

# Выпрямители



## Содержание

1. Определение и классификация выпрямителей
2. Структурная схема выпрямителей
3. Основные характеристики выпрямителей
4. Однофазный однополупериодный выпрямитель
5. Однофазный однополупериодный выпрямитель с трансформатором с выведенной средней точкой
6. Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель
7. Трехфазный выпрямитель
8. Трехфазный двухполупериодный выпрямитель
9. Трехфазный двухполупериодный выпрямитель (продолжение)
0. Управляемый двухполупериодный выпрямитель с трансформатором с выведенной средней точкой
1. Ёмкостной фильтр
2. Индуктивный фильтр
3. Г – образный и П – образный фильтры
4. Применение выпрямителей

# Определение и классификация выпрямителей

**Выпрямитель - это устройство, которое преобразует переменное напряжение питающей сети в постоянное напряжение. Есть выпрямитель, предназначенный для преобразования переменного напряжения в импульсное напряжение одной полярности.**

**Наиболее часто в выпрямителях применяются полупроводниковые диоды. Принцип выпрямления переменного напряжения основан на нелинейной вольт-амперной характеристике полупроводникового диода** Наиболее часто в выпрямителях применяются полупроводниковые диоды. Принцип выпрямления переменного напряжения основан на нелинейной вольт-амперной характеристике полупроводникового диода, у которого сопротивление в прямом Наиболее часто в выпрямителях применяются полупроводниковые диоды. Принцип выпрямления

## Классификация выпрямителей

**По схеме выпрямления** – однополупериодные, двухполупериодные, мостовые, с удвоением (умножением) напряжения, многофазные и др.

**По типу выпрямительного элемента** – ламповые (кенотронные), полупроводниковые, газотронные и др.

**По величине выпрямленного напряжения** – низкого напряжения и высокого.

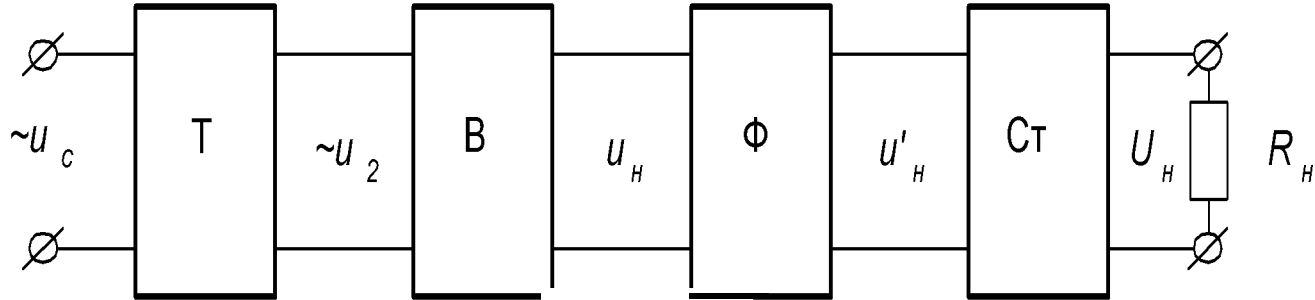
**По назначению** – для питания анодных цепей, цепей экранирующих сеток, цепей управляющих сеток, коллекторных цепей транзисторов, для зарядки аккумуляторов и др.

**По мощности** – малой, средней, большой

**По частоте** – высокочастотные и низкочастотные

**По числу фаз** – многофазные и однофазные

## Структурная схема выпрямителя



- **Т** — трансформатор служит для согласования напряжения сети и напряжения нагрузки

**В** — **вентильный комплект** преобразует переменный ток в ток одного направления;

**Ф** — **фильтр** сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения;

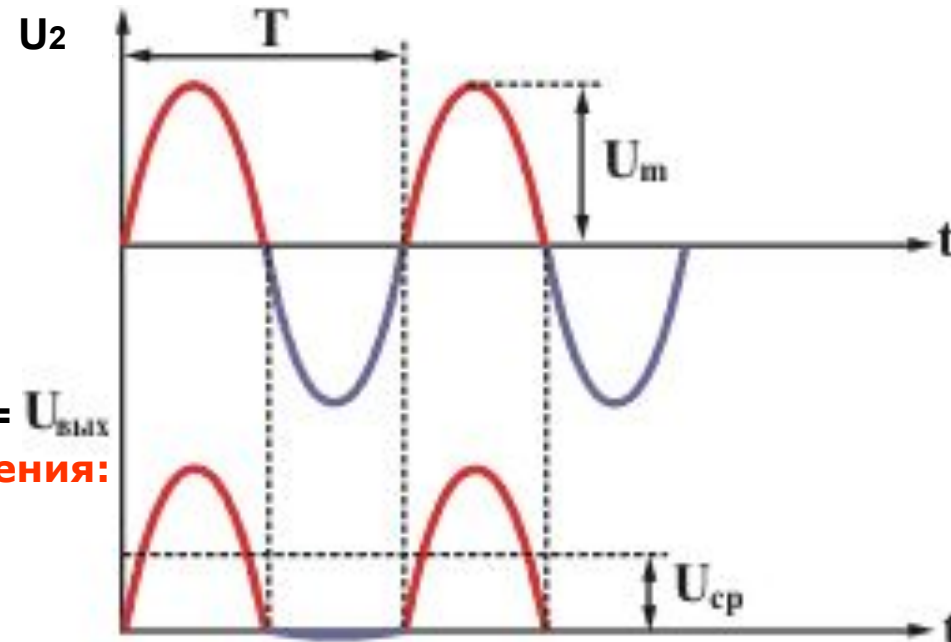
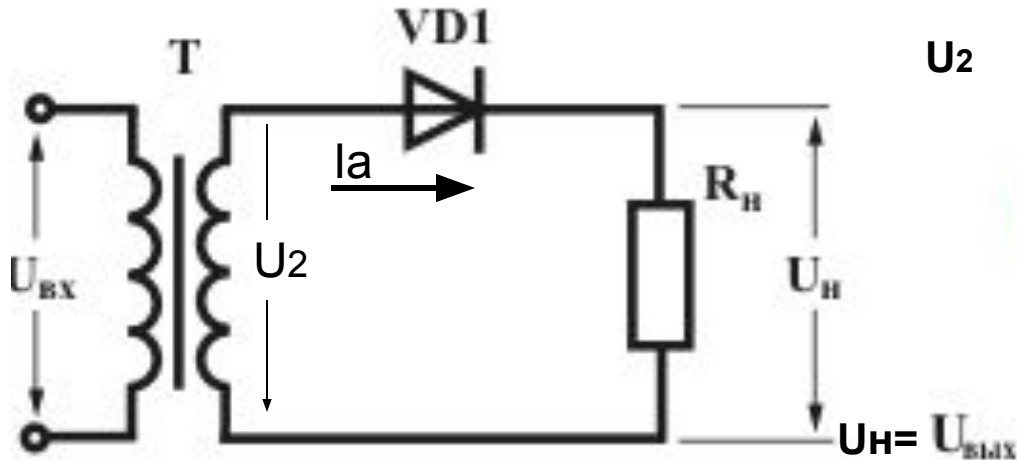
**СТ** — **стабилизатор** постоянного напряжения обеспечивает постоянство выходного напряжения при изменении нагрузки, напряжения питающей сети и т. п.

## Основные параметры выпрямителей

Основными параметрами выпрямителей являются:

- средние значения выпрямленного тока и напряжения  $I_{н.ср.}$ ,  $U_{н.ср.}$ ;
- мощность нагрузочного устройства  $P_{н.ср.} = U_{н.ср.} I_{н.ср.}$ ;
- амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения  $U_{осн.мах}$ ;
- коэффициент пульсации выпрямленного напряжения  $p = U_{осн.мах} / U_{н.ср.}$ ;
- действующие значения тока и напряжения первичной и вторичной обмоток  $I_1, U_1, I_2, U_2$ ;
- типовая мощность трансформатора  $S_{тр} = 0,5(S_1 + S_2)$ , где  $S_1 = U_1 I_1$ ;  
-  $S_2 = U_2 I_2$
- коэффициент полезного действия  $КПД = P_{н.ср.} / (P_{н.ср.} + P_{тр} + P_{д})$ , где  
-  $P_{тр}$  – потери в трансформаторе,  $P_{д}$  – потери в диодах

# Однофазный однополупериодный выпрямитель



Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t \approx 0.45U_2$$

Действующее значение входного напряжения:

$$U_2 = \frac{\pi U_{cp}}{\sqrt{2}} \approx 2.22U_{cp}$$

Действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_n} = \frac{\pi U_{cp}}{\sqrt{2}R_n} \approx 1.57I_{cp}$$

Среднее значение выпрямленного тока:

$$I_{cp} = \frac{0.45U_2}{R_n}$$

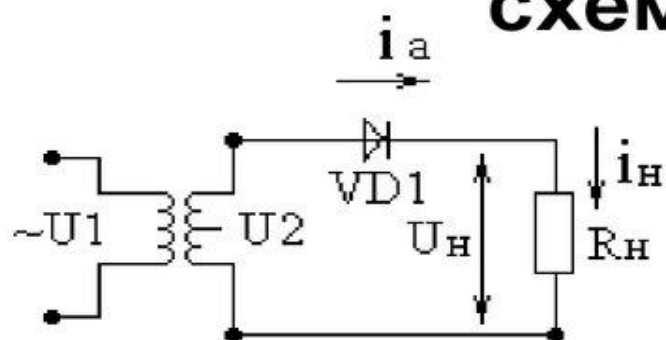
Обратное напряжение на диоде:

$$U_{обр.маx} = U_{2маx} = 3,14U_{cp}$$

Коэффициент пульсаций

$$p = \frac{U_{cp} \frac{\pi}{2}}{U_{cp}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

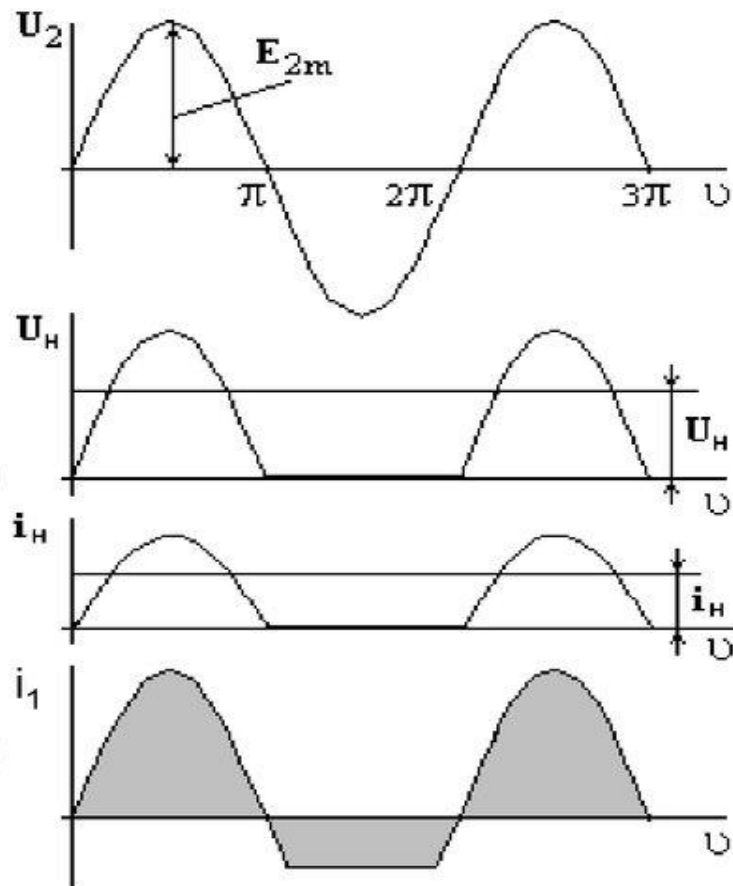
# Однофазная однополупериодная схема выпрямителя



- В момент времени:  
от  $t = 0$  до  $t = \pi$ , вентиль будет открываться.  
Тогда ток будет протекать через вторичную обмотку трансформатора, вентиль, нагрузку  
( $+U_2 \rightarrow VD1 \rightarrow R_H \rightarrow -U_2$ )

$$I_H = i_2 = i_a = \frac{E_{2m} \sin \nu}{R_H}$$

- В момент времени:  
 $\pi < \vartheta < 2\pi$ , полярность изменится,  
следовательно,  $i_H = 0$ , так как вентиль  
разорвет цепь. Сопротивление диода равно  
 $\infty$  ( $R_d = \infty$ ) и все напряжение падает на нем



Среднее значение напряжения по отношению к подведенному действующему составит:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2 \quad I_{\text{ср}} = U_{\text{ср}}/R_{\text{н}}$$

Таким образом, среднеквадратичное (эффективное, действующее) значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя будет в корень из 2 меньше подведенного действующего, а потребляемая нагрузкой мощность в 2 раза меньше (для синусоидальной формы сигнала).

Отношение среднего значения выпрямленного напряжения  $U_{\text{н ср}}$  к действующему значению входного переменного напряжения  $U_{\text{вх д}}$  называется **коэффициентом выпрямления (Квып)**. Для рассматриваемой схемы

$$\mathbf{Квып = 0,45.}$$

**Максимальное обратное напряжение на диоде**

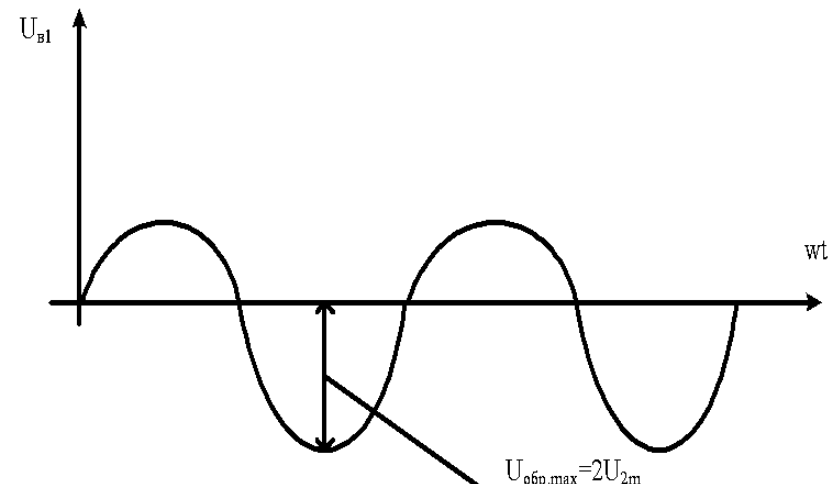
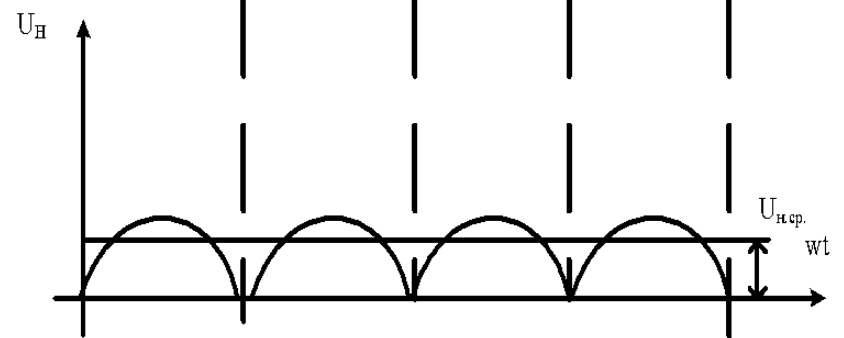
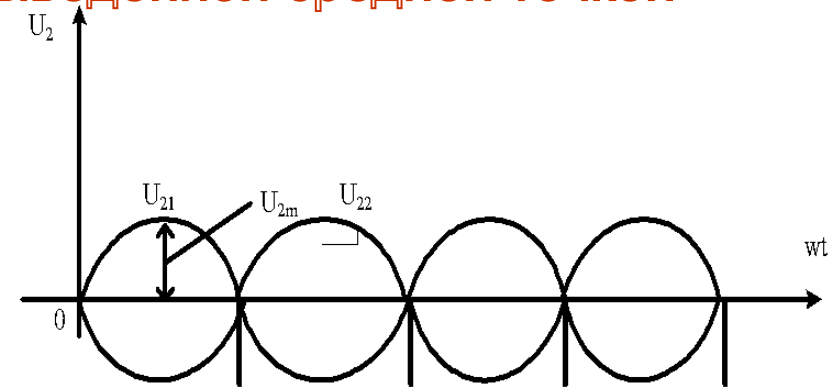
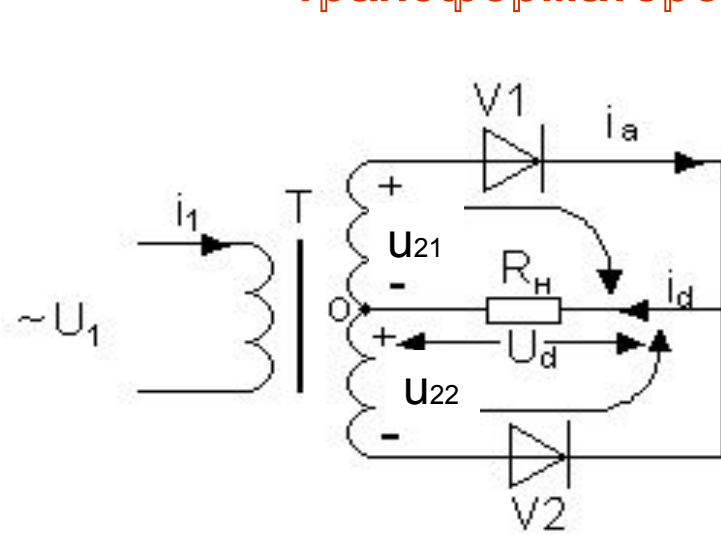
$$U_{\text{обр max}} = U_{\text{вх max}} = \pi U_{\text{н ср}}, \text{ т.е. более}$$

чем в три раза превышает среднее выпрямленное напряжение (это следует учитывать при выборе диода для выпрямителя).

**Коэффициент пульсаций**, равный отношению амплитуды низшей (основной) гармоники пульсаций к среднему значению выпрямленного напряжения, для описываемой схемы однополупериодного выпрямителя равен:

$$\mathbf{Кп = U_{\text{пульс max}}/U_{\text{н ср}} = \pi/2 = 1,57.}$$

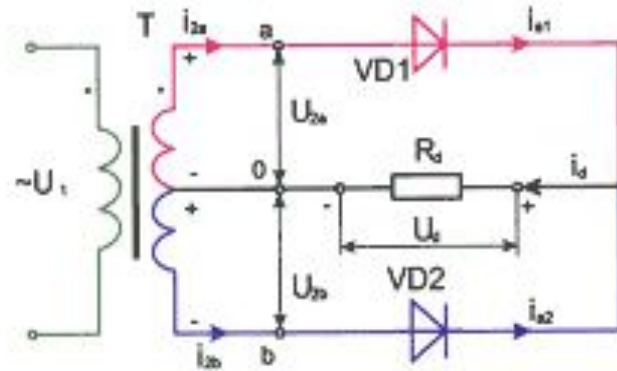
# Однофазный двухполупериодный выпрямитель с трансформатором с выведенной средней точкой



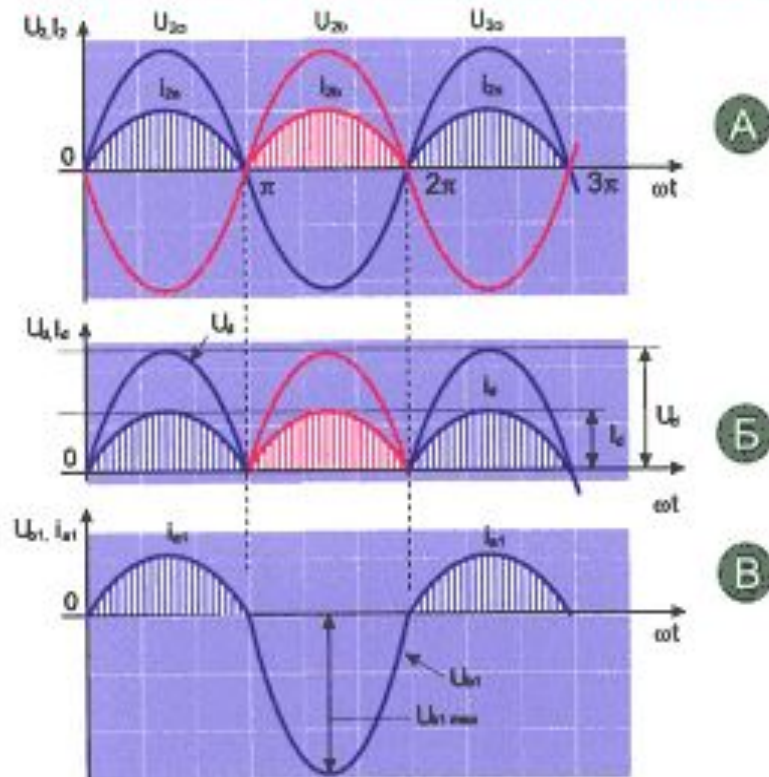


# Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

## 1. Схема включения



## 2. Временные диаграммы напряжений и токов



На интервале времени  $[0; T/2]$  под действием напряжения  $U_{вх1}$  диод  $VD1$  смещен в прямом направлении (диод  $VD2$  при этом смещен в обратном направлении) и поэтому ток в нагрузочном резисторе определяется только напряжением  $U_{вх1}$ .

На интервале  $[T/2; T]$  диод  $VD1$  смещен в обратном направлении, а ток нагрузки протекает через прямосмещенный диод  $VD2$  и определяется напряжением  $U_{вх2}$ .

Таким образом, средние значения тока и напряжения на нагрузочном резисторе в случае двухполупериодного выпрямления будут в два раза превышать аналогичные показатели для однополупериодной схемы:

$U_{вх\ max}$  и  $I_{вх\ max}$  — максимальные амплитудные значения входного напряжения и тока выпрямителя (по одному из напряжений питания),

$U_{вх\ д}$  и  $I_{вх\ д}$  — действующие значения входного напряжения и тока выпрямителя .

Отрицательным свойством двухполупериодной схемы выпрямления со средней точкой является то, что во время прохождения тока через один из диодов обратное напряжение на другом (закрытом) диоде в пике достигает удвоенного максимального входного напряжения  $U_{обр\ max} = 2U_{max}$ . Этого нельзя забывать при выборе диодов для выпрямителя.

Основная частота пульсаций выпрямленного напряжения в данной схеме будет равна удвоенной частоте входного напряжения. Коэффициент пульсаций рассчитывается по эмпирической формуле:  $K_{п} = 2/(mz - 1)$

$K_{п} = 0,67$ .

## Основные параметры:

$$U_{н.ср} = 0.9U_2 ; U_2 = 1.11U_{н.ср}.$$

$$I_{н.ср.} = 0.9U_2/R_H; I_2 = 0.78I_{н.ср}.$$

$$p = 0.67; S = 1,34P_2$$

$$U_{обр.мах} = 1,57U_{н.ср}$$

## Достоинства схемы:

частота пульсации двуполупериодного выпрямителя вдвое больше удвоенные значения  $U_{ср}$  и  $I_{ср}$

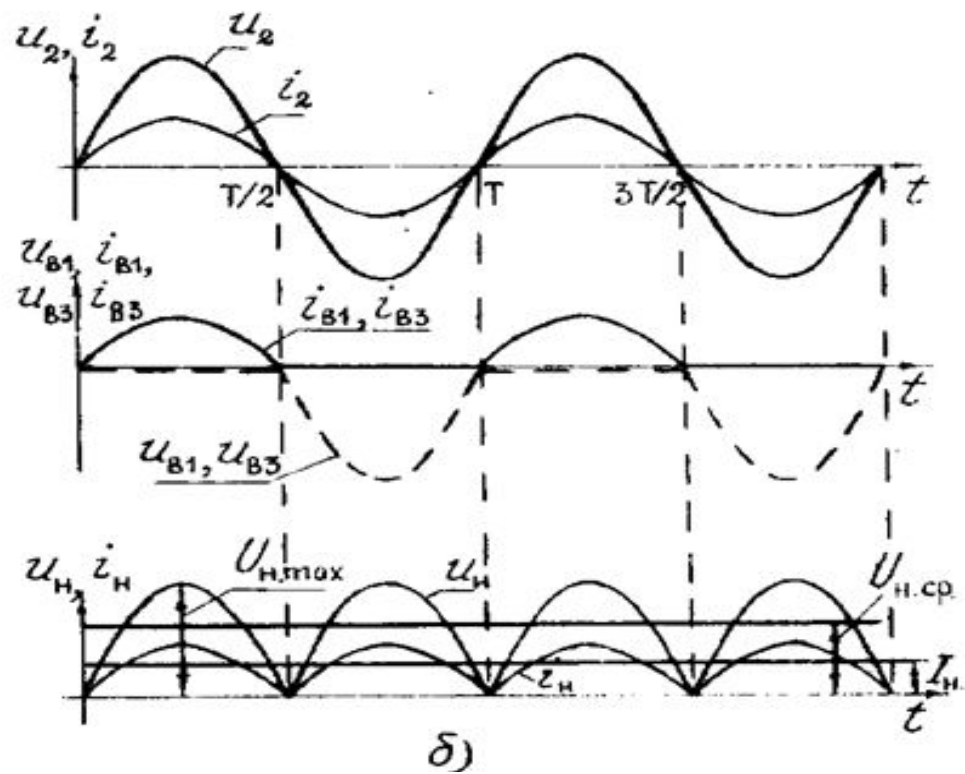
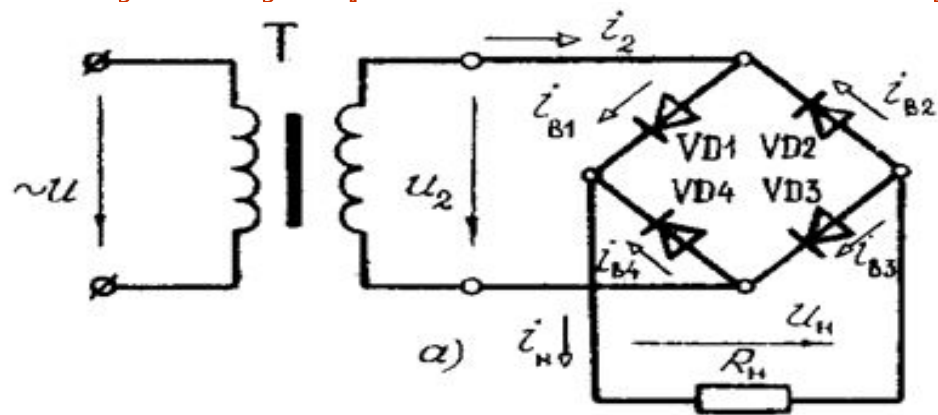
вдвое меньший коэффициент пульсаций по сравнению с однополупериодной схемой  $p = 2/m^2 - 1$

## Недостатки:

наличие трансформатора с двумя симметричными обмотками (что увеличивает его массогабаритные показатели)

на диодах удвоенное обратное напряжение.

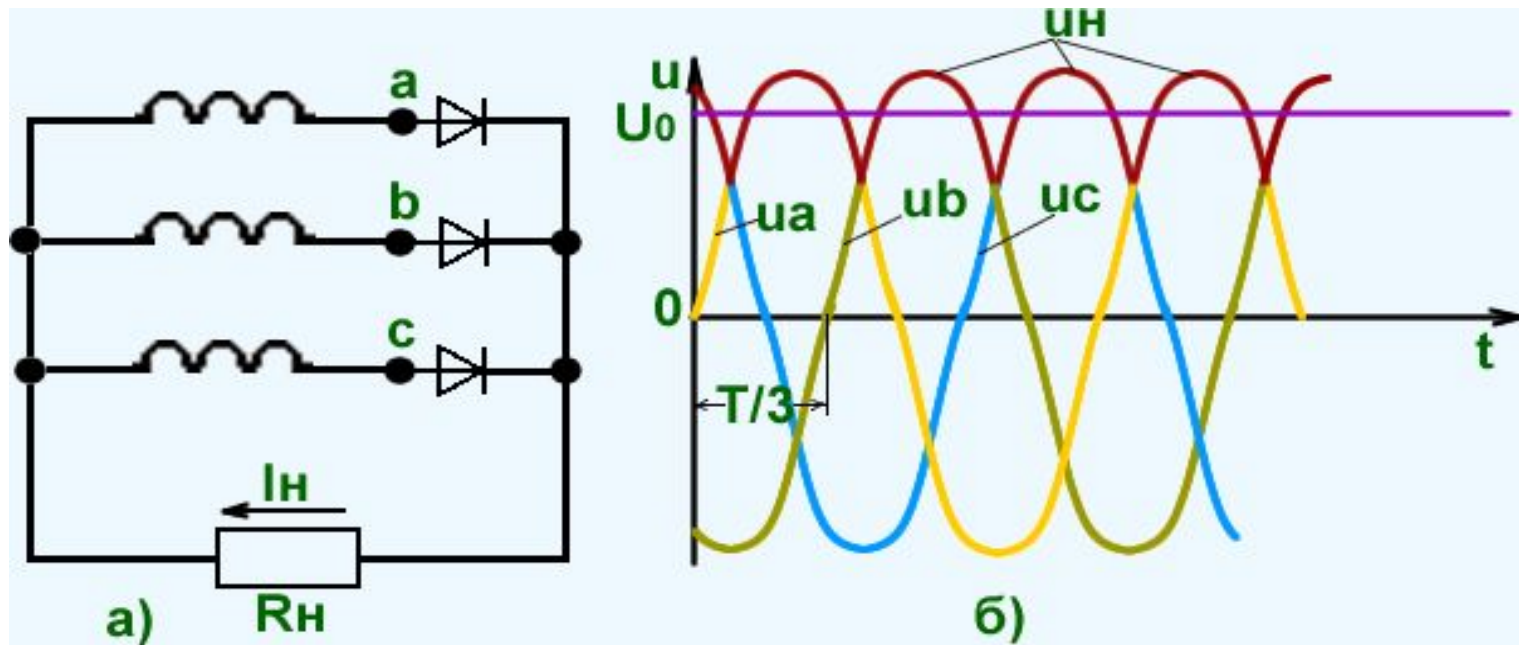
# Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель



## Основные параметры:

- Среднее значение напряжения  $U_{н.ср.} = 0,9U_2$
- Напряжение вторичной обмотки  $U_2 = 1,11U_{н.ср.}$
- Расчетная мощность трансформатора  $S_{тр} = 1,21 P_{н.ср.}$
- Для выбора вентиля: ● максимальное напряжение  $U_{обр.мах} = U_{2m}$ , ● ток  $I_{в} = I_{н.ср.}/2$ , коэффициент пульсации  $p = 0,67$
- Двухполупериодный выпрямитель в сравнении с однополупериодным имеет следующие **преимущества:**
  - выпрямленные ток и напряжение вдвое больше,
  - значительно меньший уровень пульсаций ,
  - вентили выбираются по половине тока нагрузки,
  - хорошо используется трансформатор и отсутствует вынужденное подмагничивание его сердечника.
- **Мостовая схема имеет преобладающее применение в выпрямителях небольшой и средней мощности.**

## Трехфазный выпрямитель



Каждая фаза смещена относительно другой на угол  $120^\circ$ . На нагрузке работает та фаза, у которой больше значение положительной полуволны в данный момент времени.

В схеме диоды используются в течении  $1/3$  периода. Необходимо наличие средней точки.

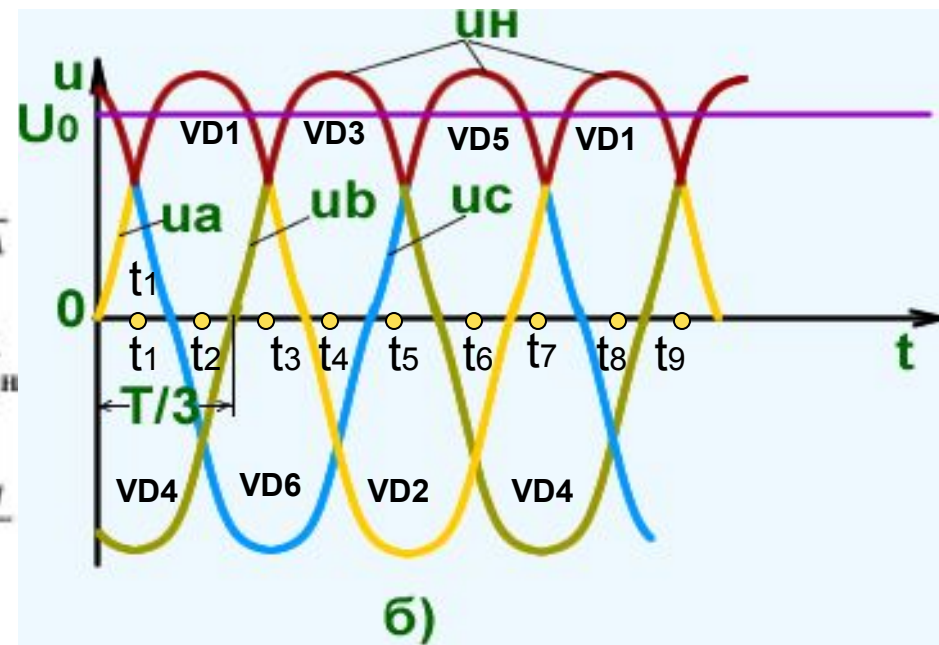
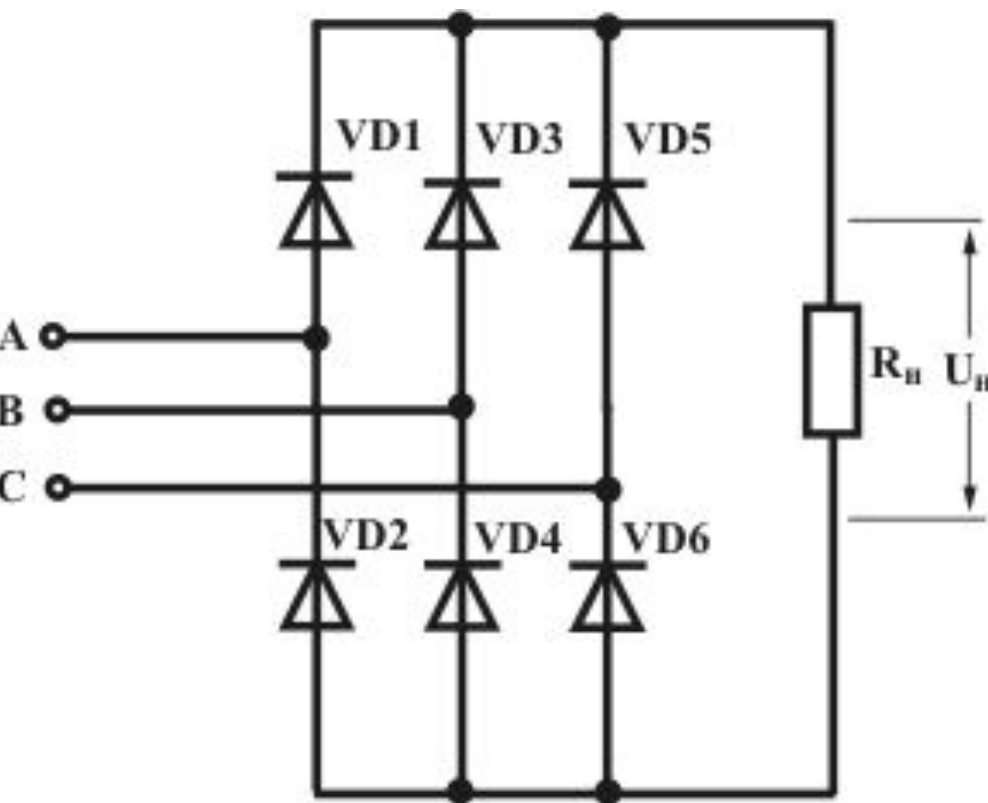
**Среднее значение выпрямленного напряжения**

$$U_{\text{ср}} = 1.17U_2$$

**Обратное напряжение  $U_{\text{обр.max}} = 2.1U_{\text{ср}}$**

**Коэффициент пульсаций  $p = 0.25$ .**

# Трёхфазный двухполупериодный выпрямитель (схема Ларионова)



$t_1 - t_2$	VD1, VD4
$t_2 - t_3$	VD1, VD6
$t_3 - t_4$	VD3, VD6
$t_4 - t_5$	VD3, VD2
$t_5 - t_6$	VD5, VD2
$t_6 - t_7$	VD5, VD4
$t_7 - t_8$	VD1, VD4
$t_8 - t_9$	VD1, VD4

## Основные параметры:

$$U_{н.ср} = 2.34U_2$$

$$U_{обр.мах} = 1.05U_{н.ср}$$

$$p = 0.057$$

**Применение:** при различных величинах входного напряжения и токах нагрузки в сотни ампер.

### Достоинства:

схема экономична

имеет низкие пульсации.

### Недостатки:

Увеличенное количество вентиляей.

Выпрямитель также не может быть применен для работы в однофазной бытовой сети.

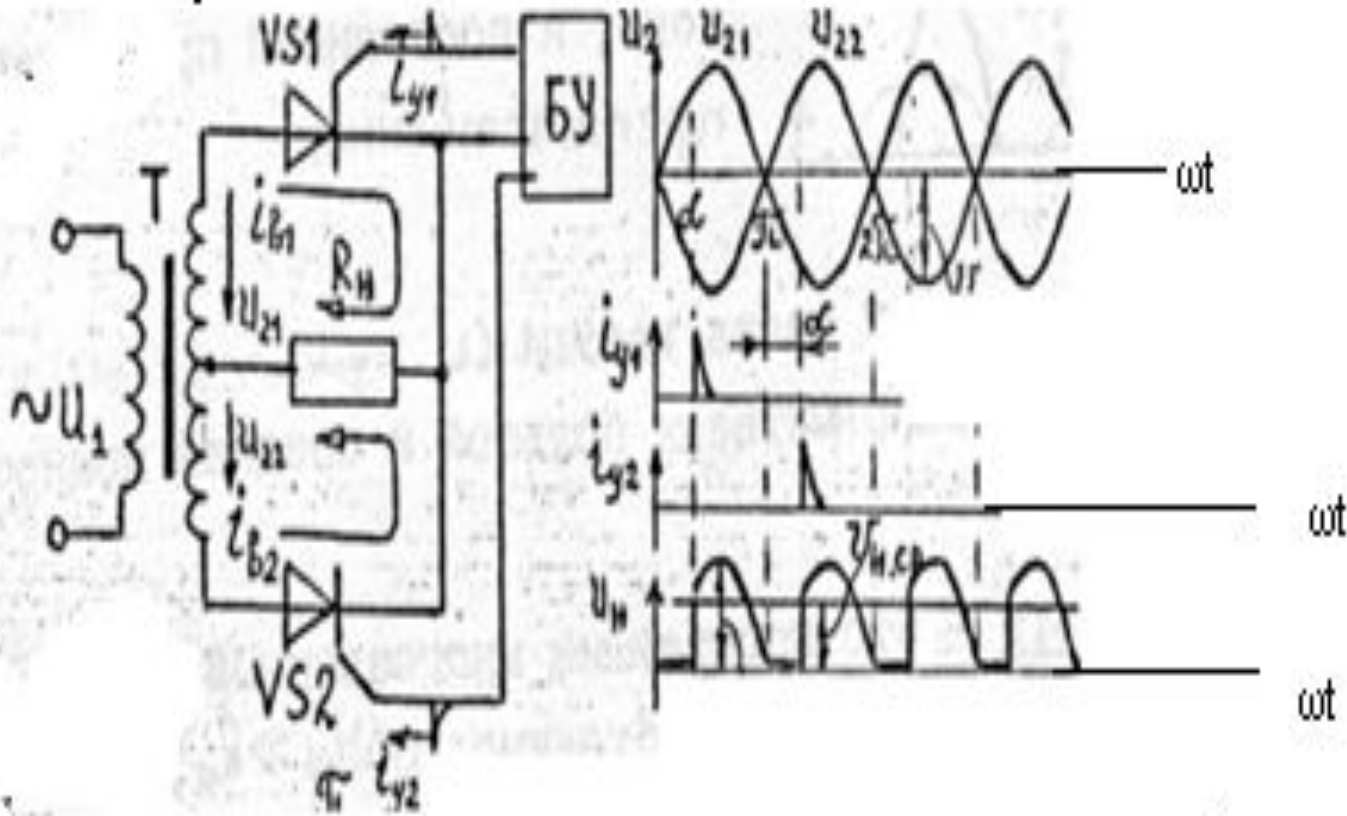


## Управляемый выпрямитель

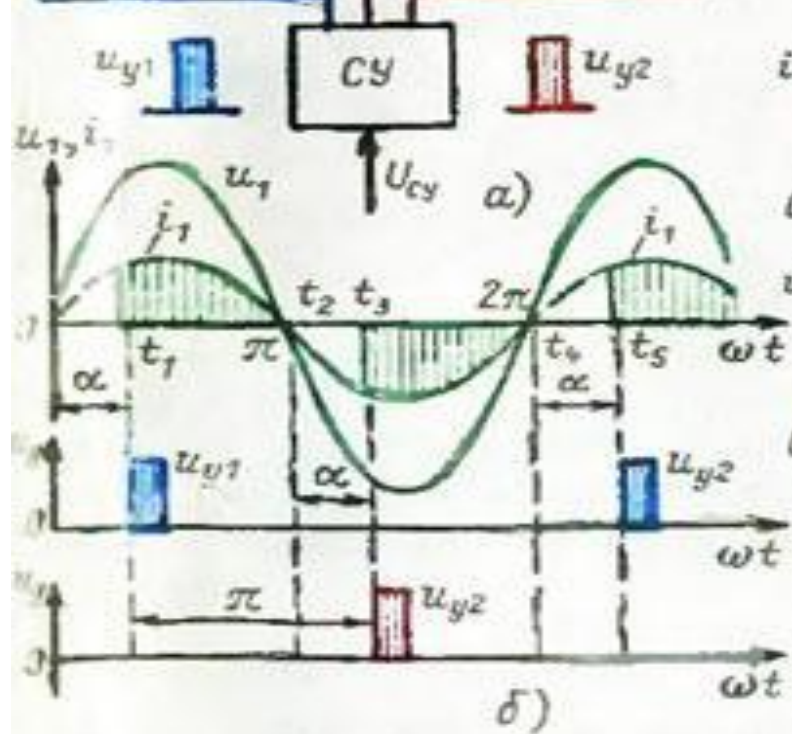
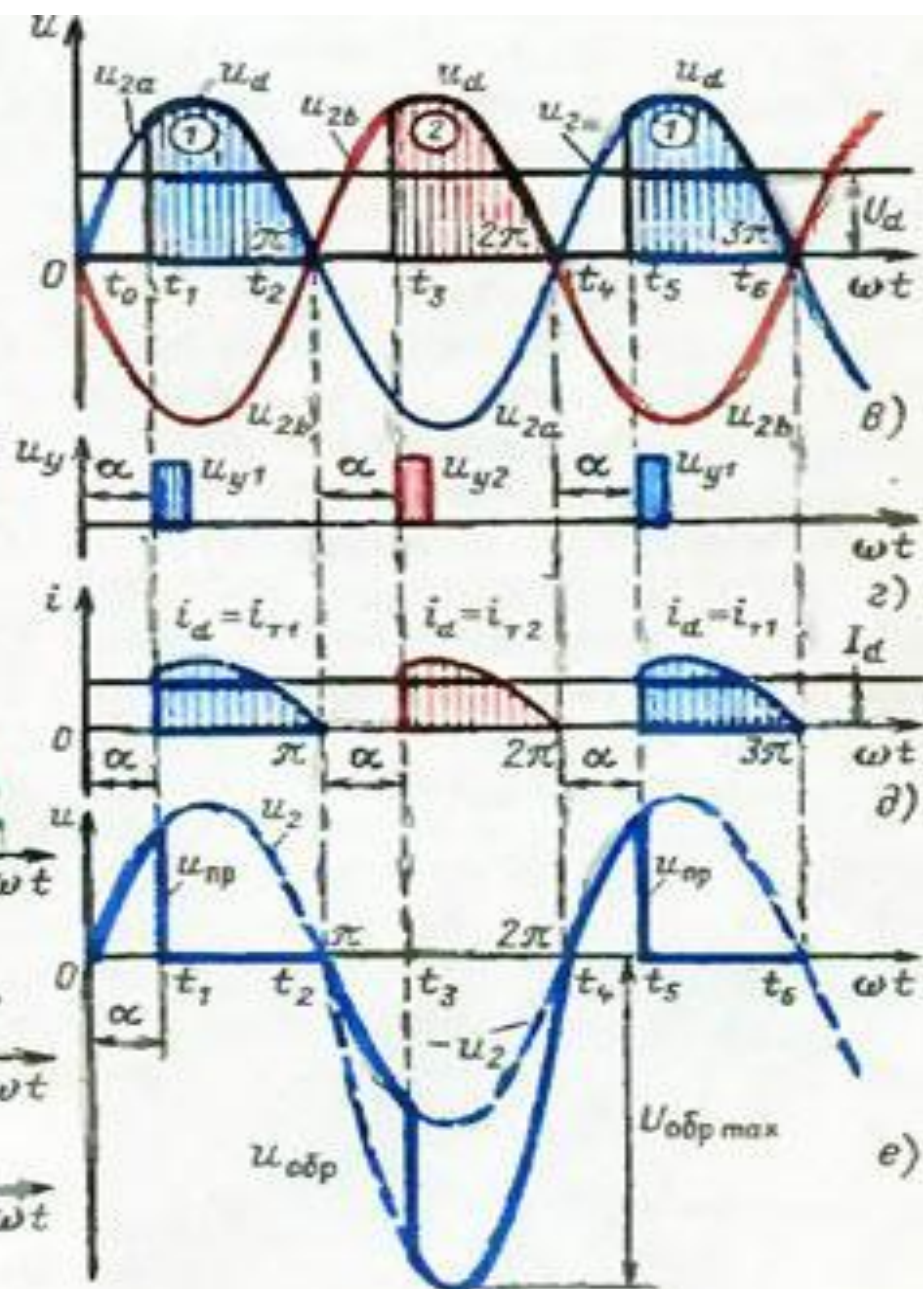
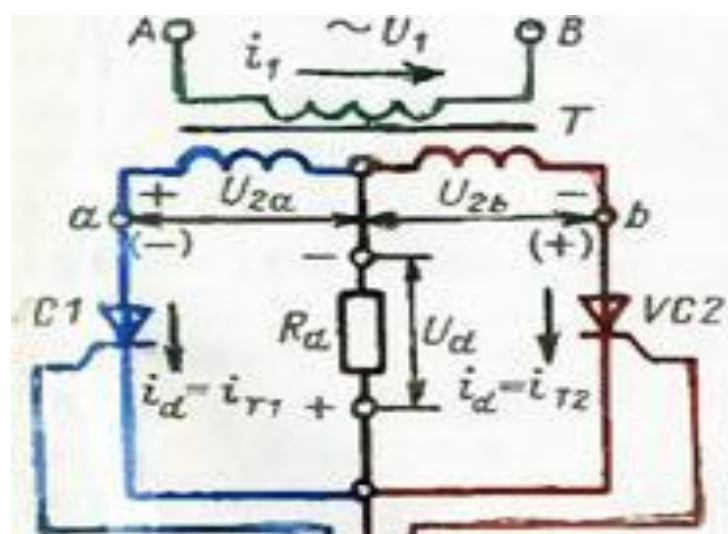
Вентильный блок управляемых выпрямителей включает в свой состав **тиристоры**. Известно, что для включения тиристора необходимо подать на его анод положительное напряжение (положительную полуволну напряжения сети), а на управляющий электрод – сигнал управления  $iu$ . Если сигнал управления совпадает с моментом перехода через нуль выпрямляемого напряжения (*моментом естественного отпирания* диода в неуправляемом выпрямителе), то среднее значение выпрямленного напряжения будет таким же, как и на выходе неуправляемого выпрямителя. Если сигнал управления задержать относительно момента естественного отпирания, то тиристор откроется позже, напряжение на выходе выпрямителя уменьшится. В этом заключается суть управления.

Количественно задержка управляющего сигнала относительно момента естественного отпирания оценивается **углом сдвига по фазе  $\alpha$** . Этот угол называется *углом управления*.

# Управляемый выпрямитель со средней точкой трансформатора

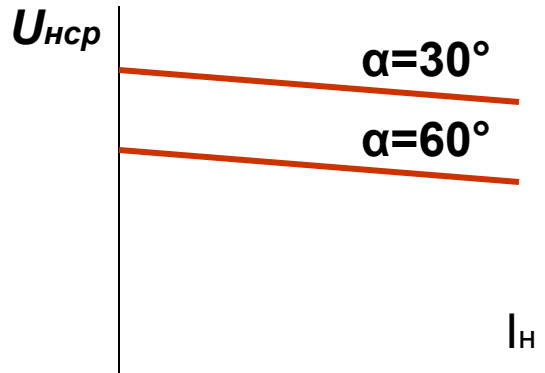


$$U_{H,ср.} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = U_{H,0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

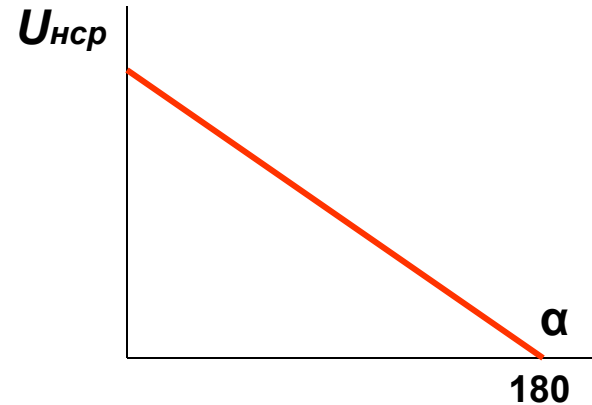


# Характеристики управляемого выпрямителя

Внешние характеристики  
 $U_{н.ср} = f(I_n)$  при  $\alpha = \text{const}$

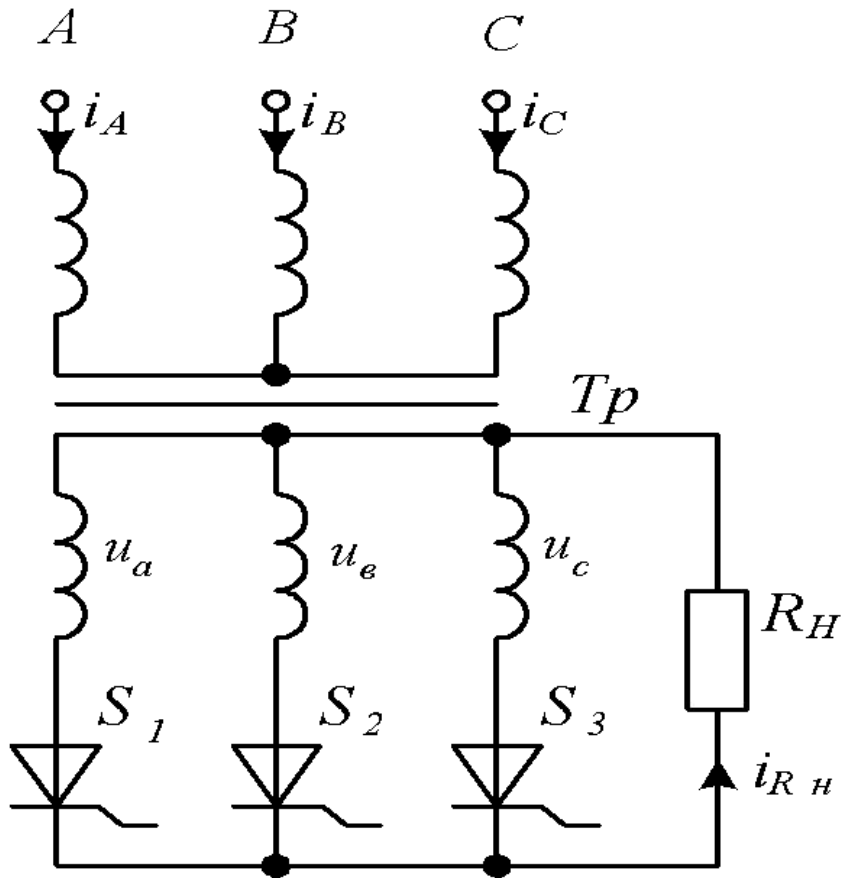


Регулировочная характеристика  
 $U_{н.ср.} = f(\alpha)$

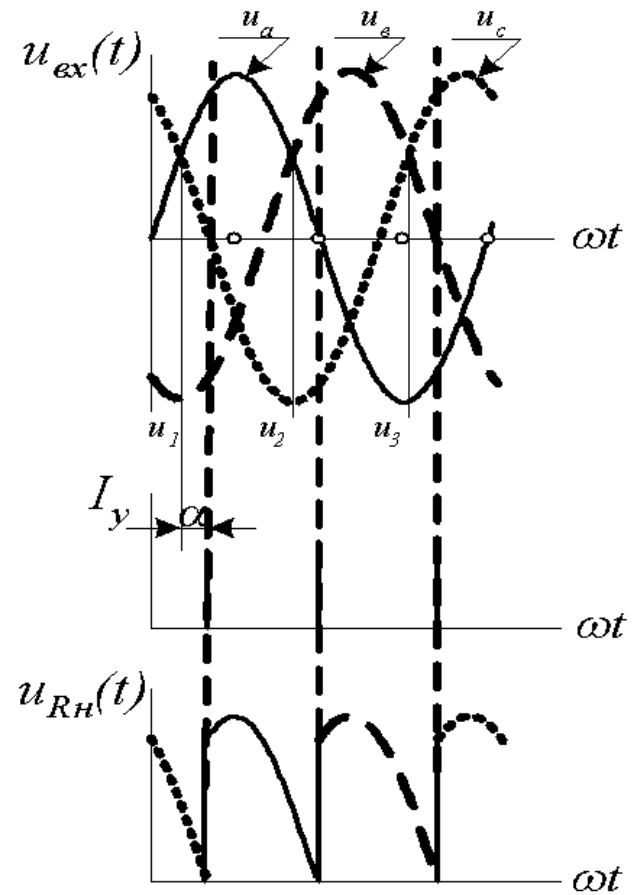


Изменяя  $\alpha$  можно регулировать  $U_{н.ср.}$  от  $0,9U_2$  до 0, где  $U_{н.ср}$  – среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке: при  $\alpha = 0$  имеет максимальное значение; при  $\alpha = 180$   $U_{н.ср.} = 0$ .

# Трехфазный управляемый выпрямитель



а)

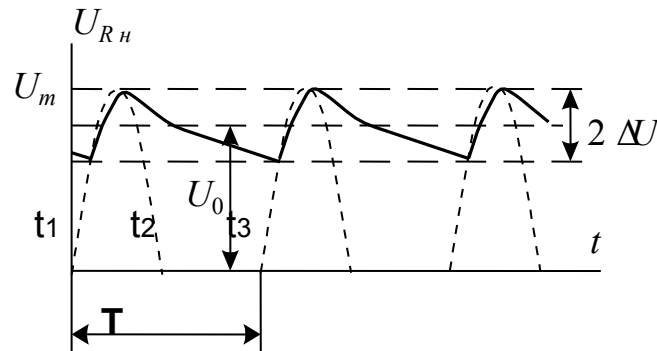
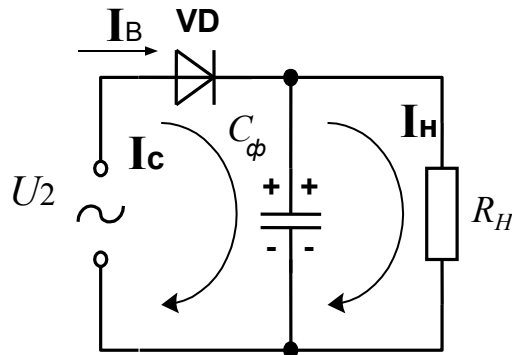


б)

Схема управляемого трехфазного нулевого выпрямителя а) и графики токов и напряжений при  $\alpha = 30^\circ$  б)

## Ёмкостной фильтр

Ёмкостной фильтр включается параллельно нагрузке и представляет большое сопротивление для постоянной составляющей тока.



Коэффициент сглаживания фильтра:  $S_C = P_{\text{ВХ}} / P_{\text{ВЫХ}} = I_b / I_H$ ,  
где  $P_{\text{ВХ}} = I_b / I_0$ ;  $P_{\text{ВЫХ}} = I_H / I_0$ ,  
Для хорошего сглаживания  $X_C \ll R_H$ , в этом случае  $I_b = I_C$ ,  
Тогда  $I_C / I_H = R_H / 1 / m\omega C_\Phi$ ;  $S_C = P_{\text{ВХ}} / P_{\text{ВЫХ}} = R_H m\omega C_\Phi$

$$C_\Phi = S_C / R_H m\omega$$

При  $U_2 > U_c$  конденсатор заряжается через открытый VD ( $t_1 - t_2$ ) до амплитуды  $U_{2max}$ . Затем разряжается, когда  $U_2 < U_c$  ( $t_2 - t_3$ ).

Коэффициент пульсаций  $p$  меньше 0,01. Подбором емкости фильтра  $C_f$  можно обеспечить требуемое значение коэффициента пульсации.

Емкостной сглаживающий фильтр эффективен в сочетании с высокоомной нагрузкой  $R_n$ .

При низкоомной нагрузке необходимо применять комбинированные фильтры.

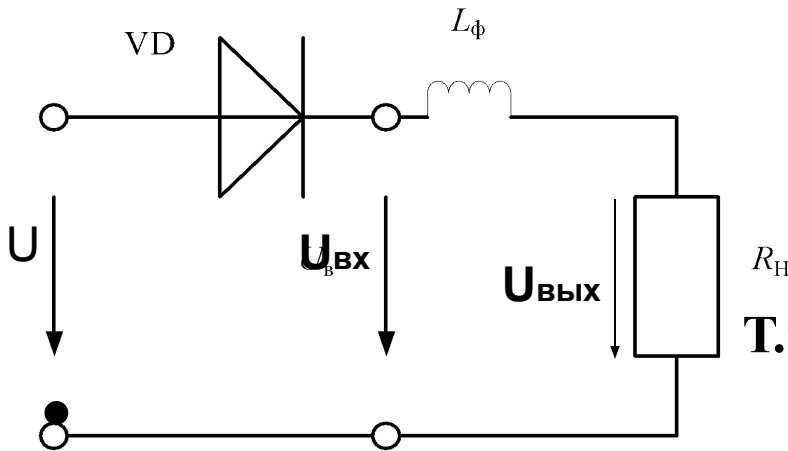
## Индуктивный фильтр

- **Индуктивный фильтр** включается последовательно с нагрузкой и
- представляет большое сопротивление для переменной составляющей тока.

$$S_L = p_{\text{ВХ}} / p_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{вх}} / U_{\text{вых}},$$

где  $p_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / U_{\text{н.ср}}$ ;  $p_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{н.ср}}$ ,

$$U_{\text{ВХ}} = I \sqrt{(\omega m L)^2 + R_{\text{н}}^2}$$



Т.к. для хорошего сглаживания необходимо:

$$X_L \gg R_{\text{н}}; \quad m\omega L_{\phi} \gg R_{\text{н}}$$

$$\text{то } U_{\text{ВХ}} = I\omega m L$$

• Коэффициент сглаживания  $S_L = \frac{m\omega L_{\phi}}{R_{\text{н}}}$

$$L_{\phi} = S_L R_{\text{н}} / m\omega$$

- Индуктивный фильтр эффективен в сочетании с низкоомной

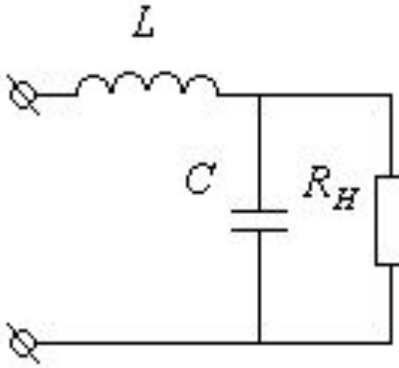


## Г - образный и П - образный фильтры

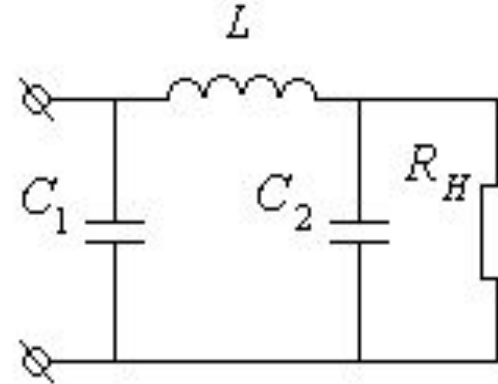
Когда требуется особенно малое значение коэффициента пульсации  $r$  (высокий коэффициент сглаживания), то применяют Г-образный или П-образный фильтры.

### Г-образный фильтр

работает по тому же принципу, что и простейшие фильтры.



**П-образный фильтр** представляет собой последовательное включение емкостного и Г-образного фильтров



Необходимое условие:

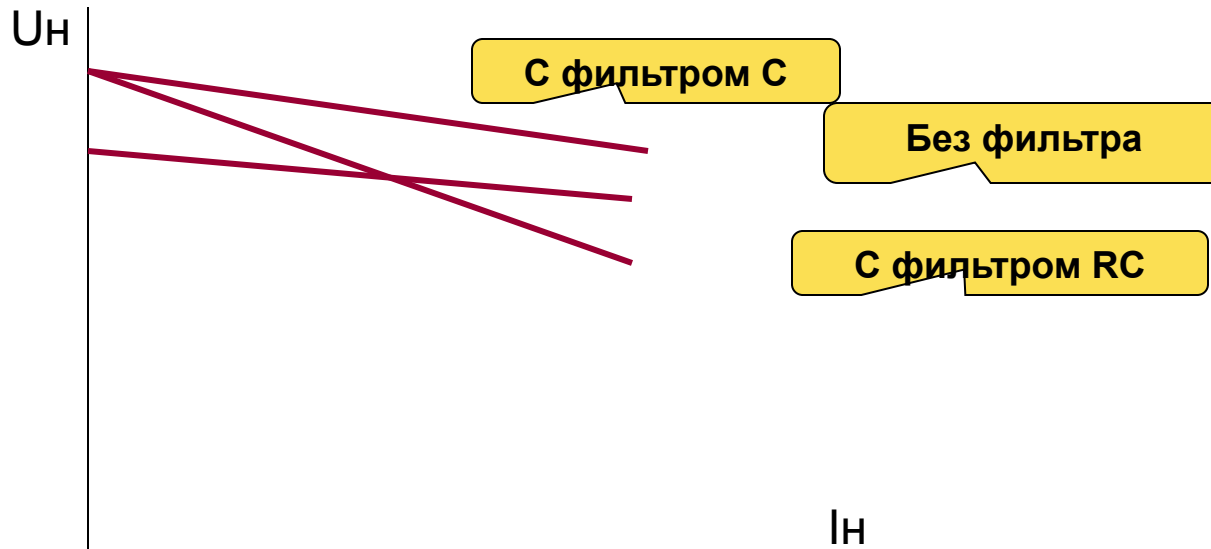
$$\omega L \gg R_H \gg 1/\omega C$$

$$S_{\Gamma} = S_{\phi} S_{\psi} = m^2 \omega^2 C L$$

$$S_{\Pi} = S_{\Gamma} S_{\text{сф}}$$

## Внешние характеристики выпрямителей

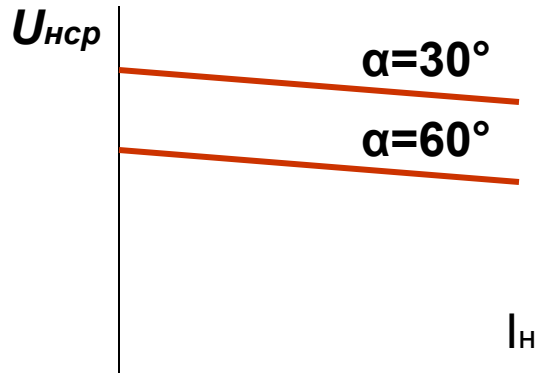
$$U_H = f(I_H)$$



# Характеристики управляемого выпрямителя

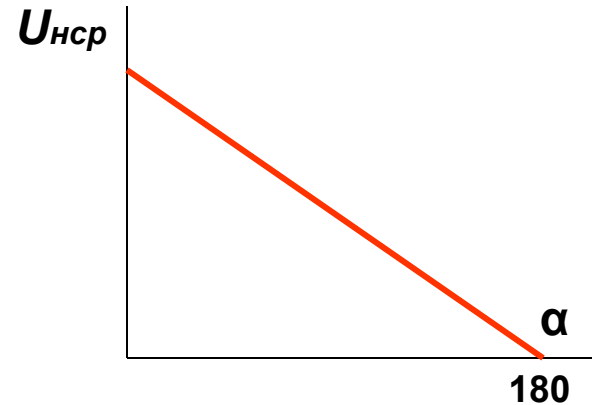
## Внешние характеристики

$$U_{н.ср} = f(I_n) \text{ при } \alpha = \text{const}$$



## Регулировочная характеристика

$$U_{н.ср.} = f(\alpha)$$



Изменяя  $\alpha$  можно регулировать  $U_{н.ср.}$  от  $0,9U_2$  до 0, где  $U_{н.ср}$  – среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке: при  $\alpha = 0$  имеет максимальное значение; при  $\alpha = 180$   $U_{н.ср.} = 0$ .

# Сравнение схем выпрямления



Схема выпрямления		m	Трансформатор				Вентили			Нагрузка			Коэффициент А
			$\frac{U_2}{U_{\text{ф0}}}$	$\frac{I_2}{I_{\text{д}}}$	$\frac{I_1}{I_{\text{д}}/m}$	$\frac{S_T}{P_{\text{д}}}$	$\frac{U_{\text{сmax}}}{U_{\text{д}}}$	$\frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{д}}}$	$\frac{I_{\text{амax}}}{I_{\text{д}}}$	$\frac{U_{\text{ф0}}}{U_2}$	$f_{\text{т.Гц}}$	$\varphi$	
Однофазная нулевая	$x_{\text{д}}=0$	2	1,11	0,79	1,11	1,48	$\pi$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0,9	100	0,67	-
	$x_{\text{д}}=\infty$			0,707					1				1,34
Однофазная мостовая	$x_{\text{д}}=0$	2	1,11	1,11	1,11	1,23	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0,9	100	0,67	-
	$x_{\text{д}}=\infty$			1	1				1,11				1
Трёхфазная нулевая	$x_{\text{д}}=\infty$	3	0,85	0,58	0,47	1,35*	2,09	$\frac{1}{3}$	1	1,17	150	0,25	0,87
Трёхфазный зигзаг	$x_{\text{д}}=\infty$	3	0,85	0,58	0,47	1,46	2,09	$\frac{1}{3}$	1	1,17	150	0,25	0,87
Трёхфазная мостовая	$x_{\text{д}}=\infty$	6	0,43	0,817	0,817	1,045	1,045	$\frac{1}{3}$	1	2,34	300	0,057	0,5
Шестифазная нулевая	$x_{\text{д}}=\infty$	6	0,74	0,41	0,58	1,28	1,55*	$\frac{1}{6}$	1	1,35	300	0,057	1,23
Двойная трёхфазная	$x_{\text{д}}=\infty$	6	0,85	0,29	0,405	1,045	$\frac{1,26}{+0,07}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{2}$	1,17	300	0,057	0,5
Условно-двенадцати-фазная	$x_{\text{д}}=\infty$	12	-	-	-	-	-	-	-	-	600	0,014	-

## Контрольные вопросы и задачи

1. Составьте структурную схему выпрямителя и определите назначение его блоков.
2. Сравните основные параметры неуправляемых одно и двухполупериодных однофазных выпрямителей. Используя графики выходных напряжений, объясните разницу в значениях параметров.
3. Определите коэффициент трансформации  $n$  трансформатора, если известно, что  $R_n = 600 \text{ Ом}$ , действующее значение тока нагрузки  $I_n = 200 \text{ мА}$ , а напряжение на входе первичной обмотки  $U_1 = 220 \text{ В}$ .
4. Чему равно среднее значение выпрямленного тока в сопротивлении нагрузки  $R_n = 400 \text{ Ом}$  однополупериодного выпрямителя, если напряжение первичной обмотки трансформатора  $U_1 = 220 \text{ В}$ , а коэффициент трансформации  $n = 0,045$ ?
5. В каких пределах можно изменять среднее значение выпрямленного напряжения на выходе управляемых выпрямителей?
6. Какие физические процессы положены в основу построения сглаживающих фильтров?
7. В схеме однополупериодного однофазного выпрямителя  $R_n = 500 \text{ Ом}$ . Определите коэффициент сглаживания и параметры емкостного сглаживающего фильтра, обеспечивающего  $K_{\text{пл}} = 0,1$ , если выпрямитель питается от сети.

# ТРЕХФАЗНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ В ТРЕХ ФАЗАХ

## Применение выпрямителей

(- неуправляемый выпрямитель)

- с выходным номинальным током до 1000 А предназначены для питания силовых и оперативных цепей постоянного тока, а также для питания цепей динамического торможения асинхронных электродвигателей
- **Выпрямитель "Дуга-318М1 220/380В"** предназначен для ручной дуговой сварки прямого и сложного профиля различных металлов и сплавов на постоянном токе любой полярности всеми видами электродов, а также в среде защитных газов.

