{ мА}$								
$U_{си}, \text{ В}$								

5.3. Открыть файл C9_082 со схемой ИУ, показанной на рис.6.20 и

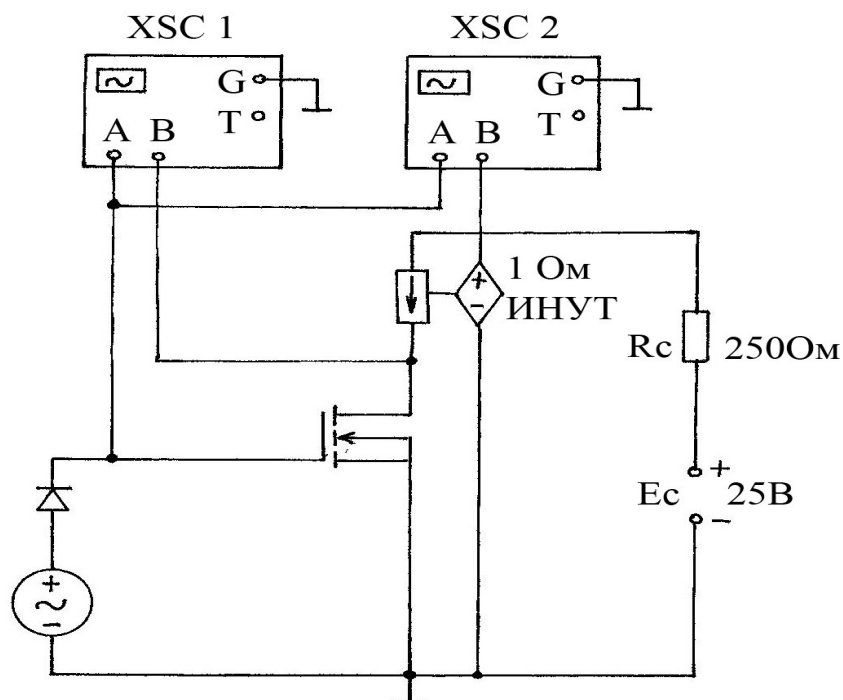


Рис. 6.20. Схема измерительной установки для определения осциллографическим методом передаточных характеристик транзисторного ключа на основе ПТИЗ с индуцированным n-каналом

позволяющей получить передаточные характеристики транзисторного ключа на основе ПТИЗ с индуцированным каналом n-типа посредством осциллографов. Здесь на каналы А осциллографов подаётся напряжение $U_{зи}$, на канал В XSC1 – напряжение $U_{си}$, а на канал В XSC2 через ИНУТ – напряжение, пропорциональное току стока. В результате, на экране осциллографа XSC1 отображается передаточная характеристика $U_{си} = f(U_{зи})$, а на экране XSC2 – передаточная характеристика $I_c = f(U_{зи})$. Включить ИУ и осциллографы, зарисовать передаточные характеристики транзисторного ключа, посредством осциллографов измерить параметры передаточных характеристик и сравнить их с построенными в п. 5.1.

5.4. Выйти из программы Multisim 2001, выключить компьютер и монитор.

Содержание отчёта

1. Схемы измерительных установок.
2. Результаты экспериментов в виде таблиц и построенных по их данным графиков статических характеристик исследованных полевых транзисторов и передаточных характеристик транзисторных ключей.
3. Графики статических характеристик ПТИЗ (передаточных и выходных), полученных осциллографическим методом.
4. Словесная сравнительная оценка результатов измерений методом амперметра и вольтметра и осциллографическим методом.
5. Числовые значения основных параметров ($U_{зи\text{ отс}}$, $I_{с\text{ нач}}$ и $R_{си} = f(I_c)$ при $U_{зи} = 0\text{ В}$) ПТ со встроенным каналом; $U_{зи\text{ пор}}$ ПТ с индуцированным каналом; малосигнальных параметров исследованных ПТ (S , $R_{вых}$, K_u , $R_{вх}$).
6. Числовые значения основных параметров транзисторного ключа на основе ПТ с индуцированным каналом ($U_{зи\text{ пор}}$, $U_{зи\text{ гр}}$, $I_{с\text{ гр}}$, $U_{си\text{ гр}}$).
7. Выводы.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ОПЗ – область пространственного заряда
ВАХ – вольтамперная характеристика
ИП – испытуемый прибор
ИТУН – источник тока, управляемый напряжением
ИНУН – источник напряжения, управляемый напряжением
ИУ – измерительная установка
ИНУТ – источник напряжения, управляемый током
ИТУТ – источник тока, управляемый током
В – выпрямитель
ОН – ограничитель напряжения
БТ – биполярный транзистор
ОЭ – общий эмиттер
ОБ – общая база
ОК – общий коллектор
ТК – транзисторный ключ
ПТ – полевой транзистор
МДП – металл-диэлектрик- полупроводник
МОП – металл-окисел-полупроводник
ПТУП – полевой транзистор с управляющим p^+ - n -переходом
ОИ – общий исток
ОЗ – общий затвор
ОС – общий сток
ПТИЗ – полевой транзистор с изолированным затвором

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров Ю.А., Мироненко И.Г. Электронные цепи и микросхемотехника. Учебник для ВУЗов. М.: Высшая школа, 2002.
2. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Учебник для ВУЗов. М.: Горячая линия – Телеком, 2001.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. Учебник для ВУЗов. М.: Высшая школа, 2005.
4. Прянишников В.А. Электроника. Полный курс лекций. Учебник для ВУЗов. С-Пб.: Корона принт, 2006.
5. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам. Учебное пособие для ВУЗов. СПб.: Лань, 2003.
6. Джонс М.Х. Электроника – практический курс. М.: Постмаркет, 1999.
7. Каганов В.И., Битюгов В.К. Основы радиоэлектроники и связи. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
8. Лачин В.И., Савельев Н.С. Электроника. Учебное пособие для ВУЗов. Ростов н/д: Феникс, 2000.
9. Кононенко В.В. Электротехника и электроника. Учебное пособие для ВУЗов. Ростов н/д: Феникс, 2007.
10. Бобылев Ю.Н. Физические основы электроники. Учебное пособие для ВУЗов. М.: МГУ, 2005.

11. Готтлиб И.М. Источники питания, инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Постмаркет, 2000.
12. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника. Учебник для ВУЗов. М.: Горячая линия – Телеком, 2003.
13. Новиков Ю.Н. Электротехника и электроника. Учебное пособие для ВУЗов. СПб.: Питер, 2005.
14. Бобровников Л.З. Электроника. Учебник для ВУЗов. СПб.: Питер, 2004
15. Щука А.А. Электроника. Учебник для ВУЗов. СПб.: БХВ – Петербург, 2005.
16. Жеребцов И.П. Основы электроники. Учебник для ВУЗов. Л.: Энергоатомиздат, 1990

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1.	Вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов и стабилитронов
Лабораторная работа №2.	Типовые схемы на основе полупроводниковых диодов и стабилитронов.....
Лабораторная работа №3.	Схемотехника.....
Лабораторная работа №4.	Статические характеристики биполярных транзисторов
Лабораторная работа №5.	Статические характеристики полевых транзисторов с управляющим р-n-переходом
Лабораторная работа №6.	Статические характеристики полевых транзисторов с изолированным затвором
Перечень сокращений
Рекомендуемая литература



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОНИКИ

Заведующий кафедрой: д.т.н., проф. Г.Н. Лукьянов.

Кафедра Электроники (первоначальное название “Радиотехники”) была основана в 1945 году. Первым руководителем кафедры был С.И. Зилитинкевич известный в стране и за рубежом ученый в области физической электроники и радиотехники, активный работник высшей школы, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор ЛИТМО с 1938 г., инициатор создания в ЛИТМО инженерно-физического и радиотехнического факультетов (1946 г.). С.И. Зилитинкевич заведовал кафедрой с 1945 до 1978 года. Под его научным руководством аспирантами и соискателями выполнено более 50 кандидатских диссертаций, многие его ученики стали докторами наук.

В дальнейшем, с 1978 г. по 1985 г. кафедру возглавил к.т.н., доцент Е.К. Алахов, один из учеников С.И. Зилитинкевича.

С 1985 года по 2006 год руководителем кафедры стал д.т.н., профессор В.В. Тогатов, известный специалист в области силовой электроники и приборов для измерения параметров полупроводниковых структур.

Начиная с 2006 г. кафедрой заведует д.т.н., профессор Г.Н. Лукьянов.

Основные направления кафедры связаны с разработкой приборов для лазерной и медицинской техники, приборов для измерения параметров полупроводниковых структур, а также встраиваемых цифровых и микропроцессорных устройств.

Под руководством В.В. Тогатова было разработано и изготовлено большое число приборов различного назначения:

- Измеритель параметров ультрабыстрых диодов;
- Универсальное устройство для исследования переходных процессов в силовых полупроводниковых структурах;
- Измеритель времени жизни неосновных носителей заряда в слаболегированных областях диодных, тиристорных и транзисторных структур;
- Универсальный разрядный модуль для накачки твердотельных лазеров;
- Импульсный источник токов для накачки лазерных линеек;
- Высокочастотный разрядный модуль для систем накачки твердотельных лазеров и импульсных источников света;
- Программируемый источник света для питания галогенных ламп;
- Блок управления затвором с нарушением полного внутреннего отражения;
- и много других.

На кафедре написаны и размещены на сайте ЦДО следующие материалы для дистанционного обучения (автор Ю.В. Китаев):

- Конспект лекций по дисциплине “Электроника и микропроцессорная техника”;
- свыше 600 вопросов к обучающим и аттестующим тестам;
- 18 дистанционных лабораторных и практических работ.

На кафедре имеются следующие компьютеризированные учебные лаборатории:

- АРМС – полупроводниковые приборы;
- Устройства на полупроводниковых приборах;
- Цифровая техника;
- Микропроцессорная техника
- Моделирование электронных устройств.

В настоящее время учебный процесс на кафедре обеспечивает профессор, д.т.н. Лукьянинов Г.Н., профессор, д.т.н. Тогатов В.В., доцент, к.т.н. Белякова И.И., доцент, к.т.н. Китаев Ю.В., доцент, к.т.н. Григорьев Б.И., доцент, к.т.н. Кулагин В.С., доцент, к.т.н. Наливкин А.В., ст. преподаватель Балобей Ф.П., ст. преподаватель Васильев А.Б., асс. Мандрыко Ю.А., зав. Лаб. Кутьев А.Н., вед. инж. Кузнецов Ю.В.

Борис Иванович Григорьев

**Элементная база и устройства аналоговой
электроники**

Учебное пособие (виртуальный лабораторный практикум)

В авторской редакции
Дизайн и верстка Б.И. Григорьев
Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского
государственного университета информационных технологий,
механики и оптики
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия от
Подписано к печати Тираж 500 экз.
Заказ № Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных
технологий, механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

