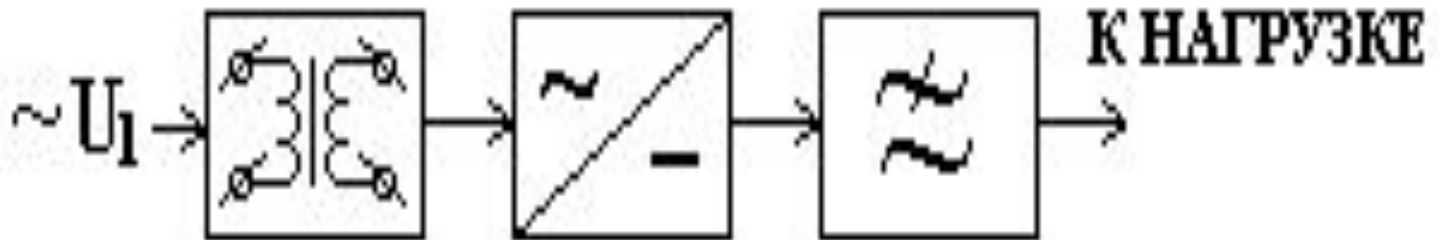


# Выпрямители источников питания

Преподаватель Говорухина О.Е.

# Структурная схема выпрямителя

Выпрямителем, называется статический преобразователь напряжения переменного тока в напряжение постоянного тока. В общем случае выпрямитель состоит из трансформатора, полупроводниковых диодов и сглаживающего фильтра.



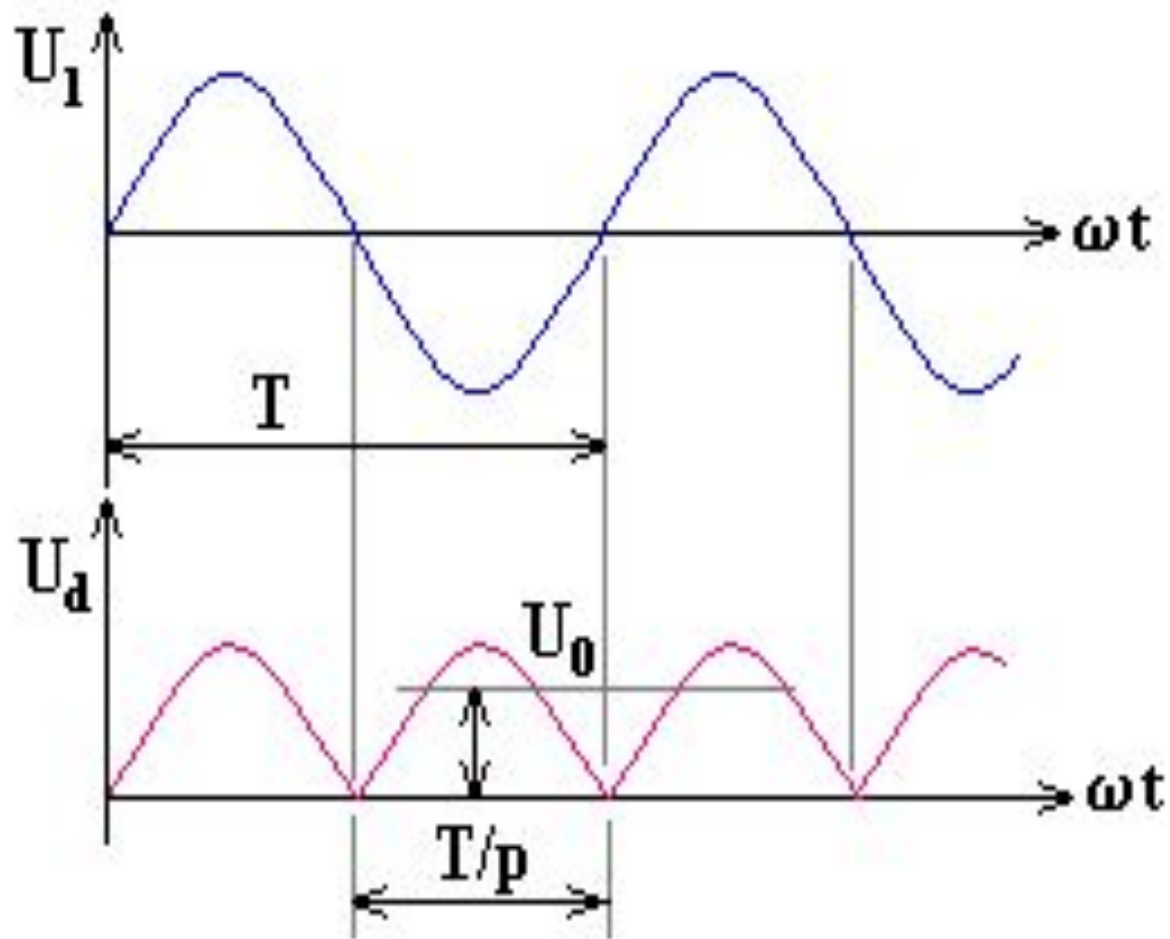
Трансформатор (не обязательный элемент), преобразует напряжение переменного тока на его первичной обмотке в необходимое для получения заданной величины напряжения на входе выпрямителя. Система вентилей (диоды) преобразует напряжение переменного тока в однонаправленное пульсирующее, имеющее в своем составе постоянную составляющую и значительное количество гармонических состав.

$$U_d = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} e^{-jmk}$$

Наибольшей из них является первая гармоника, частота и амплитуда которой определяется схемой выпрямления. Сглаживающий фильтр уменьшает амплитуды всех гармонических составляющих пульсирующего (выпрямленного) напряжения. Расчет токов и напряжений в отдельных узлах схемы выпрямителя ведется из предположения, что полупроводниковые диоды и трансформатор являются идеальными. Подавая на вход выпрямителя переменное напряжение с периодом  $T$  (рисунок 13), на выходе выпрямителя получим пульсирующее напряжение с периодом  $T/p$  (в данном случае  $p=2$  - пульсность схемы), состоящее из постоянной составляющей и ряда гармоник с частотами  $f, 2f, \dots, nf$ . Величины напряжений каждой составляющей находятся разложением выпрямленного напряжения в ряд Фурье.

$$U_d = U_0 + U_{1m} \cos \omega \cdot t + U_{2m} \cos 2\omega \cdot t + \dots + U_{nm} \cos n\omega \cdot t,$$

## Временные диаграммы напряжения на входе и выходе выпрямителя при $p=2$



Выпрямленное напряжение представляет собой периодическую функцию с периодом пульсаций, равным  $T_p = T/p$  или  $f_p = p \cdot f$ . Амплитуда  $k$ -ой составляющей выпрямленного напряжения равна:

где  $k = 1, 2, \dots, n$ .

$$U_{km} = \frac{2p}{T} \int_{-T/2p}^{+T/2p} U_m \cos k p \omega t \cdot d\omega t = \frac{2p}{\pi(k^2 p^2 - 1)} U_m \cdot \sin \frac{\pi}{p},$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения (среднее значение) равно:

$$U_0 = \frac{p}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{p} = \frac{p}{\pi} \sqrt{2} \cdot U_{2л} \cdot \sin \frac{\pi}{p}.$$

где  $U_{2л}$  - действующее линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

# Функциональные схемы однофазных выпрямителей

Для выпрямления однофазного переменного напряжения широко применяют три типа выпрямителей: однополупериодный и два двухполупериодных

## Однополупериодный выпрямитель

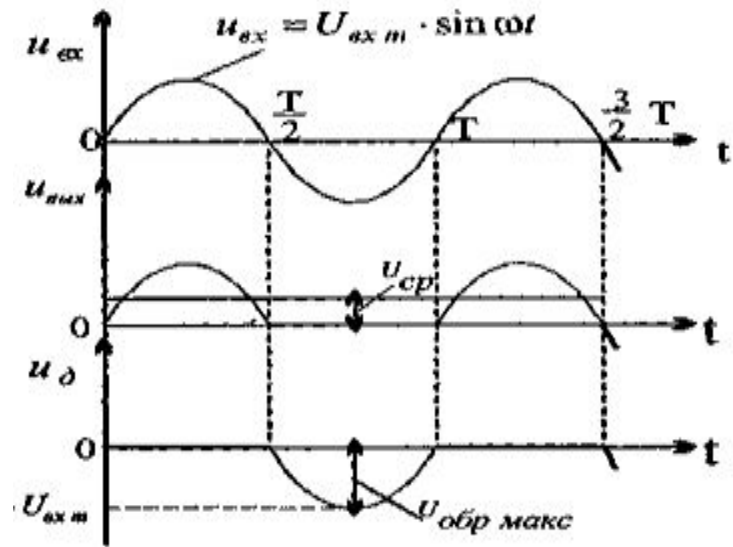
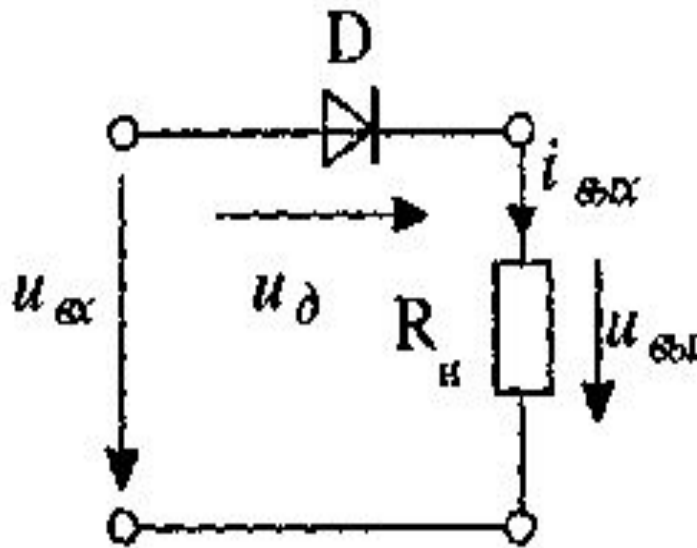
Выпрямитель состоит из трансформатора, к вторичной обмотке которого последовательно подсоединены диод  $D$  и нагрузочный резистор  $R_n$ .

Для упрощения анализа работы выпрямителей трансформатор и диод считают идеальными, т. е. принимают следующие допущения:

- у трансформатора активное сопротивление обмотки, а у диода прямое
- сопротивление равно нулю;
- обратное сопротивление диода равно бесконечности;
- в трансформаторе отсутствуют потоки рассеяния

При таких допущениях с подключением первичной обмотки трансформатора к сети переменного синусоидального напряжения во вторичной обмотке будет наводиться синусоидальная э. д. с.

# Схема однополупериодного выпрямителя и осциллограммы в точках схемы





Работу выпрямителя удобно рассматривать с помощью временных диаграмм. В первый полупериод, т. е. в интервале времени  $0 - T/2$ , диод открыт, так как потенциал точки а выше потенциала точки б и под действием напряжения в вторичной обмотки трансформатора возникает ток  $I_n$ . В интервале времени  $T/2 - T$  диод закрыт, ток в нагрузочном резисторе отсутствует, а к запертому диоду прикладывается обратное напряжение  $U_2$ .

Основными электрическими параметрами  
однополупериодного выпрямителя:

средние значения выпрямленного тока и напряжения  $I_{\text{ср}}$  и  $U_{\text{ср}}$ .

*средние значения выпрямленного тока и напряжения  $I_{\text{ср}}$  и  $U_{\text{ср}}$ :*

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\text{вх}} dt$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{\text{вх}} dt$$

*мощность нагрузочного устройства  $P_{\text{н.ср}} = U_{\text{н.ср}} I_{\text{н.ср}}$*

*коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения*

$$\xi = \frac{U_{\text{м}}}{U_{\text{ср}}}$$

где:  $U_{\text{м}}$  - амплитуда основной гармоники (первой),

$U_{\text{ср}}$  - среднее значение выпрямленного напряжения (постоянная составляющая).

Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота.

Анализ электрических параметров позволяет сделать вывод о недостатках этого выпрямителя:

- большой коэффициент пульсаций,
- малые значения выпрямленного тока и напряжения.
- ток  $I_2$  имеет постоянную составляющую, которая вызывает подмагничивание сердечника трансформатора, из-за чего уменьшается магнитная проницаемость сердечника, что, в свою очередь, снижает индуктивность обмоток трансформатора. Это приводит к росту тока холостого хода трансформатора, а следовательно, к снижению к.п.д. всего выпрямителя.
- Однополупериодный выпрямитель применяют обычно для питания высокоомных нагрузочных устройств (например, электроннолучевых трубок), допускающих повышенную пульсацию; мощность не более 10—15 Вт.

**Основные параметры выпрямителя определяются по следующим формулам**

$$U_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{\text{вх}} \approx 0,45 U_{\text{вх}}$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\text{н}}}$$

$$\xi = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

$$U_{\text{обр.макс}} = \sqrt{2} U_{\text{вх}} = \pi * U_{\text{ср}}$$

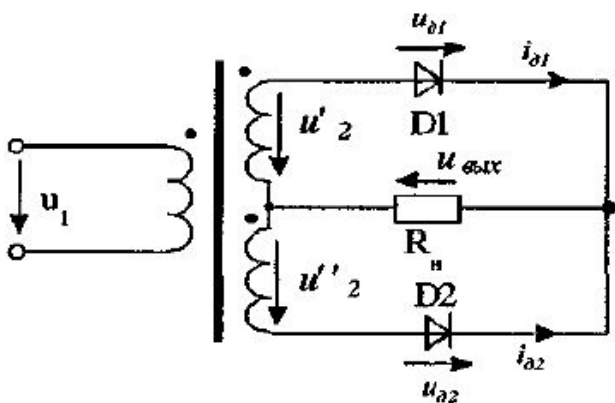
$$I_{\text{д.ср}} = I_{\text{ср}}$$

$$I_{\text{д.макс}} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{вх}}}{R_{\text{н}}} = \pi * I_{\text{ср}}$$

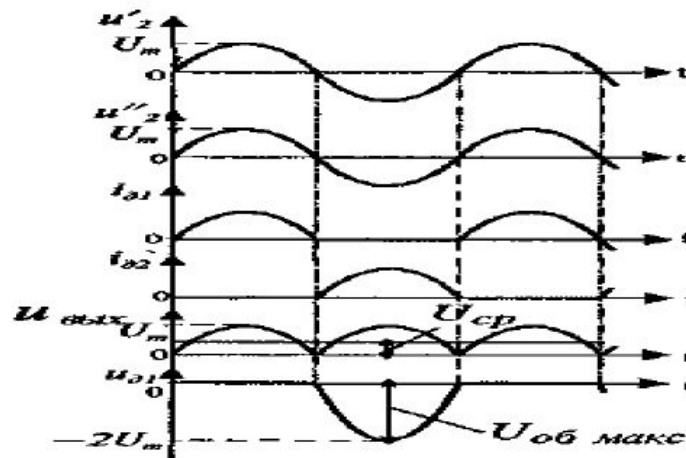
## Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой представляет собой параллельное соединение двух однополупериодных выпрямителей. Рассматриваемый выпрямитель может использоваться только с трансформатором, имеющим вывод от середины вторичной обмотки. Диоды схемы проводят ток поочередно, каждый в течение полупериода

а) – Схема мостового выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора, б) осциллограммы в точках схемы



а)



б)

Основные параметры выпрямителя определяются по следующим формулам:

$$U_{\text{ср}} = 2 * \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9U_2$$

где:  $U_2$  –действующие значение напряжения каждой половины вторичной обмотки;

$$I_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\text{н}}}$$

$$\xi = \frac{2}{3} \approx 0,67$$

$$U_{\text{обр.макс}} = 2 * \sqrt{2}U_2 = \pi * U_{\text{ср}}$$

$$I_{\text{д.ср}} = \frac{I_{\text{ср}}}{2}$$

$$I_{\text{д.макс}} = \frac{\sqrt{2}U_2}{R_{\text{н}}} = \frac{\pi}{2} * I_{\text{ср}}$$

Рассматриваемый выпрямитель характеризуется довольно высокими технико-экономическими показателями и широко используется на практике.

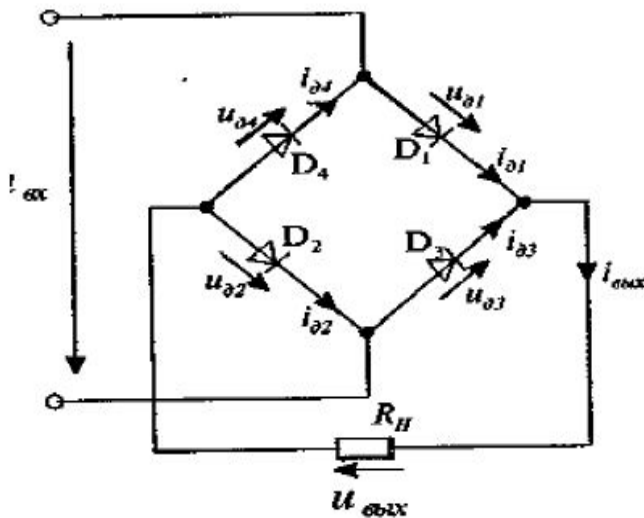
Достоинствами выпрямителя являются:

- Высокая нагрузочная способность;
- Низкая пульсация выпрямленного напряжения.

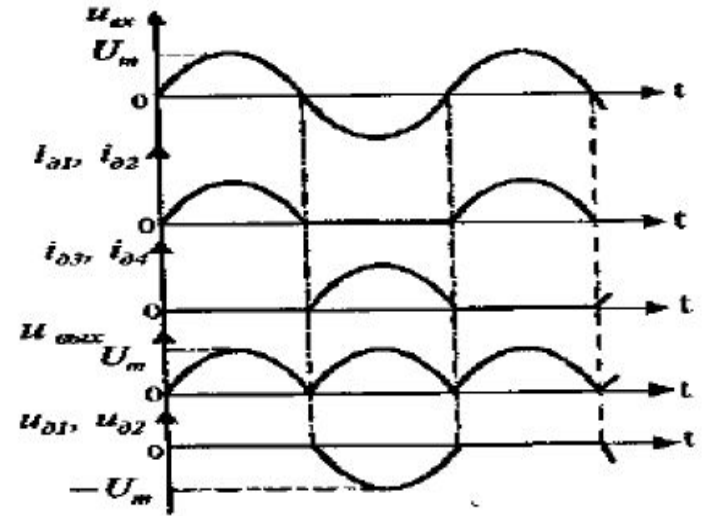
Недостатками выпрямителя являются:

- Необходимость применения трансформатора со средней точкой;
- Повышенные требования к диодам по обратному напряжению.

# Двухполупериодный мостовой выпрямитель



а)



б)

а) – Схема двухполупериодный мостовой выпрямитель, б) осциллограммы в точках схемы



Однофазный мостовой выпрямитель можно считать пределом совершенства тех однофазных выпрямителей, которые могут использоваться без трансформатора. Не известна другая однофазная схема без трансформатора, в которой бы так рационально использовались диоды. Диоды в рассматриваемой схеме включаются и выключаются парами. Одна пара — это диоды D1 и D2, а другая — D3 и D4. Таким образом, к примеру, диоды D1 и D2 или оба включены и проводят ток, или оба выключены. Основные расчетные соотношения выпрямителя следующие:

$$U_{\text{ср}} = 2 * \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{\text{вх}} \approx 0,9 U_{\text{вх}}$$

$$U_{\text{обр.макс}} = \sqrt{2} U_{\text{вх}} = \pi * U_{\text{ср}}$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{R_{\text{н}}}$$

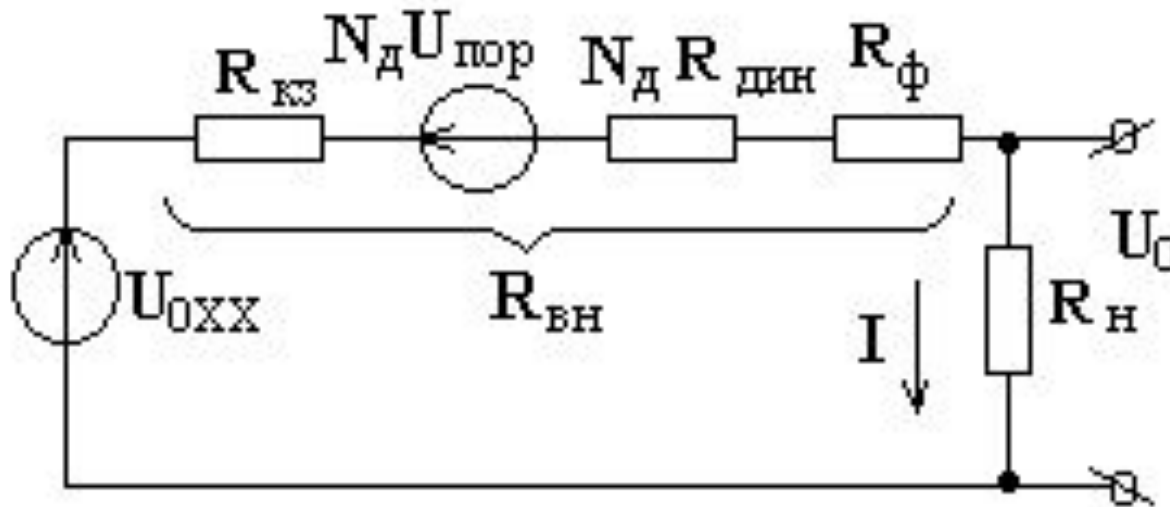
$$I_{\text{д.ср}} = \frac{I_{\text{ср}}}{2}$$

$$\xi = \frac{2}{3} \approx 0,57$$

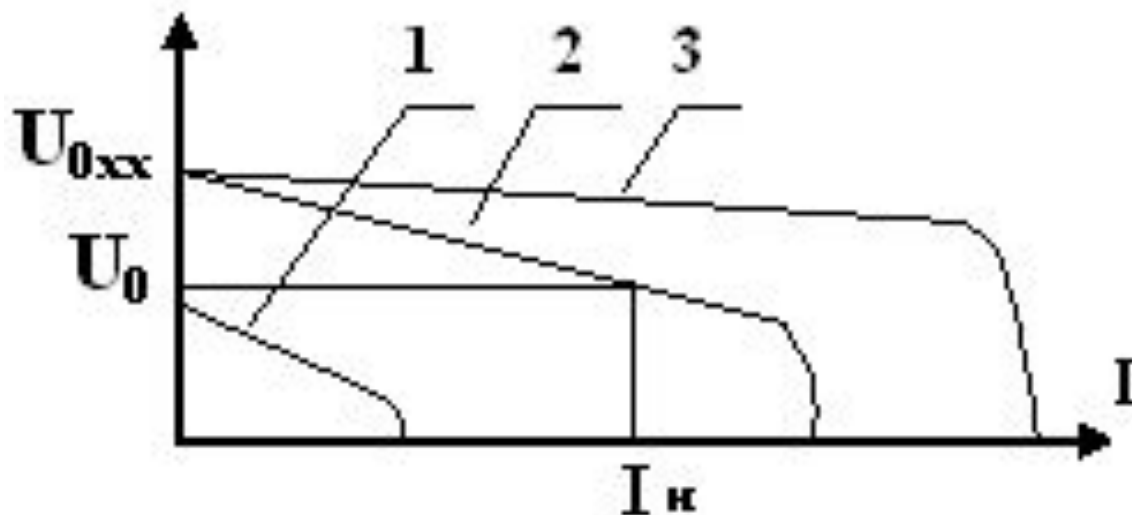
$$I_{\text{д.макс}} = \frac{\sqrt{2} U_{\text{вх}}}{R_{\text{н}}} = \frac{\pi}{2} * I_{\text{ср}}$$

## Внешняя характеристика выпрямителя

Внешняя характеристика выпрямителя - это зависимость средневывпрямленного напряжения на выходе выпрямителя от изменения тока нагрузки. На рисунке представлена схема замещения выпрямительного устройства в цепи постоянного тока.



Внешний вид нагрузочной характеристики выпрямителя. 1-однополупериодный, 2-двухполупериодный мостовой, 3-двухполупериодный с нулевой точкой.



$R_{вн}$  - внутреннее сопротивление выпрямителя (активн  $R_{кз}$ ; опротивление потерь), которое включает активные потери в трансформаторе , потери в дросселе сглаживающего фильтра  $R_{\phi}$  и потери в диод  $R_{дин}$  ,  $U_{пор}$ ). Очевидно, что внешняя характеристика имеет падающий характер. Всегда имеет место

$$U_{0н} < U_{0xx}$$

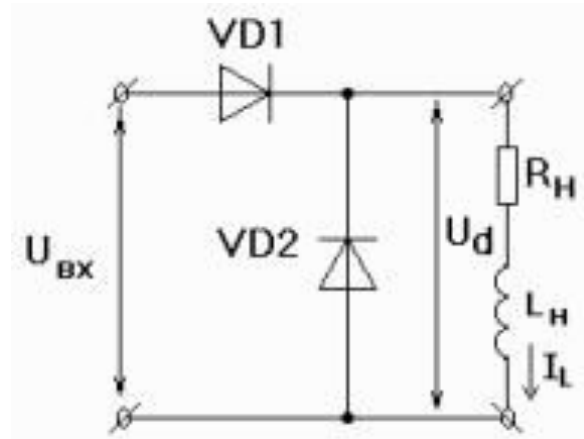
при токе нагрузки отличном от нуля

# Влияние различных видов нагрузок на работу неуправляемых выпрямителей

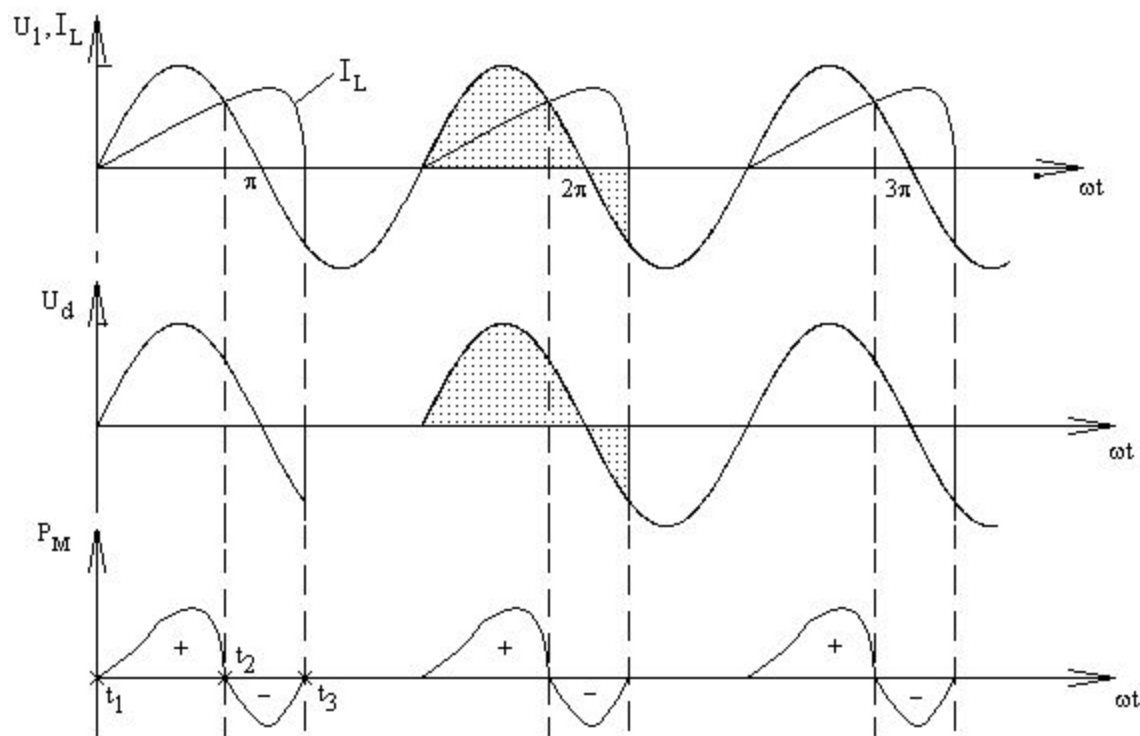
## Активно-индуктивная нагрузка

Рассмотрим на примере однополупериодной схемы выпрямления:

Схема однополупериодного выпрямителя, работающего на резистивно-индуктивную нагрузку

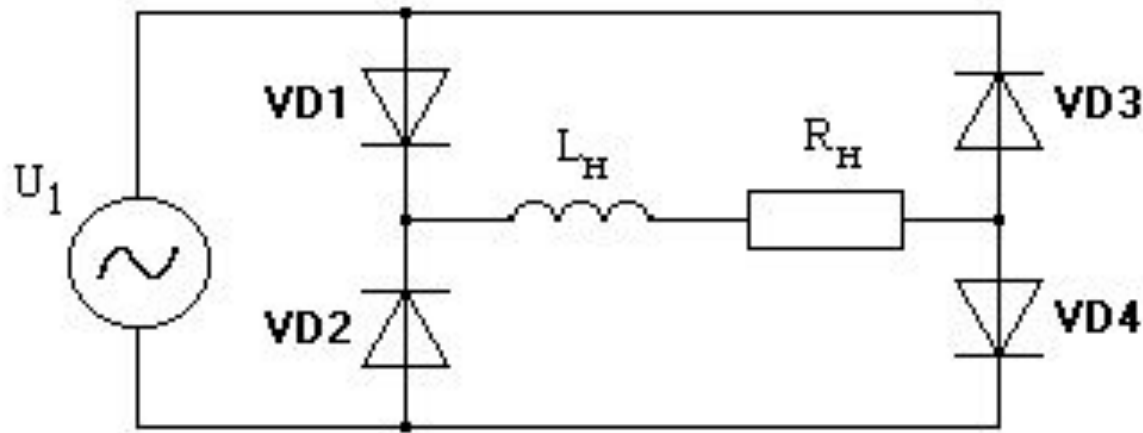


# Зависимости токов, напряжений и мгновенной мощности при работе на резистивно-индуктивную нагрузку



На рисунке изображены графические зависимости для токов, напряжений и мгновенной мощности с целью пояснения процессов, протекающих в схеме выпрямления. На интервале  $[t_1 ; t_2 ]$  положительный потенциал фазы  $U_1$  коммутирует диод  $VD_1$ , при этом в дросселе  $L_n$  накапливается реактивная энергия. На интервале  $[t_2 ; t_3 ]$   $VD_1$  остается открытым из-за положительного тока дросселя и энергия дросселя отдается в источник  $U_1$  (такой режим называется инверторным). Коммутационная задержка на выключение  $VD_1$  уменьшает уровень выпрямляемого напряжения, увеличивая его пульсации. Для исключения влияния индуктивности нагрузки на форму выпрямленного напряжения параллельно к нагрузке включается обратный диод  $VD_2$ , который обеспечивает сброс реактивной энергии дросселя в нагрузку и тем самым исключает отрицательный выброс выпрямленного напряжения. В двухполупериодной однофазной схеме роль обратного диода играет один из диодов выпрямителя, который включается первым.

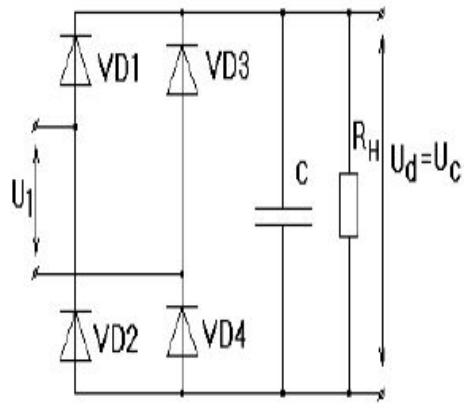
## Схема подключения индуктивной нагрузки к мостовому двухполупериодному выпрямителю



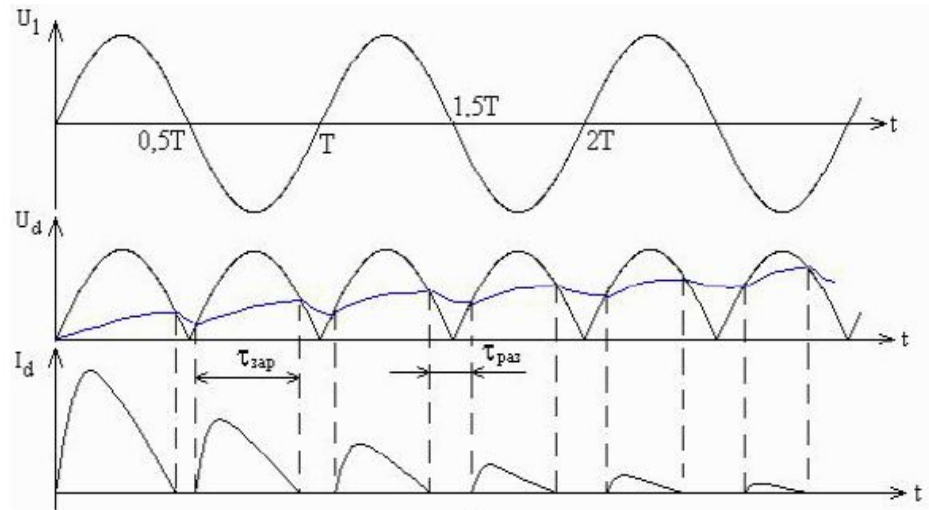
При положительной полуволне напряжения  $U_1$  ток протекает по контуру: "+"  $U_1 \rightarrow VD1 \rightarrow L_H \rightarrow R_H \rightarrow VD4 \rightarrow$  "-"  $U_1$ . Предположим, что при прохождении напряжения  $U_1$  через ноль в момент смены полярности, первым включился диод  $VD2$ . Тогда сброс реактивной энергии будет осуществляться через  $VD4$  и включенный  $VD2$ . В выпрямленном напряжении не будет присутствовать отрицательного выброс напряжения.

# Активно-емкостная нагрузка

а) Схема подключения емкостной нагрузки к выпрямителю; б) Графические зависимости токов и напряжений в схеме



а)



б)



Рассмотрим влияние активно-емкостной нагрузки на примере работы однофазного мостового выпрямителя.

На рисунке представлены графические зависимости токов и напряжений, поясняющие переходные процессы в схеме в момент подключения выпрямителя к источнику  $U_1$ . На интервале  $t_{зар}$   $U_1 > U_c$  и при этом происходит заряд емкости  $C$  сглаживающего фильтра через внутреннее сопротивление выпрямительного звена. При этом появляется большой импульсный ток, значения которого в 20...40 раз выше установившегося значения средневывпрямленного тока вентиля. Особенно это выражено в источниках питания с бестрансформаторным входом. Для ограничения этого тока вводят резисторы, терморезисторы или резисторы, шунтированные управляемыми ключами, выполненные на симисторах, тиристорах или динисторах. Ключи позволяют с учетом времени установления переходного процесса производить ограничение тока только в момент пуска источника питания, следовательно, повышаются КПД и надежность выпрямителя.

На интервале  $t_{раз}$ , когда напряжение на емкости уравнивается с напряжением источника, конденсатор разряжается на нагрузку. С увеличением тока нагрузки увеличивается уровень пульсации выпрямленного напряжения из-за уменьшения постоянной цепи разряда  $t_{раз} = R_n C$ .

## Выбор схемы выпрямителя, основные расчетные соотношения

При расчете выпрямителя используют метод Терентьева - метод номограмм. Он основан на расчете вспомогательных коэффициентов зависящих от угла протекания тока через вентиль. Вводят коэффициент  $A=f(Q)$ , где  $Q$  - угол протекания тока через вентиль. Для различных схем выпрямителей приводятся номограммы, которые получены экспериментальным путем для различных мощностей и схем выпрямителей. Для расчета параметров  $U_{обр}$ ,  $I_{аср}$ ,  $I_{ад}$ ,  $U_2$ ,  $I_2$  вводят вспомогательные коэффициенты:  $B, C, D, F=f(A)$ . Расчет схемы выпрямителя проводят в два этапа Исходные данные:  $U_0$  и  $I_0$  — выпрямленное напряжение и ток, требуемые для питания нагрузки. Пульсация выпрямленного напряжения  $\xi$

# Выбор схемы выпрямителя

Определяется величиной мощности  $P_0$ , потребляемой нагрузкой.

$$P_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

где  $U_0$  и  $I_0$  — выпрямленное напряжение и ток, требуемые для питания нагрузки.

При нескольких нагрузках, питающихся от одного источника  $U_0$ , расчетное значение выпрямленного тока  $I_0$  находится из соотношения:

$$I_0 = I_{01} + I_{02} + \dots$$

где  $I_{01}$  и  $I_{02}$  — токи потребляемые, каскадами нагрузки.

Для получения небольших (десятки, сотни ватт) мощностей применяют однофазные схемы.

Для выпрямления токов мощностью  $P_0 > 1 \text{ кВт}$  служат более сложные трехфазные схемы, обеспечивающие равномерную нагрузку на трехфазную сеть и не требующие громоздких фильтров.

Выбранная схема выпрямителя должна обеспечивать требуемую пульсацию напряжения

$$\epsilon_{\text{выбранная}} \leq \epsilon$$

При выборе схемы необходимо использовать и соображения экономичности и надежности.

## Выбор типа вентиля.

Тип вентиля определяется основными параметрами:

- средним  $I_0$  и максимальным  $I_{\max}$  значениями выпрямленного тока ;
- величиной наибольшего обратного напряжения  $U_{0\text{бр.}\max}$  действующего в схеме.

Выбранный вентиль «должен допускать» токи и напряжения не ниже расчетных для данной схемы.

Режим работы вентиля в схеме зависит от вида схемы и характера нагрузки (активная, индуктивная, емкостная).

При расчете режима в схемах выпрямителей определяют коэффициент  $A$ , связывающий режим работы трансформатора и вентиля.

$$A = \frac{\pi(R_i + r_{\text{тр}})}{10m} \cdot \frac{I_0}{U_0}$$

где  $R_i$  — внутреннее сопротивление вентиля ( $R_i \approx 10$  Ом для большинства плоскостных полупроводниковых диодов);

$m$  — число фаз выпрямителя (определяется по числу полупериодов выпрямленного тока в схеме);

$r_{\text{тр}}$  — сопротивление обмоток трансформатора. Сопротивление обмоток трансформатора выбирают в зависимости от мощности выпрямителя:

**Таблица 3 - Порядок выбора величины сопротивления обмоток трансформатора**

$P_0$ , Вт	1—10	10-100	100—1000
$r_{\text{тр}}$ Ом ,	$(0,1—0,07)R_{\text{н}}$	$(0,08—0,05) R_{\text{н}}$	$(0,06-0,04) R_{\text{н}}$

Сопротивление нагрузки  $R_{\text{н}} = U_0/I_0$  (Ом).

По найденному значению коэффициента  $A$ , пользуясь номограммой (рисунок23), определяют коэффициенты  $B$ ,  $D$ ,  $F$ ,  $H$ , зная которые используя данные из таблицы 4,

можно рассчитать режим и параметры вентиля.

По значениям параметров вентиля определяют по справочнику его тип из условия:

$$\begin{cases} I_{Д \max} \geq I_m \\ U_{Д \text{обр}} \geq U_{\text{обр}} \end{cases}$$

Для выпрямления высоких напряжений и получения большой величины обратного напряжения ( $U_{\text{обр}}$ ) включают последовательно по несколько однотипных диодов (Рисунок 23). Но даже однотипные диоды имеют разброс параметров (неравенство сопротивлений обратному току). Чтобы при этих условиях обеспечить равномерное распределение обратных напряжений на нескольких последовательно включенных диодах, их шунтируют высокоомными сопротивлениями в десятки кОм, мощностью 0,25—0,5 Вт. Обычно каждое шунтирующее сопротивление принимают такой величины, чтобы оно примерно в 10 раз было меньше минимального обратного сопротивления диода.

Для получения больших выпрямленных токов применяют параллельное соединение однотипных диодов (Рисунок 24). Чтобы обеспечить равенство прямых токов через диоды в каждую ветвь последовательно с диодом включают резистор величиной 5-10 Ом.

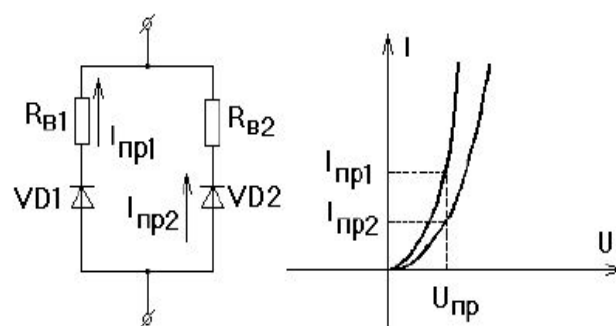
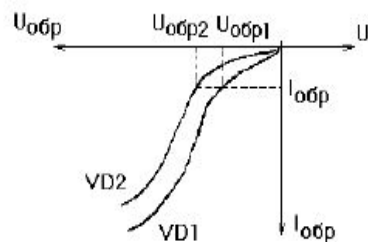
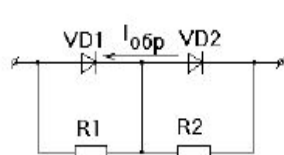


Рисунок 23 - Последовательное соединение диодов

Рисунок 24 - Параллельное соединение диодов

Таблица 4 - Формулы для расчета выпрямителя

Схема выпрямителя	Реакция нагрузки	Режим вентиля			
		Число вентилялей	Обратное напряжение на вентиле $U_{обр}$	Среднее значение тока вентиля $I_0$	Максимальное значение тока вентиля $I_m$
Однополупериодная	Активная	1	$\pi U_0$	$I_0$	$\pi I_0$
	Емкостная	1	$2,82BU_0$	$I_0$	$F I_0$
Двухполупериодная с нулевой точкой	Активная	2	$\pi U_0$	$0,5 I_0$	$0,5 \pi I_0$
	Индуктивная	2	$\pi U_0$	$0,5 I_0$	$I_0$
	Емкостная	2	$2,82B U_0$	$0,5 I_0$	$0,5 F I_0$
Однофазная мостовая	Активная	4	$0,5\pi U_0$	$0,5 I_0$	$0,5 \pi I_0$
	Индуктивная	4	$0,5\pi U_0$	$0,5 I_0$	$I_0$
	Емкостная	4	$1,41B U_0$	$0,5 I_0$	$0,5 F I_0$
Схема удвоения	Емкостная	2	$1,41B U_0$	$I_0$	$F I_0$
Трехфазная	Активная	3	$2,09 U_0$	$0,33 I_0$	$1,21 I_0$
	Индуктивная	3	$2,09 U_0$	$0,33 I_0$	$I_0$
Трехфазная мостовая (схема Ларионова)	Активная	6	$1,045 U_0$	$0,33 I_0$	$1,045 I_0$
	Индуктивная	6	$1,045 U_0$	$0,33 I_0$	$I_0$

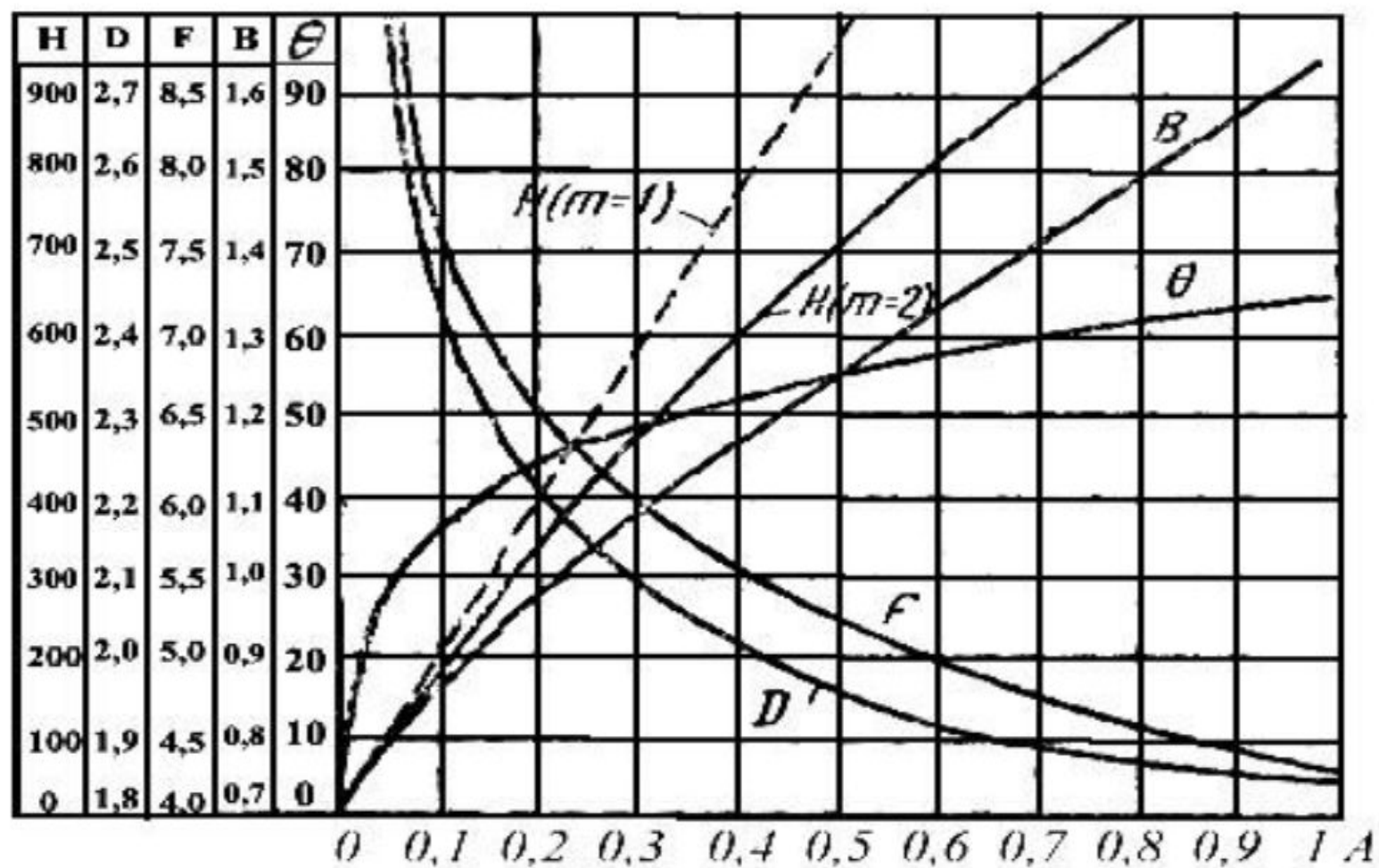


Рисунок 25 - Номограмма для расчета схемы выпрямителя