

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

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 высоковольтной 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.

Предмет и задачи курса

- Дисциплина «Силовая электроника» предназначена для изучения силовых электронных усилительно - преобразовательных устройств на основе полупроводниковых приборов.
- Цель учебной дисциплины – формирование компетенций связанных с проектированием и эксплуатацией современной силовой электронной 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 силовой электроники

- 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.

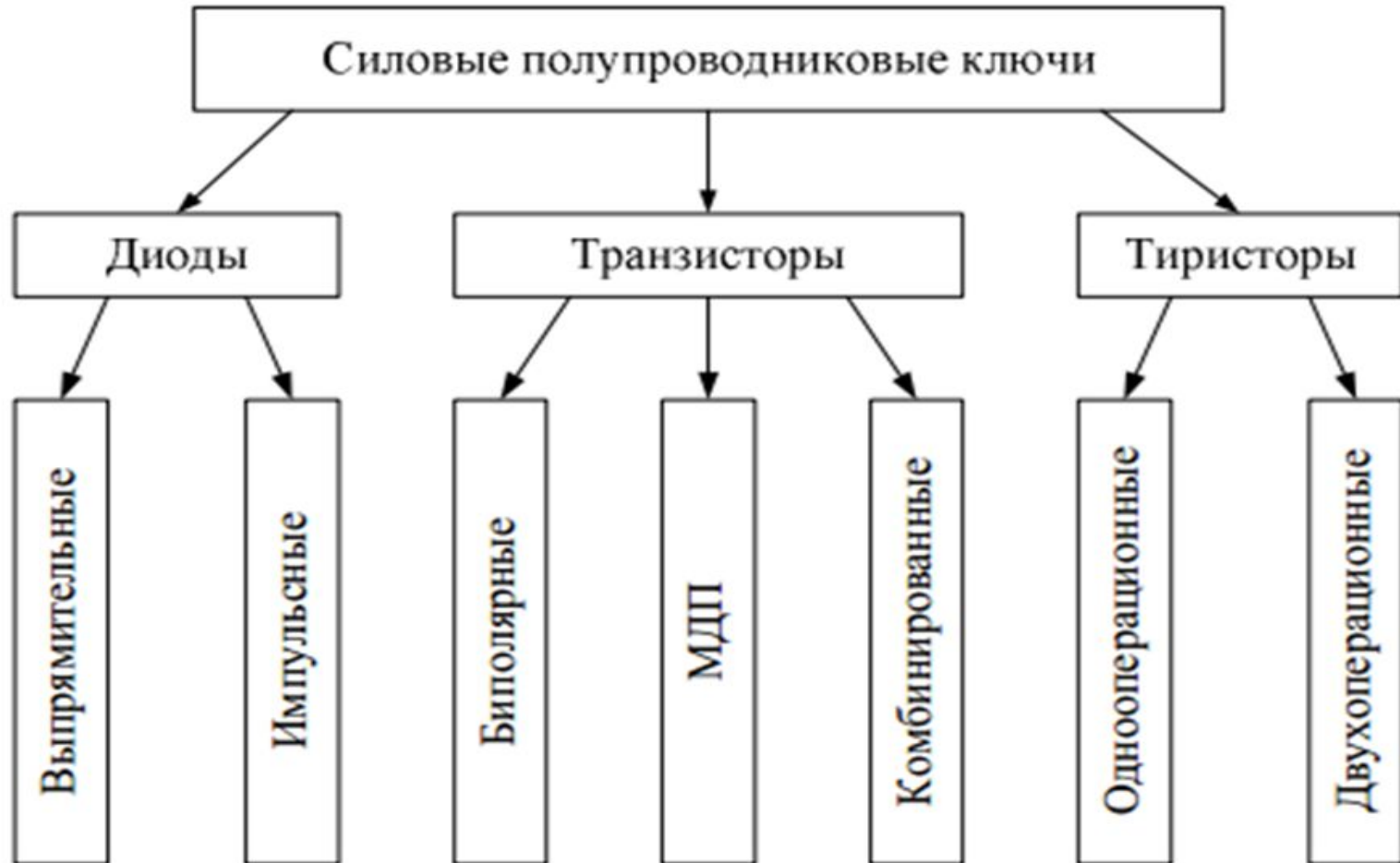
Современная классификация устройств силовой электроники

- 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

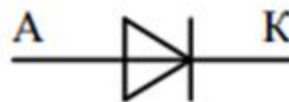
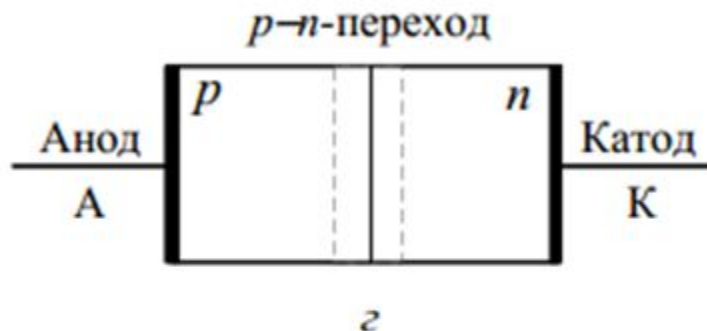


Классификационная схема силовых электронных ключей

- 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.



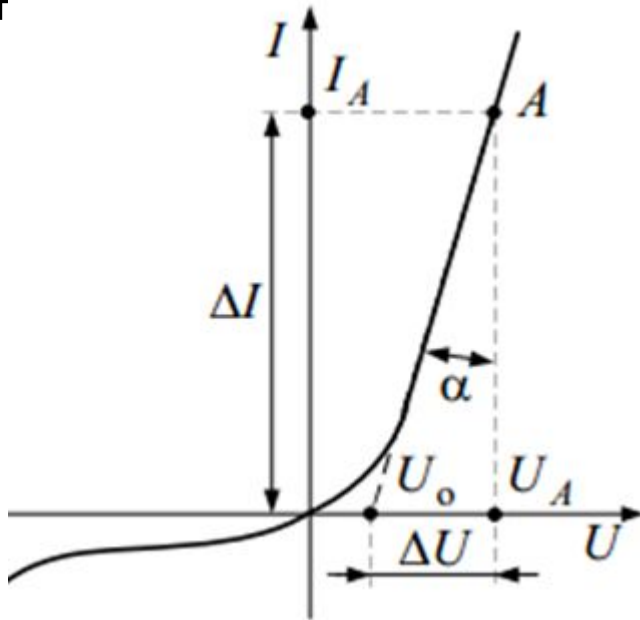
Конструктивное исполнение ДИОДОВ

- 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:

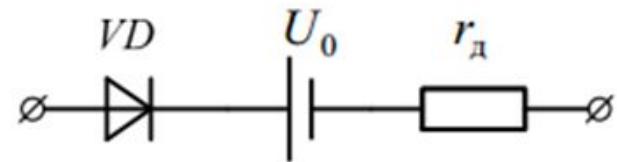
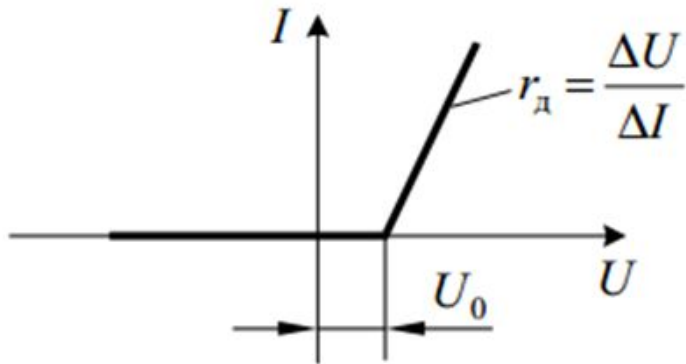
$$U = U_0 + I \cdot r_d,$$

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)

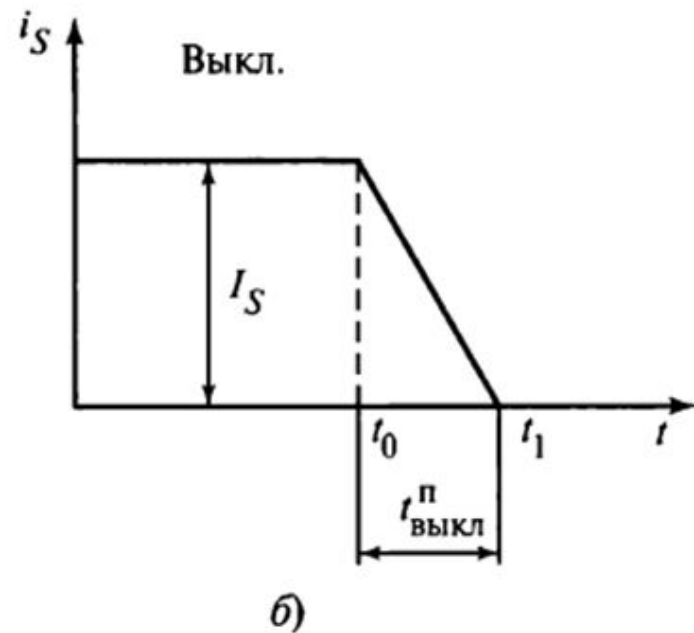
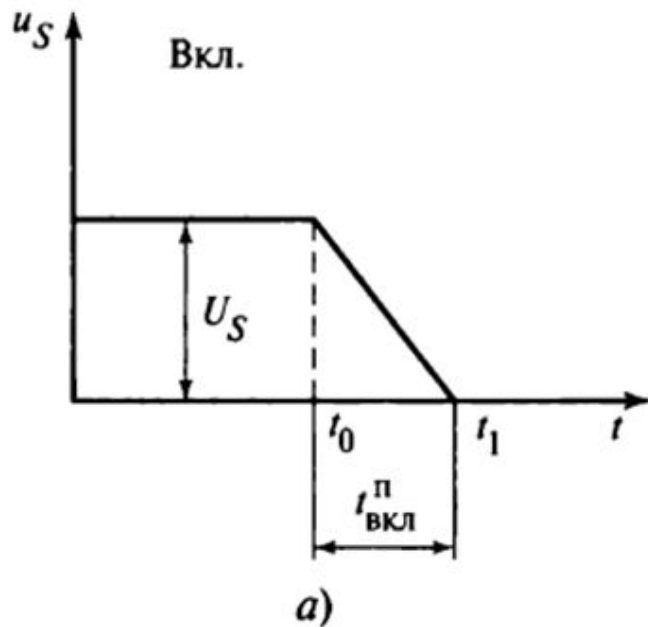


Динамическая вольт-амперная характеристика диода

- **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 ;

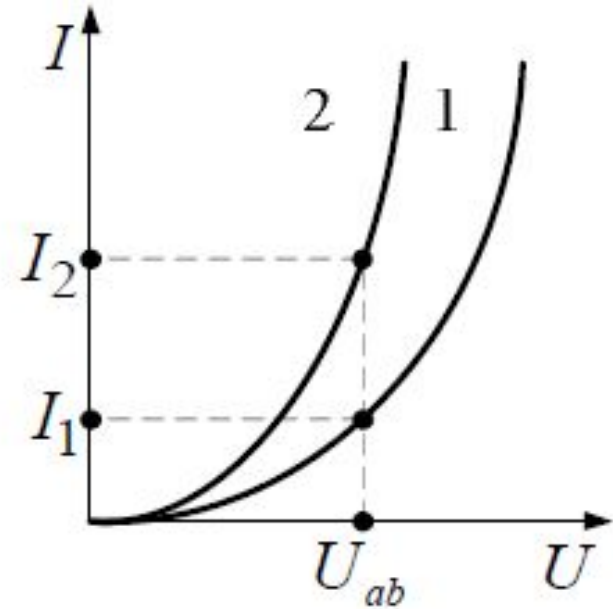
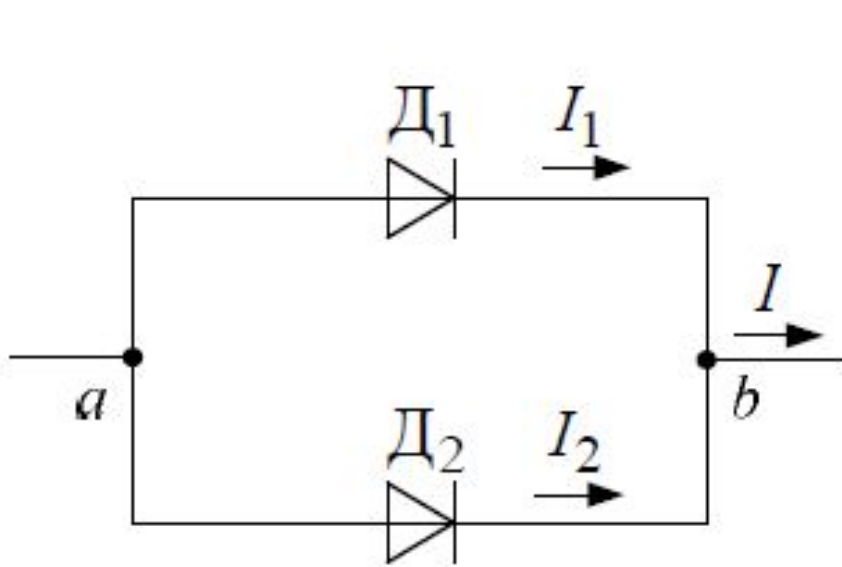
К динамическим параметрам относятся:

- 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

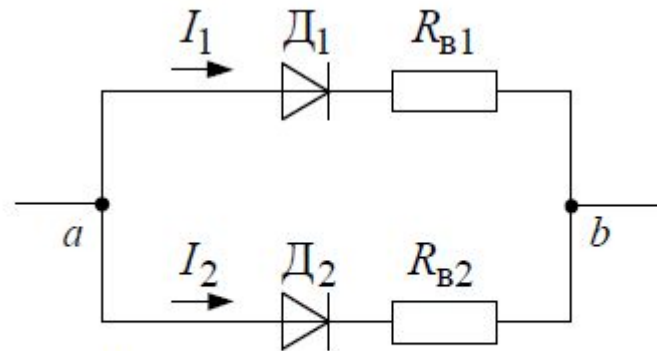
- В настоящее время силовые диоды выпускаются на токи до 2000 А и рабочие напряжения до 4000 В.
- На большие значения предельных токов и напряжений необходимо использовать параллельное, либо последовательное, либо смешанное включение диодов.

Параллельное соединение диодов

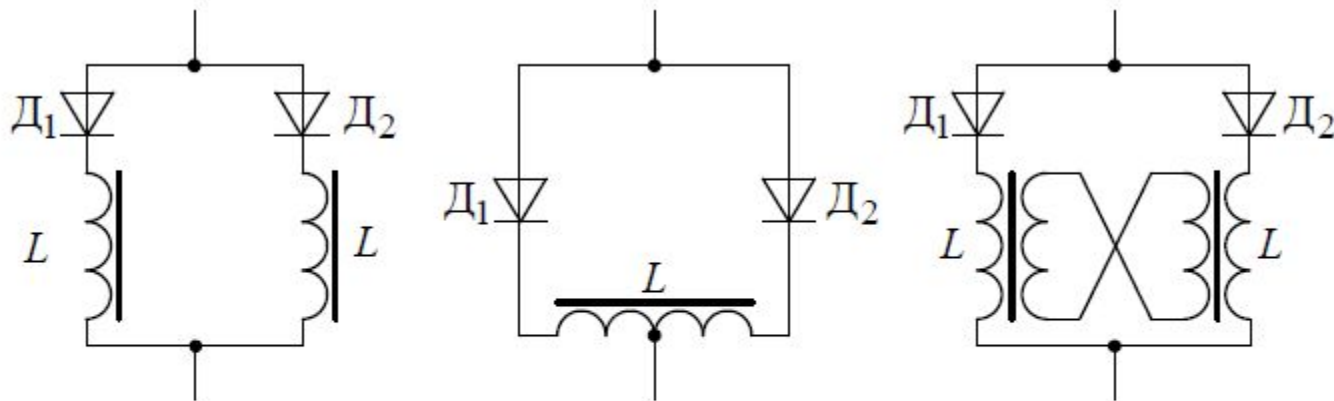


*Параллельное соединение силовых диодов
и их вольт-амперные характеристики*

Способы выравнивания токов

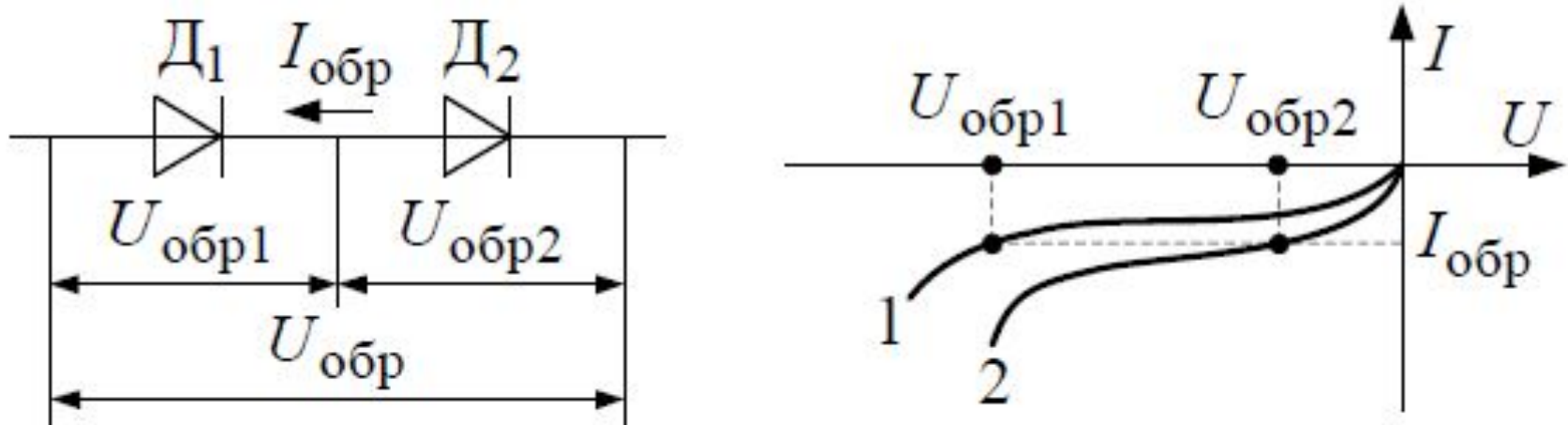


Выравнивание токов с помощью выравнивающих сопротивлений



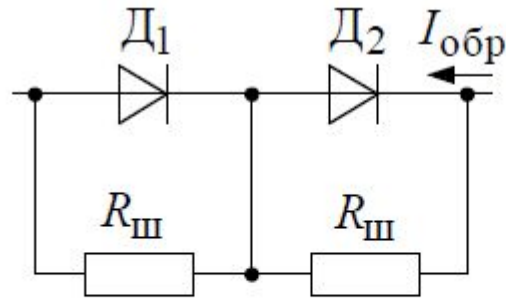
Выравнивание токов с помощью индуктивных делителей

Последовательное соединение диодов

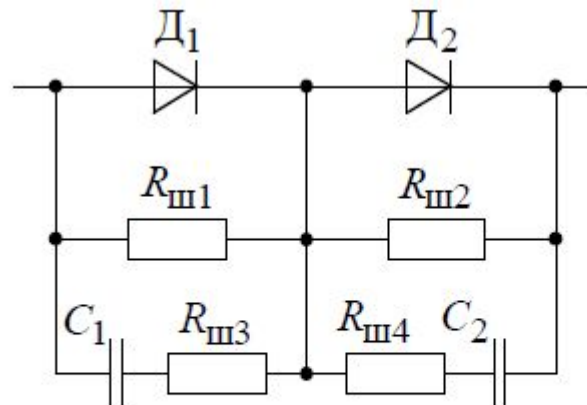


*Последовательное включение диодов
и их вольт-амперные характеристики*

Способы выравнивания напряжений



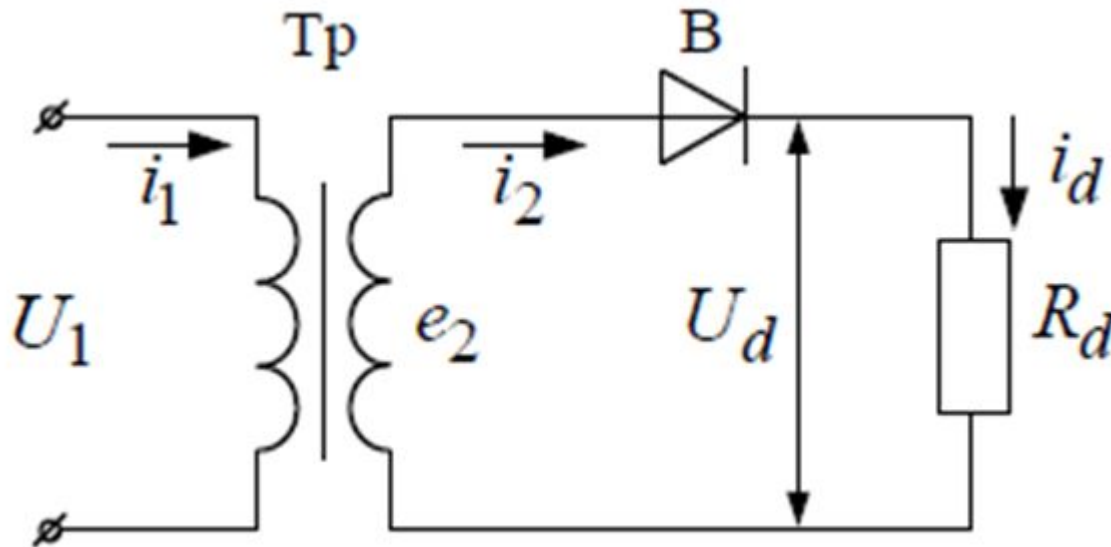
*Выравнивание обратных напряжений
с помощью шунтовых резисторов*



*Схема выравнивания обратных напряжений
в переходных режимах*

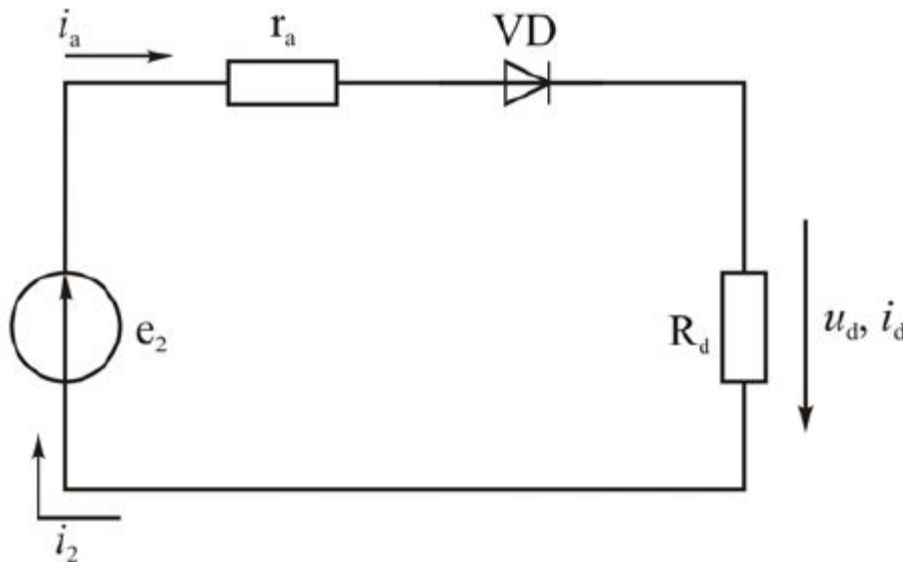
Однофазные выпрямители

- **Однофазная однополупериодная схема выпрямления**



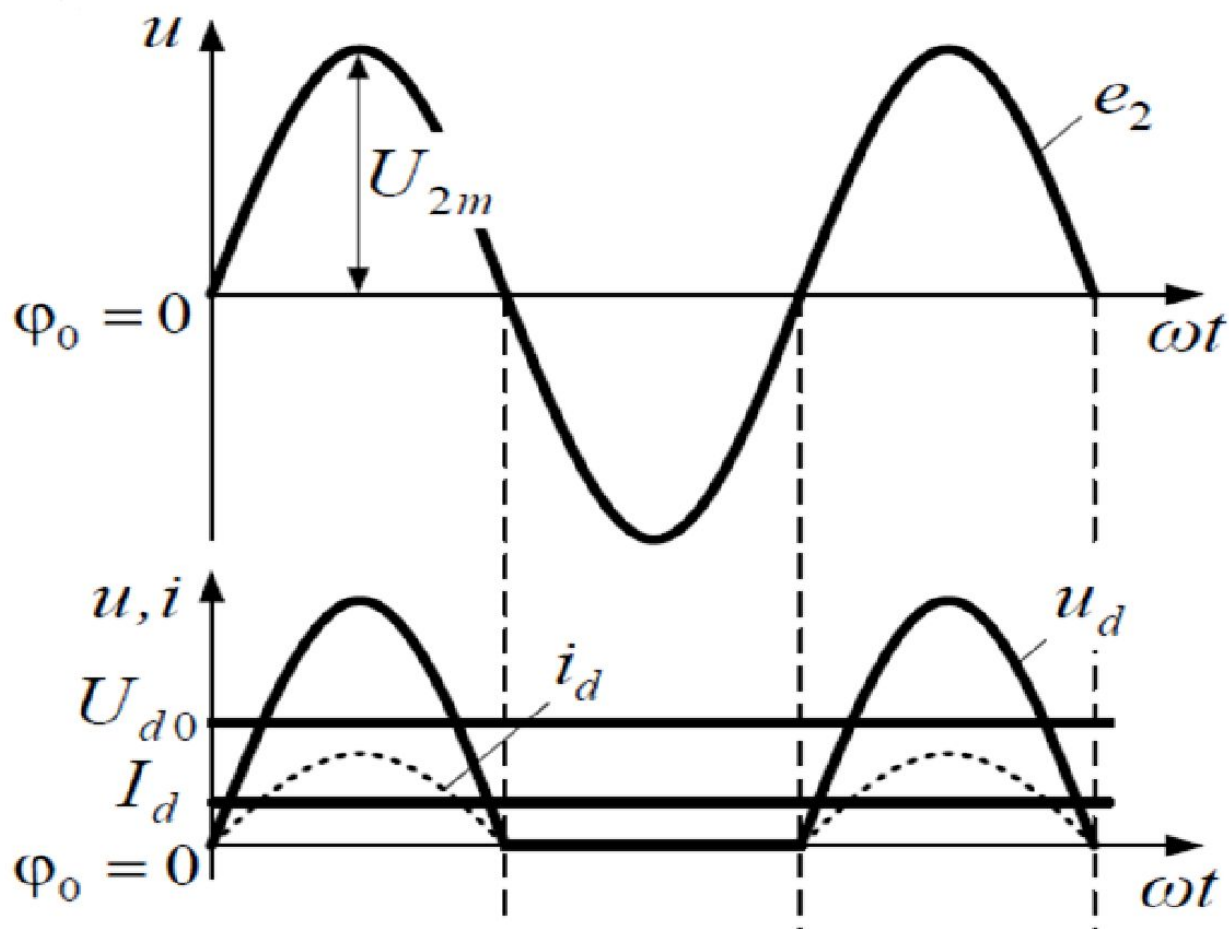
Допущения при расчете схем

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

Диаграммы токов и напряжений



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 $P_o = 200$ Вт, напряжение потребителя $U_o = 100$ 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):

$$I_o = P_o / U_o = 200 / 100 = 2 \text{ A.}$$

2. Напряжение на диоде в непроводящий период:

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

3. Выбирается диод из условия:

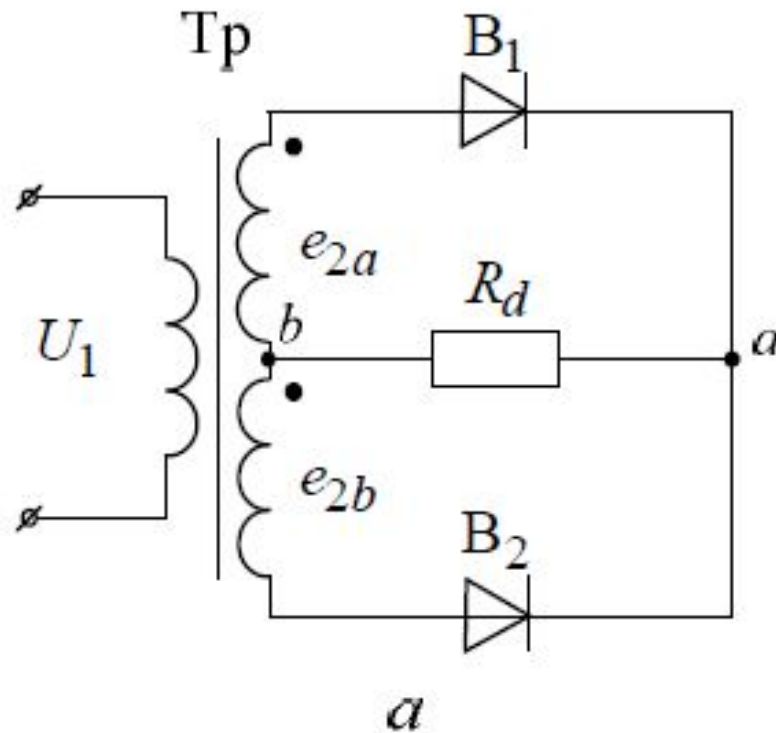
$$I_{доп} > I_o, \quad 10 > 2 \text{ A,}$$

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

Этим условиям удовлетворяет диод Д232.

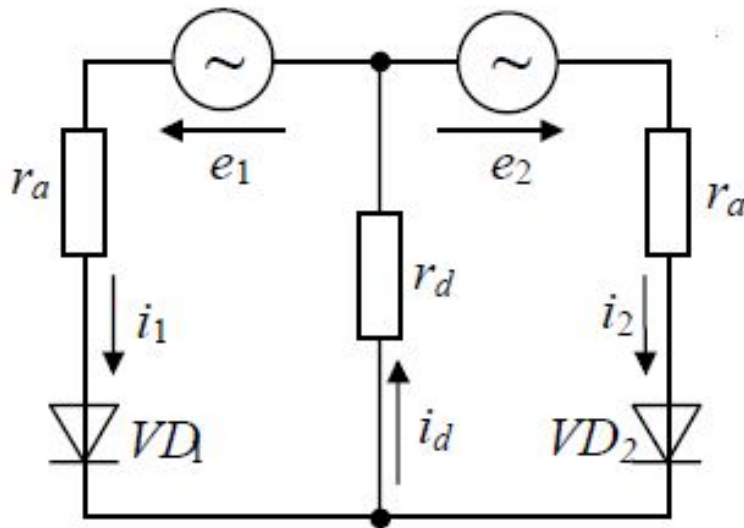
Однофазные выпрямители

- **Однофазная нулевая схема выпрямления**



Допущения при расчете схемы

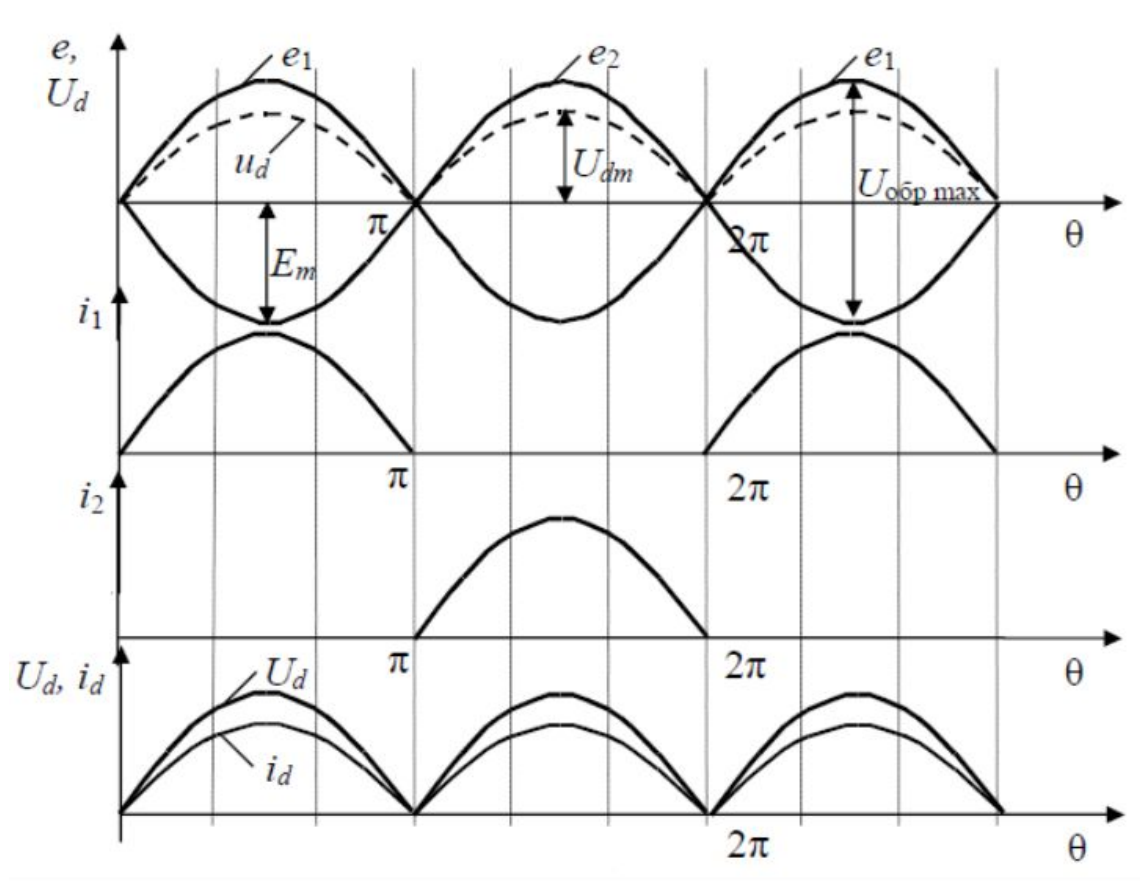
- При построении диаграмм для вторичных ЭДС и выпрямленного напряжения потенциал нулевого вывода трансформатора принят за 0.
- При построении диаграммы для напряжения на вентиле потенциал катода принят за 0.



Эквивалентная схема
выпрямителя

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.

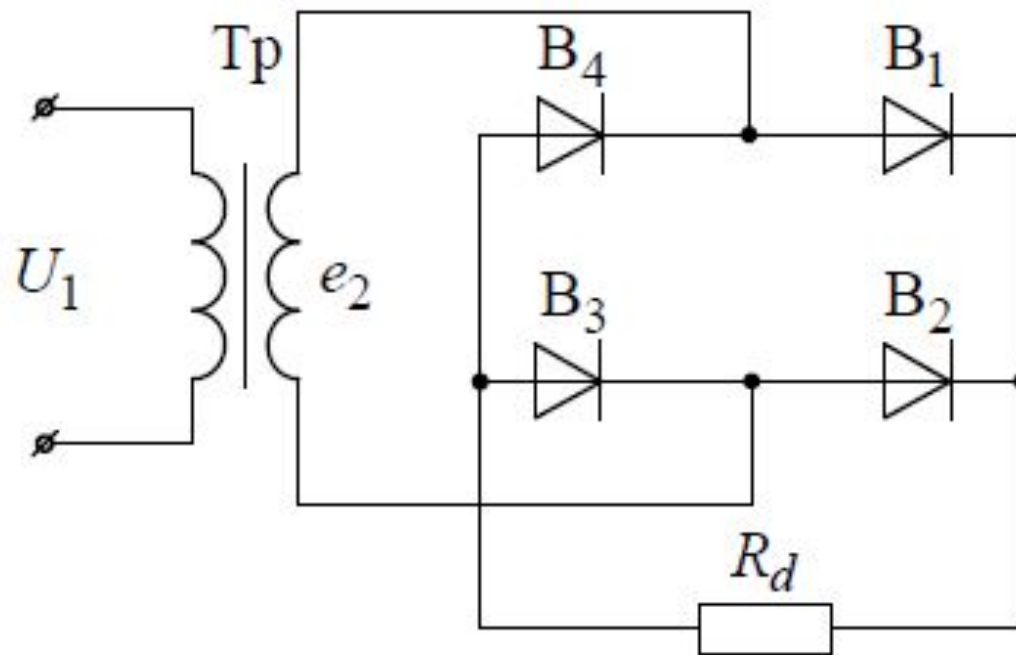


Методика упрощенного расчета однофазной нулевой схемы выпрямления

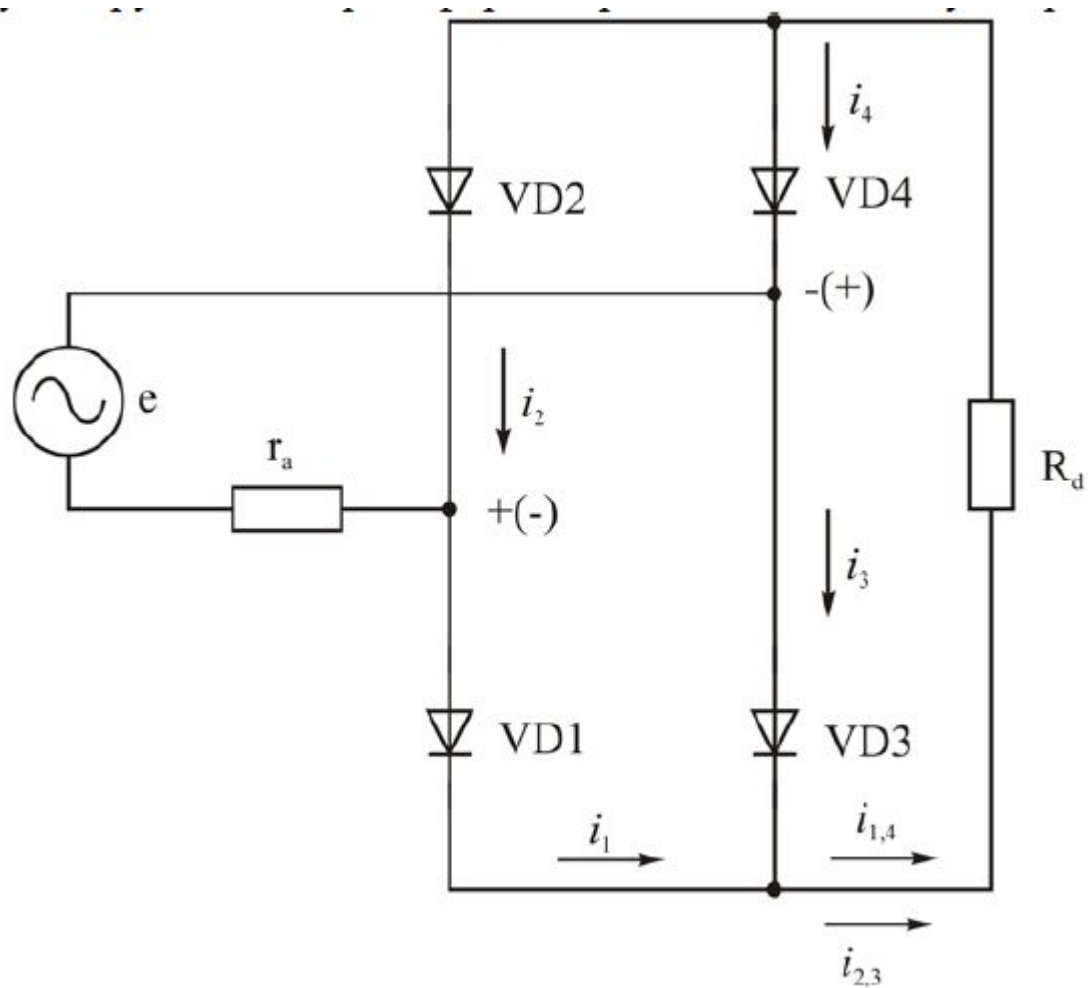
- **Пример.** Рассчитать нулевую схему выпрямителя, используя один из четырех диодов: Д218, Д232, КД202Н, Д215Б.
 - Мощность потребителя $P_o = 200$ Вт, напряжение потребителя $U_o = 100$ В.
1. Ток потребителя (нагрузки):
 $I_o = P_o / U_o = 200 / 100 = 2$ А.
 2. Напряжение на диоде в непроводящий период: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

Однофазные выпрямители

- *Однофазная мостовая схема выпрямления*

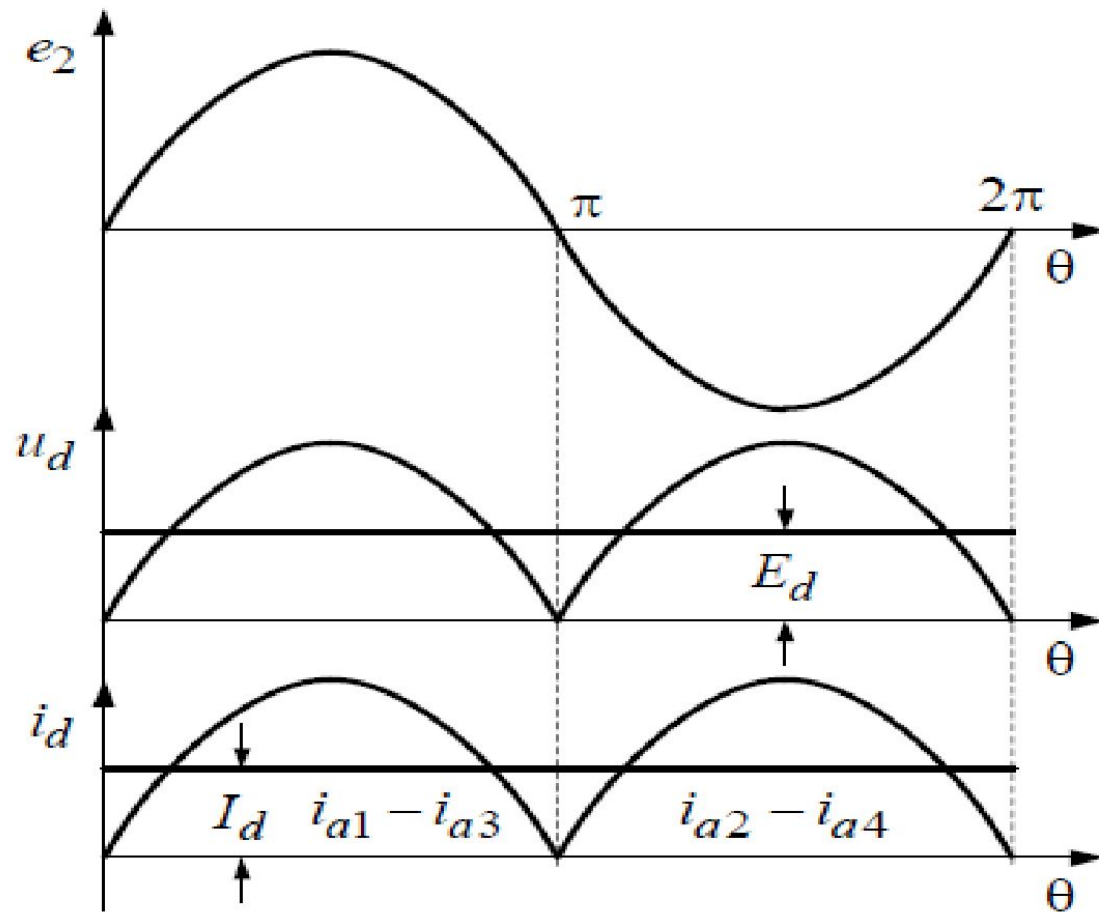


Эквивалентная схема выпрямителя



Диаграммы токов и напряжений

- Большинство диаграмм в однофазной нулевой и мостовой схемах одинаково. Только амплитуда обратного напряжения на вентиле в мостовой схеме вдвое меньше, и по вторичной обмотке протекает переменный ток.



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 Д243.

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.