

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Введение. Содержание курса

Основные понятия, термины и определения

- Электроника – это часть электротехники, относящаяся к вакуумным, газонаполненным и ртутным вентилям или полупроводниковым приборам, объединенным под общим названием «электронные элементы».
- Такие элементы используются в силовой электронике, автоматике и технике связи.

Основные понятия, термины и определения

- Задачей высокопроизводительной электронной техники является генерирование, передача и распределение электроэнергии с последующим ее преобразованием и регулированием в соответствии с нуждами потребителя.
- О значении и масштабах силовых преобразовательных устройств можно судить по тому факту, что не менее 25 – 30% всей генерируемой (на переменном токе) электроэнергии подлежит преобразованию, и эта цифра имеет тенденцию к росту.

- **В системах передачи электрической энергии, в тиристорном электроприводе постоянного тока, возникает потребность в преобразовании постоянного тока в переменный (инвертирование тока) в месте потребления.**
- Данные примеры охватывают не все случаи, когда требуется преобразовывать электрическую энергию одного вида в другой. Более трети всей вырабатываемой электроэнергии преобразуется в другой вид энергии, поэтому технический прогресс во многом связан с успешным развитием **преобразовательных устройств (преобразовательной техники).**

Предмет и задачи курса

- Дисциплина «Преобразовательные устройства» предназначена для изучения силовых электронных усилительно - преобразовательных устройств на основе полупроводниковых приборов.
- Цель учебной дисциплины – формирование компетенций связанных с проектированием и эксплуатацией современной преобразовательной техники, которые позволят успешно решать теоретические и практические задачи в профессиональной деятельности.
- Задачи изучения основ силовой электроники прежде всего опираются на анализ базовых типов этих устройств, т. е. на установление свойств устройств в функции их параметров и представляют собой набор знаний, умений и навыков по использованию теоретических и практических материалов, связанных с расчетом, выбором, монтажом и наладкой преобразовательной техники.

Краткий обзор исторического развития преобразовательной

ТЕХНИКИ

- Теоретические основы процессов преобразования электроэнергии с помощью вентильных устройств были разработаны в начале прошлого столетия. Широкое внедрение в практику силовая электроника получила после создания в 50-х годах силовых полупроводниковых приборов (СПП): диодов, транзисторов и тиристоров.
- Вначале такие преобразователи выполнялись исключительно на основе электромеханических систем, например, в системе «двигатель-генератор», когда двигатель, питаемый электроэнергией одного вида, приводит во вращение генератор, вырабатывающий электроэнергию другого вида или с другими параметрами. В настоящее время такие системы почти полностью вытеснены полупроводниковыми статическими преобразователями, имеющими существенные преимущества, такие как:
 - - отсутствие вращающихся частей;
 - - отсутствие скользящих контактов;
 - - достаточно высокий КПД;
 - - приемлемые массогабаритные показатели;
 - - простота обслуживания.

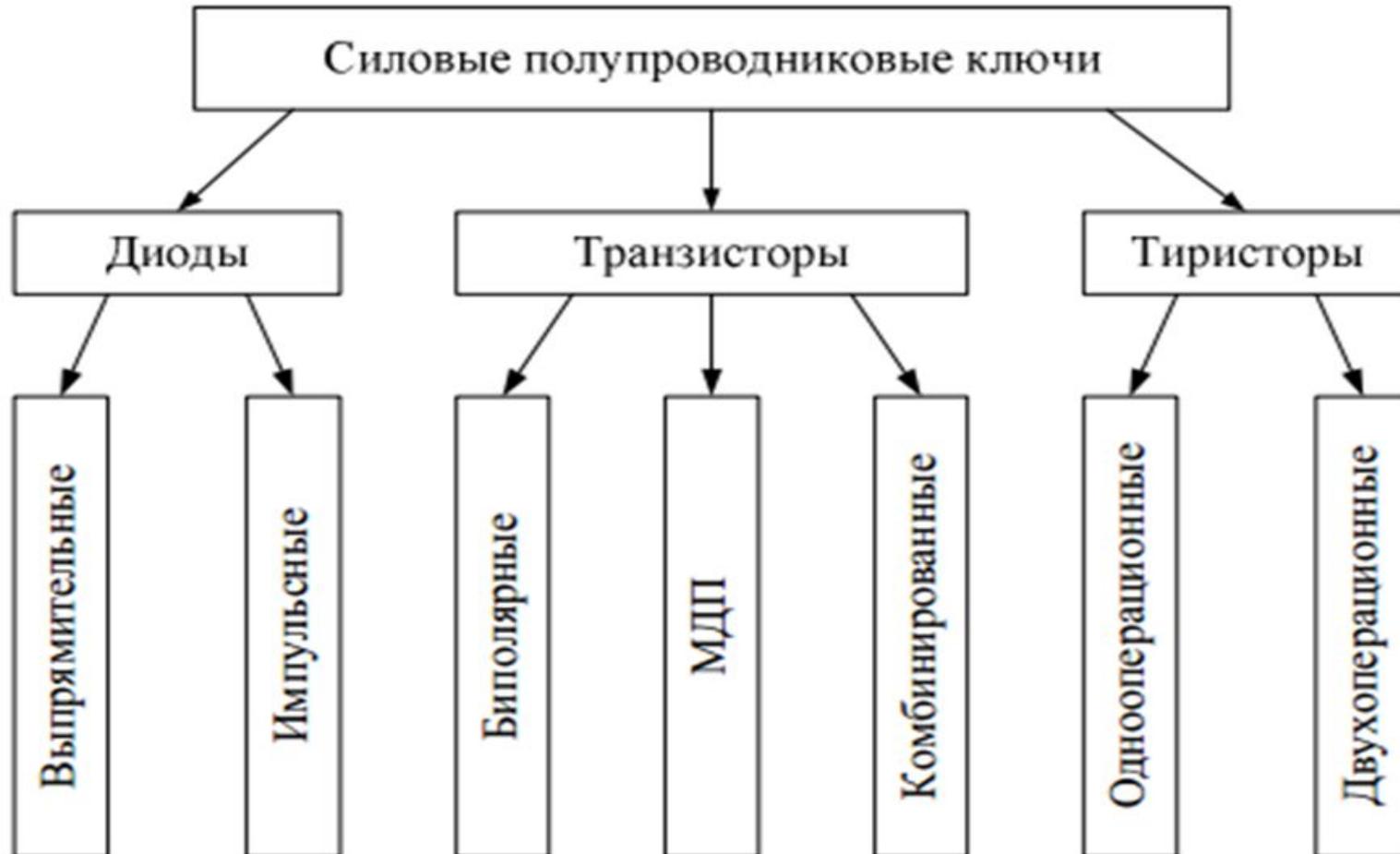
Современная классификация устройств преобразовательной техники

- Выпрямители, преобразующие энергию переменного тока в энергию постоянного тока.
- Инверторы, преобразующие энергию постоянного тока в энергию переменного тока.
- Преобразователи переменного тока, преобразующие энергию переменного тока одних параметров в энергию переменного тока других параметров.
- Преобразователи энергии постоянного тока одного напряжения в энергию постоянного тока другого напряжения.

Основа полупроводниковой преобразовательной техники

- Силовым электронным ключом называется устройство для размыкания или замыкания электрической цепи, которое содержит по меньшей мере один полностью управляемый прибор, например транзистор или тиристор.
- Под ключевым способом подразумевается, что прибор может находиться только во включенном (проводящем) или выключенном (непроводящем) состоянии, при этом время перехода из одного состояния в другое минимально.

Классификационная схема силовых электронных ключей

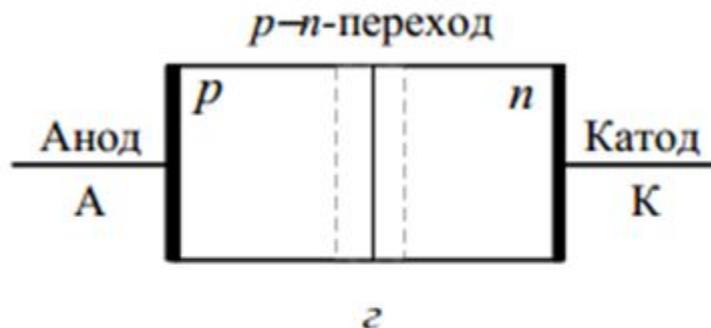


Классификационная схема силовых электронных ключей

- Силовые полупроводниковые приборы (ключи) по принципу действия подразделяются на три основные группы:
 - силовые неуправляемые вентили — диоды;
 - силовые транзисторы;
 - силовые управляемые вентили — тиристоры.

СИЛОВЫЕ ДИОДЫ

- **Диод** – это двухэлектродный, неуправляемый полупроводниковый электро-преобразовательный прибор, имеющий два вывода (*анод* со стороны *p*-слоя и *катод* со стороны *n*-слоя), содержащий один *p-n*-переход и обладающий односторонней проводимостью тока.



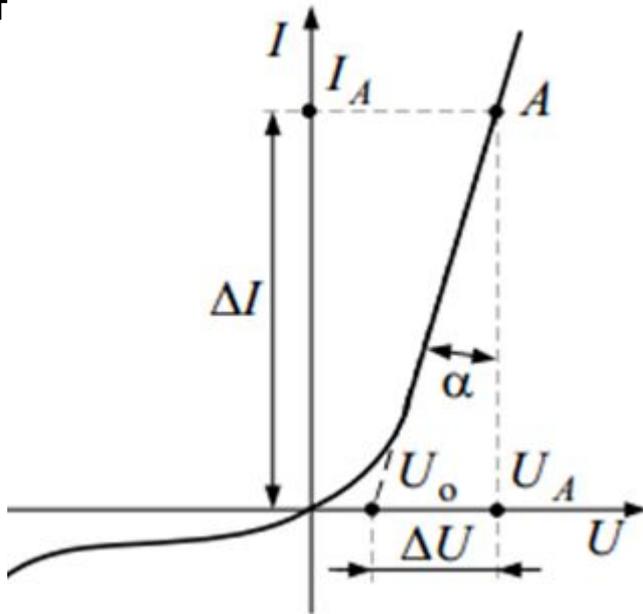
Конструктивное исполнение ДИОДОВ

- Конструктивно силовые диоды выполняются в виде дискретных элементов либо в виде диодных сборок, к примеру, диодных мостов, силовых диодных модулей, выполненных в едином корпусе



Статическая вольт-амперная характеристика диода (ВАХ)

- **Статическим режимом** работы ключа называется режим, установившийся после переключения ключа в одно из следующих состояний: включенное (проводящее ток нагрузки) или выключенное (не проводящее ток)



При расчетах статическую ВАХ аппроксимируют в виде двух отрезков прямых (пунктир на рис.). Выделяют идеализированную ВАХ, которая позволяет учесть потери в проводящем состоянии, а для закрытого состояния диод считается идеальным (сопротивление равно бесконечности).

Идеализированная модель диода

- Согласно идеализированной ВАХ модель диода в открытом состоянии описывается линейным уравнением:

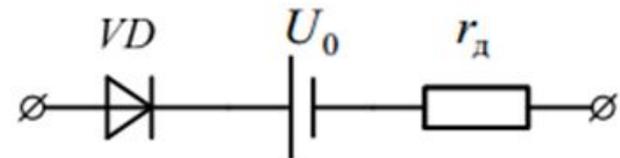
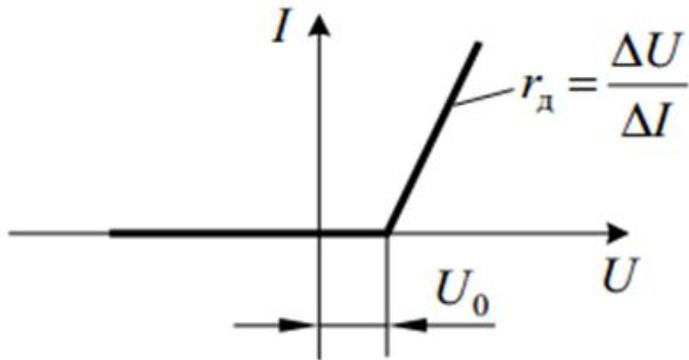
$$U = U_0 + I \cdot r_d,$$

где U_0 – пороговое напряжение диода;

$r_d = \Delta U / \Delta I$ – дифференциальное сопротивление диода во включенном состоянии.

Идеализированная модель диода

- Идеализированная вольт-амперная характеристика диода (а) и его схема замещения (б)

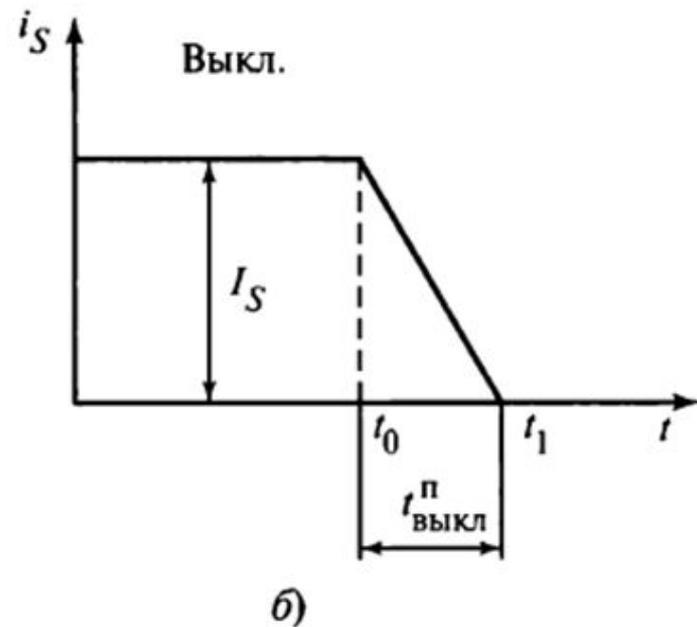
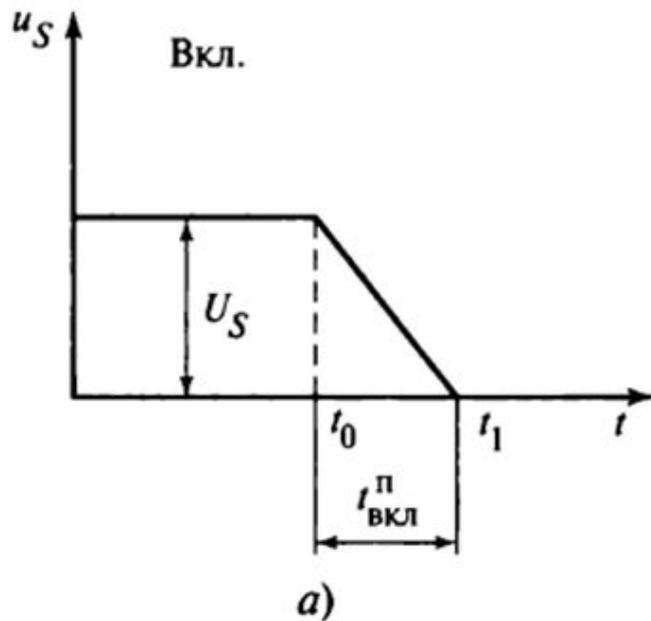


Динамическая вольт-амперная характеристика диода

- Динамическим режимом работы ключа называется режим, при котором происходит переход из одного состояния в другое (из включенного в выключенное и наоборот).
- Динамическая вольт-амперная характеристика - это зависимость напряжения на ключе u_s от тока i_s в процессе переключения. Динамическая ВАХ является траекторией переключения (коммутации) электронного ключа.

Динамическая вольт-амперная характеристика диода

- Диаграммы напряжения и тока на интервалах включения (а) и выключения (б)



Параметры силовых диодов

- **Параметры** – это численные значения величин, определяющих характерные точки ВАХ и допустимые режимы.

Основными параметрами диодов являются:

- максимальный ток ($I_{\text{пр.мах}}$);
- допустимое значение обратного напряжения ($U_{\text{обр.мах}}$).

Параметры силовых диодов

К статическим параметрам относятся:

- статическое сопротивление диода $R_{ст} = \frac{U_A}{I_A}$
- номинальное значение прямого тока $I_{пр ном}$;
- номинальное значение обратного тока $I_{обр ном}$;
- номинальное значение обратного напряжения $U_{обр ном}$;
- номинальное значение прямого падения напряжения $U_{пр ном}$;
- напряжение отсечки U_0 ;

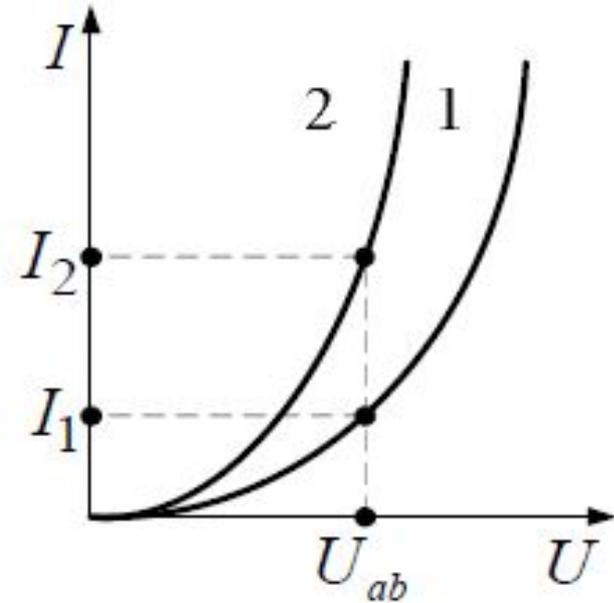
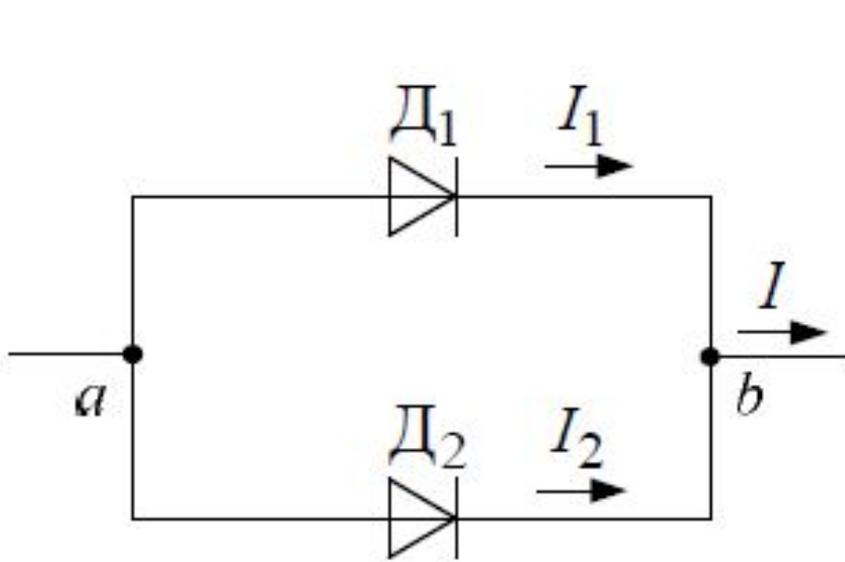
К динамическим параметрам относятся:

- динамическое сопротивление $R_{дин}$;
- скорость нарастания прямого тока $\frac{di}{dt}$;
- скорость нарастания обратного напряжения $\frac{du}{dt}$;
- время восстановления обратного напряжения $t_{восст}$;
- предельная частота f_{max} .

Соединения силовых диодов

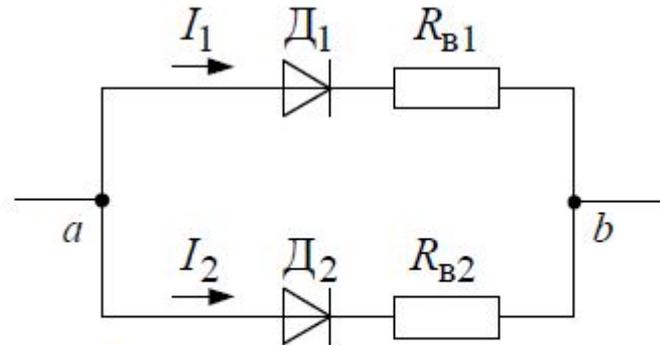
- В настоящее время силовые диоды выпускаются на токи до 2000 А и рабочие напряжения до 4000 В.
- На большие значения предельных токов и напряжений необходимо использовать параллельное, либо последовательное, либо смешанное включение диодов.

Параллельное соединение диодов

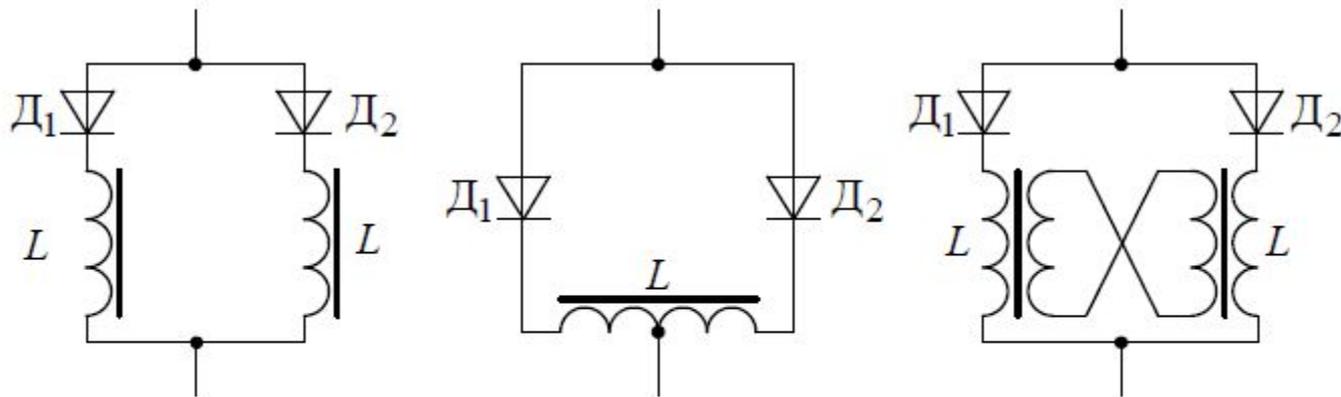


*Параллельное соединение силовых диодов
и их вольт-амперные характеристики*

Способы выравнивания токов

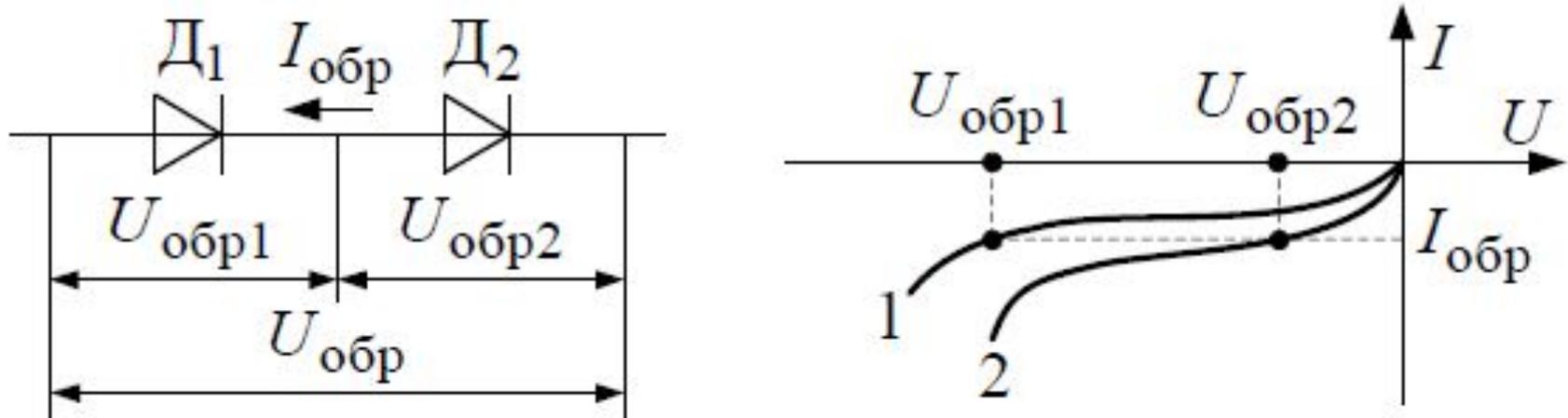


Выравнивание токов с помощью выравнивающих сопротивлений



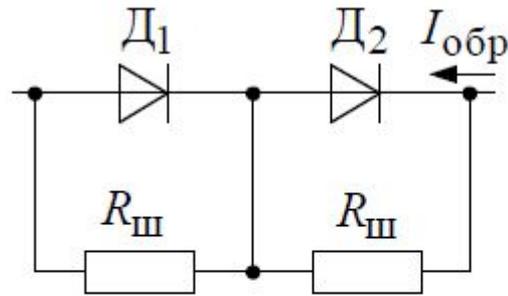
Выравнивание токов с помощью индуктивных делителей

Последовательное соединение диодов

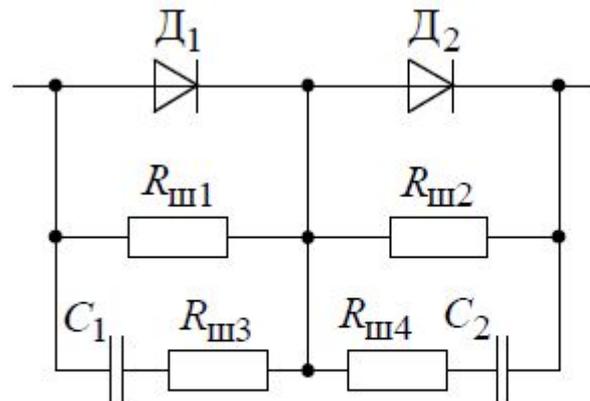


*Последовательное включение диодов
и их вольт-амперные характеристики*

Способы выравнивания напряжений

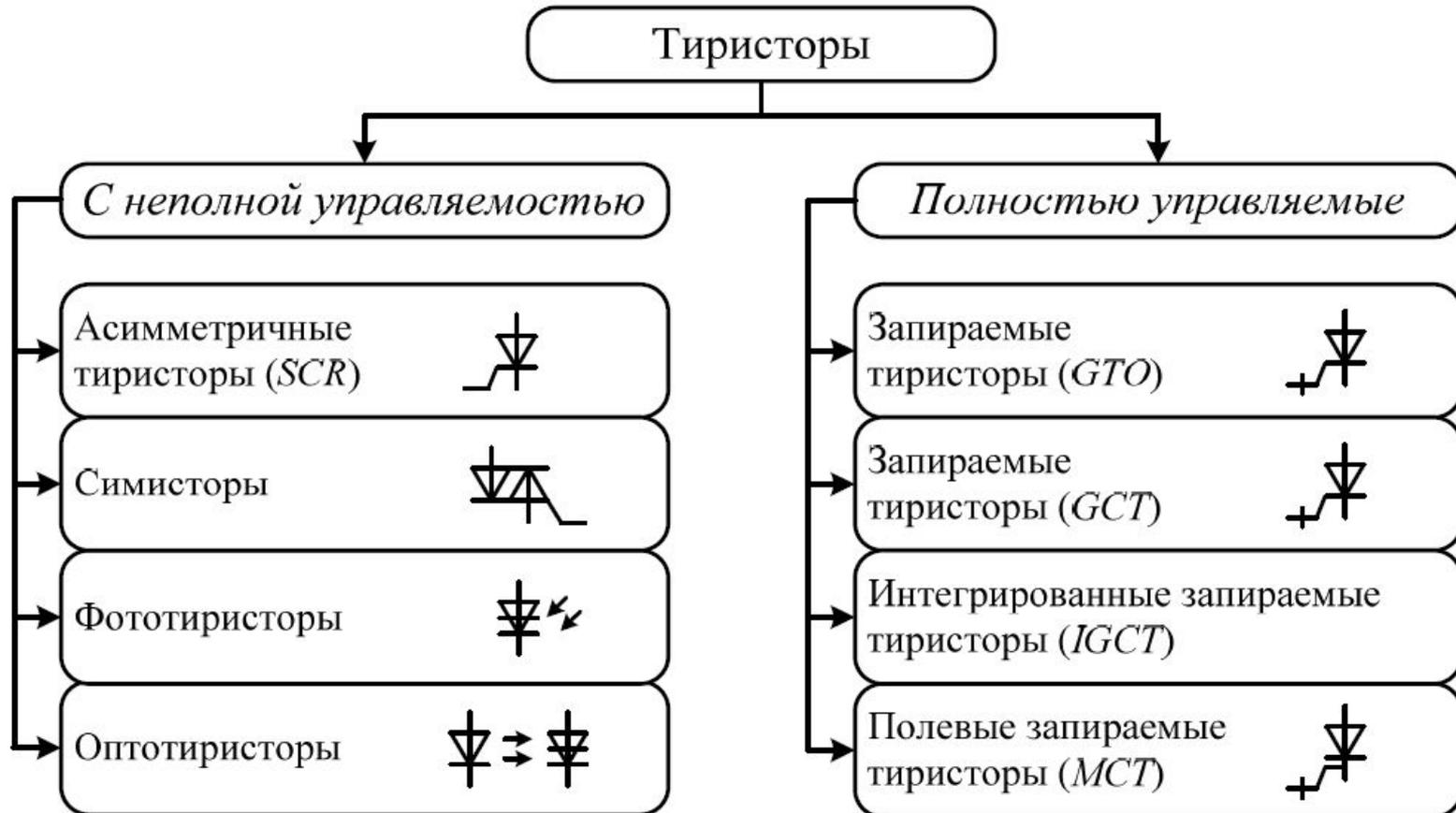


*Выравнивание обратных напряжений
с помощью шунтовых резисторов*



*Схема выравнивания обратных напряжений
в переходных режимах*

ТИРИСТОРЫ



Тиристоры: дискретное (а) и модульное (б) исполнение; структура тиристора (в)



а



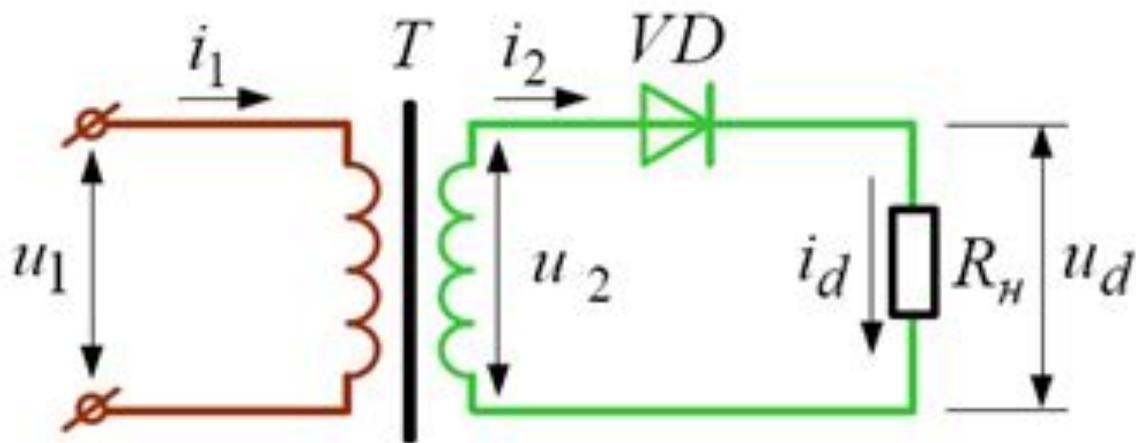
б



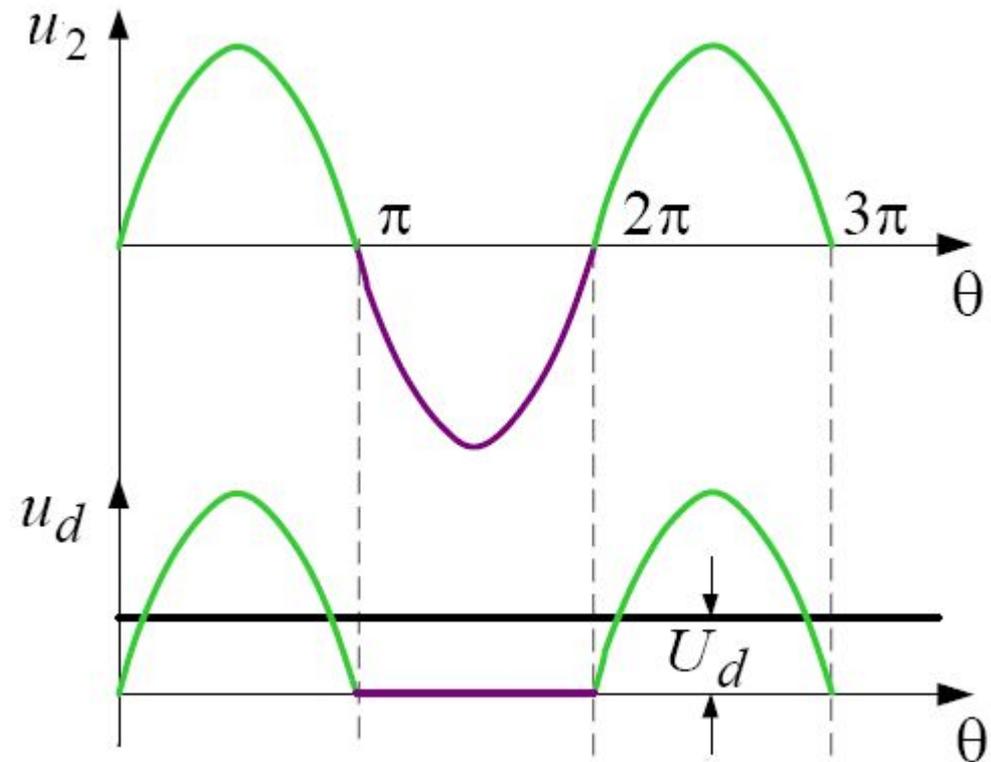
в

Однофазный однополупериодный выпрямитель

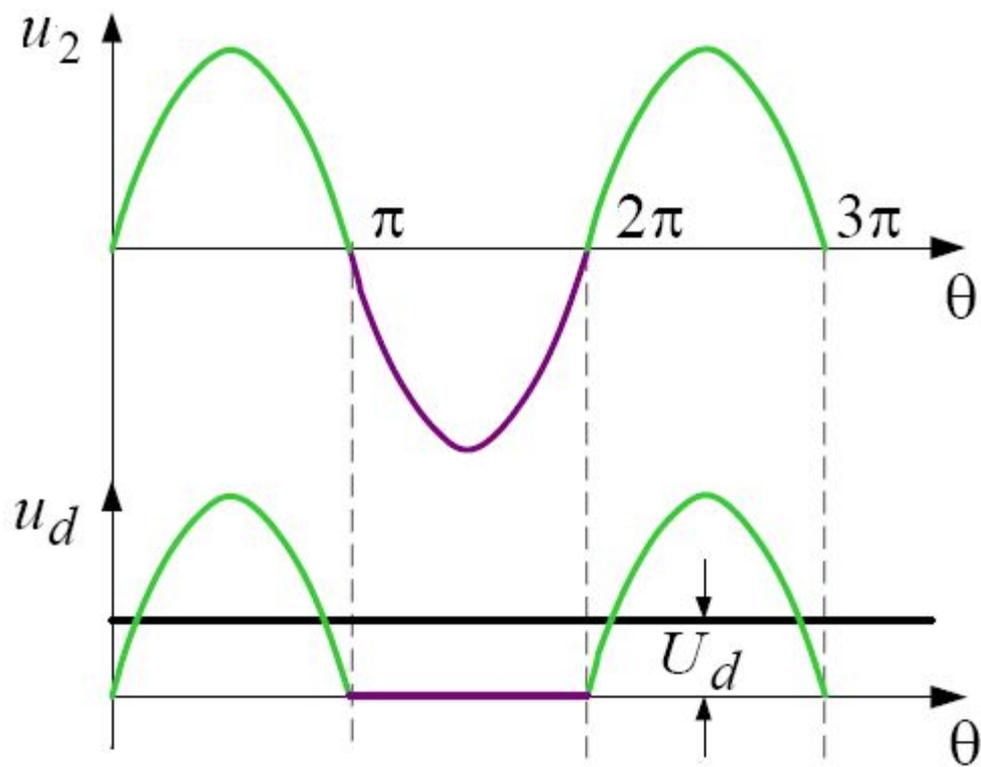
- Трансформатор T играет двойную роль:
- служит для подачи на вход выпрямителя U_2 ,
- обеспечивает гальваническую развязку цепи нагрузки и питающей сети.



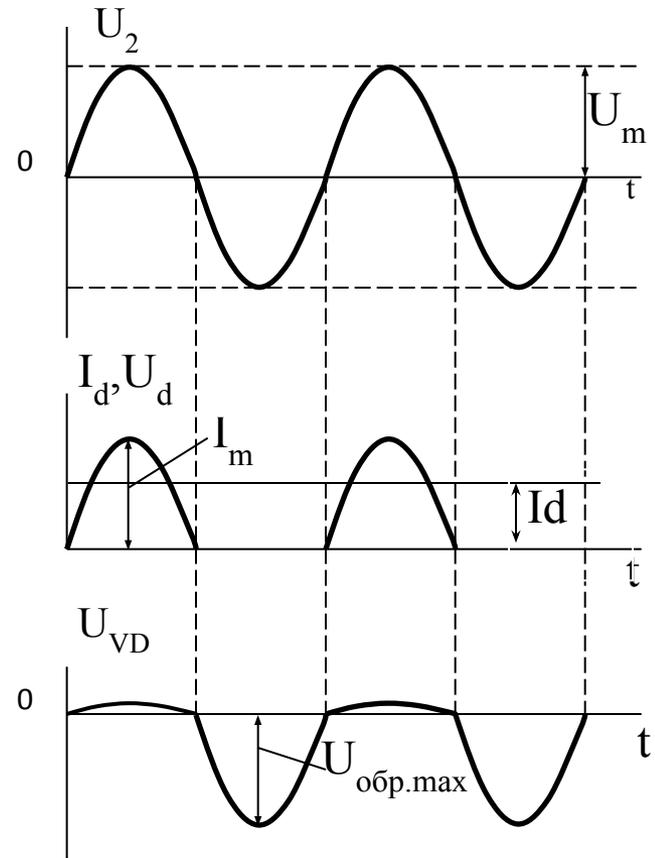
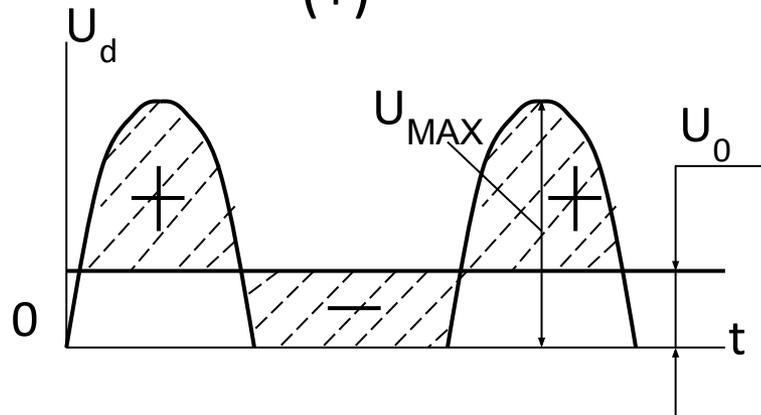
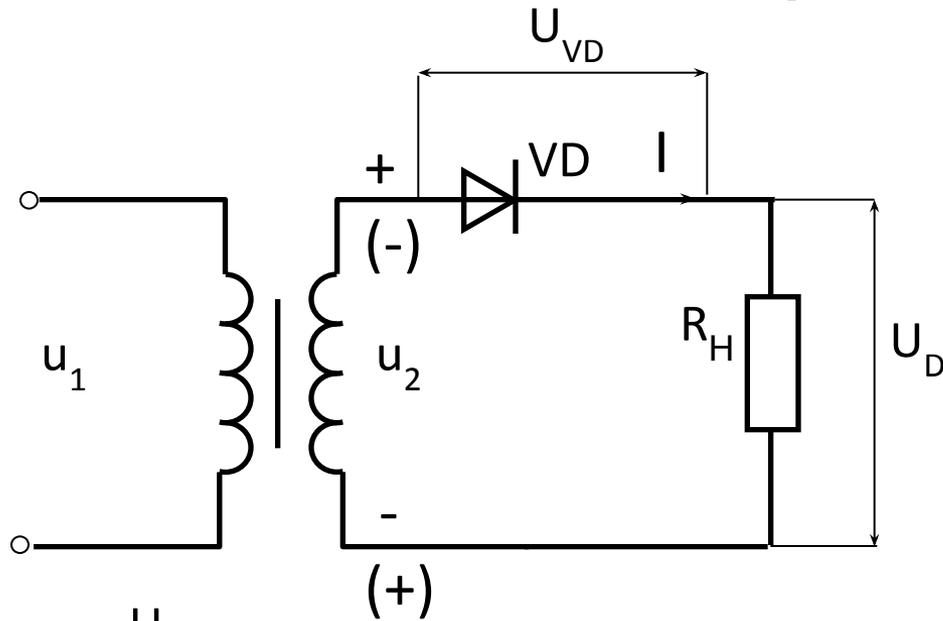
- Благодаря односторонней проводимости вентиля ток в цепи нагрузки будет протекать только в течение одной половины периода напряжения на вторичной обмотке трансформатора



- На интервале $0 - \pi$ u_2 будет иметь полярность, прямую по отношению к вентилю VD , вентиль открыт и в цепи нагрузки протекает ток.
- На интервале $\pi - 2\pi$ u_2 имеет противоположную полярность, вентиль VD закрыт и ток нагрузки равен нулю.



Однофазная однополупериодная схема выпрямления



- Поскольку диод идеален (потерь нет), то в первом полупериоде все напряжение вторичной обмотки трансформатора приложено к нагрузке R_H . График выпрямленного напряжения повторяет положительную полусинусоиду графика напряжения u_2 .
- Через нагрузку, диод и вторичную обмотку трансформатора протекает ток I .
- Во время второго полупериода напряжения u_2 диод закрыт и к нему приложено обратное напряжение $U_{обр}$.

Основные расчетные соотношения

- Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения

$$k = \frac{U_{01}}{U_0}$$

где U_{01} - амплитуда основной (первой) гармоники при разложении в ряд Фурье.

U_0 - среднее значение выпрямленного напряжения

$$k = 1,57$$

- Среднее значение выпрямленного напряжения и тока определяется с помощью коэффициентов ряда Фурье

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_2 d(\omega t), \quad I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_2 d(\omega t)$$

$$u_2 = U_{2m} \sin \omega t \quad i_2 = I_{2m} \sin \omega t$$

$$U_d = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{U_2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 0.45 \cdot U_2 \quad I_d = \frac{I_{2m}}{\pi}$$

$$U_{обр. \max} = \sqrt{2} U_2$$

Недостатки однофазной однополупериодной схемы выпрямления

- Большой коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения
- Большие масса и габариты трансформатора (вынужденное подмагничивание магнитопровода трансформатора)

Однофазная нулевая двухполупериодная схема выпрямления (с нулевым выводом)

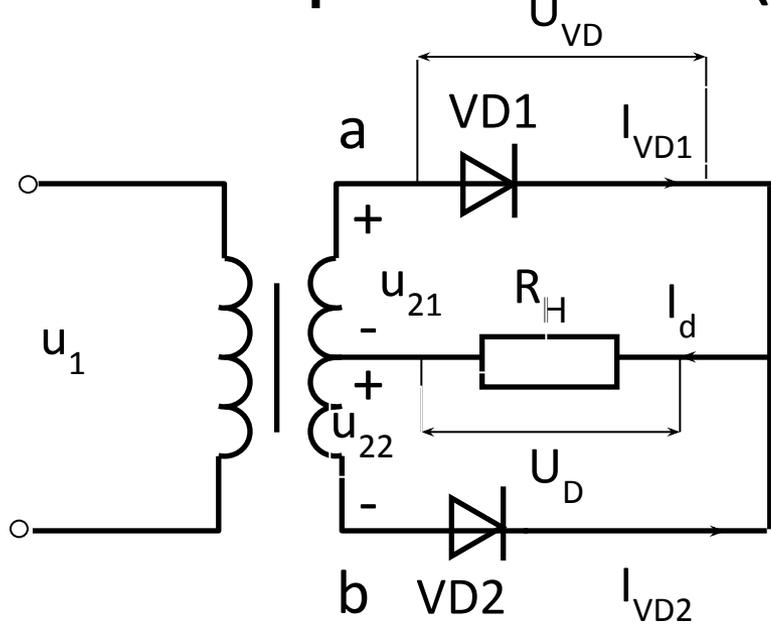


Схема соединения обмоток трансформатора такова, что одинаковые по величине напряжения на выводах вторичных обмоток относительно общей (нулевой) точки сдвинуты по фазе на 180°

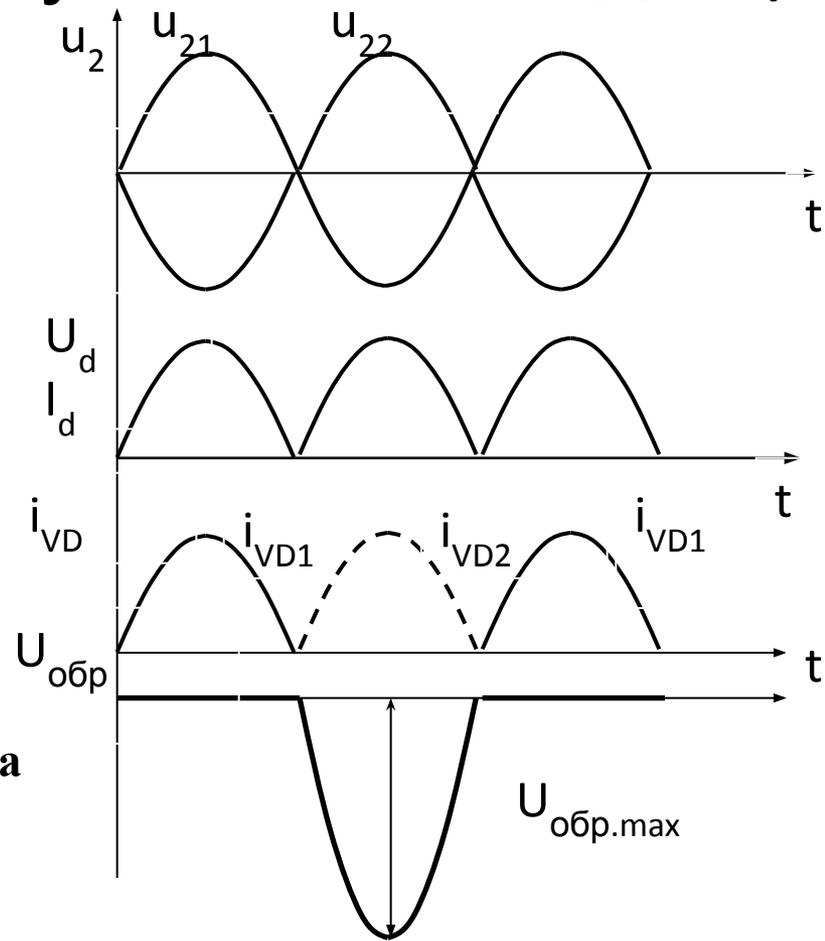


График $U_{\text{обр}}$

- Во второй полупериод закрыт диод VD1, так как находится под обратным напряжением равным разности потенциалов точек a и b и максимальное значение этой разности потенциалов равно удвоенному амплитудному значению напряжения одной из половин вторичной обмотки.

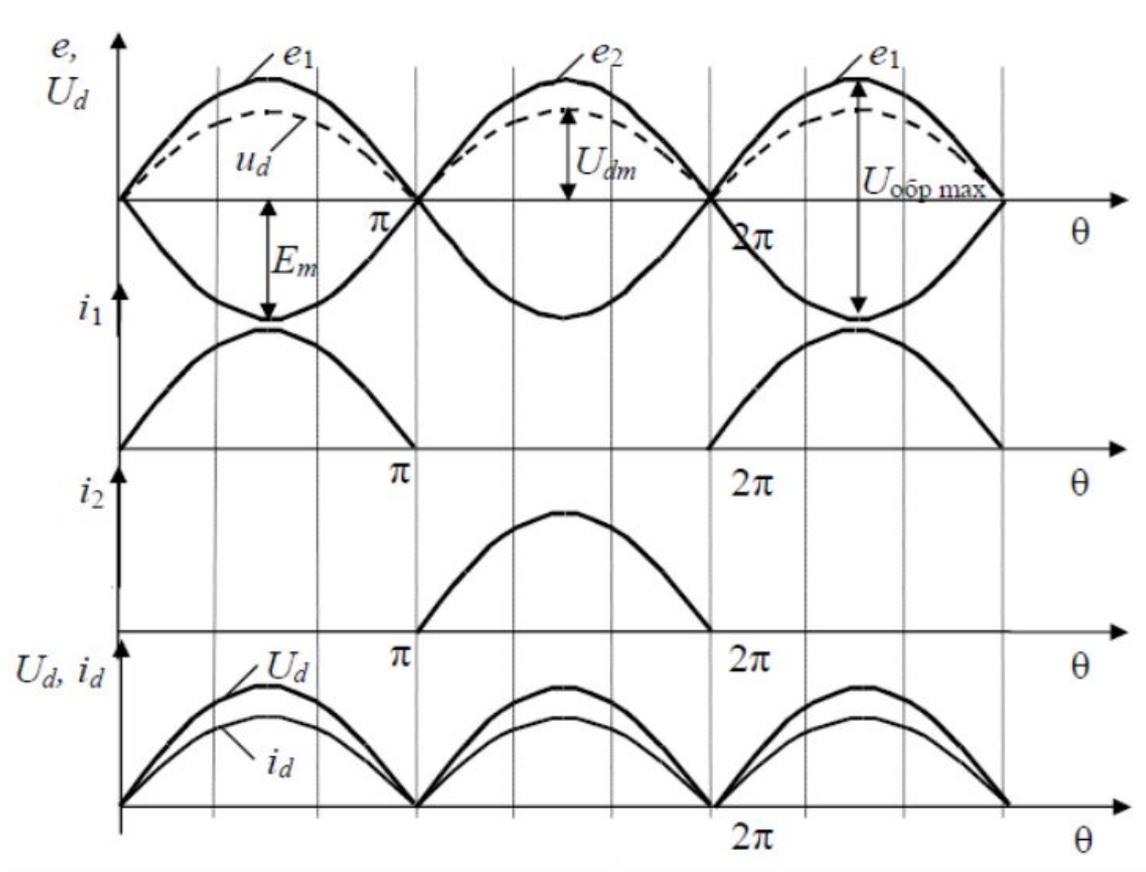
$$U_{VD1\text{обр}} = U_A - U_K = -U_{21} - U_{22} = -2U_{21},$$

$$\text{Т.К. } r_{VD} \approx 0$$

- Первый полупериод: $VD1$ – открыт, ток протекает через $VD1$, нагрузку и верхнюю половину вторичной обмотки трансформатора; $VD2$ – закрыт.
- Второй полупериод: $VD2$ – открыт, ток протекает через $VD2$, нагрузку и нижнюю половину вторичной обмотки трансформатора; $VD1$ – закрыт.
- Через нагрузку протекает ток в одном и том же направлении в течение всего периода.

Диаграммы токов и напряжений

- Выпрямитель с нулевым выводом по существу является двухфазным, так как вторичная обмотка трансформатора с нулевой точкой создает две ЭДС e_2 и e_1 равные по величине, но противоположные по направлению.



Основные расчетные соотношения

$$K_{II} = 0,67$$

$$U_d = 0,9 \cdot U_2 \quad I_d = \frac{2 \cdot I_{2m}}{\pi}$$

$$U_{обр. \max} = 2\sqrt{2} \cdot U_2$$

Достоинства схемы

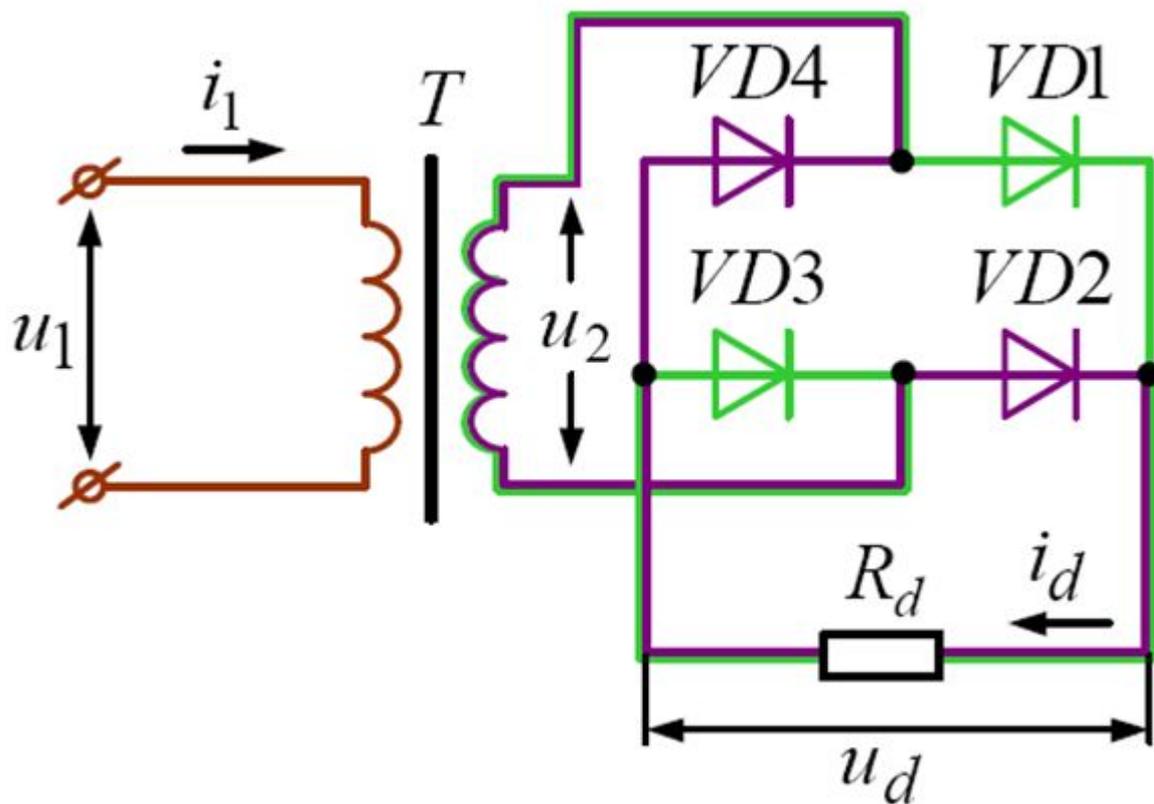
- В 2 раза меньше коэффициент пульсаций;
- Меньше масса и габаритные размеры трансформатора из-за отсутствия подмагничивания магнитопровода.

Недостатки схемы

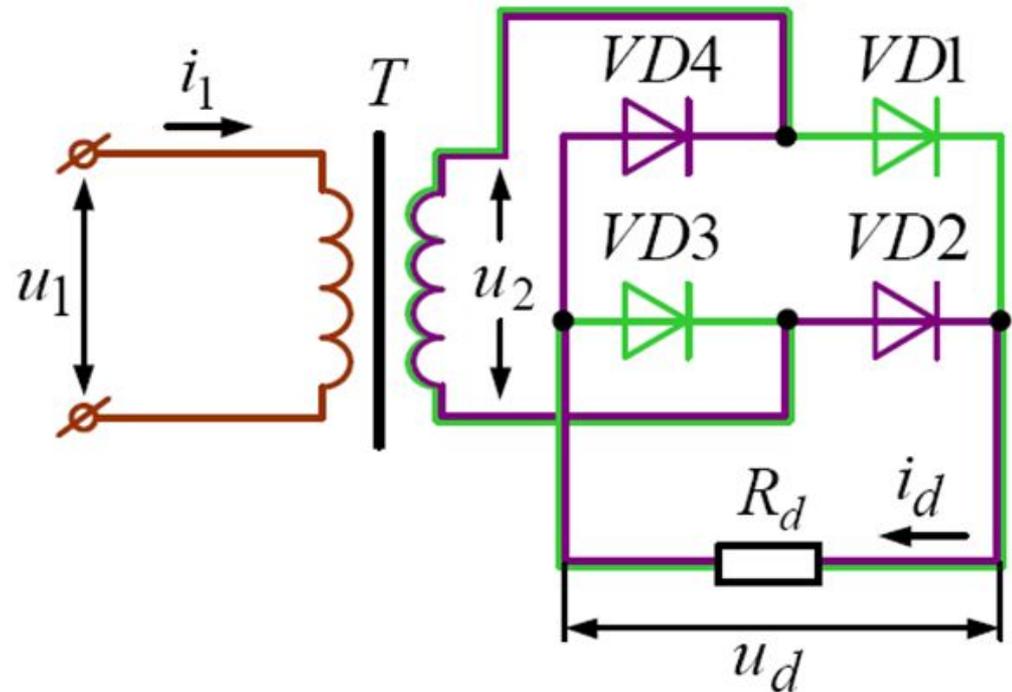
- Необходимость вывода средней точки вторичной обмотки трансформатора;
- Наличие в схеме двух диодов вместо 1.

Однофазный мостовой выпрямитель

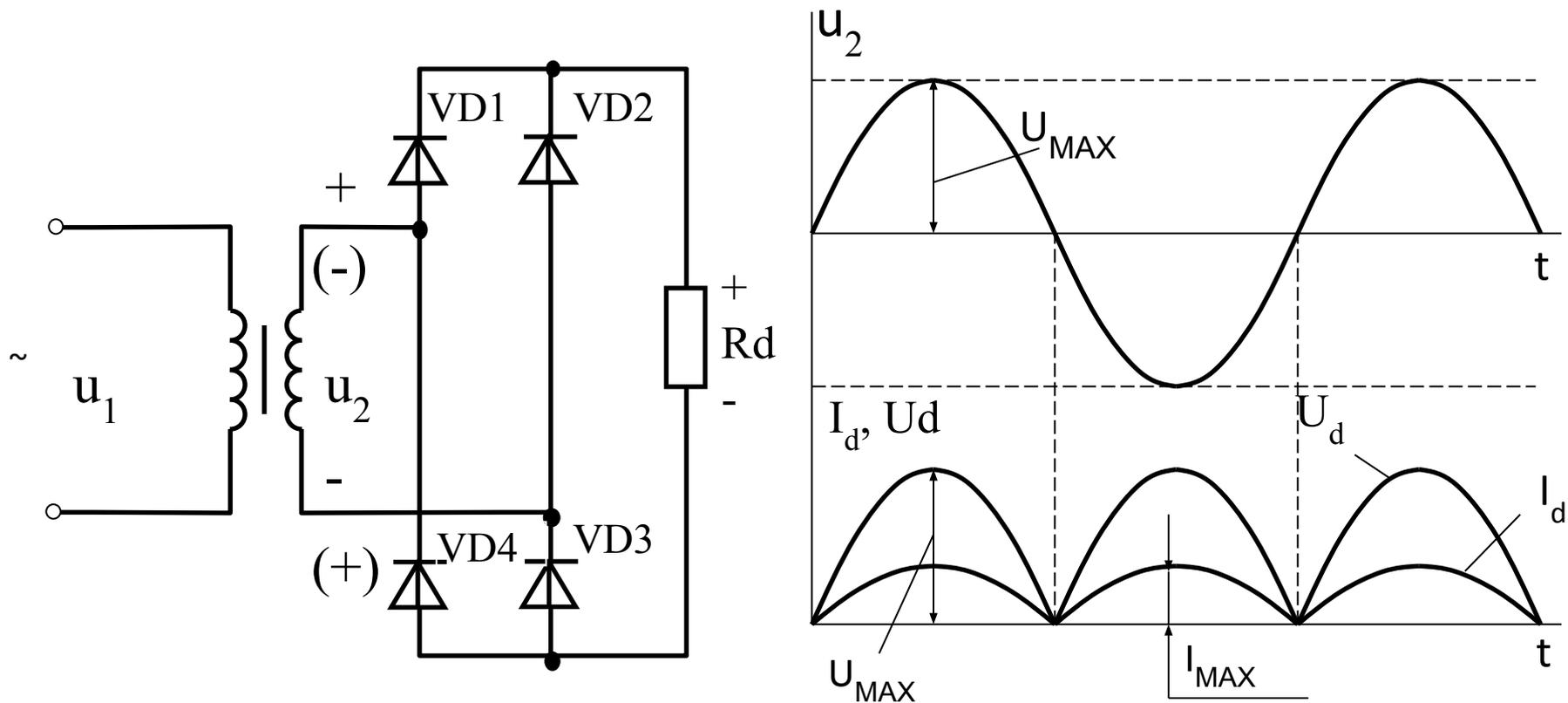
- Схема представляет собой мост из вентилей $VD1$ - $VD4$, в одной диагонали которого включена нагрузка, а в другую – переменное напряжение u_2 .



- В положительном полупериоде открыты вентили $VD1$ - $VD3$, в отрицательном – $VD2$ - $VD4$. Ток в нагрузке протекает в одном и том же направлении в течение обоих полупериодов, поэтому эта схема, так же как и предыдущая, относится к двухполупериодным схемам выпрямления.



Однофазная мостовая схема выпрямления



- В первый полупериод ток протекает:
+, VD1, R_н, VD3,-.
- Во второй полупериод ток протекает:
(+), VD2, R_н, VD4,(-).

График $U_{обр}$

$$U_{VD2обр} = U_A - U_K = -U_2,$$

$$Т.К. r_{VD} \approx 0$$

Основные расчетные соотношения

$$K_{II} = 0,67$$

$$U_d = 0,9 \cdot U_2 \quad I_d = \frac{2 \cdot I_{2m}}{\pi}$$

$$U_{обр. \max} = \sqrt{2} \cdot U_2$$

Достоинства схемы

- Меньше амплитуда обратного напряжения;
- Ток в обмотке трансформатора синусоидальный (лучшее использование трансформатора).

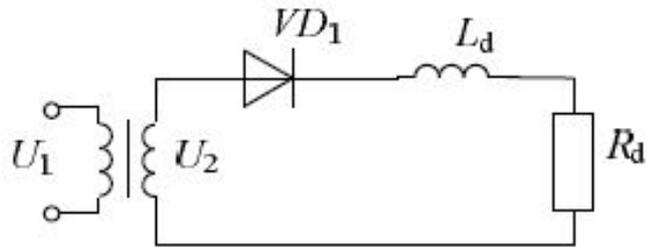
Недостатки схемы

- Использование 4 диодов;
- Больше потерь.

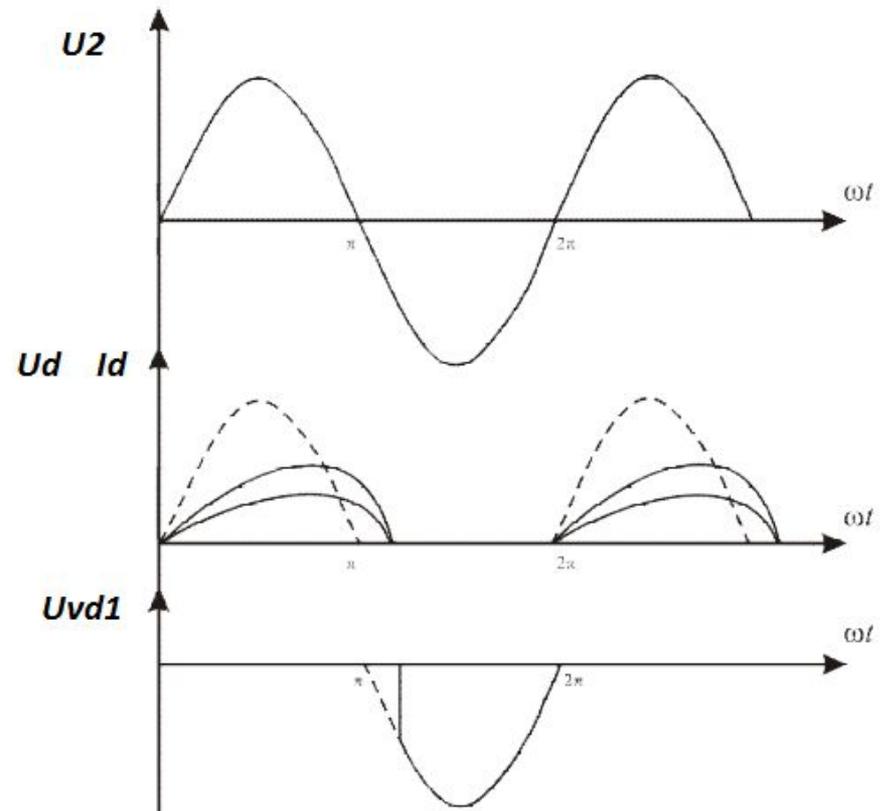
Однофазные выпрямители

- **Сравнение однофазных схем выпрямления**
- **Преимущество однофазной однополупериодной схемы** – простота, недостаток – очень низкое качество выпрямленного напряжения.
- **Преимущества однофазной нулевой схемы:**
 - 1) меньше падение напряжения на вентилях, что особо важно при низких напряжениях;
 - 2) меньше вентиляей (но они более высоковольтные).
- **Преимущества однофазной мостовой схемы:**
 - 1) меньше амплитуда обратного напряжения на вентилях;
 - 2) меньше расчетная мощность трансформатора и проще его изготовление;
 - 3) схема может работать без трансформатора.

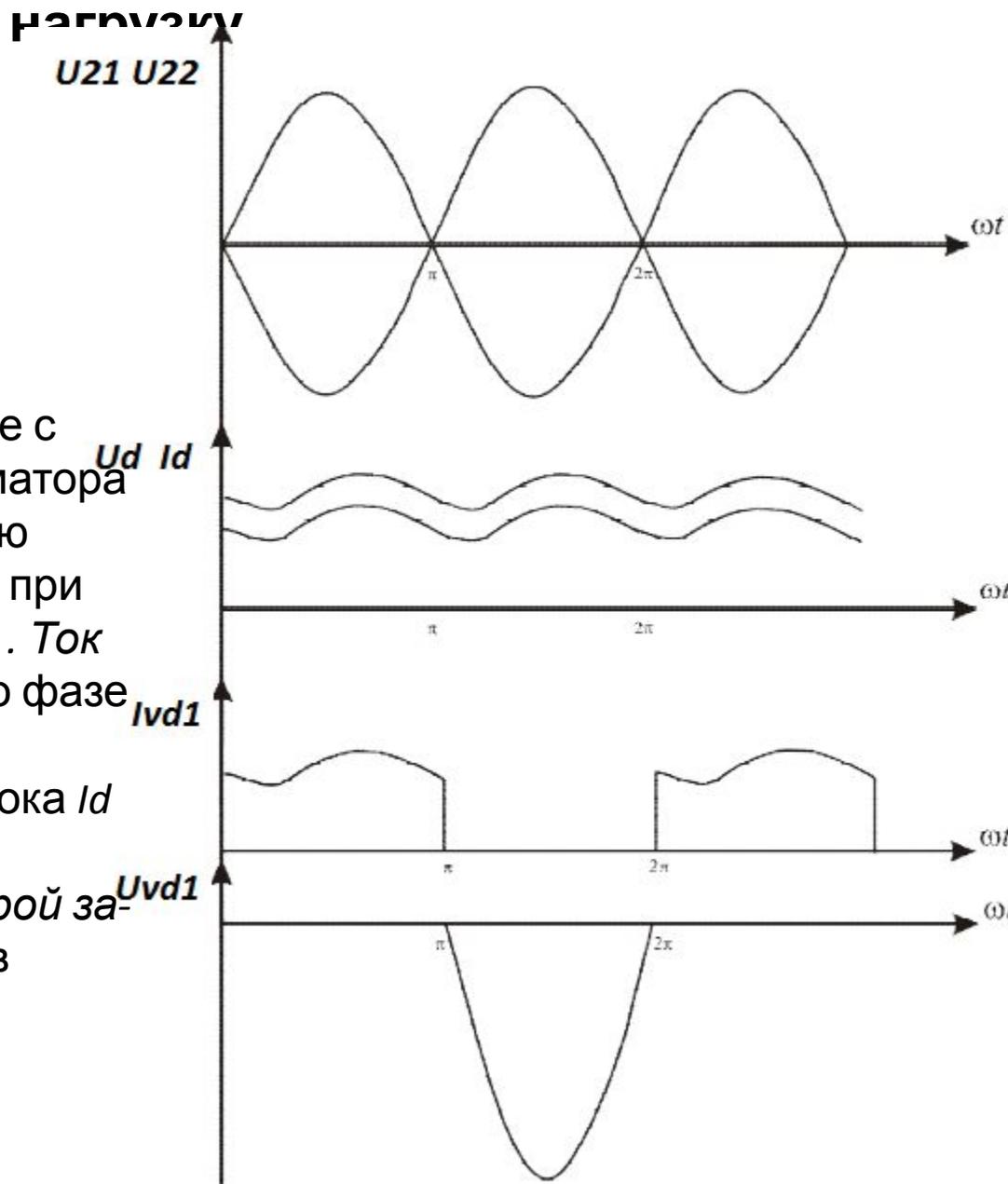
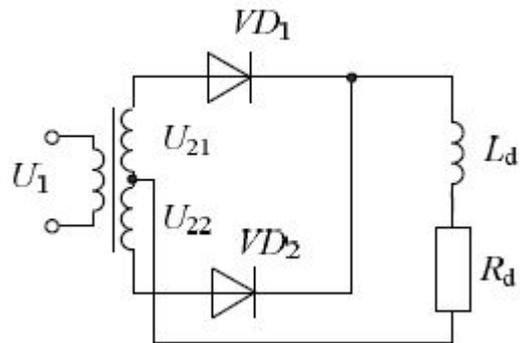
Работа выпрямителей на активно-индуктивную нагрузку



При работе однополупериодного выпрямителя вследствие влияния индуктивности **ток нагрузки сглаживается**: замедляется время его нарастания и спадания, смещается момент амплитудного значения. Под действием тока поддерживаемого индуктивностью при смене полярности питающего напряжения **увеличивается время проводящего состояния диода**



Работа выпрямителей на активно-индуктивную

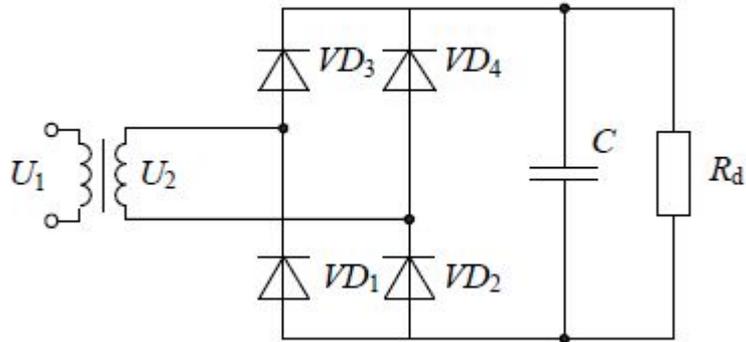


В двухполупериодном выпрямителе с выводом средней точки трансформатора при работе на активно-индуктивную нагрузку, ток I_d не спадает до нуля при нулевых значениях напряжения U_2 . Ток в цепи с индуктивностью отстает по фазе от напряжения, поэтому максимумы тока I_d и напряжения U_d следуют с некоторой задержкой относительно максимумов напряжения U_2

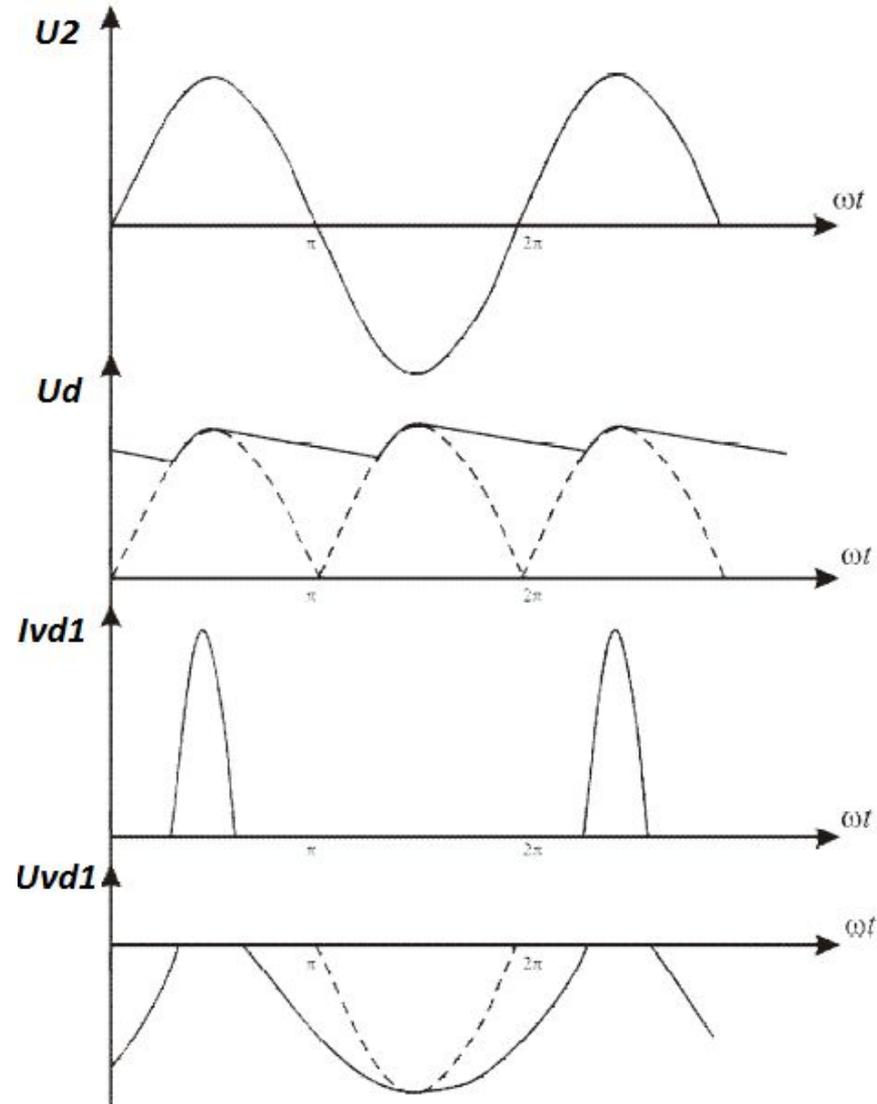
Работа выпрямителей на активно-индуктивную нагрузку

- Работа на активно-индуктивную нагрузку является наиболее **благоприятным режимом** работы для выпрямителя. В этом случае по обмоткам трансформатора и через диоды протекает меньший по амплитуде ток. В результате чего уменьшается установочная мощность трансформатора и максимальный ток диодов.

Работа выпрямителей на активно-емкостную нагрузку



Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения параллельно нагрузке подключают конденсатор достаточно большой емкости. В этом случае режим работы выпрямителя изменяется. Диоды открываются по очереди в те моменты времени, когда положительная полуволна напряжения U_2 , приложенного к аноду диода, больше напряжения конденсатора. Половину времени, в течение которого протекает ток через диод принято называть углом отсечки q . В те моменты времени, когда диоды закрыты, происходит разряд конденсатора на нагрузку. В результате кривая



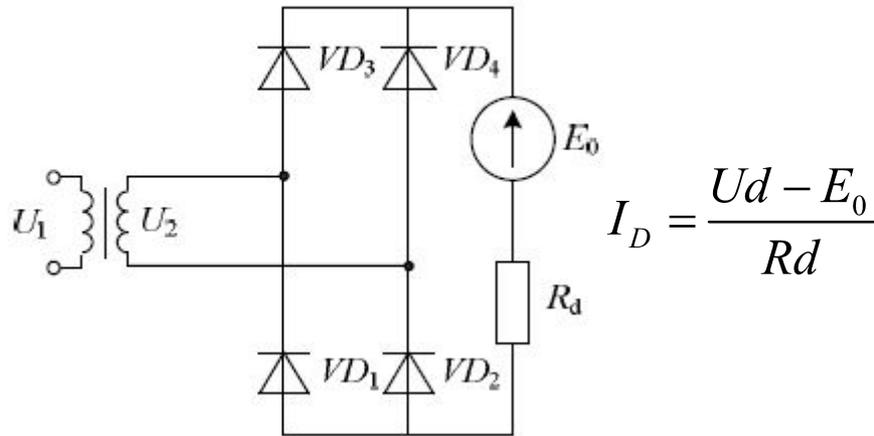
Работа выпрямителей на активно-емкостную нагрузку

- Как правило, конденсатор подбирают таким образом, чтобы диоды находились в открытом состоянии примерно одну треть от времени закрытого состояния. В связи с чем, амплитуда импульса тока через диоды и обмотки трансформатора в три, пять раз превышает ток через диоды при *RL* нагрузке.

Данный режим является наиболее тяжелым для выпрямителя, поскольку происходит перегрузка диодов и обмоток трансформатора по току. Особенно опасен момент включения выпрямителя, так как время первоначальной зарядки конденсатора затягивается и возникающий при этом импульс тока может вывести из строя полупроводниковые приборы.

В **однополупериодном выпрямителе** работа на *RC*-нагрузку, кроме описанных особенностей, приводит к **увеличению максимального обратного напряжения** прикладываемаемого к вентилю, так как во время закрытого состояния к диоду прикладывается напряжение равное разности напряжения вторичной обмотки трансформатора и напряжения заряженного конденсатора.

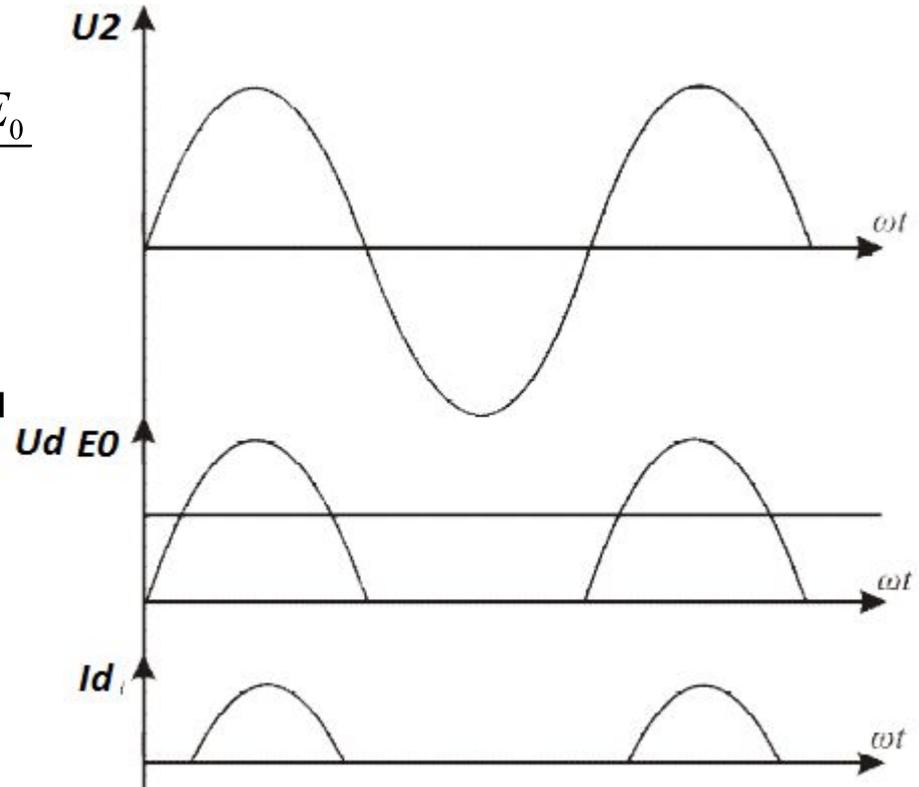
Работа неуправляемого выпрямителя на нагрузку с противо - э. д. с



Очевидно, что ток через вентили схемы может проходить только в те части периода, когда мгновенное выпрямленное напряжение будет больше E_0 .

В результате кривая выпрямленного тока будет иметь прерывистый характер.

Максимальное обратное напряжение остается в этом режиме таким же, как и при работе схемы на чисто активную нагрузку без противо - э. д. с.



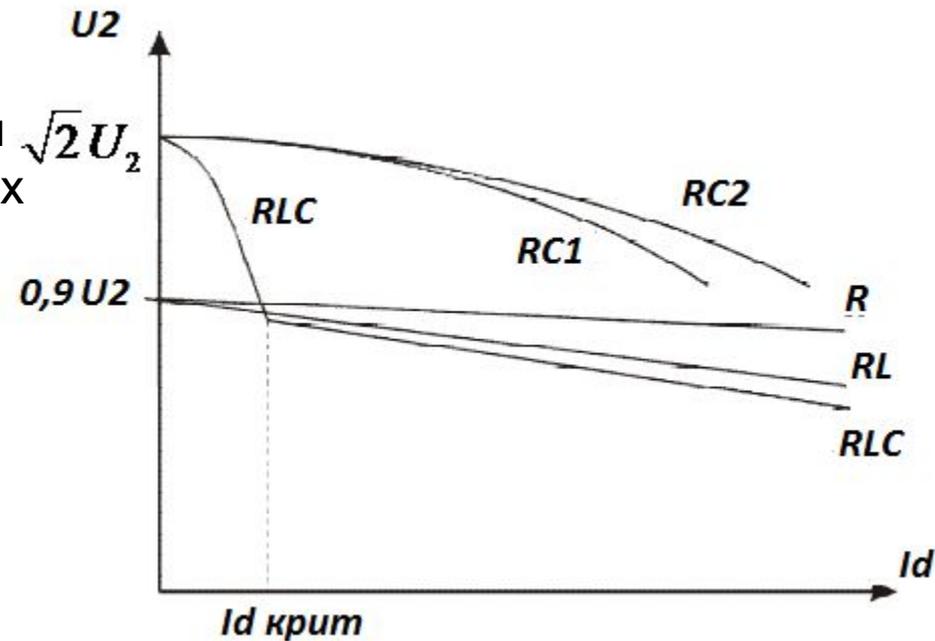
Внешние характеристики выпрямителей

- Внешняя характеристика выпрямителя представляет собой зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения выпрямленного тока

При чисто активной нагрузке наклон внешней характеристики с увеличением тока обусловлен потерями в проводящих проводах в активном сопротивлении обмоток трансформатора, падением напряжения на диодах и потерями в стали трансформатора.

При активно-индуктивной нагрузке наклон внешней характеристики увеличивается, так как добавляются активные потери в обмотке сглаживающего дросселя.

При активно-емкостной нагрузке $\sqrt{2}U_2$ характеристика начинается из точки $\sqrt{2}U_2$, так как на холостом ходу конденсатор заряжается до амплитудного значения входного напряжения. Характеристика имеет большой наклон и зависит от



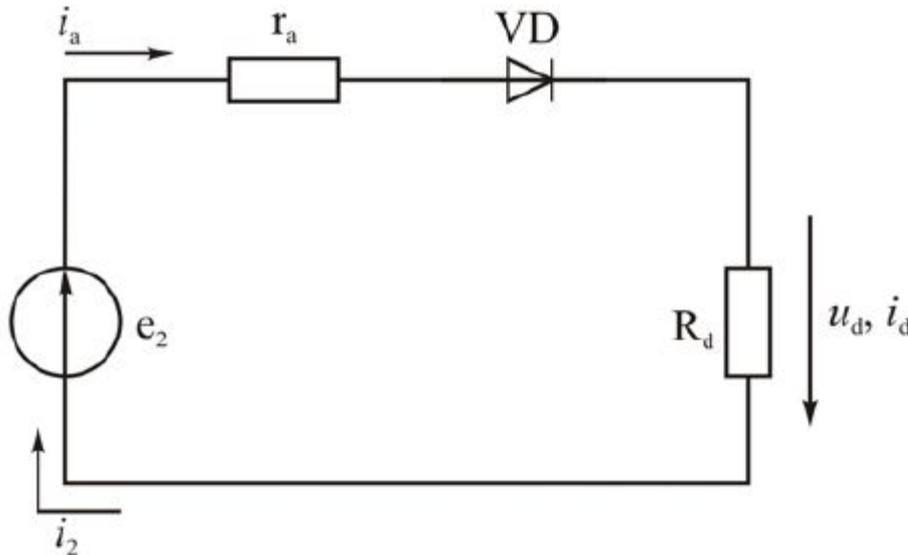
Внешние характеристики выпрямителей

- При активно-индуктивно-емкостной нагрузке среднее значение тока при больших значения совпадает с характеристикой при активно-индуктивной нагрузке. В выпрямленном токе и напряжении присутствует переменная и постоянная составляющие, причем величина переменной составляющей выпрямленного тока в основном определяется величиной индуктивности сглаживающего дросселя. При уменьшении среднего значения тока нагрузки до величины I_{dkpim} режим работы выпрямителя изменяется, ток в дросселе становится прерывистым и начинается процесс подзаряда конденсатора. Кривая внешней характеристики становится подобна кривой при активно-емкостной нагрузке.

Расчет схем выпрямления

Допущения при расчете схем

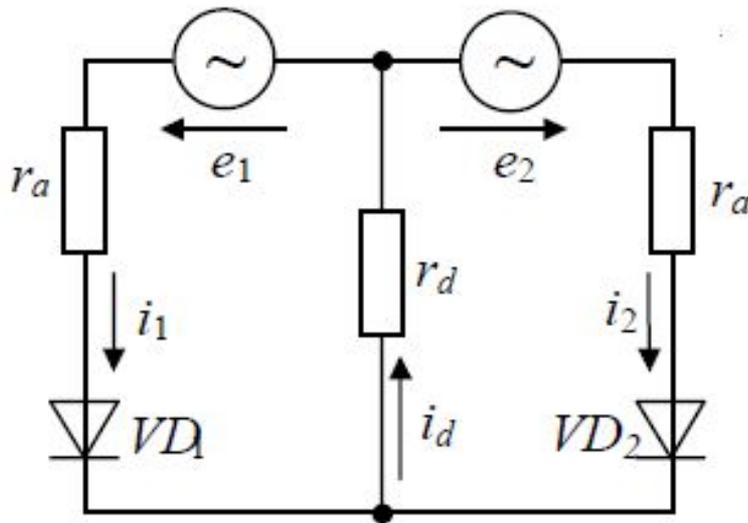
1. Активным и индуктивным сопротивлением обмоток трансформатора пренебрегаем.
2. Нагрузка имеет чисто активный характер.
3. Вентиль В идеальный.
4. Током намагничивания трансформатора пренебрегаем.
5. ЭДС обмотки трансформатора синусоидальна: $e_2 = \sqrt{2}E_2 \sin \theta$.



Эквивалентная схема
выпрямителя

Допущения при расчете схемы

- При построении диаграмм для вторичных ЭДС и выпрямленного напряжения потенциал нулевого вывода трансформатора принят за 0.
- При построении диаграммы для напряжения на вентиле потенциал катода принят за 0.



Эквивалентная схема
выпрямителя

Основные положения методики упрощенного расчета схемы выпрямителя

- Обычно при составлении реальной схемы выпрямителя задаются значением мощности потребителя P_o , Вт, получающего питание от данного устройства, и выпрямленным напряжением U_o , В, при котором работает потребитель постоянного тока. Отсюда нетрудно определить ток потребителя $I_o = P_o/U_o$. Сравнивая ток потребителя с допустимым током диода $I_{доп}$, выбирают диоды для схем выпрямителя.
- Следует учесть, что для однополупериодного выпрямителя ток через диод равен току потребителя, т.е. надо соблюдать условие $I_{доп} \geq I_o$.
- Для двухполупериодной и мостовой схем выпрямления тока через диод равен половине тока потребителя, т.е. следует соблюдать условие $I_{доп} \geq 0,5I_o$.
- Для трехфазного выпрямителя ток через диод составляет треть тока потребителя, следовательно, необходимо, чтобы $I_{доп} \geq 1/3I_o$.
- Напряжение, действующее на диод в непроводящий период $U_{в}$, также зависит от той схемы выпрямления, которая применяется в конкретном случае.
- Так, для однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя $U_{в} = \pi U_o = 3,14 U_o$, для мостового выпрямителя $U_{в} = \pi U_o / 2 = 1,57 U_o$, а для трехфазного выпрямителя $U_{в} = 2,1 U_o$.
- При выборе диода, следовательно, должно соблюдаться условие $U_{обр} \geq U_{в}$.

Методика упрощенного расчета однополупериодной схемы выпрямителя

- **Пример.** Рассчитать однополупериодную схему выпрямителя, используя один из четырех диодов: Д218, Д232, КД202Н, Д215Б.
- Мощность потребителя $P_d = 200$ Вт, напряжение потребителя $U_d = 100$ В.
- Основные параметры используемых диодов:

Типы диодов	Идоп, А	Uобр, В	Типы диодов	Идоп, А	Uобр, В
Д218	0.1	1000	КД202Н	1	500
Д232	10	400	Д215Б	2	200

Методика упрощенного расчета однополупериодной схемы выпрямителя

1. Ток потребителя (нагрузки):

$$I_d = P_d / U_d = 200 / 100 = 2 \text{ А.}$$

2. Напряжение на диоде в непроводящий период:

$$U_v = \pi * U_d = 3.14 * 100 = 314 \text{ В.}$$

3. Выбирается диод из условия:

$$I_{доп} > I_d, \quad 10 > 2 \text{ А,}$$

$$U_{обр} > U_v, \quad 400 \geq 314 \text{ В.}$$

Этим условиям удовлетворяет диод Д232.

Методика упрощенного расчета однофазной нулевой схемы выпрямления

- **Пример.** Рассчитать нулевую схему выпрямителя, используя один из четырех диодов: Д218, Д232, КД202Н, Д215Б.
 - Мощность потребителя $P_d = 200$ Вт, напряжение потребителя $U_d = 100$ В.
1. Ток потребителя (нагрузки):
 $I_d = P_d / U_d = 200 / 100 = 2$ А.
 2. Напряжение на диоде в непроводящий период:
 $U_v = \pi * U_d = 3.14 * 100 = 314$ В.
 3. Выбирается диод из условия:
 $I_{доп} > 0,5 * I_d, \quad 10 > 1$ А,
 $U_{обр} > U_v, \quad 400 \geq 314$ В.
- Этим условиям удовлетворяет диод Д232.

Методика упрощенного расчета однофазной мостовой схемы выпрямления

- **Пример.** Рассчитать мостовую схему выпрямителя, используя один из четырех диодов: Д218, Д232, КД202Н, Д243.
 - Мощность потребителя $P_o = 200$ Вт, напряжение потребителя $U_o = 100$ В.
1. Ток потребителя (нагрузки):
 $I_o = P_o / U_o = 200 / 100 = 2$ А.
 2. Напряжение на диоде в непроводящий период:
 $U_v = \pi/2 * U_o = 1.57 * 100 = 157$ В.
 3. Выбирается диод из условия:
 $I_{доп} > 0,5 * I_o, \quad 5 > 1$ А,
 $U_{обр} > U_v, \quad 200 \geq 157$ В.
- Этим условиям удовлетворяет диод Д232.

Однофазный управляемый выпрямитель с нулевой точкой

