

# Тема 16. Выпрямители

## 1. Назначение и устройство выпрямителей

Выпрямители – это устройства, служащие для преобразования переменного тока в постоянный.

На рис. 1 представлена структурная схема выпрямителя, в состав которого входят:

- силовой трансформатор, служащий для преобразования (обычно понижения) переменного питающего напряжения;
- вентиль, обладающий односторонней проводимостью и обеспечивающий преобразование переменного тока в выпрямленный (ток одного направления);
- сглаживающий фильтр, который служит для преобразования выпрямленного тока в ток, близкий по форме к постоянному.

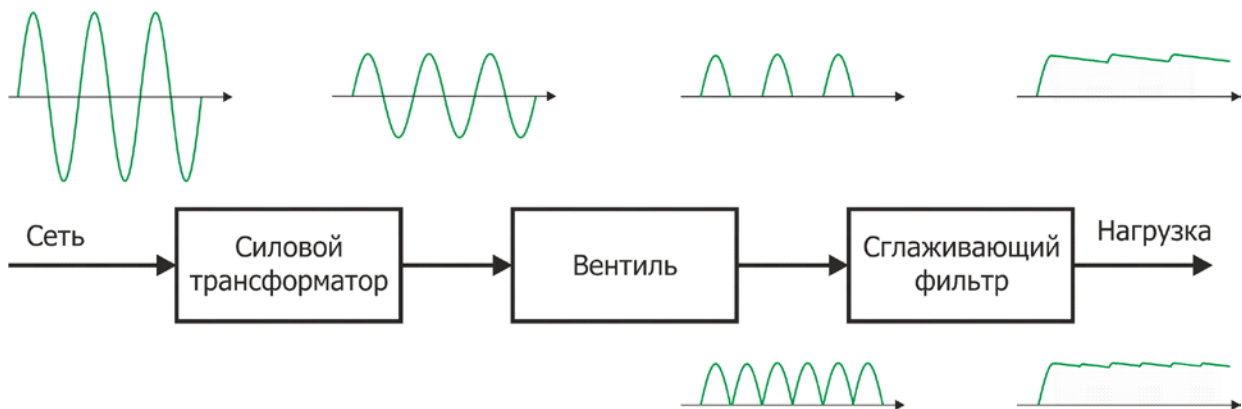


Рис. 1. Структурная схема выпрямителя с осциллограммами напряжений

Для преобразования переменного тока в постоянный служат электрические вентили различных типов: электронные (кенотроны), полупроводниковые (германиевые, кремниевые и др.), ионные (газотроны, тиратроны и др.).

Полупроводниковый вентиль (диод) характеризуется главным образом средним допустимым значением выпрямленного тока и амплитудой обратного напряжения.

**Среднее значение тока** определяет тепловой режим вентиля, так что повышение среднего значения тока поведет к перегреву вентиля.

**Амплитуда обратного напряжения** - это то наибольшее напряжение, которое может быть приложено к вентилю в обратном (непроводящем) направлении, не подвергая его опасности пробоя.

В выпрямителях вентили соединяют по определенным схемам.

## 2. Однополупериодный выпрямитель

На рис. 2 представлена схема однополупериодного выпрямителя.

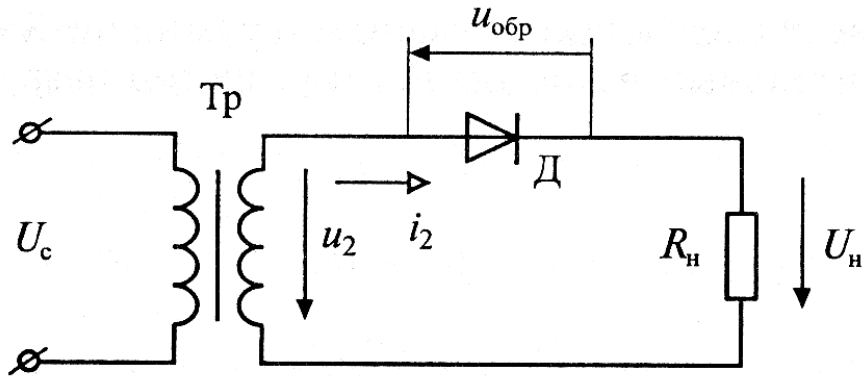


Рис. 2. Схема однополупериодного выпрямителя

Переменное синусоидальное напряжение  $u_2$  (рис. 3, а) подают на диод Д. За счет односторонней проводимости диодов ток  $i_2$  (рис. 3, б) проходит только в положительные полупериоды напряжения  $u_2$  и, следовательно, имеет импульсную форму. Постоянная составляющая этого тока  $I_0$  определяется средним значением тока  $i_2$ , проходящего через нагрузку  $R_H$  за полупериод.

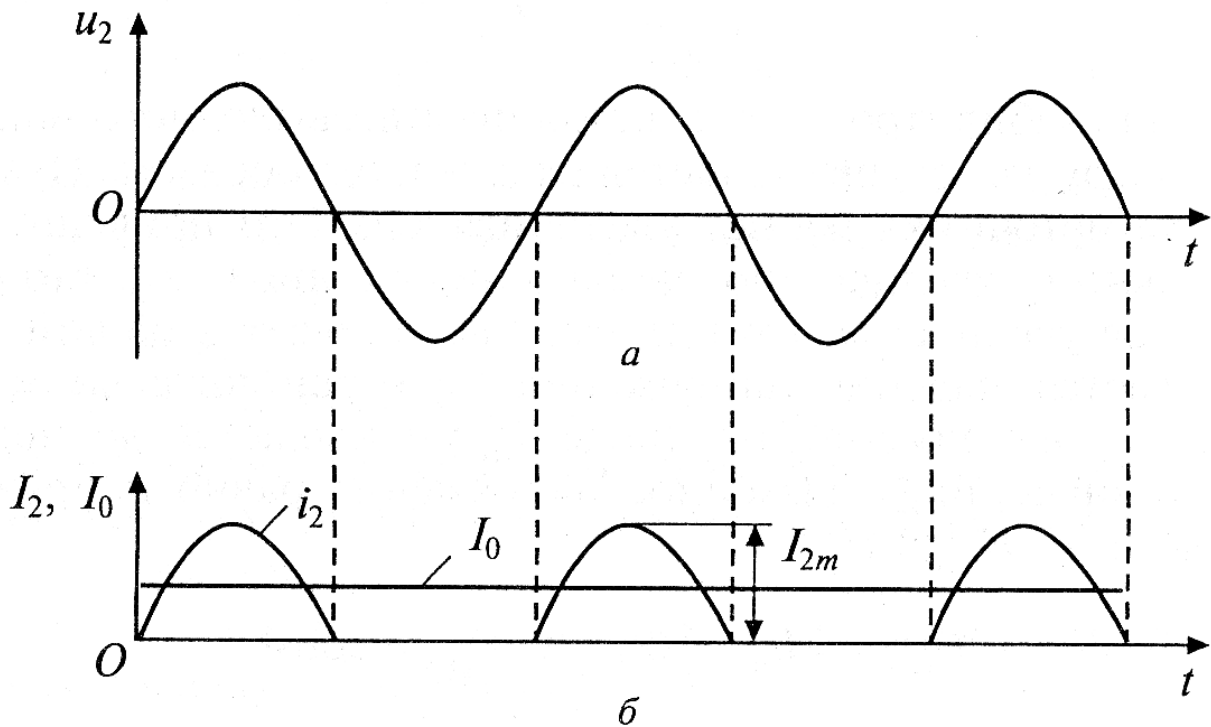


Рис. 3. Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора (а), выпрямленный ток  $i_2$ , постоянная составляющая тока  $I_0$  (б)

Средним значением тока  $i_2$  называется среднее арифметическое значение из всех мгновенных значений за полупериод:

$$I_0 = \int_0^{T/2} \frac{i_2 dt}{T} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{2m} \sin \omega t dt = -\frac{I_{2m}}{\omega T} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \Big|_0^{T/2} = -\frac{I_{2m} T}{2\pi T} \cdot (\cos \pi - \cos 0) = \frac{I_{2m}}{\pi}$$

$$I_0 = 0,318 I_{2m} = 0,45 I_2. \quad (16.1)$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения на  $R_H$  определяется законом Ома:

$$U_0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H.$$

Найдем соотношение между  $U_0$  и действующим значением напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора  $U_2$ . Так как  $R_H \gg R_{пр д}$  ( $R_{пр д}$  - прямое сопротивление диода), то  $I_{2m} R_H \approx U_{2m}$ . Следовательно,

$$U_0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H \approx \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} = 0,45 U_2. \quad (16.2)$$

Значения  $U_0$  задают при расчете выпрямителя, определяют  $U_2$ , и по известному значению напряжения сети  $U_c$  определяют коэффициент трансформации  $k = \frac{U_2}{U_c}$ .

Ранее было установлено, что полупроводниковые диоды характеризуются допустимым обратным напряжением  $U_{обр д}$ .

Во время отрицательного полупериода напряжения  $u_2$  диод  $D$  находится под действием обратного напряжения, максимум которого равен  $U_{2m}$ .

Так как  $R_{обр д} \gg R_H$ , то

$$U_{обр м} = U_{2m} = \pi U_0 = 3,14 U_0. \quad (16.3)$$

Отсюда следует, что при выборе диода для работы в схеме однополупериодного выпрямления надо соблюдать неравенство  $U_{обр д} > 3,14 U_0$ . Если такой диод подобрать не удастся, прибегают к последовательному включению нескольких диодов.

Среднее значение тока, проходящего через диод, не должно превышать  $I_{ср д}$ . Для однополупериодного выпрямителя

$$I_{ср д} = I_0 = \frac{I_m}{\pi}. \quad (16.4)$$

Если последнее неравенство не выполняется для диодов имеющихся типов, необходимо выключить несколько диодов параллельно.

Однополупериодная схема редко используется в современных выпрямителях, так как вторичная обмотка трансформатора работает только половину периода, и поэтому габаритная мощность трансформатора должна превышать мощность выпрямленного тока примерно в 3 раза. Обратное напряжение на диоде более чем в 3 раза превышает выпрямленное напряжение на нагрузке, что накладывает ограничение на применяемые диоды. Выпрямленное напряжение имеет очень высокий уровень пульсаций, что затрудняет его сглаживание.

### 3. Двухполупериодный выпрямитель

Наиболее широкое распространение получила мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 4). Схема состоит из силового трансформатора и четырех диодов Д1 – Д4. К диагонали моста А-В подключена вторичная обмотка трансформатора, к диагонали Б-Г — сопротивление нагрузки  $R_H$ .

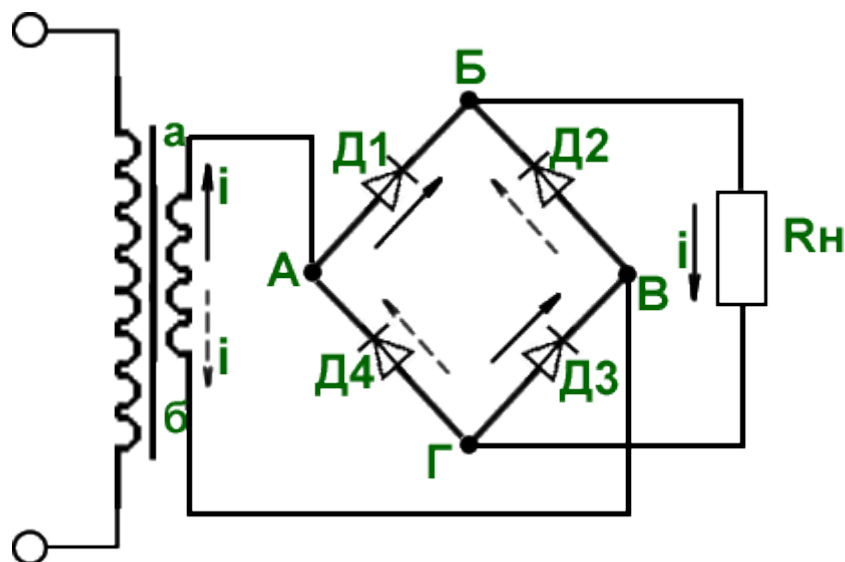


Рис. 3. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя

В положительный полупериод напряжения  $u_2$ , когда потенциал точки А выше потенциала точки В (см. рис. 4, 5, а), открыты диоды Д1 и Д3 и ток проходит по цепи: точка А, диод Д1, сопротивление нагрузки  $R_H$  (сверху вниз по схеме), диод Д3, точка В. В отрицательный полупериод напряжения открыты диоды Д2 и Д4 и теперь ток проходит по цепи: точка В, диод Д2, сопротивление нагрузки  $R_H$  (сверху вниз по схеме), диод Д4, точка А. Через сопротивление нагрузки  $R_H$  ток проходит все время в неизменном направлении. Таким образом, ток в нагрузке имеет форму, показанную на рис. 5, б, что и соответствует двухполупериодному выпрямлению.

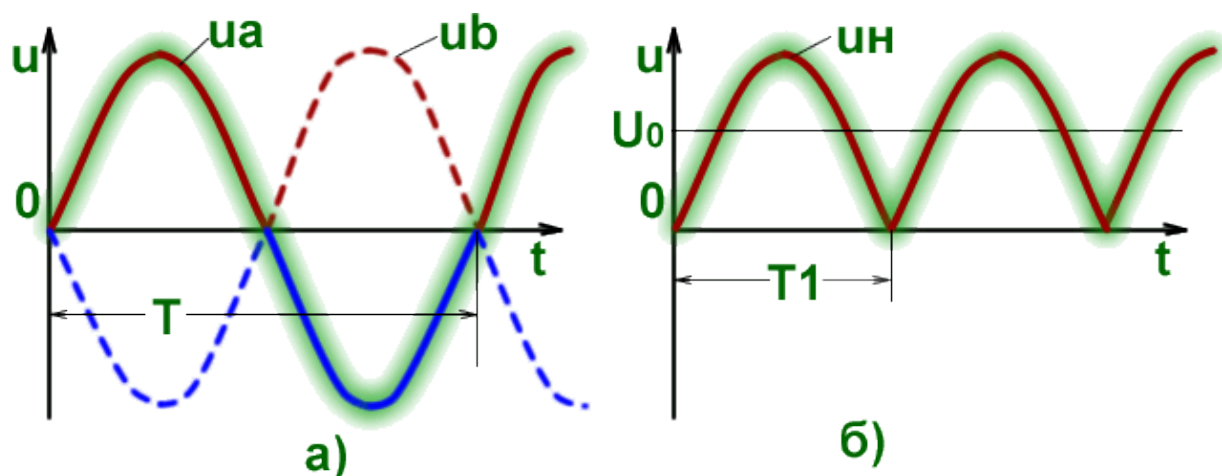


Рис. 5. Кривые напряжений в двухполупериодной схеме выпрямления:  
а - в фазах вторичной обмотки, б - на нагрузке

Каждый диод здесь работает как в однополупериодной схеме. Токи диодов складываются, поэтому постоянная составляющие тока

$$I_0 = \frac{2I_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}I_2}{\pi} = 0,90I_2 \quad (16.5)$$

Сравнив это значение тока с  $I_0$  для однополупериодного выпрямителя, приходим к выводу, что в данной схеме гораздо лучше используются обмотки трансформатора по току. Это позволяет значительно уменьшить габариты трансформатора.

Найдем теперь соотношение между  $U_0$  и  $U_2$ . Так как постоянная составляющая напряжения  $U_0 = I_0 R_H$ , то с учётом  $R_H \gg R_{пр.д}$  и  $I_2 R_H = U_2$ ,

$$U_0 = I_0 R_H = 0,90I_2 R_H = 0,90U_2 \quad (16.6)$$

Обратное напряжение, действующее на каждый диод в данной схеме такое же, как в схеме однополупериодного выпрямителя. Действительно, когда диоды Д1 и Д3 открыты, к диоду Д2 приложено полное обратное напряжение вторичной обмотки через открытый диод Д1. Точно такое же обратное напряжение приложено и к диоду Д4. Следовательно,

$$U_{обр.м} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = \frac{\sqrt{2}U_0}{0,90} = 1,57U_0 \quad (16.7)$$

Другими словами, требования к одному диоду по допустимому обратному напряжению в 2 раза меньше, по сравнению с однополупериодной схемой.

Малое значение уровня пульсаций также является преимуществом данной схемы.

#### 4. Трёхфазная схема выпрямления

Мостовая трехфазная схема выпрямления переменного тока изображена на рис. 6. В ней сочетаются принципы мостовой схемы и схемы многофазного выпрямления. В этой схеме нулевая точка трансформатора для выпрямления не нужна, и поэтому первичные и вторичные обмотки могут быть соединены как звездой, так и треугольником.

Шесть диодов образуют две группы — нечетную  $VD1, VD3, VD5$  и четную  $VD2, VD4, VD6$ . У нечетной группы катоды соединены вместе и служат точкой вывода выпрямителя с положительным потенциалом, а у четной группы аноды соединены вместе и служат точкой вывода с отрицательным потенциалом.

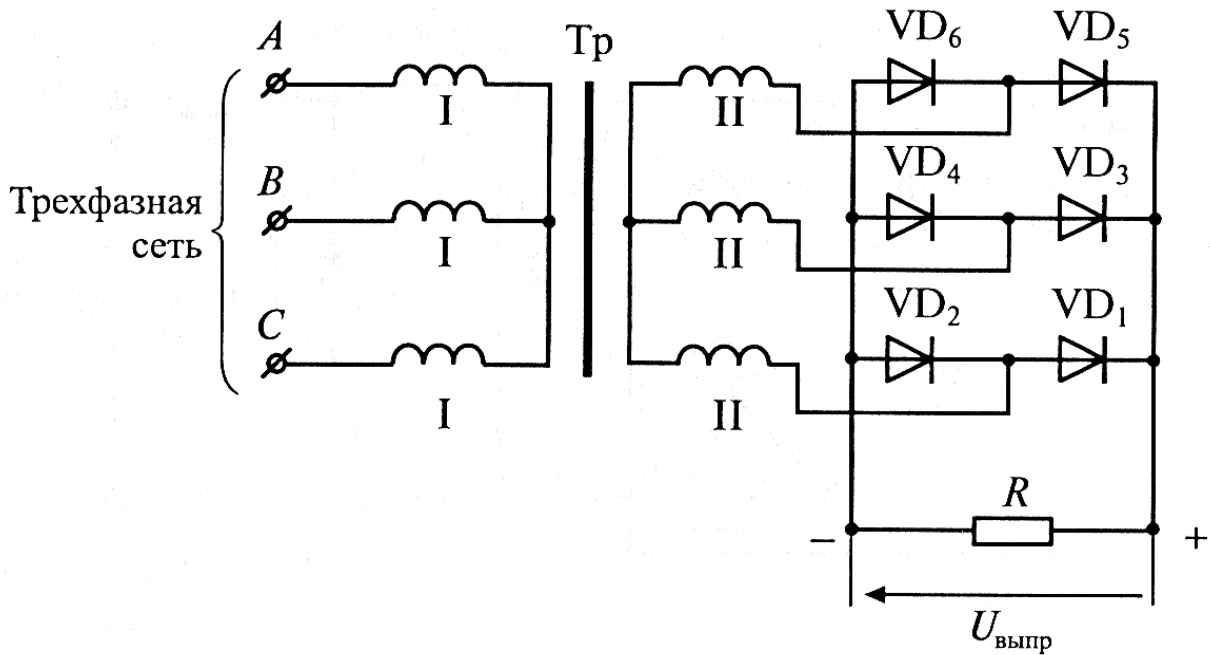


Рис. 6. Мостовая трехфазная схема выпрямления переменного тока

При работе этой схемы выпрямляются обе полуволны переменных напряжений всех вторичных обмоток трансформатора, благодаря чему пульсации выпрямленного напряжения значительно уменьшаются.

## 5. Сглаживающие фильтры

Для питания ряда узлов электронной аппаратуры обычно требуется постоянное напряжение. Напряжение же, получаемое на выходе рассмотренных выпрямительных схем, является или пульсирующим (трехфазный выпрямитель), или импульсным (одно- и двухполупериодный выпрямитель). Для того чтобы выпрямленное напряжение имело требуемую форму, применяют **сглаживающие фильтры**.

Сглаживающие фильтры подразделяются на емкостные, индуктивные, индуктивно-емкостные.

Наиболее простым является емкостный фильтр, который состоит из конденсатора  $C_\phi$ , включенного параллельно с нагрузкой (рис. 7, а). Работа фильтра основана на способности конденсатора быстро запастись электрической энергией, а затем относительно медленно отдавать ее в нагрузку.

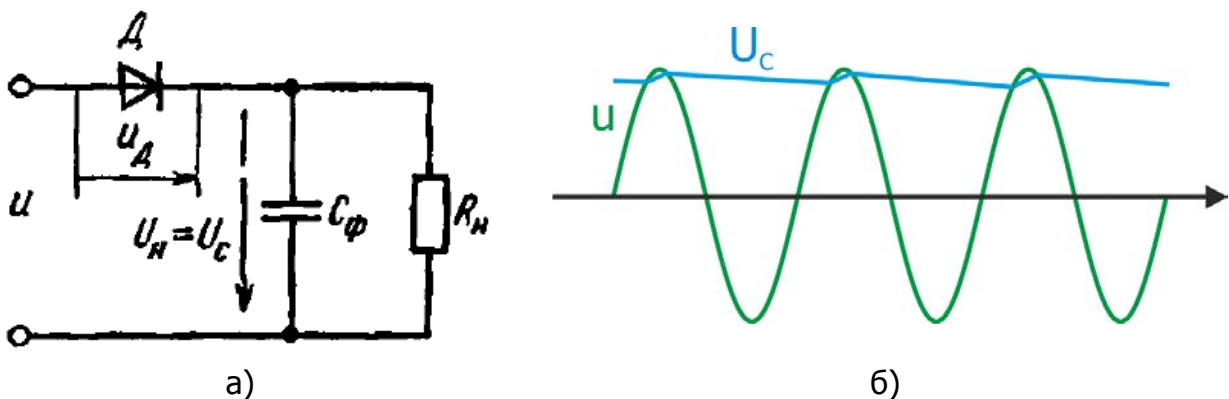


Рис. 7. Схема емкостного фильтра (а) и графики напряжений в нём (б)

Когда напряжение на диоде  $D$ , равное разности напряжения источника и напряжения на конденсаторе, положительно, т. е.  $U_D = u - U_C > 0$ , то диод открыт и  $C_\phi$  заряжается. Так как сопротивление диода  $D$  весьма мало, конденсатор успевает зарядиться почти до  $U_m$ . Затем, когда  $U_D = u - U_C < 0$ , диод заперт и конденсатор медленно разряжается через  $R_H$  до тех пор, пока напряжение источника  $u$  снова не станет больше  $U_C$ . Время разрядки зависит от постоянной времени  $\tau = C_\phi R_\phi$ , которая показывает, в течение какого времени напряжение на конденсаторе уменьшится в 2,72 раза.

Емкостные фильтры, как правило, используют в выпрямителях малой мощности.

В выпрямителях с большими токами применяют индуктивные и комбинированные фильтры.

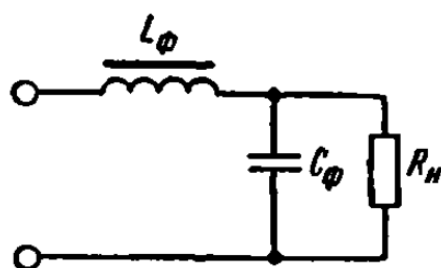


Рис. 8. Комбинированный  $LC$ -фильтр

Эти фильтры обеспечивают хорошее сглаживание тока в нагрузке. Их работу (рис. 8) удобно объяснять, представляя напряжение на входе фильтра как сумму постоянной составляющей и целого ряда гармоник (переменных составляющих). Тогда индуктивность и емкость фильтра представляют собой делитель. На индуктивном сопротивлении делителя ( $X_L = 2\pi fL$ ) выделяется большая часть переменной, а на емкостном ( $X_C = 1/2\pi fC$ ) — большая часть постоянной составляющей напряжения выпрямителя.

## 6. Стабилизаторы напряжения.

Устройство, поддерживающее автоматически постоянное напряжение на нагрузке при изменении дестабилизирующих факторов в определенных пределах, называется **стабилизатором напряжения**. Такими дестабилизирующими факторами являются входное напряжение и сопротивление нагрузки, которые изменяются в процессе работы устройства.

Существует два метода стабилизации напряжения: *параметрический* и *компенсационный*.

В параметрических стабилизаторах используются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой, рассмотренные ранее (ионный и кремниевый стабилизаторы).

Компенсационные стабилизаторы обладают более оптимальными параметрами. Работа таких стабилизаторов основана на сравнении входного напряжения с заданным стабильным. В зависимости от разности между стабильным и выходным напряжениями (рассогласованием) осуществляется автоматическое воздействие (регулирование), направленное на уменьшение

этого рассогласования. В качестве примера рассмотрим схему стабилизатора, приведенную на рис. 9.

Стабильное (опорное) напряжение  $U_{СТ}$  создается на кремниевом стабилитроне Д. Транзистор Т играет роль сравнивающего и регулирующего элемента. Между базой и эмиттером действует небольшое положительное напряжение  $U_{БЭ} = U_{СТ} - U_{ВЫХ}$ .

Таким образом,  $U_{ВЫХ} \approx U_{СТ}$ . Представим себе, что напряжение на выходе  $U_{ВЫХ}$  несколько возросло. Следовательно, напряжение  $U_{БЭ} = U_{СТ} - U_{ВЫХ}$  уменьшится и транзистор начнёт закрываться (уменьшится ток эмиттера, равный выходному току). Это обстоятельство приведет к уменьшению выходного напряжения практически почти до прежнего значения. На транзисторе избыток напряжения упадет.

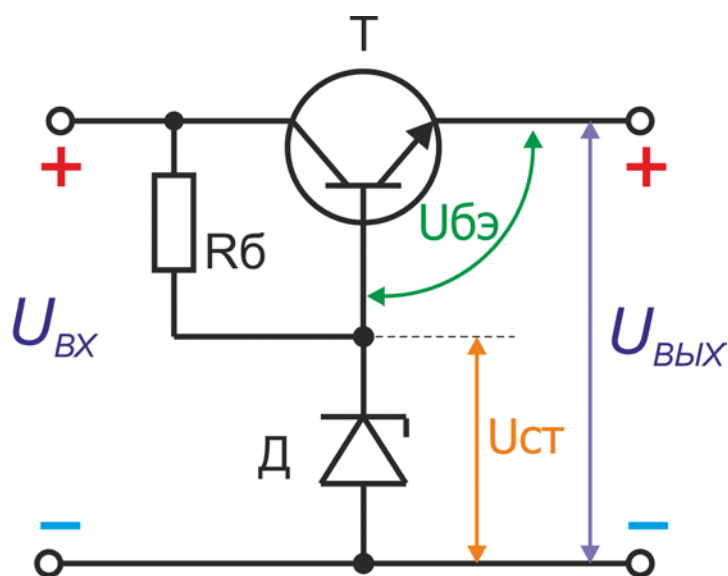


Рис.9. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Важнейшим параметром, характеризующим работу схемы стабилизатора, является коэффициент стабилизации, представляющий собой отношение относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения (при  $R_H = \text{const}$ ):

$$k_{СТ U} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ}}{\Delta U_{ВЫХ} / U_{ВЫХ}}$$

где  $U_{ВХ}$  и  $U_{ВЫХ}$  - номинальные значения входного и выходного напряжений.

### Вопросы для проверки

1. Нарисуйте схему однополупериодного выпрямителя и объясните его работу.
2. Каковы недостатки однополупериодного выпрямителя?
3. Нарисуйте мостовую схему двухполупериодного выпрямителя и объясните его работу.
4. Каковы достоинства мостовой схемы двухполупериодного выпрямителя?
5. Нарисуйте схему трехфазного выпрямителя и объясните ее работу.
6. Каково назначение сглаживающего фильтра?



7. Объясните принцип работы сглаживающего фильтра.
8. Для чего служит стабилизатор напряжения?