

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

**ЭЛЕКТРОНИКА В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСАХ И СИСТЕМАХ  
(В задачах)**

*В трех частях*

**ЧАСТЬ 1**

**Учебно-методическое пособие**

*Электронное издание*

Красноярск  
СФУ  
2012

УДК 621.38 (07)  
ББК 31.264.53я73  
Э455

Рецензент: С.И. Мурашкин, доцент кафедры ЭТКиС

Составители: Молодецкий Виктор Борисович, Архипцев Максим Геннадьевич, Федий Константин Сергеевич

**Э455 Электроника** в электротехнических комплексах и системах (в задачах).  
Ч. 1: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс] / сост. В.Б. Молодецкий, М.Г. Архипцев, К.С. Федий. – Электрон.дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – Систем.требования: РС не ниже класса Pentium I; 128 Mb RAM; Windows 98/XP/7; AdobeReader V8.0 и выше. – Загл. с экрана.

**В учебно-методическом пособии** в начале каждой главы даны краткие теоретические сведения и сводка необходимых формул. Наиболее подробно изложен тот материал, который меньше освещен в литературе. Характеристики некоторых приборов даны в приложениях. Изложенный в пособии теоретический материал сопровождается примерами расчетов, способствующих лучшему усвоению курса.

Предназначено для бакалавров укрупненной группы направления 140400 «Энергетика и электротехника».

УДК 621.38 (07)  
ББК 31.264.53я73

© Сибирский  
федеральный  
университет, 2012

Учебное издание

Подготовлено к публикации редакционно-издательским  
отделом БИК СФУ

Подписано в свет 01.10.2012 г. Заказ 9648.  
Тиражируется на машиночитаемых носителях.

Редакционно-издательский отдел  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
Тел/факс (391)206-21-49. E-mail rio@sfu-kras.ru  
<http://rio.sfu-kras.ru>

## **Предисловие**

Настоящее учебно-методическое пособие представляет собой сборник задач по курсу «Физические основы электротехники», читаемому в технических университетах и ВУЗах.

Предлагаемое учебно-методическое пособие предназначено для студентов изучающих электротехнику и основы электроники дневных, вечерних и заочных отделений. Для облегчения решения задач в начале каждой главы даны краткие теоретические сведения и сводка необходимых формул. Наиболее подробно изложен тот материал, который меньше освещен в литературе. Характеристики некоторых приборов даны в приложениях. Изложенный в пособии теоретический материал сопровождается примерами расчетов, способствующих лучшему усвоению курса.

В связи с вышеизложенным можно заключить, что данное учебно-методическое пособие «Электроника в электротехнических комплексах и системах в задачах. Часть 1», базирующегося на основах теории с преимущественным акцентом на наиболее важные прикладные разделы, окажется полезным большинству курсов электротехнической подготовки.

## Общие сведения

С целью контроля усвоения учебного материала в соответствии с учебным планом, студентам предлагается выполнить расчетные задания.

Исходные данные к задачам сведены в таблицы. Они разбиты на столбцы, обозначенные символами А, В, С, и строки под номерами 0,1,2,...,9. Для выбора исходных данных необходимо определить номер строки, соответствующий номеру зачетной книжки, по следующему правилу:

Номером строки в столбце А является последняя цифра номера зачетной книжки, в столбце В – предпоследняя цифра, а в столбце С – младший разряд суммы последней и предпоследней цифр.

Например, номер Вашей зачетной книжки: 123456. номером строки в столбце А является 6, в столбце В – 5, в столбце С – 1 ( $5+6=11$ ).

Номера строк в столбцах для всех задач одинаковы. Перед текстом решения первой задачи необходимо привести расчет номеров строк в столбцах по номеру Вашей зачетной книжки, а перед текстом решения каждой задачи четко выписать исходные данные.

## Полупроводниковые диоды

Основой полупроводниковых диодов служит  $p$ - $n$  переход. Поэтому свойства диода и его вольт-амперная характеристика отражают особенности прохождения тока через  $p$ - $n$  переход.

Выражение:

$$j = \left( \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p p_n}{L_p} \right) \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) = j_s \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) \quad (1)$$

описывает вольт-амперную характеристику идеального  $p$ - $n$  перехода. Вольт-амперные характеристики реальных кремниевых диодов отличаются от характеристики идеального перехода. Типичная ВАХ кремниевого диода представлена на рис.1.

$j_s$  – плотность обратного тока насыщения,  $D_n$  и  $D_p$  – коэффициенты диффузии, соответственно, электронов и дырок,  $L_n$  и  $L_p$  – соответствующие диффузионные длины,  $n_p$  и  $p_n$  – концентрации неосновных носителей.

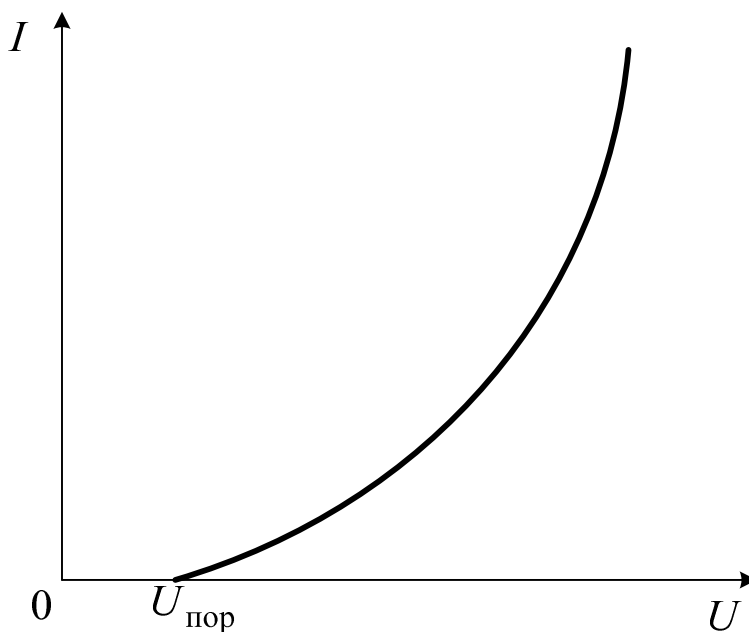


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика кремниевого диода

Характерная особенность ВАХ реальных диодов — отсутствие на рисунках токов через диод при отрицательных и малых положительных напряжениях, т. е. при  $U < U_{\text{пор}}$  (см. рисунок 1). Обратные токи в этих диодах малы, поэтому в инженерных расчетах их полагают равными нулю; заметный ток появляется только при  $U > U_{\text{пор}}$ . Область напряжений  $0 < U < U_{\text{пор}}$  называется зоной умолчания. Иногда при анализе кремниевых интегральных

схем ВАХ диода изображают в виде ступеньки (рисунок 2), то есть представляют диод в виде идеального ключа.

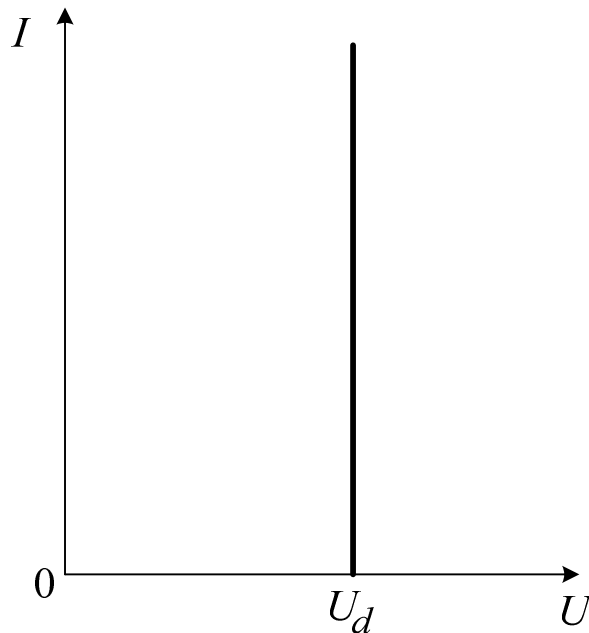


Рисунок 2 – Вольт-амперная характеристика идеального ключа

К основным параметрам диода относятся сопротивление диода постоянному току  $R_{\pi}$  и дифференциальное сопротивление  $R_{\text{диф}}$ . Величина  $R_{\pi}$  определяется как отношение постоянного напряжения на диоде к току через него. Дифференциальное сопротивление характеризует наклон к оси абсцисс вольт-амперной характеристики при данном напряжении на диоде:

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}.$$

Отличие характеристик реальных диодов от ВАХ идеального р-п перехода делает практически невозможным аналитический расчет токов и напряжений в реальных схемах с диодами. Поэтому на практике пользуются графоаналитическим методом решения задач. При этом используют реальные характеристики диодов, например приведенные в справочниках. Суть этого метода поясним на простом примере.

Пример: Определить ток, текущий в схеме, представленной на рисунке 3. Известна ВАХ диода (рисунок 4),  $U_{\pi} = 2\text{ В}$ ,  $R = 1\text{ кОм}$ .

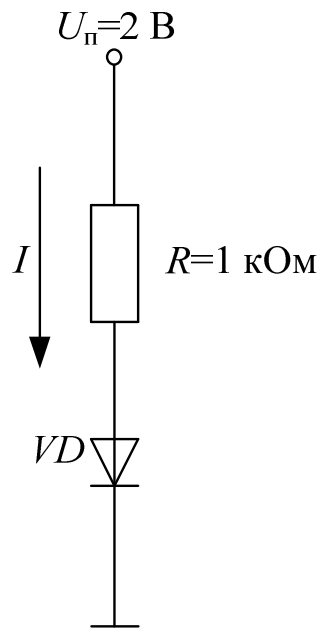


Рисунок 3 – Схема включения диода

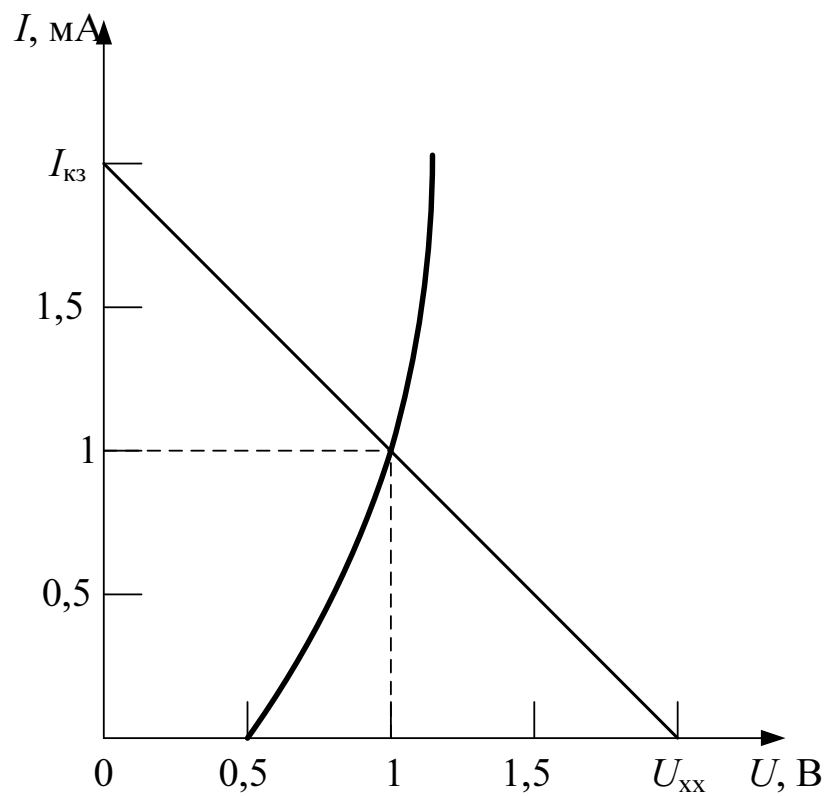


Рисунок 4 – Иллюстрация графического метода определения тока через диод и напряжения на нем

Для решения запишем 2-ой закон Кирхгофа для цепи:

$$U_{\text{п}} = IR + U_d \quad (2)$$

где  $U_d$  - падение напряжения на диоде.

Это уравнение содержит две неизвестные величины:  $I$  и  $U_d$ . Чтобы их определить, нужно ещё одно уравнение. Его роль выполняет ВАХ диода, дающая связь между  $I$  и  $U_d$ . Учитывая, что (2) – это уравнение прямой, задачу удобно решить графически. Построим нагрузочную прямую (2) по двум точкам (точкам её пересечения с осями координат). Напряжение холостого хода  $U_{xx}$  – это точка пересечения нагрузочной прямой с осью абсцисс;  $U_{xx} = U_{\pi} = 2$  В. Ток короткого замыкания  $I_{кз}$  – точка пересечения прямой с осью ординат;  $I_{кз} = U_{\pi}/R = 2$  мА. Точка пересечения прямой с характеристикой дает искомое решение задачи:  $I = 1$  мА;  $U_d = 1$  В.

Задача 1. В схеме, изображенной на рисунке 1.5,  $U_{\pi} = 2,2$  В;  $R = 500$  Ом;  $U_1 = U_2 = 0,2$  В;  $U_3 = 1,2$  В. Вольт-амперная характеристика диодов приведена на рисунке 6. Определить токи через диоды и напряжение на выходе  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\pi}$ .

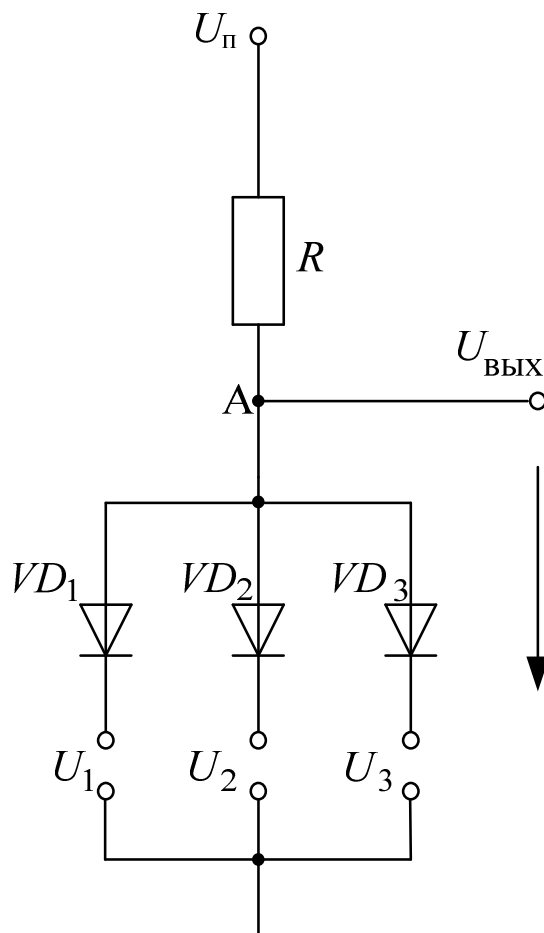


Рисунок 5 – Схема включения диодов



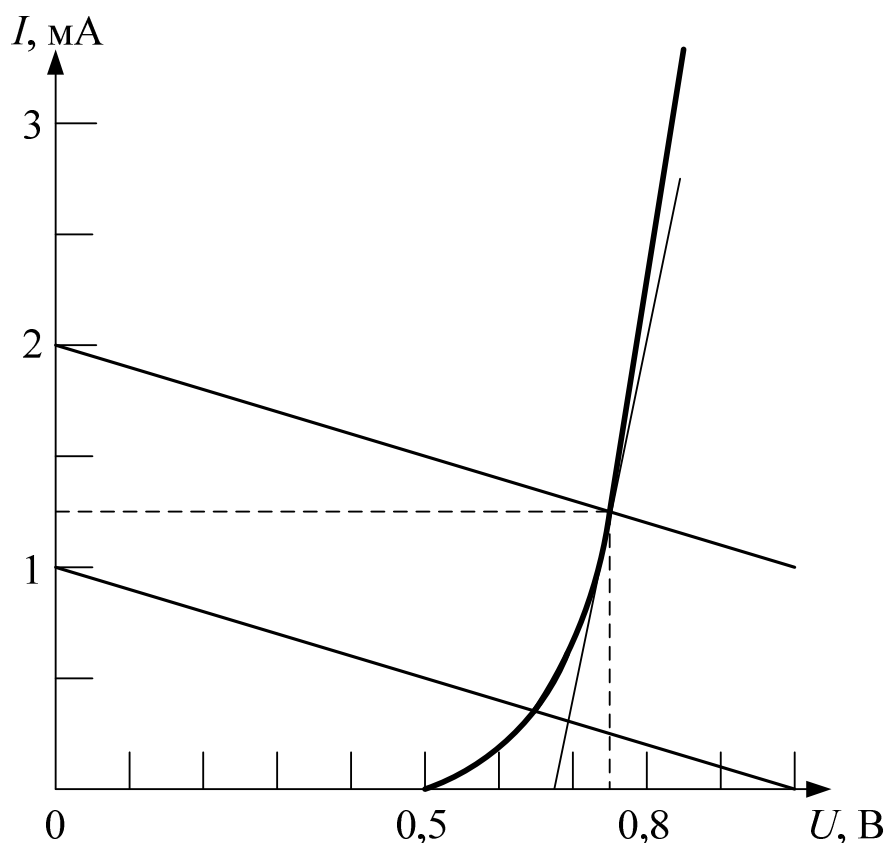


Рисунок 6 – Вольт-амперная характеристика диода

Решение. Поскольку напряжения  $U_1$  и  $U_2$  - одинаковые, то напряжения на диодах  $VD_1$  и  $VD_2$  и токи через эти диоды одинаковые. Обозначим их через  $U_d$  и  $I_d$  соответственно. Предположим, что диод  $VD_3$  открыт, то есть ток через этот диод отличен от нуля. Из рисунка 6 видно, что это возможно, если потенциал точки А превышает величину  $U = U_3 + U_{\text{пор}} = 1,2 + 0,5 = 1,7 \text{ В}$ . Здесь через  $U_{\text{пор}}$  обозначено пороговое напряжение диода, отвечающее границе “зоны умолчания” на вольт-амперной характеристике. Если это так, то напряжение на диодах  $VD_1$  и  $VD_2$  окажется равным  $1,7 - 0,2 = 1,5 \text{ В}$ , что противоречит рисунку 6. Поэтому при решении будем считать, что диод  $VD_3$  закрыт, то есть ток через него не течет. Ток  $I$  через сопротивление  $R$  в соответствии с 1-м законом Кирхгофа равен удвоенному току через открытый диод:  $I = 2I_d$ . Согласно 2-му закону Кирхгофа

$$U_{\text{н}} = U_1 + U_d + 2I_d R \quad (3)$$

Уравнение (3) содержит две неизвестные величины:  $U_d$  и  $I_d$ . Чтобы их определить, необходимо ещё одно уравнение, в данном случае второе уравнение задано графически в виде ВАХ диода. Уравнение (3) представляет собой уравнение нагрузочной прямой. Чтобы построить эту прямую в плоскости вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода, нужно определить точки пересечения этой характеристики с осями координат. Положив  $I_d = 0$ ,

получим точку пересечения прямой с осью напряжений  $U_{xx}$  (напряжение холостого хода):

$$U_{xx} = U_{\pi} - U_1 = 2,2 - 0,2 = 2 \text{ В}$$

Положив далее  $U_d = 0$ , получим точку пересечения нагрузочной прямой с осью ординат -  $I_{кз}$  (ток короткого замыкания):

$$I_{кз} = \frac{U_{\pi} - U_1}{2R} = \frac{(2,2 - 0,2)\text{В}}{2 \cdot 0,5\text{кОм}} = 2 \text{ мА}$$

Поскольку значение  $U_{xx} = 2 \text{ В}$  не помещается на графике рисунка 6, построим сначала вспомогательную прямую, параллельную нагрузочной прямой. Пусть вспомогательная прямая пересекает ось напряжений в точке  $U = 1 \text{ В}$ , то есть  $U = U_{xx}/2$ ; тогда эта прямая должна пересечь ось ординат (токов) в точке  $I = I_{кз}/2 = 2 \text{ мА} / 2 = 1 \text{ мА}$ . Проведем вспомогательную прямую через точки  $(0, 1 \text{ мА})$  и  $(1 \text{ В}; 0)$  на графике рисунка 6. Нагрузочная прямая пройдет через точку  $(0; 2 \text{ мА})$  параллельно вспомогательной.

Отметим, что прямая на ВАХ, вообще говоря, может быть построена в плоскости  $(U, I)$  по любым двум точкам; описанный выше способ построения этой прямой – один из возможных.

По точке пересечения нагрузочной прямой и ВАХ диода определяется ток через открытые диоды  $I_d$  и напряжение на этих диодах  $U_d$ :  $I_d = 1,25 \text{ мА}$ ;  $U_d = 0,75 \text{ В}$ .

$$\text{Напряжение } U_{\text{вых}} = U_1 + U_d = U_{\pi} - 2I_d R = 0,2 + 0,75 = 0,95 \text{ В}.$$

Диод VD3 в этом случае закрыт, как и полагалось ранее; напряжение на нем равно  $U_{\text{вых}} - U_3 = 0,95 - 1,2 = -0,25 \text{ В}$ .

Сопротивление постоянному току  $R_{\pi}$  равно

$$R_{\pi} = \frac{U_d}{I_d} = \frac{0,75\text{В}}{1,25\text{мА}} = 600 \text{ Ом}.$$

Чтобы определить дифференциальное сопротивление, нужно провести касательную к ВАХ в рабочей точке и построить прямоугольный треугольник, гипотенуза которого – часть касательной, а катеты параллельны осям. Отношение катетов  $\Delta U / \Delta I$  равно дифференциальному сопротивлению. Пользуясь построением на рисунке 7, определим:

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,1\text{В}}{1,25\text{мА}} = 80 \text{ Ом}.$$

Задача 2. В схеме, изображенной на рисунке 7 определить ток через диоды и напряжение на каждом диоде. Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\pi}$ . Вольт-

амперная характеристика диодов изображена на рисунке 6. Исходные данные представлены в таблице 1.

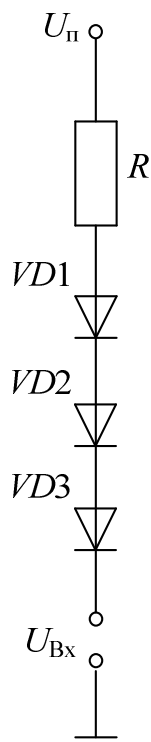


Рисунок 7 – Схема включения диодов

Таблица 1

Символ столбца	A	B	C
Номер строки	$U_{\Pi}$ , В	$R$ , кОм	$U_{Bx}$ , В
0	5	20	45
1	6	23	41
2	7	24	37
3	8	25	42
4	5,5	21	40
5	6,5	22	39
6	7,5	28	36
7	8,5	29	35
8	5	30	37
9	6	27	44

Задача 3. В схеме, изображенной на рисунке 5, определить токи через диоды и напряжение на выходе  $U_{вых}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{диф}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{п}$ . Вольт-амперная характеристика диодов приведена на рисунке 6. Исходные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

Символ столбца	А		В	С	
Номер строки	$U_{\text{п}}, \text{В}$	$R, \text{кОм}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$
0	8	2	0,5	3,5	3,5
1	6	3	0,8	5	5
2	5	2,2	0,6	4,5	4,5
3	7	3,4	1	7	7
4	6,5	2,8	0,9	6,5	6,5
5	7,5	2,6	0,7	6	6
6	5,5	2,5	0,65	5,5	5,5
7	8,5	3,1	0,85	6	6
8	7	2,7	0,75	5,5	5,5
9	8	2,9	0,95	7	7

Задача 4. В схеме на рисунке 1.8  $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$ ;  $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$ . Определить токи через диоды, напряжение на диодах и напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\text{п}}$ . Вольт-амперная характеристика диодов изображена на рисунке 6.

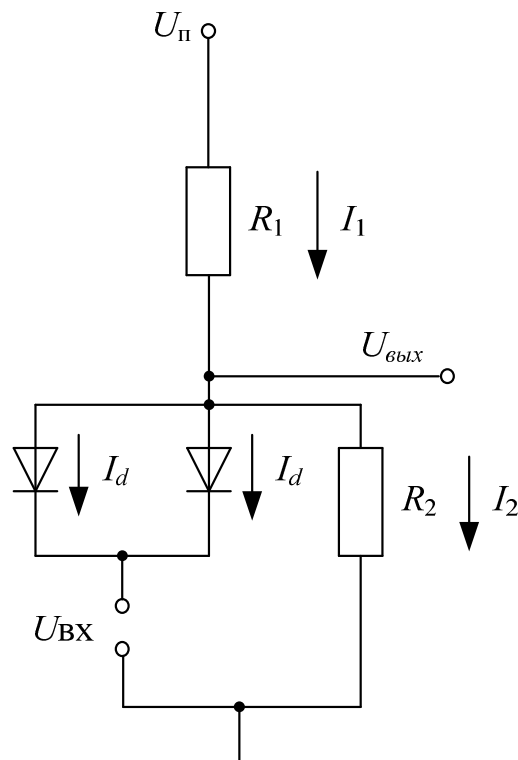


Рисунок 8 – Схема включения диодов

Решение. Согласно законам Кирхгофа токи и напряжения связаны уравнениями:

$$2I_d + I_2 = I_1$$

$$I_2 R_2 = U_d + U_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{п}} = I_1 R_1 + U_d + U_{\text{вх}}$$

Исключая токи  $I_1$  и  $I_2$ , получим уравнение нагрузочной прямой в виде

$$U_{\text{п}} = 2I_d R_1 + U_d \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + U_{\text{вх}} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

Полагая, что  $I_d = 0$ , получим  $U_{\text{хх}} = 1,5$  В; полагая далее  $U_d$ , получим  $I_{\text{кз}} = 1,5$  мА. После построения нагрузочной прямой находим графическое решение:  $U_d = 0,7$  В;  $I_d = 0,8$  мА. Далее, используя приведенные выше уравнения, можно найти все токи и напряжения в схеме:  $I_2 = 1,7$  мА;  $I_1 = 3,3$  мА;  $U_{\text{вых}} = 1,7$  В. Сопротивление диода по постоянному току и дифференциальное сопротивление определяются аналогично выше задаче 1.

Задача 5. В схеме на рисунке 9 определить токи через диоды, напряжение на диодах и напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$ . Определить дифференциальное сопротивление диодов  $R_{\text{диф}}$  и сопротивление по постоянному току  $R_{\text{п}}$ . Вольт-амперная характеристика диодов изображена на рисунке 6. Исходные данные представлены в таблице 3.

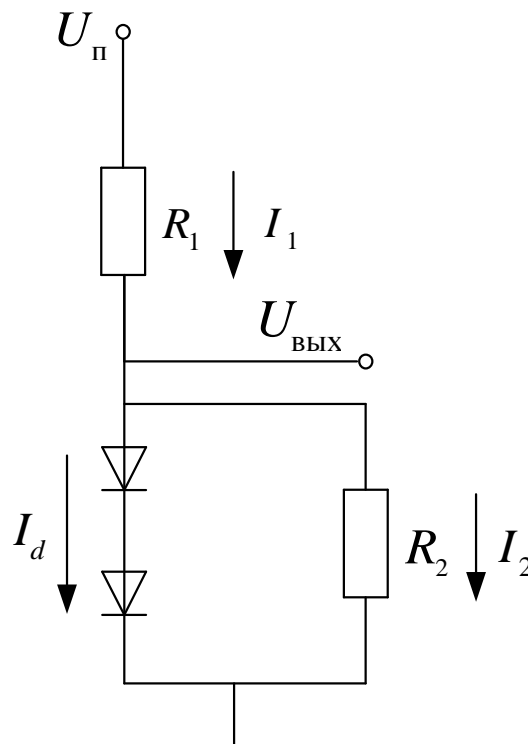


Рисунок 9 – Схема включения диодов

Таблица 3

Символ столбца	A	B	C
Номер строки	$U_{\text{п}}, \text{В}$	$R_1, \text{кОм}$	$R_2, \text{кОм}$
0	7	4,5	2,5
1	8	5,5	3
2	6	4	2
3	5	3,5	1,5
4	9	6	4
5	8,5	4,5	3,5
6	9,5	6,5	4,5
7	7,5	5	3
8	6,5	4	2
9	5,5	3,5	1,5

Задача 6. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рисунке 10. Диоды  $VD_1$ - $VD_5$  одинаковые, их вольт-амперная характеристика приведена на рисунке 1.11.  $U_{\text{п}} = 4,2 \text{ В}$ ;  $R_1 = 0,6 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{БХ}} = 2,4 \text{ В}$ .

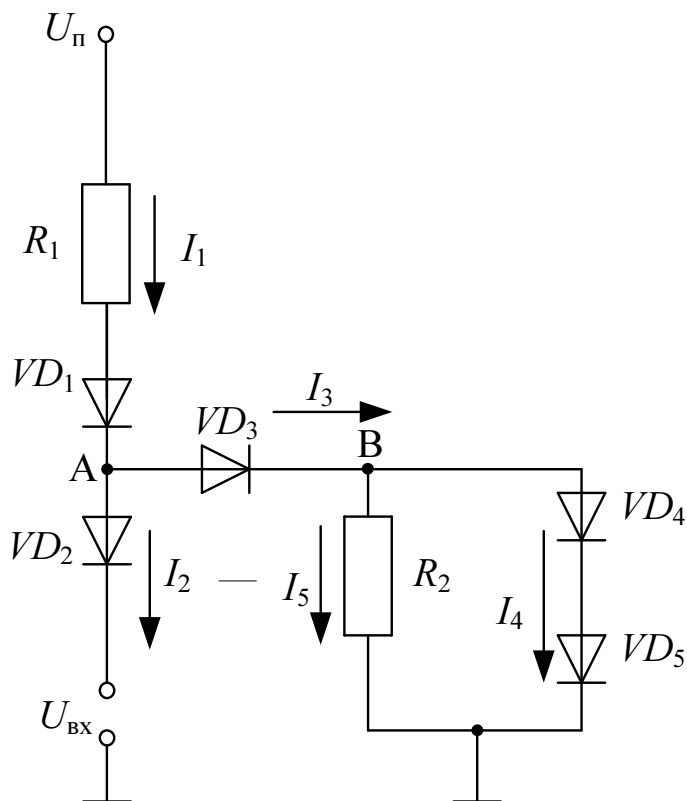


Рисунок 10 – Схема включения диодов

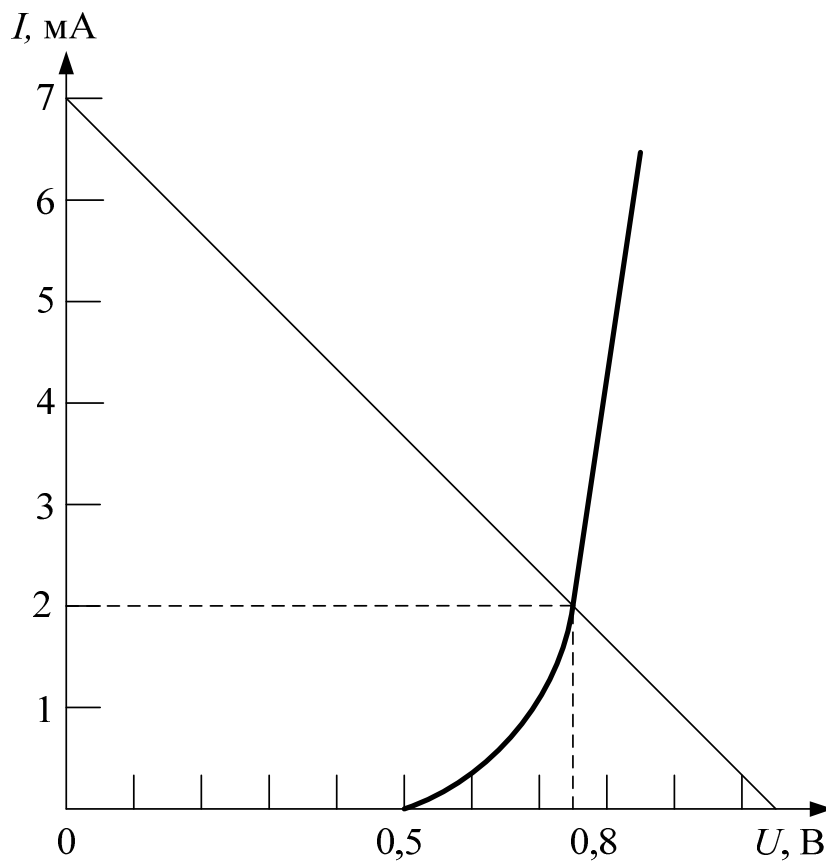


Рисунок 11 – Вольт-амперная характеристика диода

Решение. Сначала определим, по каким ветвям протекает ток, а по каким он протекать не может. Для этого оценим потенциал в точке А.

Допустим, что ток  $I_2 \neq 0$ , то есть через левую ветвь протекает отличный от нуля ток. В этом случае потенциал точки А должен быть не менее, чем  $U_{\text{вх}} + U_{\text{пор}} = 2,4 + 0,5 = 2,9$  В.

Здесь  $U_{\text{пор}}$  – пороговое напряжение включения диода, равное 0,5 В. Однако, потенциал 2,9 В в точке А установиться не может, так как напряжения  $3U_{\text{пор}} = 1,5$  В будет достаточно, чтобы открыть диоды  $VD_3$ ,  $VD_4$  и  $VD_5$ . при открытых диодах  $VD_3$ - $VD_5$  значение напряжения в точке А лежит в диапазоне от 1,5 В до  $3 \times 0,8 = 2,4$  В. Таким образом следует ожидать, что диоды  $VD_3$ - $VD_5$  будут открыты, а диод  $VD_2$  – закрыт, и ток  $I_2$  окажется равным нулю. Токи через диоды  $VD_1$  и  $VD_3$  одинаковы:  $I_1 = I_3$ . Ток  $I_3$  разветвляется в точке В: ток через сопротивление  $R_2$  –  $I_5$  и ток через диоды  $VD_4$  и  $VD_5$  –  $I_4$ . В данной задаче найти решение методом нагрузочной прямой удастся, если через все диоды течет одинаковый ток. Однако, ток  $I_3$  больше тока  $I_4$  на величину тока  $I_5$ . Задачу можно решить приближенно, если  $I_5 \ll I_3$ . Оценим эти токи. Потенциал точки В при открытых диодах  $VD_4$ ,  $VD_5$  может принимать значения от  $2U_{\text{пор}} = 1$  В до  $2 \times 0,8 = 1,6$  В. Следовательно,

$I_5$  не превышает величины  $(1,6/R_2)=0,16$  мА. С другой стороны, ток  $I_1$  (и равный ему  $I_3$ ) не могут быть меньше значения

$$I_{1\min} = \frac{U_{\pi} - U_{A\max} - U_{dVD1\max}}{R_1} = \frac{4,2 - 2,4 - 0,8}{0,6} = 1,67 \text{ мА}$$

Поскольку  $I_{1\min} \gg I_{5\max}$ , можно сделать вывод, что при решении задачи графоаналитическим методом током  $I_5$  можно пренебречь, и считать, что через диоды  $VD_1$ ,  $VD_3$ ,  $VD_4$  и  $VD_5$  течет одинаковый ток  $I_1$  и, следовательно, падение напряжения на этих диодах тоже одинаково. Считая  $I_4 = I_1$ , запишем уравнение Кирхгофа для цепи  $U_{\pi} - I_1 - VD_1 - VD_3 - VD_4 - VD_5 - \perp$ :

$$U_{\pi} = 4U_d + I_1 R_1$$

Последнее уравнение представляет собой уравнение нагрузочной прямой.

Находим напряжение холостого хода  $U_{xx}$  и ток короткого замыкания  $I_{кз}$ :

$$U_{xx} = \frac{U_{\pi}}{4} = 1,05 \text{ В}$$

$$I_{кз} = \frac{U_{\pi}}{R_1} = 7 \text{ мА}$$

Нагрузочная диаграмма пересекает ВАХ диода в точке  $I_1 = 2$  мА,  $U_d = 0,75$  В. Таким образом,  $I_1 = I_3 = 2$  мА. Потенциалы точек А и В равны соответственно  $U_A = 3 \times 0,75 = 2,25$  В;  $U_B = 2 \times 0,75 = 1,5$  В. Ток  $I_5$  через сопротивление  $R_2$  равен  $1,5/10 = 0,15$  мА. Ток  $I_4$  теперь можно уточнить:

$$I_4 = I_3 - I_5 = 2 - 0,15 = 1,85 \text{ мА.}$$

Полученное решение – приближенное, его можно уточнить методом итераций, однако в этом нет необходимости, так как в реальных схемах номинальные значения сопротивлений, напряжений источников питания и вольт-амперные характеристики диодов определяются (как правило) с точностью, не превышающей 5%.

Задача 7. Определить токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  в схеме, изображенной на рисунке 10. Диоды  $VD_1$ - $VD_5$  одинаковые, их вольт-амперная характеристика приведена на рисунке 11. Исходные данные представлены в таблице 4.



Таблица 4

Символ столбца	А		В	С	
Номер строки	$U_{\text{п}}, \text{В}$	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	Падение на открытом диоде, В	$R_1, \text{кОм}$	$R_2, \text{кОм}$
0	6	0,3	0,8	4	21
1	6,4	0,5	0,7	45	10
2	6,7	0,4	0,9	20	3
3	5,8	0,2	0,8	5	18
4	5,9	0,3	0,7	6	23
5	5,7	0,4	0,9	35	8
6	5,5	0,5	0,8	7	32
7	6,5	0,6	0,7	22	6
8	6	0,2	0,9	15	4
9	6,1	0,3	0,8	3	25

Задача 8. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рисунке 12, если падение напряжения на открытом диоде равно 0,8 В. Диоды  $VD_1$ - $VD_6$  одинаковые.  $U_{\text{п}} = 5 \text{ В}$ ;  $R_1 = 1 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 0,6 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вх}} = 1,6 \text{ В}$ .

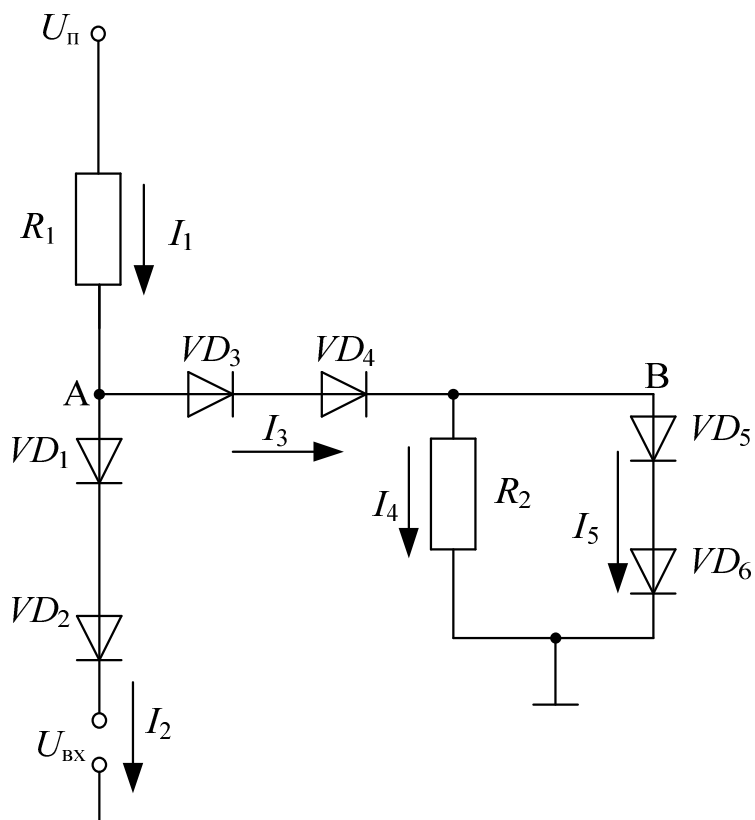


Рисунок 12 – Схема включения диодов

Решение. Предположим, что ток  $I_2 \neq 0$ . Тогда потенциал в точке разветвления будет равен  $U_A = U_{\text{вх}} + 2U_d = 3,2 \text{ В}$ . Предположим, что ток

$I_5 \neq 0$ . В этом случае потенциал точки разветвления равен  $U_a = 4U_d = 3,2 \text{ В}$ . На основании этих оценок можно сделать вывод, что либо потенциал точки А действительно равен 3,2 В и тогда открыты все ветви (все токи отличны от нуля), либо в действительности потенциал  $U_A$  окажется ниже 3,2 В, что означает, что ток течет по одной единственной ветви:  $U_{\text{п}} - R_1 - VD_3 - VD_4 - R_2 - \perp$ . Чтобы выяснить, какой из этих случаев реализуется, оценим токи через сопротивления в предположении, что  $U_A = 3,2 \text{ В}$ :

$$I_1 = \frac{U_{\text{п}} - U_A}{R_1} = \frac{1,8 \text{ В}}{1 \text{ кОм}} = 1,8 \text{ мА}.$$

$$I_2 = \frac{U_B}{R_2} \text{ мА}.$$

$$I_2 = \frac{1,6 \text{ В}}{0,6 \text{ кОм}} = 2,67 \text{ мА}.$$

Однако согласно схеме, ток  $I_4$  не может быть больше тока  $I_1$ . Это противоречит первому закону Кирхгофа для узлов А и В. Отсюда можно сделать вывод, что предположение о том, что  $U_A = 3,2 \text{ В}$ , неверно. На самом деле потенциал точки А окажется ниже 3,2 В, что означает, что  $I_2 = I_5 = 0$ . Далее запишем второй закон Кирхгофа для контура  $U_{\text{п}} - R_1 - VD_3 - VD_4 - R_2 - \perp$ :

$$U_{\text{п}} = I_1 R_1 + 2U_d + I_1 R_2$$

Здесь принято во внимание, что  $I_4 = I_1$ . Ток  $I_1$  равен:

$$I_1 = \frac{U_{\text{п}} - 2U_d}{R_1 + R_2}.$$

$$I_1 = \frac{5 - 2 \cdot 0,8}{1 + 0,6} = 2,125 \text{ мА}.$$

Задача 9. Определить токи  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$  в схеме, изображенной на рисунке 12. Диоды  $VD_1 - VD_6$  одинаковые. Исходные данные представлены в таблице 5.

Символ столбца	А		В	С	
Номер строки	$U_{п}, В$	$U_{вх}, В$	Падение на открытом диоде	$R_1, кОм$	$R_2, кОм$
0	5,5	1,3	0,7	2	0,7
1	5	1,5	0,8	2,2	0,6
2	6,5	1,6	0,9	1,8	0,65
3	6	1,4	0,7	1,9	0,75
4	5,5	1,7	0,8	2,1	0,8
5	6,5	1,4	0,9	1,8	0,85
6	5	1,3	0,7	1,9	0,6
7	6	1,6	0,8	2	0,7
8	5,5	1,5	0,9	2,1	0,85
9	6,5	1,4	0,7	2,2	0,65

### Полупроводниковый стабилитрон

Это полупроводниковый диод, сконструированный для работы в режиме электрического пробоя. Условное графическое обозначение стабилитрона представлено на рисунке 13.

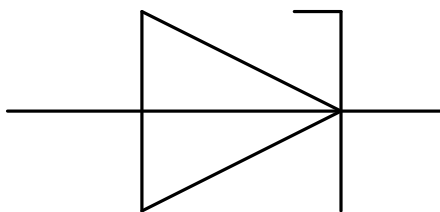


Рисунок 13 – Условное графическое обозначение стабилитрона

В указанном режиме при значительном изменении тока стабилитрона напряжение изменяется незначительно. Говорят, что стабилитрон стабилизирует напряжение.

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

Основными являются следующие параметры стабилитрона:

$U_{\text{ст}}$  – напряжение стабилизации (при заданном токе в режиме пробоя);  
 $I_{\text{ст.мин}}$  – минимально допустимый ток стабилизации;  
 $I_{\text{ст.макс}}$  – максимально допустимый ток стабилизации;  
 $r_{\text{ст}}$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона (на участке пробоя),  $r_{\text{ст}} = \frac{du}{di}$ ;

$\alpha_{U_{\text{ст}}}$  (ТКН) – температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Величины  $U_{\text{ст}}$ ,  $I_{\text{ст.мин}}$  и  $I_{\text{ст.макс}}$  принято указывать как положительные.

Не рекомендуется использовать стабилитрон при обратном токе, меньшем по модулю, чем  $I_{\text{ст.мин}}$ , так как стабилизация напряжения при этом будет неудовлетворительной (дифференциальное сопротивление будет чрезмерно большим). Если же обратный ток по модулю превысит  $I_{\text{ст.макс}}$ , то стабилитрон может перегреться, начнется тепловой пробой и прибор выйдет из строя. Чем меньше величина  $r_{\text{ст}}$ , тем лучше стабилизация напряжения.

По определению  $\alpha_{U_{\text{ст}}}$  – это отношение относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды при постоянном токе стабилизации.

У стабилитронов с туннельным пробоем коэффициент  $\alpha_{U_{\text{ст}}}$  отрицателен:  $\alpha_{U_{\text{ст}}} < 0$ . У стабилитронов с лавинным пробоем  $\alpha_{U_{\text{ст}}}$  положителен:  $\alpha_{U_{\text{ст}}} > 0$ .

Иногда стабилитрон с лавинным пробоем включают последовательно с диодом, работающим в прямом направлении. У диода соответствующий температурный коэффициент отрицательный, и он компенсирует положительный коэффициент стабилитрона. Промышленно выпускаются стабилитроны с включенным термостабилизирующим диодом.

В режиме пробоя отсутствует инжекция неосновных носителей, и поэтому нет накопления избыточных зарядов. Вследствие этого стабилитрон является быстродействующим прибором и хорошо работает в импульсных схемах.

*Задача:*

1. В соответствие с исходными данными выбрать стабилитрон. Принципиальная схема параметрического стабилизатора представлена на рисунке 14. Исходные данные представлены в таблице 6.
2. Выбрать балластное сопротивление  $R_6$ .
3. Уточнить балластное сопротивление по ряду E24.
4. Рассчитать мощности на стабилитроне, на балластном сопротивлении и КПД стабилизатора.
5. Рассчитать коэффициент стабилизации.
6. Построить ВАХ стабилизатора.
7. Выполнить проверочный расчет.

Дано:  $U_{\text{н.ном}} = 24 \text{ В}$ ,  $\Delta U_1 = 2 \text{ В}$ ,  $I_{\text{н.ном}} = 40 \text{ мА}$ ,  $U_{2\text{ном}} = 19 \text{ В}$ .

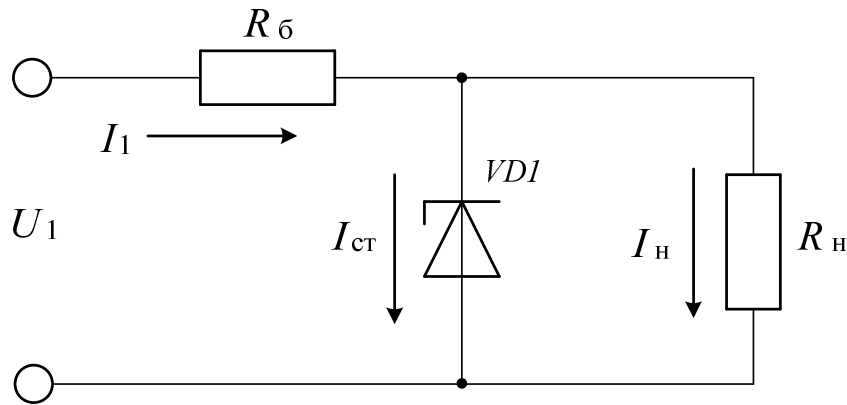


Рисунок 14– Принципиальная схема параметрического стабилизатора напряжения

*Решение:* Руководствуясь исходными данными по справочнику выбираем стабилитрон с  $U_{ст.ном} \approx U_{2,ном}$ . Выбрали стабилитрон типа КС518А со следующими паспортными данными:

$$U_{ст.мин} = 17,2 \text{ В}, U_{ст.макс} = 20,8 \text{ В}, I_{ст.мин} = 0,001 \text{ А}, I_{ст.макс} = 0,045 \text{ А}.$$

Определяем сопротивление нагрузки:

$$R_н = \frac{U_{2,ном}}{I_{н,ном}} = \frac{19}{0,04} = 475 \text{ Ом}.$$

Ток и напряжение в цепи параметрического стабилизатора:

$$I_1 = I_{ст} + I_н; U_1 = I_1 \cdot R_б + U_{ст.ном}.$$

Основная задача при расчете параметрического стабилизатора – определение сопротивления балластного резистора, обеспечивающего при заданных параметрах нагрузки и питающей режим работы стабилитрона в пределах рабочей зоны.

Составим систему неравенств для определения балластного сопротивления:

$$\begin{cases} U_1 - \Delta U_1 \geq I_{1min} \cdot R_б + U_{ст.мин} \\ U_1 + \Delta U_1 \leq I_{1max} \cdot R_б + U_{ст.макс} \end{cases},$$

где

$$I_{1min} = I_{ст.мин} + \frac{U_{ст.мин}}{R_н} = 0,001 + \frac{17,2}{475} = 0,0372 \text{ А},$$

$$I_{1max} = I_{ст.макс} + \frac{U_{ст.макс}}{R_н} = 0,045 + \frac{20,8}{475} = 0,089 \text{ А}.$$

Тогда

$$\begin{cases} R_6 \leq \frac{U_1 - \Delta U_1 - U_{cm.min}}{I_{1min}} = \frac{24 - 3 - 17,2}{0,0372} = 102,15 \\ R_6 \geq \frac{U_1 + \Delta U_1 - U_{cm.max}}{I_{1max}} = \frac{24 + 3 - 20,8}{0,089} = 69,66 \end{cases}.$$

$$69,66 \leq R_6 \leq 102,15.$$

Уточняем по ряду E24 балластное сопротивление стабилитрона:

$$R_6 = 82 \text{ Ом.}$$

Определяем параметры стабилизатора в соответствии с выбранным балластным сопротивлением. В номинальном режиме:

$$R_H = 475 \text{ Ом, } I_H = 0,04 \text{ А, } U_H = 19 \text{ В.}$$

Мощность, потребляемая от сети питания:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1, \text{ где } I_1 = \frac{U_1 - U_2}{R_6} = \frac{24 - 19}{82} = 0,061 \text{ А,}$$

$$U_2 = I_H \cdot U_H = 0,039 \cdot 475 = 18,6 \text{ В,}$$

$$P_1 = 24 \cdot 0,061 = 1,464 \text{ Вт.}$$

Мощность, передаваемая нагрузке:

$$P_H = U_H \cdot I_{H.ном} = 19 \cdot 0,04 = 0,76 \text{ Вт}$$

КПД параметрического стабилизатора:

$$\eta = \frac{P_H}{P_1} \cdot 100\% = \frac{0,76}{1,464} \cdot 100\% = 0,519 \cdot 100\% = 51,9\%.$$

Коэффициент стабилизации:

$$k_{ст} = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_{ст}} = \frac{3}{1,8} = 1,67.$$

Для выполнения проверочного расчета проведем линеаризацию ВАХ стабилитрона на рабочем участке, заменив в принципиальной схеме стабилизатора стабилитрон на последовательно включенные  $R_{ст.дин}$  и  $U_2^*$ . Составляем схему замещения (рисунок 15):

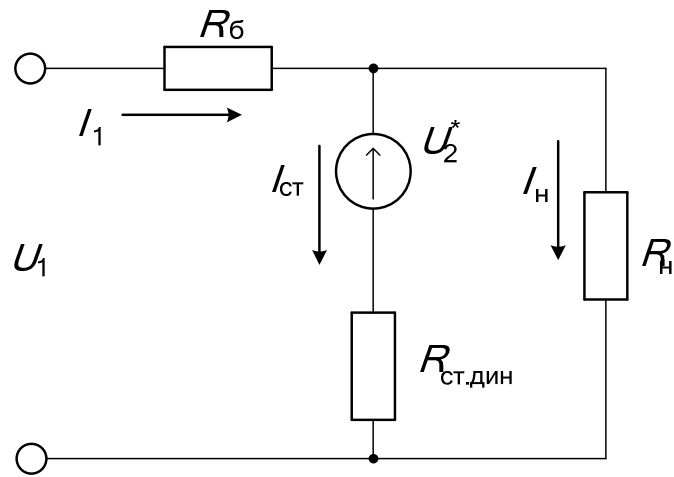


Рисунок 15 – Схема замещения

Строим ВАХ:

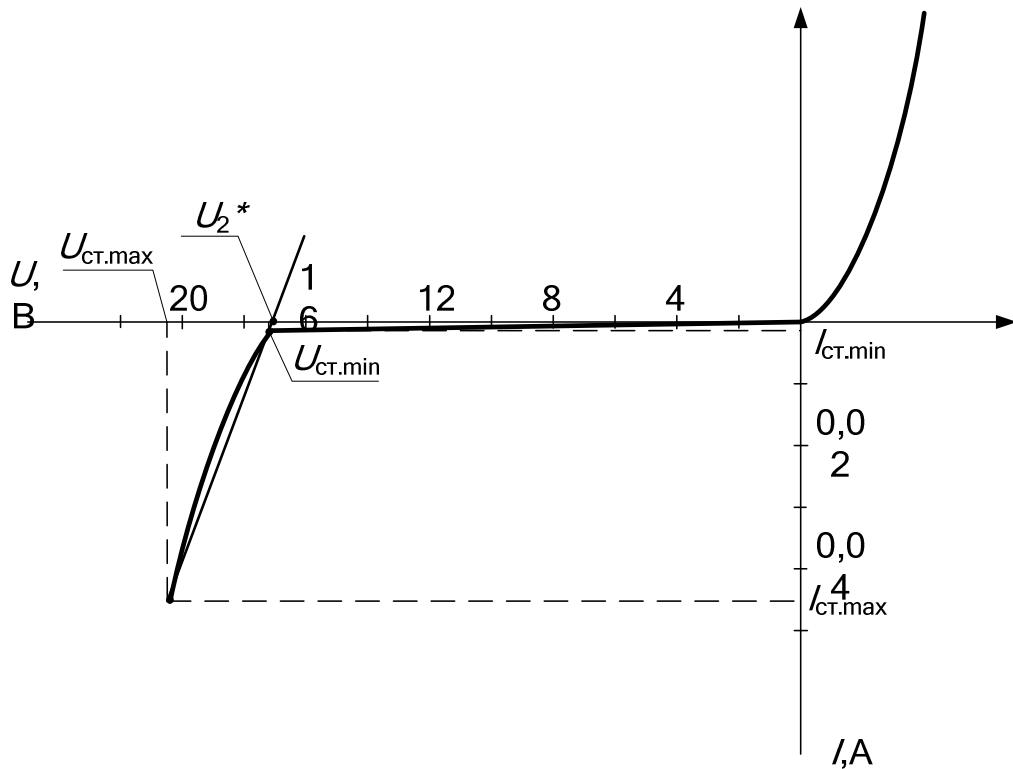


Рисунок 16 – Вольтамперная характеристика выбранного стабилизатора

По построенной ВАХ (рисунок 16) определяем величину  $U_2^*$  необходимую для определения параметров схемы замещения:

Рассчитаем  $R_{ст.дин}$  и  $tg\alpha$ :

$$R_{дин} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = tg\alpha = \frac{3,6}{0,044} = 81,82 \text{ Ом},$$

$$U_2^* = U_{ст.маx} - (U_{ст.маx} \cdot tg\alpha) = 20,8 - (0,045 \cdot 81,82) = 17,12 \text{ В}.$$

*Проверочный расчет.*

По законам Кирхгофа составим систему уравнений.

Найдем параметры схемы замещения, при  $U_{\text{ном}}$ :

$$\begin{cases} I_1 \cdot R_{\text{б}} + I_{\text{ст}} \cdot R_{\text{ст.дин}} = U_1 - U_2^* \\ I_1 \cdot R_{\text{б}} + I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = U_1 \\ I_1 - I_{\text{ст}} - I_{\text{н}} = 0 \end{cases}$$

Составим матричное уравнение и найдем значения токов:

$$\begin{pmatrix} 82 & 81,82 & 0 \\ 82 & 0 & 475 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6,88 \\ 24 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$X = A^{-1} \cdot B$$

Решение матричного уравнения:

$$I_1 = 0,061 \text{ A},$$

$$I_{\text{ст}} = 0,022 \text{ A},$$

$$I_{\text{н}} = 0,039 \text{ A}.$$

Определяем напряжение на нагрузке при номинальном заданном входном напряжении:

$$U_2 = I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = 0,022 \cdot 475 = 10,53 \text{ В}.$$

Составляем уравнения по закону Кирхгофа для входного напряжения  $U_{\text{ном}} - \Delta U_1$ :

$$\begin{cases} I_1 \cdot R_{\text{б}} + I_{\text{ст}} \cdot R_{\text{ст.дин}} = (U_1 - \Delta U_1) - U_2^* \\ I_1 \cdot R_{\text{б}} + I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = U_1 - \Delta U_1 \\ I_1 - I_{\text{ст}} - I_{\text{н}} = 0 \end{cases}$$

Запишем в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 82 & 81,82 & 0 \\ 82 & 0 & 475 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,88 \\ 21 \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$X = A^{-1} \cdot B$$

Решение матричного уравнения:

$$I_1 = 0,42 \text{ A},$$



$$I_{\text{ст}} = 0,0047 \text{ А},$$

$$I_{\text{н}} = 0,037 \text{ А},$$

Определяем напряжение на нагрузке при минимальном заданном входном напряжении:

$$U_2 = I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = 0,037 \cdot 475 = 17,6 \text{ В}.$$

Составляем уравнения по закону Кирхгофа для  $U_{I_{\text{ном}}} + \Delta U_1$ :

$$\begin{cases} I_1 \cdot R_6 + I_{\text{ст}} \cdot R_{\text{ст.дин}} = (U_1 + \Delta U_1) - U_2^* \\ I_1 \cdot R_6 + I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = U_1 + \Delta U_1 \\ I_1 - I_{\text{ст}} - I_{\text{н}} = 0 \end{cases}$$

Запишем в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} 82 & 81,82 & 0 \\ 82 & 0 & 475 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9,8 \\ 27 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$X = A^{-1} \cdot B$$

Решение матричного уравнения:

$$I_1 = 0,084 \text{ А},$$

$$I_{\text{ст}} = 0,041 \text{ А},$$

$$I_{\text{н}} = 0,043 \text{ А},$$

Определяем напряжение на нагрузке при максимальном заданном входном напряжении:

$$U_2 = I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = 0,043 \cdot 475 = 20,4 \text{ В}.$$

Так как в результате проверочного расчета ток через стабилитрон при максимальном входном напряжении не превышает максимальное паспортное значение тока через стабилитрон и ток через стабилитрон при минимальном входном напряжении превышает минимальное паспортное значение тока через стабилитрон выбор стабилитрона и балластного сопротивления верный. Наносим на ВАХ расчетные точки при трех значениях входного напряжения. Расчет окончен.

Символ столбца	А		В	С
Номер строки	$U_{1\text{ном}}, \text{В}$	$U_{2\text{ном}}, \text{В}$	$\Delta U_1, \text{В}$	$I_{\text{н.ном}}, \text{мА}$
0	12	8	2	45
1	9	5	3	41
2	41	37	2	37
3	11	7	3	42
4	31	26	2	40
5	26	22	3	39
6	18	14	2	36
7	10	5	3	35
8	24	19	2	37
9	15	12	3	44

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.Р. Залялеев, В.М. Скрипников. – Микроэлектронные устройства систем управления. Аналоговые устройства управления. Красноярск, 1986 г.
2. Ю.А. Браммер, И.Н. Пащук. Импульсные и цифровые устройства. – М.: Высшая школа, 2002 г.
3. С.Г. Калашников. Электричество. – М.: Физматлит, 2003 г.
4. Н.В. Бурбаева, Т.С. Днепровская. Сборник задач по полупроводниковой электронике. – М.: Физматлит, 2006 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Общие сведения	4
1. Полупроводниковые диоды	5
2. Полупроводниковый стабилитрон	19
Список литературы	27