

режиме прибор может работать неограниченно долго. Предельно допустимая рассеиваемая мощность для стабилитронов малой мощности может составлять от 100 мВт, а для стабилитронов большой мощности – до 8 Вт.

Иногда для стабилизации напряжения используют тот факт, что прямое падение напряжения на диоде слабо зависит от силы протекающего через  $p$ - $n$ -переход тока. Приборы, в которых используется этот эффект, в отличие от стабилитронов называются стабисторами. В области прямого смещения падение напряжения на  $p$ - $n$ -переходе составляет, как правило, 0,7 В ... 2 В, поэтому, стабисторы позволяют стабилизировать только малые напряжения (не более 2 В). Для ограничения тока через стабистор последовательно с ним также включают балластный резистор.

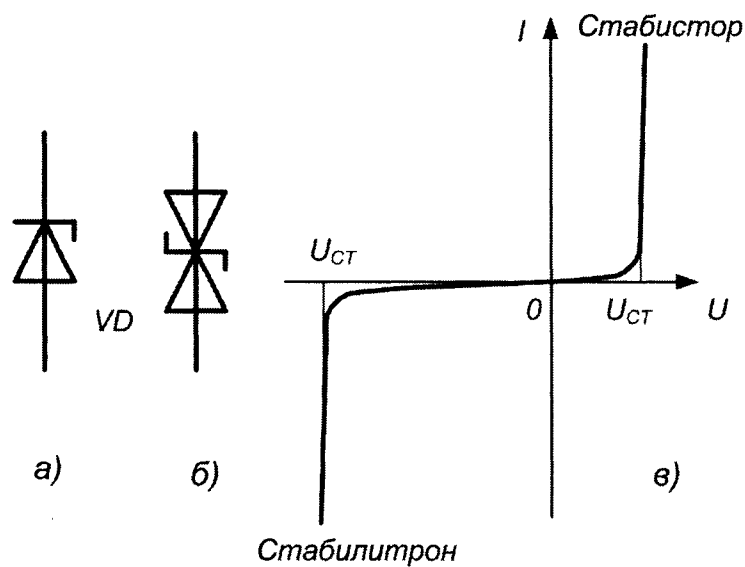


Рис. 4.1. Схематическое изображение стабилитронов (а – односторонний, б – двухсторонний) и их ВАХ (в):  
 $U_{СТ}$  – напряжение стабилизации

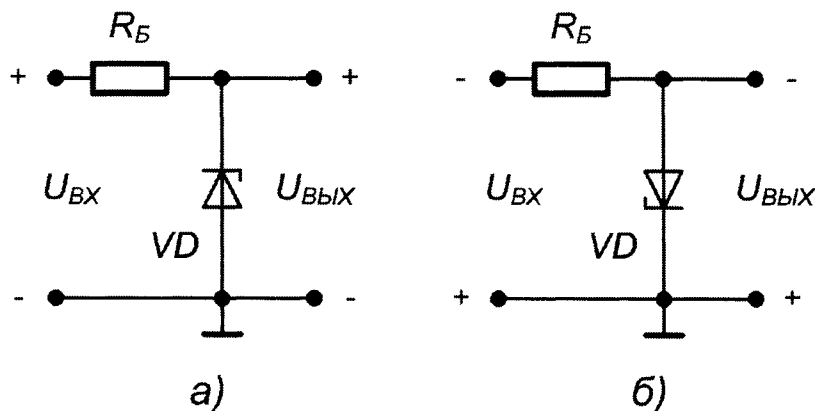


Рис. 4.2. Схема включения стабилитрона для стабилизации положительного (а) и отрицательного (б) напряжения

Дифференциальное сопротивление стабилитрона – это параметр, который характеризует наклон его вольтамперной характеристики в области пробоя. На рис.4.3 показан линеаризованный участок ВАХ стабилитрона, который позволяет определить дифференциальное сопротивление прибора:

$$r_d = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}. \quad (4.1)$$

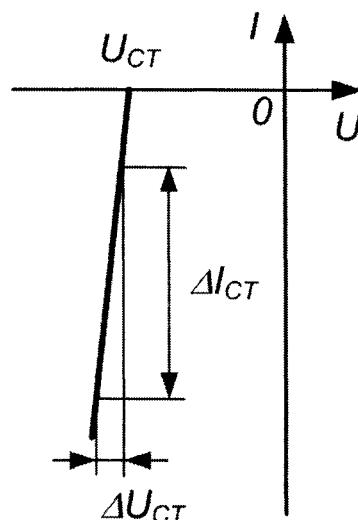


Рис. 4.3. Линеаризованная характеристика стабилитрона

### Параметрический стабилизатор напряжения

Типовая схема параметрического стабилизатора напряжения, выполненного на стабилитроне, приведена на рис.4.4.

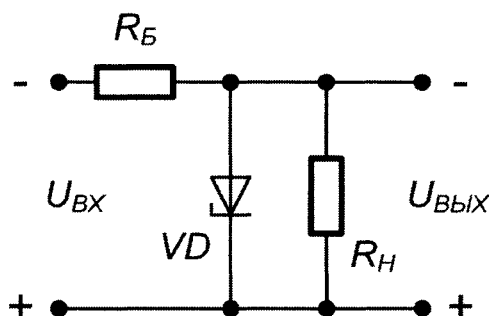


Рис. 4.4. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Это параллельная схема стабилизации. Входное напряжение  $U_{BX}$  через балластный резистор  $R_B$  подается на параллельно включенные стабилитрон  $VD$  и сопротивление нагрузки  $R_H$ . Рабочим участком ВАХ стабилитрона является ее обратная ветвь в области электрического лавинного пробоя. При работе в этой области обратное напряжение на стабилитроне изменяется незначительно при относительно больших изменениях тока стабилитрона. Так как сопротивление нагрузки включено параллельно ста-

билитрону, напряжение на нем также меняется незначительно.

Если входное напряжение, например, увеличится, то практически все его приращение  $\Delta U_{ВХ}$  будет приложено к балластному резистору, что приведет к увеличению тока через него. Это увеличение тока происходит за счет увеличения тока стабилитрона при почти неизменном токе через сопротивление нагрузки.

Схему параметрического стабилизатора можно рассматривать как последовательное включение двух элементов, один из которых балластный резистор  $R_B$ , а второй – параллельно соединенные стабилитрон  $VD$  и сопротивление нагрузки  $R_H$ . Для анализа работы такой схемы удобно использовать метод пересечения вольтамперных характеристик. В основу данного метода положено предположение о том, что суммарное напряжение на последовательно включенных элементах определяется внешним источником и не зависит от тока, протекающего в цепи. При известных ВАХ элементов ток, протекающий в цепи, может быть легко найден графически. Для этого нужно построить ВАХ обоих элементов. При этом для одного из элементов ВАХ зеркально отражают относительно оси токов, а ее начало сдвигают по оси напряжений на величину, равную входному напряжению.

На рис.4.5 кривая 1 представляет собой ВАХ стабилитрона и сопротивления нагрузки, соединенных параллельно.

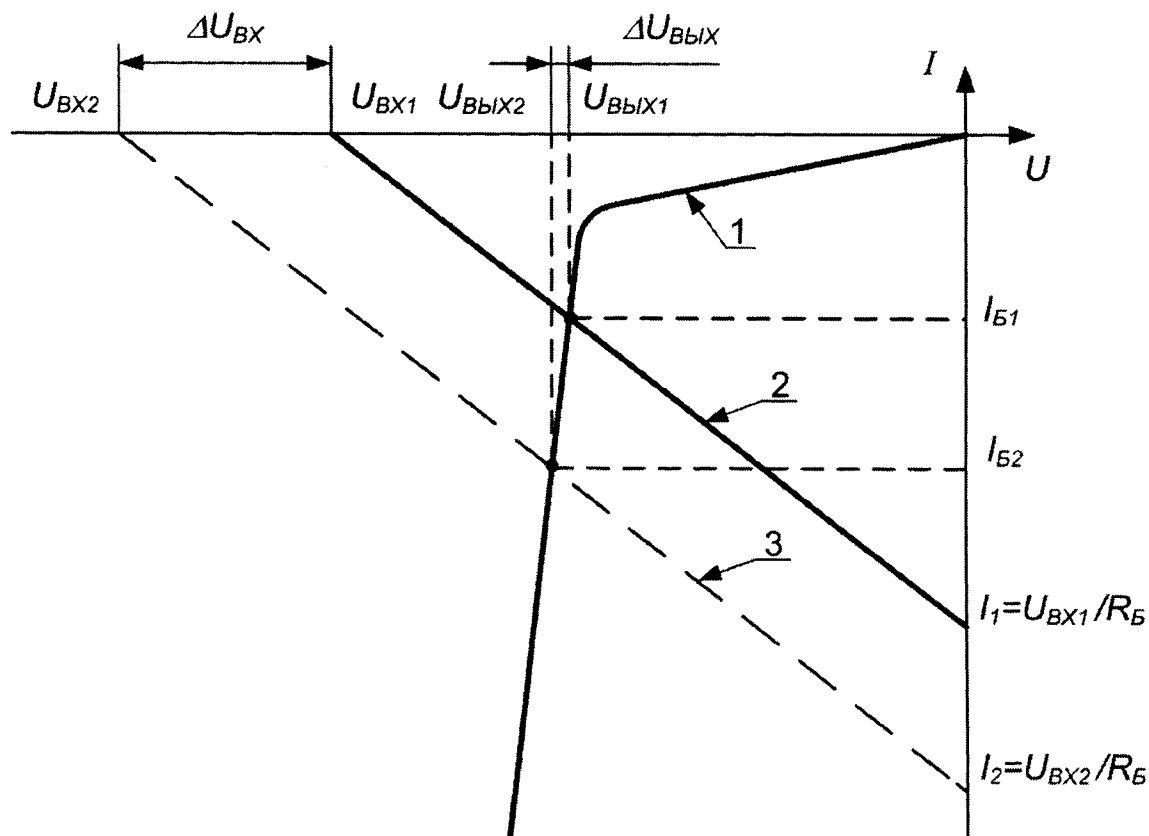


Рис. 4.5. ВАХ параметрического стабилизатора напряжения

Линия 2 на этом рисунке представляет собой перевернутую ВАХ балластного резистора, которую принято называть нагрузочной характеристикой. Она проходит через две точки, одна из которых лежит на оси напряжений  $U = U_{BX1}$ , а другая – на оси токов  $I_I = U_{BX1}/R_B$ . Пересечение характеристик дает рабочую точку схемы параметрического стабилизатора, что позволяет найти выходное напряжение  $U_{ВЫХ1}$  и ток  $I_{Б1}$ , протекающий через балластный резистор  $R_B$ . При этом следует помнить, что  $I_{Б1} = I_H + I_{СТ}$ , т.е. перераспределяется между сопротивлением нагрузки ( $I_H = U_{ВЫХ}/R_H$ ) и стабилитроном ( $I_{СТ} = I_B - I_H$ ).

Если входное напряжение схемы изменится и станет равным  $U_{BX2}$ , это приведет к изменению положения ВАХ балластного резистора (пунктирная линия 3 на рис.4.5). Рабочая точка схемы сместится, что приведет к изменению режима работы параметрического стабилизатора. Очевидно, что вследствие нелинейности ВАХ стабилитрона изменению входного напряжения будет соответствовать существенно меньшее изменение выходного напряжения схемы ( $\Delta U_{ВЫХ} \ll \Delta U_{ВХ}$ ).

Важным параметром стабилизатора напряжения является коэффициент стабилизации, определяемый как отношение относительного изменения входного напряжения к вызванному им относительному изменению выходного напряжения:

$$K_U = (\Delta U_{ВХ}/U_{ВХ}) / (\Delta U_{ВЫХ}/U_{ВЫХ}), \quad (4.2)$$

где  $U_{ВХ} = (U_{ВХ1} + U_{ВХ2})/2$ ,  
 $U_{ВЫХ} = (U_{ВЫХ1} + U_{ВЫХ2})/2$ .

Для оценки коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора напряжения сделаем предположение, что  $\Delta U_{ВХ} \gg \Delta U_{ВЫХ}$  и  $R_H = \text{const}$ .

Тогда можно записать соотношения:

$$\Delta I_{ВХ} = \Delta U_{ВХ}/R_B, \quad (4.3)$$

$$\Delta U_{ВЫХ} = \Delta I_{ВХ} \cdot r_D, \quad (4.4)$$

где  $r_D$  – дифференциальное сопротивление стабилитрона, определяемое выражением (4.1).

Из выражений (4.3) и (4.4) следует:

$$\Delta U_{ВЫХ}/\Delta U_{ВХ} = (\Delta I_{ВХ} \cdot r_D) / (\Delta I_{ВХ} \cdot R_B) = r_D / R_B. \quad (4.5)$$

Подставив полученные соотношения в выражение (4.2), получим:

$$K_U = (\Delta U_{ВХ}/U_{ВХ}) / (\Delta U_{ВЫХ}/U_{ВЫХ}) = (U_{ВЫХ} \cdot R_B) / (U_{ВХ} \cdot r_D), \quad (4.6)$$

Типовая величина коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора составляет:  $K_U = 10 - 30$ .

Расчет схемы параметрического стабилизатора сводится к расчету сопротивления балластного резистора при заданных изменениях входного напряжения при условии  $I_{CT.min} \leq I_{CT} \leq I_{CT.max}$  с помощью соотношений:

$$(U_{BX.min} - U_{ВЫХ}) / R_B = U_{ВЫХ} / R_{H.min} - I_{CT.min} \quad (4.7)$$

$$(U_{BX.max} - U_{ВЫХ}) / R_B = U_{ВЫХ} / R_{H.max} - I_{CT.max} \quad (4.8)$$

### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

В состав лабораторного стенда входят:

- базовый лабораторный стенд;
- лабораторный модуль М3.

### 4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Подготовьте шаблон отчета в редакторе MS Word.

Установите ключ в разъем модуля М3 лабораторного стенда. Внешний вид модуля показан на рис.4.6.

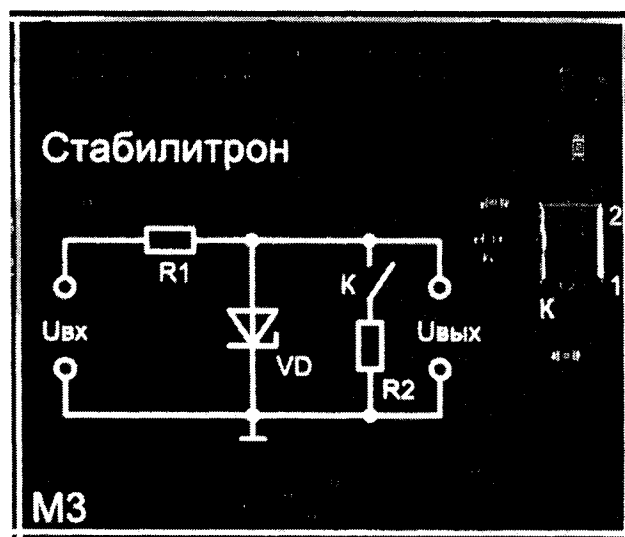


Рис. 4.6. Внешний вид модуля М3

Загрузите и запустите программу Lab4(M3).vi. На экране появится изображение лицевой панели ВП (рис.4.7), необходимого для выполнения лабораторных заданий.

#### Задание 1. Исследование вольтамперной характеристики стабилитрона

4.1.1. Установите переключатель «К» модуля М3 в положение «1».

4.1.2. Постройте ВАХ стабилитрона. Для этого с помощью элемен-

тов управления  $U_{BX.min}$  и  $U_{BX.max}$  на лицевой панели ВП установите диапазон изменения напряжения входного сигнала от  $-10$  В до  $4$  В, и нажмите кнопку «Измерение». ВП выполнит серию измерений и на его графическом индикаторе будет построена ВАХ стабилитрона. Скопируйте полученную ВАХ в отчет.

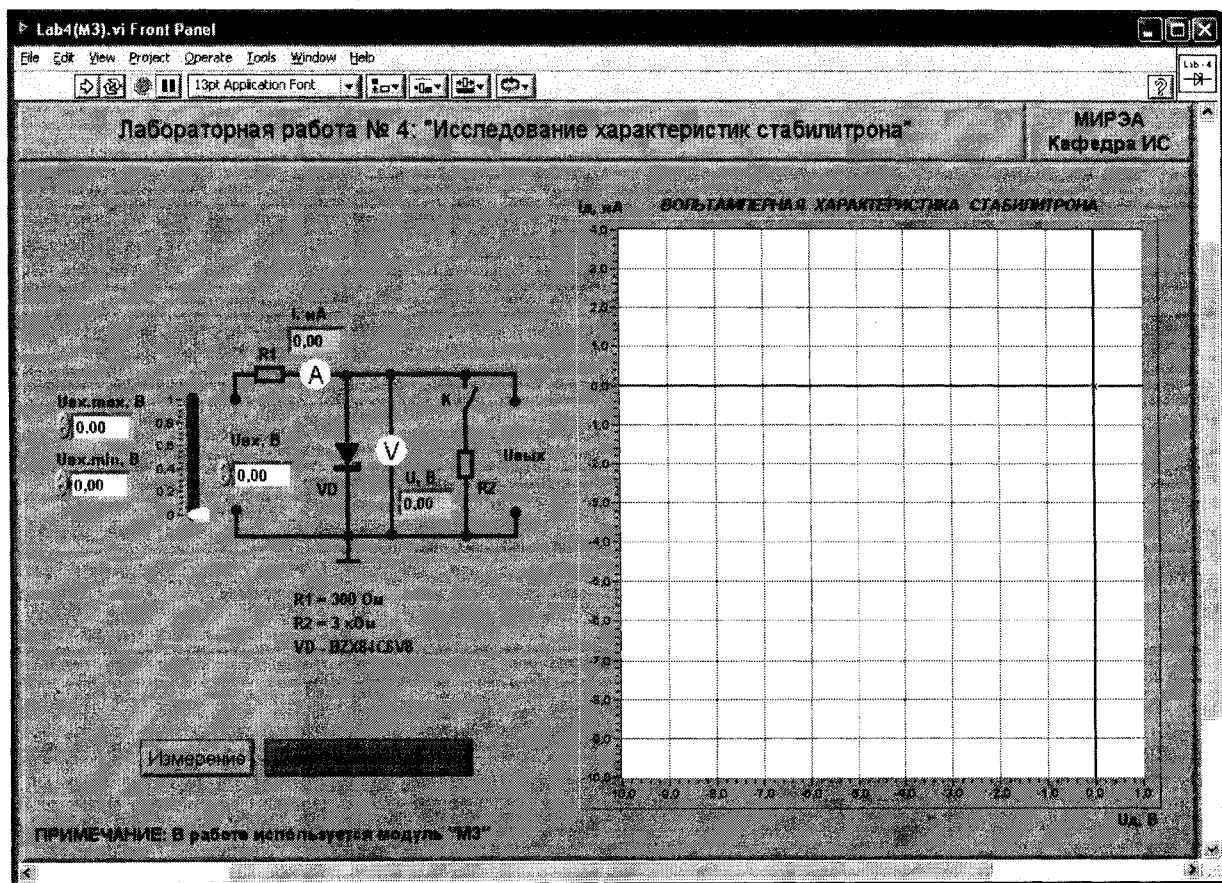


Рис. 4.7. Лицевая панель ВП

4.1.3. Определите напряжение стабилизации стабилитрона. Для этого, изменяя напряжение на входе схемы с помощью ползункового регулятора, установите ток через стабилитрон примерно равным  $I_{CT} = -5$  мА. Показание вольтметра  $U$ , соответствующее падению напряжения на стабилитроне, запишите в отчет. Сравните полученное значение со справочными данными.

4.1.4. Для определения дифференциального сопротивления стабилитрона установите с помощью ползункового регулятора ток через стабилитрон сначала примерно равным  $-2$  мА, а затем примерно равным  $-8$  мА. Запишите в отчет показания амперметра  $I$  и вольтметра  $U$ .

4.1.5. Рассчитайте дифференциальное сопротивление стабилитрона по формуле  $r_D = \Delta U_{CT} / \Delta I_{CT}$ . Сравните полученное значение со справочными данными. Выводы и результаты запишите в отчет.

## **Задание 2. Исследование работы параметрического стабилизатора напряжения**

4.2.1. Установите переключатель «К» модуля **М2** в положение «2». При этом параллельно стабилитрону будет подключено сопротивление нагрузки величиной 3 кОм.

4.2.2. Постройте ВАХ участка схемы, состоящей из параллельно соединенных стабилитрона и сопротивления нагрузки. Для этого с помощью элементов управления  $U_{BX.min}$  и  $U_{BX.max}$  на лицевой панели ВП установите диапазон изменения входного напряжения от  $-10$  В до  $4$  В и нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Измерение». ВП выполнит серию измерений и на его графическом индикаторе будет построена вольтамперная характеристика. Скопируйте полученную ВАХ в отчет.

4.2.3. С помощью ползункового регулятора установите на входе стабилизатора напряжение  $U_{BX}$  примерно равное  $-8$  В. Запишите в отчет значения тока  $I$ , протекающего через балластный резистор, и величину выходного напряжения  $U$ .

4.2.4. С помощью ползункового регулятора установите на входе стабилизатора напряжение  $U_{BX}$  примерно равное  $-9$  В. Запишите в отчет значения тока  $I$ , протекающего через балластный резистор, и величину выходного напряжения  $U$ .

4.2.5. Рассчитайте коэффициент стабилизации по формулам (4.2) и (4.6), используя величины токов и напряжений, измеренные в пп. 4.2.3 и 4.2.4. При расчетах используйте значение дифференциального сопротивления стабилитрона, полученное при выполнении п.4.1.5. Сравните полученные разными способами значения коэффициента стабилизации. Выводы и результаты запишите в отчет.

4.2.6. Выключите ВП, для чего нажмите на лицевой панели ВП кнопку «Завершение работы».

## **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- Для каких целей применяются стабилитроны? Какая ветвь ВАХ стабилитрона является рабочей?
- Что такое стабисторы?
- Чем стабисторы отличается от стабилитронов?
- Можно ли включать стабилитроны последовательно? параллельно? Какие дополнительные качества можно при этом получить?
- Какие существуют способы термокомпенсации параметров стабилитрона?
- Приведите схему параметрического стабилизатора напряжения и опишите его работу.
- Как определить коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРА

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование вольтамперной характеристики тиристора и определение его параметров.

## 2. СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Тиристором называется полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три (или более)  $p$ - $n$ -перехода. Тиристор может переключаться из закрытого состояния в открытое и наоборот. Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Диодный тиристор называют *динистором*. Для коммутации цепей переменного тока разработаны специальные симметричные тиристоры – *симисторы*.

**Динистор** – это двухэлектродный прибор диодного типа, имеющий три  $p$ - $n$ -перехода. Крайняя  $p$ -область называется анодом, а другая крайняя  $n$ -область – катодом. Структура динистора приведена на рис.5.1, а, на котором  $p$ - $n$ -переходы обозначены как  $J_1$ ,  $J_2$  и  $J_3$ . Условное графическое изображение динистора показано на рис.5.1, б.

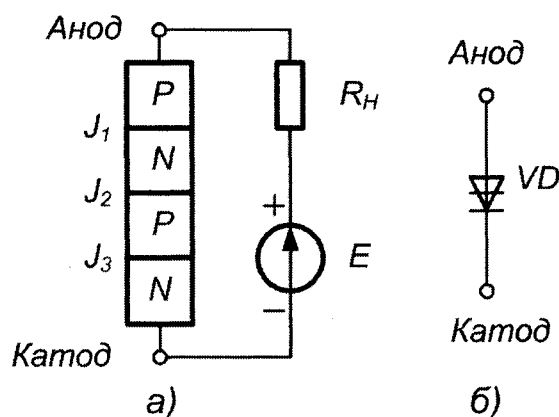


Рис. 5.1. Структура динистора (а) и его условное графическое изображение (б)

Схему замещения динистора можно представить в виде двух триодных структур, соединенных между собой. Деление динистора на составляющие транзисторы и схема замещения приведены на рис.5.2.

При таком соединении коллекторный ток первого транзистора является током базы второго, а коллекторный ток второго транзистора является током базы первого. Благодаря такому соединению внутри прибора возникает положительная обратная связь.



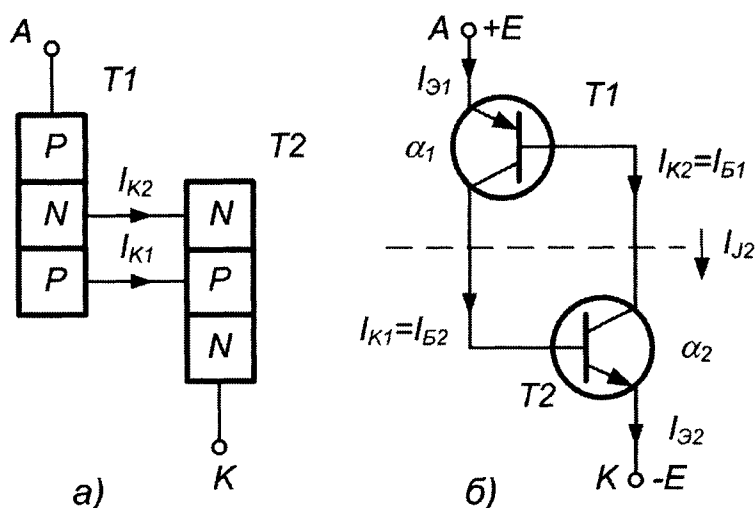


Рис. 5.2. Деление динистора на две структуры (а) и схема замещения (б)

Если на анод подано положительное напряжение по отношению к катоду, то переходы  $J_1$  и  $J_3$  (рис.5.1, а) будут смещены в прямом направлении, а переход  $J_2$  – в обратном. В результате всё напряжение источника  $E$  будет приложено к переходу  $J_2$ .

Пусть коэффициенты передачи по току эмиттера транзисторов  $T1$  и  $T2$  имеют значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Тогда согласно схеме замещения (рис.5.2, б) ток через тиристор, равен сумме токов коллекторов обоих транзисторов и тока утечки  $I_{K0}$ :

$$I = \alpha_1 I_{Э1} + \alpha_2 I_{Э2} + I_{K0}. \quad (5.1)$$

Ток во внешней цепи равен  $I = I_{Э1} = I_{Э2}$ . После подстановки  $I$  в (5.1) можно записать:  $I(1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_{K0}$ . Отсюда получаем величину  $I$ :

$$I = \frac{I_{K0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (5.2)$$

До тех пор, пока выполняется условие  $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$ , ток в динисторе будет равен  $I_{K0}$ . При соотношении  $(\alpha_1 + \alpha_2) > 1$  динистор включается и начинает проводить ток. Это и есть условие включения динистора.

Для увеличения коэффициентов передачи тока  $\alpha_1$  или  $\alpha_2$  в динисторе нужно увеличить напряжение на его аноде. При выполнении условия  $U = U_{ВКЛ}$  один из транзисторов перейдет в режим насыщения. Коллекторный ток этого транзистора, протекая в цепи базы второго транзистора, откроет его, а последний, в свою очередь, увеличит ток базы первого. В результате коллекторные токи транзисторов будут лавинообразно нарастать, пока оба транзистора не перейдут в режим насыщения. После включения транзисторов ток  $I$  будет ограничиваться только сопротивлением внешней цепи.

На рис.5.3, а приведена вольтамперная характеристика динистора, а на рис.5.3, б – схема его включения. На рисунках использованы следующие

щие обозначения:  $U_{ВКЛ}$  — напряжение включения динистора,  $U_{ПР}$  — падение напряжения на открытом динисторе,  $I_H$  — ток нагрузки,  $I_{ВЫКЛ}$  — ток выключения динистора,  $VD$  — полупроводниковый диод,  $VS$  — динистор,  $R_H$  — сопротивление нагрузки,  $R$  — ограничивающее сопротивление,  $C$  — разделительный конденсатор,  $U_{ПУСК}$  — управляющий импульс. Падение напряжения на открытом динисторе составляет около 2 В.

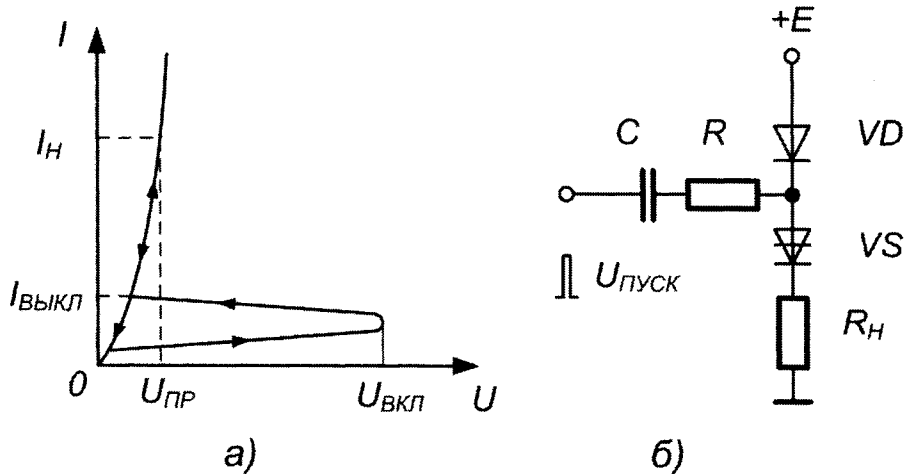


Рис. 5.3. Вольтамперная характеристика динистора (а) и схема его включения (б)

Выключить динистор можно, понизив ток в нем до значения  $I_{ВЫКЛ}$  или поменяв полярность напряжения на аноде. Различные способы выключения динистора показаны на рис.5.4.

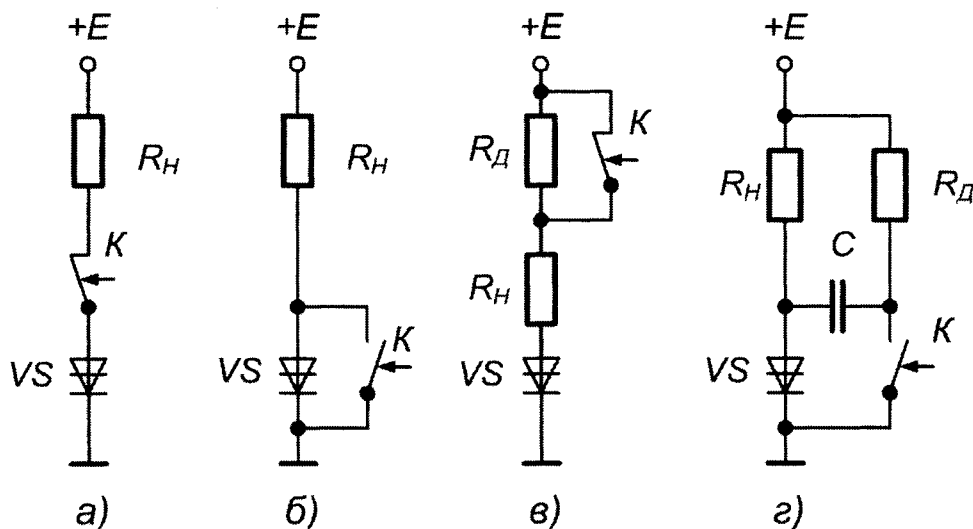


Рис. 5.4. Схемы выключения динистора: размыканием цепи (а), шунтированием прибора (б), снижением тока анода (в), подачей обратного напряжения (г)

В схеме а) при размыкании ключа  $K$  прерывается ток в цепи динистора. В схеме б) при замыкании ключа  $K$  падение напряжения на дини-

сторе уменьшается до нуля. В схеме *в*) при размыкании ключа *K* последовательно с нагрузкой  $R_H$  включается добавочный резистор  $R_D$ , в результате чего ток динистора понижается до значения  $I_{\text{выкл}}$ . В схеме *г*) при замыкании ключа *K* на анод динистора с конденсатора *C* подается напряжение обратной полярности.

**Тиристор** имеет структуру, аналогичную динистору, при этом одна из внутренних областей используется для управления. Если в базу одного из транзисторов (рис.5.2) подать ток управления, то его коэффициент передачи увеличится и произойдет включение тиристора.

В зависимости от расположения управляющего электрода (УЭ) различают тиристоры с катодным управлением и тиристоры с анодным управлением. Расположение этих управляющих электродов и условные обозначения соответствующих тиристоров приведены на рис.5.5.

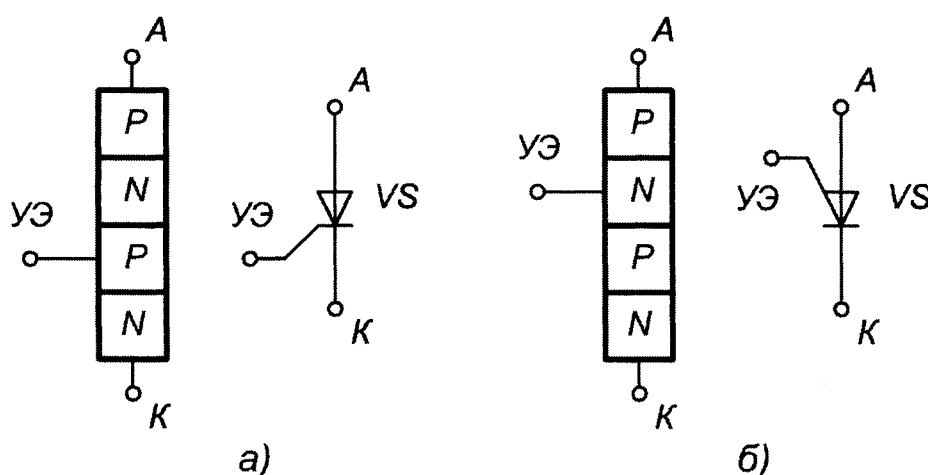


Рис. 5.5. Структура и условное графическое обозначение тиристора с катодным (а) и анодным (б) управлением

Существуют также запираемые тиристоры, особенность которых заключается в том, что при подаче сигнала на управляющий электрод тиристор переходит в закрытое состояние. Применение таких тиристоров ограничено из-за того, что ток управляющего электрода в момент выключения приближается по величине к основному коммутируемому току.

Схема включения и вольтамперная характеристика тиристора приведена на рис.5.6. Напряжение включения тиристора регулируется изменением тока в цепи управляющего электрода - при увеличении тока управления напряжение включения снижается. После включения управляющий электрод теряет управляющие свойства. Основные способы выключения тиристора такие же, как и для динистора.

К основным параметрам динисторов и тиристоров относятся:

- допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр}}$ ;
- падение напряжения в открытом состоянии  $U_{\text{пр}}$  при заданном прямом токе;