

Лекции по курсу :

Силовые преобразователи в электроснабжении

*Кафедра электроснабжения
промышленных предприятий
Энергетический институт
Томского политехнического
университета*

Составлено по следующим источникам:

- 1. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении. Учебное пособие. – Томск, Изд. ТПУ, 2006.**
- 2. Чебовский О.Г. и др. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. – Ленинград, Энергия, 1985.**
- 3. Руденко В.И. и др. Основы преобразовательной техники. Учебник для ВУЗов, 2-е издание М.: Высш. шк., 1980 – 286 с.**
- 4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. Второе издание, стереотипное.-М.: ООО ИД «Альянс», 2008. -496 с., ил.**

Тема 3. Выпрямители

- ✓ Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера.
- ✓ Силовые выпрямители с нулевой точкой.
- ✓ Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности.

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

Выпрямитель – это электротехническое устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное.

Основными элементами выпрямителя являются **трансформатор** и **вентили**, с помощью которых обеспечивается одностороннее протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в пульсирующее.

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения к выходным зажимам выпрямителя часто подключают **электрический сглаживающий фильтр**.

Для регулирования или стабилизации выпрямленного напряжения и тока потребителя к входным зажимам выпрямителя подключают **регулятор** или **стабилизатор** (стабилизатор может быть включен и на стороне переменного тока выпрямителя).

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

Режим работы и параметры отдельных элементов выпрямителя, фильтра, регулятора и стабилизатора согласуются с заданными условиями работы потребителя постоянного тока.

Основная задача теории выпрямительных устройств сводится к определению расчетных соотношений, позволяющих по заданному режиму работы потребителя определить электрические параметры элементов: стабилизатора, регулятора, фильтра, а также вентилей и трансформатора выпрямителя.

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

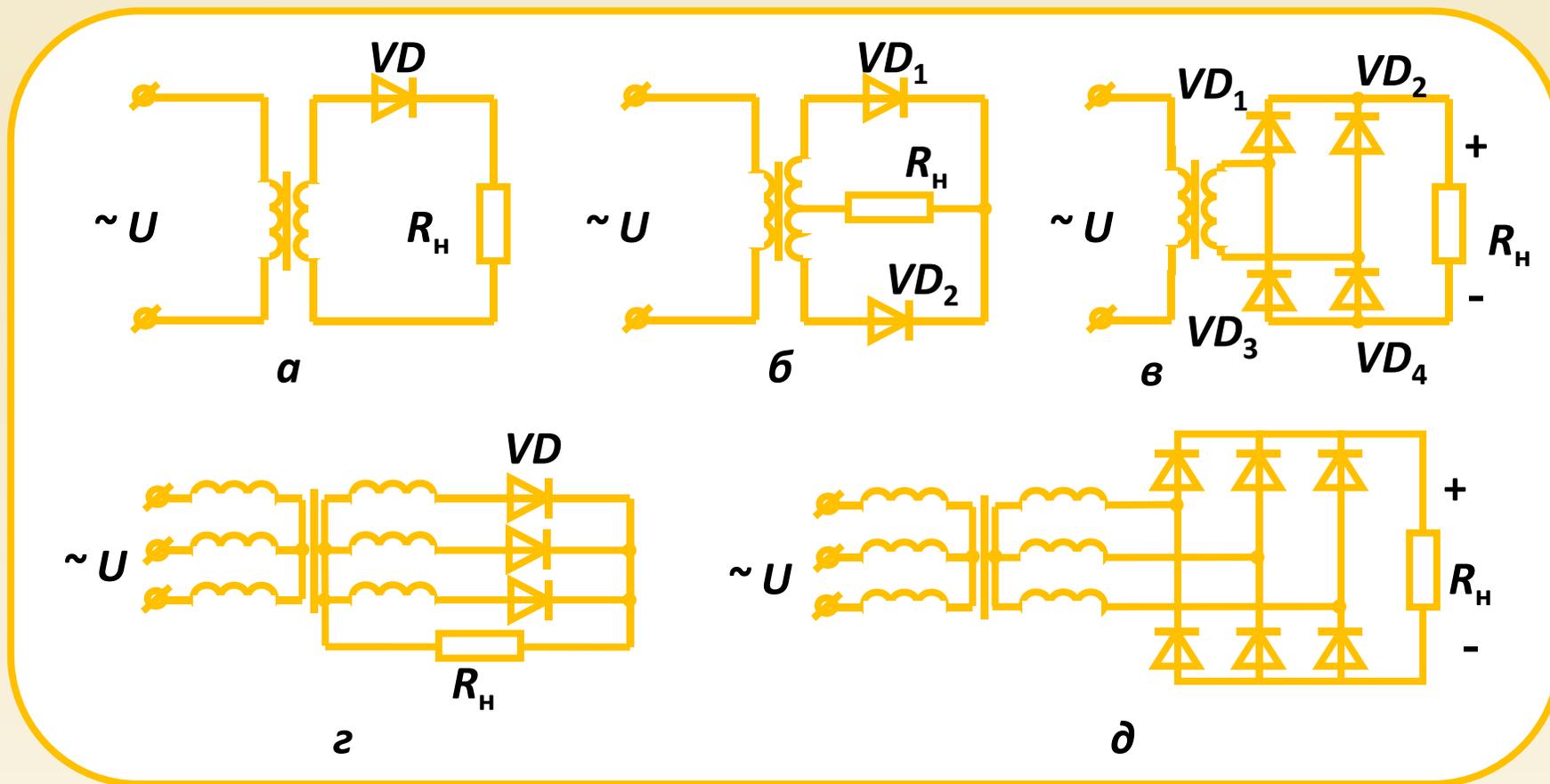
Затем произвести выбор этих элементов по каталогу или, если это необходимо, рассчитать их.

Схемы выпрямителей классифицируют по ряду признаков (см. рис.).

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

Основные схемы выпрямителей:

а – однофазная однополупериодная; **б** – однофазная с нулевым выводом; **в** – однофазная мостовая; **г** – трехфазная нулевая схема; **д** – трехфазная мостовая схема



Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

В зависимости от числа фаз питающего источника переменного напряжения различают схемы

- ✓ однофазного и
- ✓ трехфазного питания.

Независимо от мощности выпрямителей все схемы делят на

- ✓ одноктактные и
- ✓ двухтактные.

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

К **однотактным** относят схемы, у которых по вторичным обмоткам трансформатора ток протекает только один раз за полный период (полупериод или его часть). Отношение **частоты пульсаций** выпрямленного напряжения **к частоте сети** в однотактных схемах **равно числу фаз** вторичной обмотки трансформатора. В таких схемах, кроме простейшего **однофазного** **однопериодного** выпрямителя (см. рис. **а**), обязательно выводится нулевая точка трансформатора. **Однотактные** схемы – это схемы с нулевым выводом (см. рис. **б**).

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

К **двухтактным** относят схемы, у которых в каждой фазе вторичной обмотки трансформатора **ток протекает дважды** за **один** период, притом в противоположных направлениях. **Кратность пульсаций** выпрямленного напряжения в таких схемах **в два** раза больше, **чем число фаз** вторичной обмотки трансформатора. Схемы выпрямителей, относящиеся к двухтактным, называют также **мостовыми** (см. рис. **в**, **д**). В мостовых схемах ток во вторичной цепи всегда проходит последовательно по двум вентилям.

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

В зависимости от назначения выпрямители могут быть **управляемыми** (с регулируемым выпрямленным напряжением) и **неуправляемыми**.

Возможны различные модификации схем выпрямителей – с включением вторичных обмоток трансформатора в зигзаг, несимметричные схемы, схемы с нагрузкой, шунтированной диодом и др.

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

Эксплуатационные характеристики выпрямителей

Основными величинами, характеризующими эксплуатационные свойства выпрямителей, являются:

Чиженко И. М., Руденко В. С., Сенько В. И.
Основы преобразовательной техники:
учебное пособие для специальности
«Промышленная электроника». – М. : Высш.
шк., 1974. – 430 с.

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

- 1) средние значения выпрямленного напряжения и тока U_d, I_d ;
- 2) коэффициент полезного действия η ;
- 3) коэффициент мощности χ ;
- 4) внешняя характеристика, представляющая зависимость напряжения на выходе от тока нагрузки: $U_d = f(I_d)$;
- 5) регулировочная характеристика, представляющая зависимость выпрямленного напряжения от угла регулирования: $U_d = f(\alpha)$;

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

6) коэффициент пульсаций, представляющий отношение амплитуды данной гармонической составляющей выпрямленного напряжения (тока) к среднему значению выпрямленного напряжения (тока):

$$\varepsilon = \frac{U_{(q)m}}{U_d}$$

Классификация, принцип действия выпрямителя, работающего на нагрузку различного характера

7) коэффициент искажения, равный отношению действующих значений основной гармоники и полного тока первичной обмотки трансформатора:

$$v = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}$$

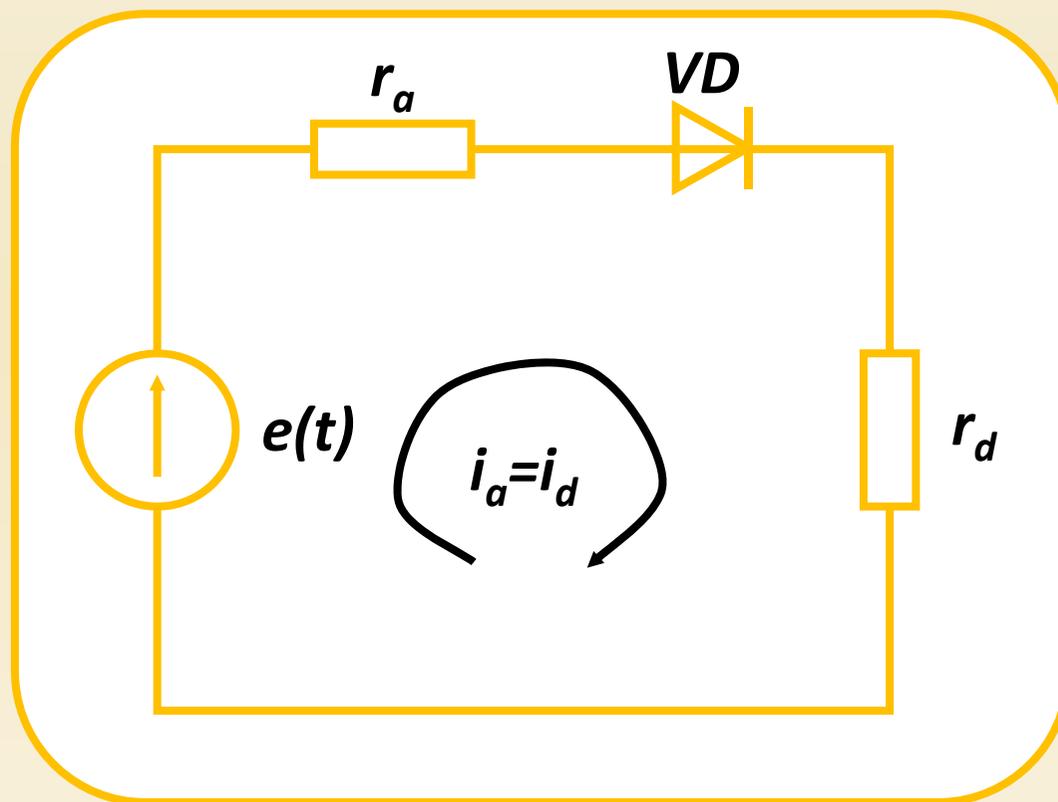
Силовые выпрямители с нулевой точкой

Рассмотрим работу **однополупериодного выпрямителя**, нагруженного на активное сопротивление, пренебрегая индуктивностью рассеяния трансформатора (источник питания бесконечной мощности).

На **рис.** показана эквивалентная схема и временные диаграммы работы выпрямителя.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

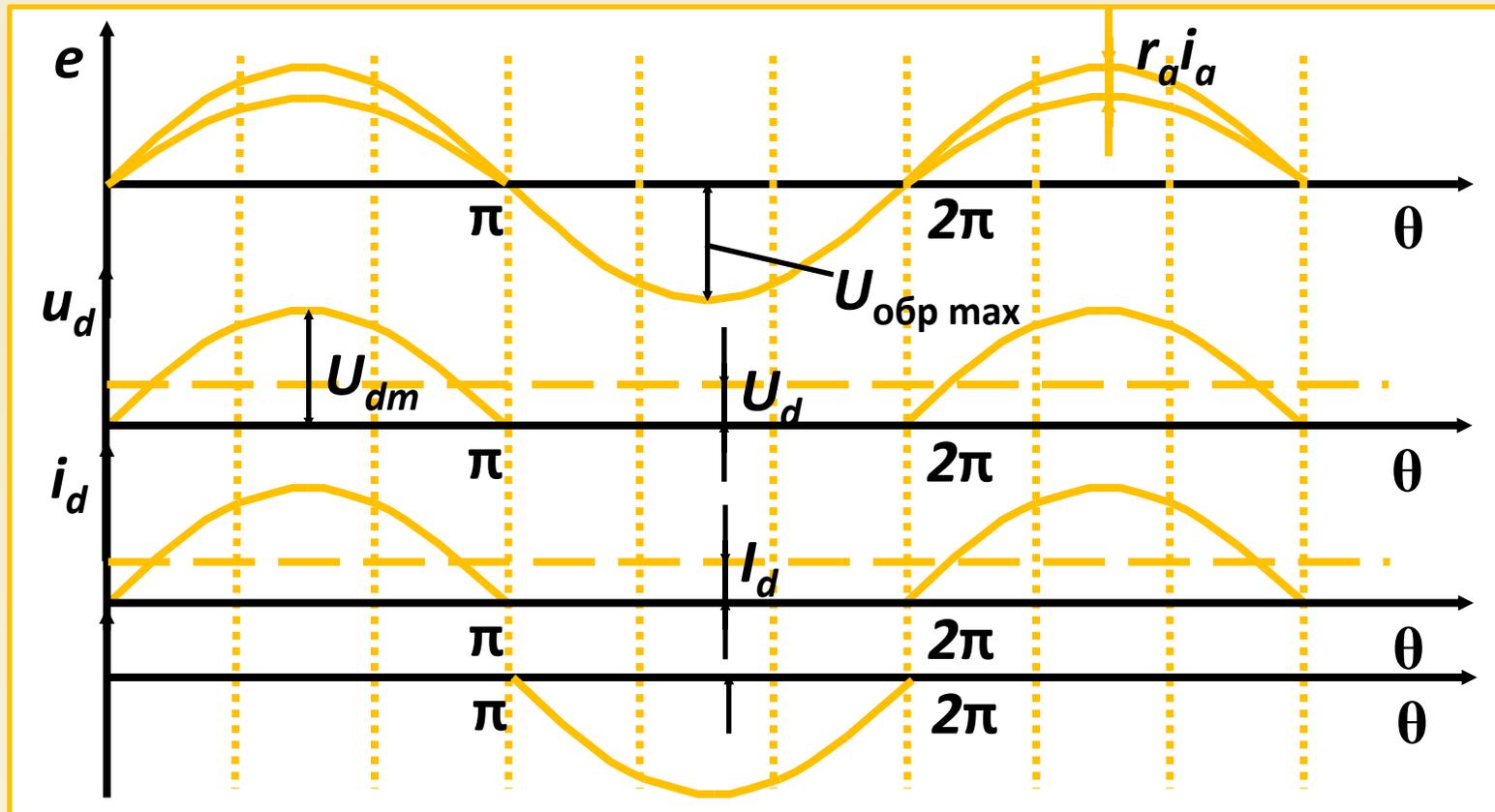
Однополупериодный выпрямитель с активной нагрузкой ($L_a = 0$, $r_a \neq 0$): *a* – эквивалентная схема.



a

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Однополупериодный выпрямитель с активной нагрузкой ($L_a = 0, r_a \neq 0$): б – временные диаграммы напряжений и токов.



б

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Под действием синусоидальной ЭДС вторичной обмотки $e(t) = E_m \sin \theta$, где $\theta = \omega t$, ток в цепи нагрузки может проходить только в течение тех полупериодов, когда анод вентиля имеет положительный потенциал относительно катода. На рис., **б** представлены временные диаграммы напряжений и токов, поясняющие работу выпрямителя. Вентиль **VD** пропускает ток в первый полупериод; во второй полупериод, когда потенциал анода становится отрицательным, ток в цепи равен нулю.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Учитывая это, мгновенное значение выпрямленного тока можно представить на интервалах следующим образом:

$$i_d = i_a = \frac{E_m}{r_a + r_d} \sin \theta$$

при $0 < \theta < \pi$;

$$i_d = i_a = 0$$

при $\pi < \theta < 2\pi$.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Величина

$$\frac{E_m}{r_a + r_d} = I_m$$

означает максимальное значение выпрямленного тока. Выпрямленное напряжение в любой момент времени меньше, чем ЭДС вторичной обмотки, так как часть напряжения теряется на сопротивлении r_a :

$$u_d = r_d i_d = \frac{E_m r_d}{r_a + r_d} \sin \theta = \eta E_m \sin \theta = U_{dm} \sin \theta$$

где

$$\eta = \frac{r_d}{r_a + r_d}$$

– условный КПД анодной цепи;

Силовые выпрямители с нулевой точкой

$U_{dm} = \eta E_m$ – максимальное значение выпрямленного напряжения.

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{dm} \sin \theta \cdot d\theta = \frac{U_{dm}}{\pi} = \frac{\eta}{\pi} E_m$$

Среднее значение выпрямленного тока (а также тока вентиля)

$$I_d = I_{cp} = \frac{U_d}{r_d} = \frac{1}{\pi} I_m$$

Действующее значение тока вентиля

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_m^2 \sin^2 \theta \cdot d\theta} = \frac{I_m}{2} = \frac{E_m}{2(r_d + r_a)}$$

Максимальное обратное напряжение на вентиле, как видно на рис., достигает амплитудного значения ЭДС вторичной обмотки:

$$U_{\text{обр max}} = E_m = \frac{\pi}{\eta} U_d$$

Силовые выпрямители с нулевой точкой

По найденным величинам I_a , $I_{\text{ср}}$, I_d и $U_{\text{обр max}}$ выбирается вентиль. Согласно полученным данным вентиль должен допускать амплитудное значение тока и максимальное напряжение, по крайней мере в π раз превышающее среднее значение тока и напряжения на нагрузке.

Переменная составляющая выпрямленного напряжения и тока для данной схемы, как следует из временных диаграмм для u_d и i_d , велика, причем основная гармоника пульсаций имеет частоту, равную частоте питающей сети.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Для удобства вычисления амплитуды основной гармоники пульсаций выберем начало координат в точке, где выпрямленное напряжение имеет максимальное значение.

Тогда мгновенное значение u_d можно представить как косинусоидальную функцию в пределах угла

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq +\frac{\pi}{2}$$

$$u_d = U_{dm} \cos \theta$$

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Так как u_d – четная функция, то при разложении в ряд Фурье останутся только косинусоидальные члены. Амплитуда первой (основной) гармоники напряжения

$$U_{(1)m} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} u_d \cos \theta \cdot d\theta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} U_{dm} \cos^2 \theta \cdot d\theta = \frac{U_{dm}}{2} = \frac{\pi}{2} U_d$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения по первой гармонике

$$\varepsilon_{(1)} = \frac{U_{(1)m}}{U_d} = 1,57$$

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Рассмотрим режим работы трансформатора. Действующее значение тока вторичной обмотки

$$I_{\text{д}} = I_{a.\text{эфф}} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi}{2} I_d$$

Отношение переменного и постоянного токов выпрямителя называется *коэффициентом преобразования схемы по току*. Для рассматриваемой схемы выпрямителя

$$k_I = \frac{I_{\text{д}}}{I_d} = \frac{\pi}{2}$$

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Отношение действующего значения фазного тока I_d к его среднему значению I_{cp} называют коэффициентом формы тока:

$$k_{\phi} = \frac{I_d}{I_{cp}}$$

В одноктных схемах постоянная составляющая фазного тока определяется выражением

$$I_{cp} = I_a = \frac{I_d}{m}$$

где m – число фаз вторичной обмотки трансформатора.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Для данной схемы

$$k_{\phi} = \frac{I_{\text{д}} m}{I_d} = \frac{I_{\text{д}}}{I_d} = \frac{\pi}{2}$$

Действующее значение ЭДС вторичной обмотки

$$E_{\text{д}} = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m = \frac{\pi}{\eta \sqrt{2}} U_d = \frac{2,22}{\eta} U_d$$

Отношение действующего значения ЭДС $E_{\text{д}}$ к среднему значению выпрямленного напряжения U_d называют **коэффициентом преобразования схемы по напряжению**

$$k_U = \frac{E_{\text{д}}}{U_d} = \frac{2,22}{\eta}$$



Силовые выпрямители с нулевой точкой

Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора

$$S_{\text{тр}} = m E_{\text{д}} I_{\text{д}} = m k_U U_{\text{д}} k_I I_{\text{д}} = m \frac{3,49}{\eta} P_{\text{д}}$$

где m – число фаз вторичной обмотки трансформатора;

$P_{\text{д}} = U_{\text{д}} I_{\text{д}}$ – мощность постоянных составляющих выпрямленного напряжения и тока.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Коэффициент использования мощности питающего трансформатора определяется из выражения

$$k_{\text{ис}} = \frac{U_d I_d}{m E_d I_d} 100 \%$$

Для рассматриваемой схемы коэффициент использования мощности вторичной обмотки трансформатора не превышает **29 %**.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

В сердечнике трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки создается добавочный постоянный магнитный поток, насыщающий сердечник трансформатора.

Это явление принято называть **вынужденным намагничиванием трансформатора.**

В результате насыщения намагничивающий ток трансформатора возрастает в несколько раз по сравнению с током при нормальном режиме намагничивания сердечника.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Возрастание намагничивающего тока связано с увеличением сечения провода первичной обмотки и размеров трансформатора в целом.

Однополупериодный выпрямитель из-за перечисленных недостатков применяется **редко** (в источниках электропитания маломощной аппаратуры).

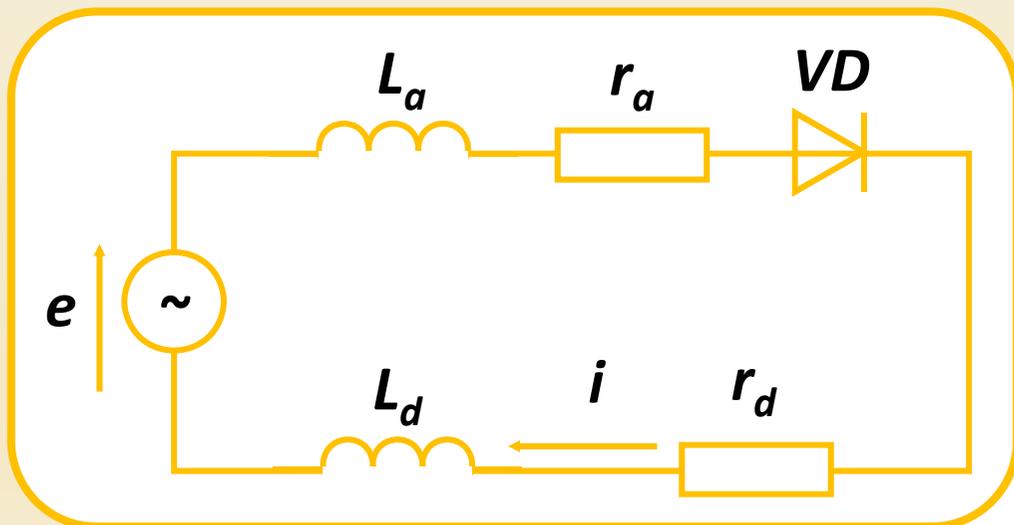
Силовые выпрямители с нулевой точкой

При учете индуктивности рассеяния обмоток питающего трансформатора (выпрямитель большой мощности) эквивалентная схема простейшего однополупериодного выпрямителя соответствует расчетной схеме, представленной на рис. а. Пренебрегая потерями в вентиле, он может быть заменен ключом, замыкающимся в момент появления положительного потенциала между анодом и катодом и размыкающимся в момент прохождения тока через нуль. Тогда эквивалентная схема замещения выпрямителя приводится к схеме, изображенной на рис. б.

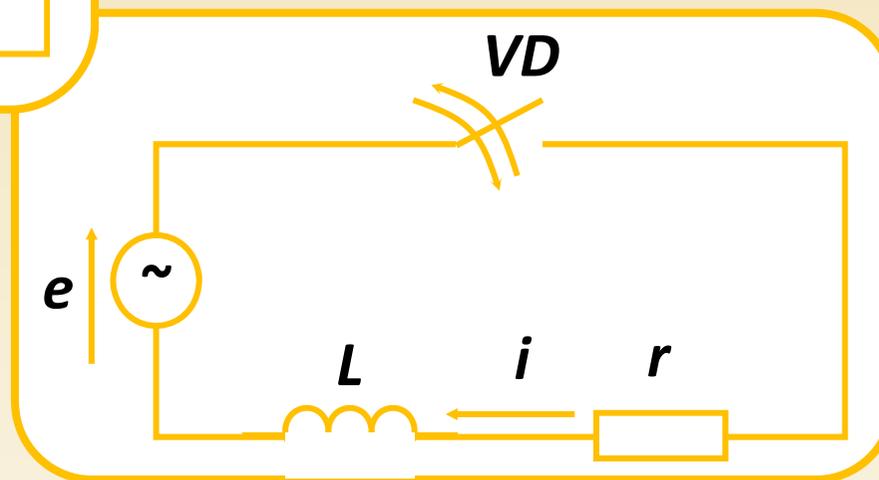


Силовые выпрямители с нулевой точкой

Однополупериодный выпрямитель при активно-индуктивной нагрузке



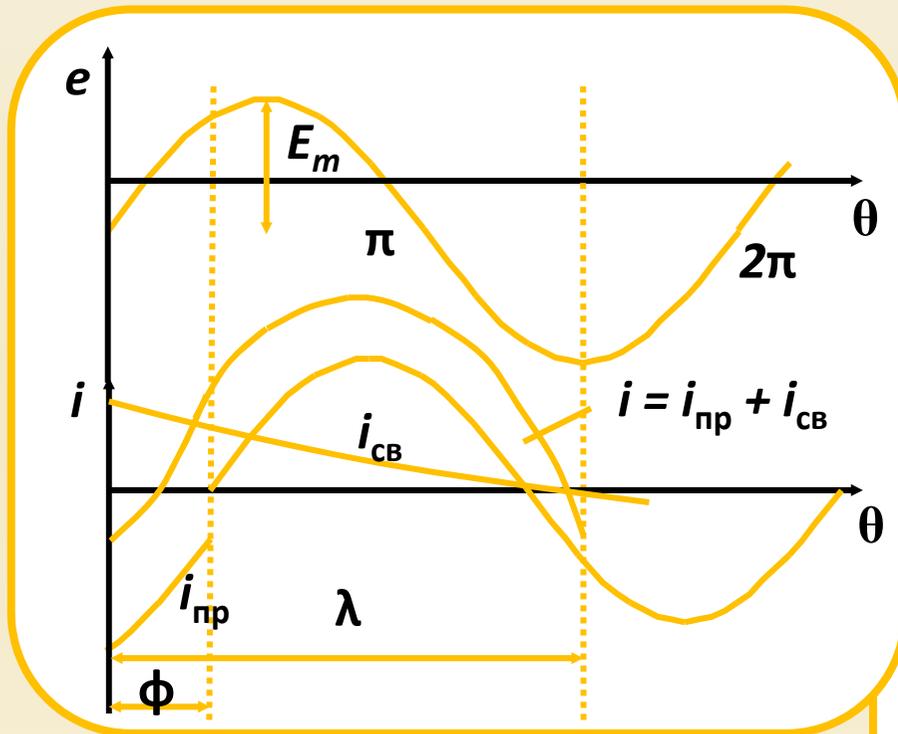
a



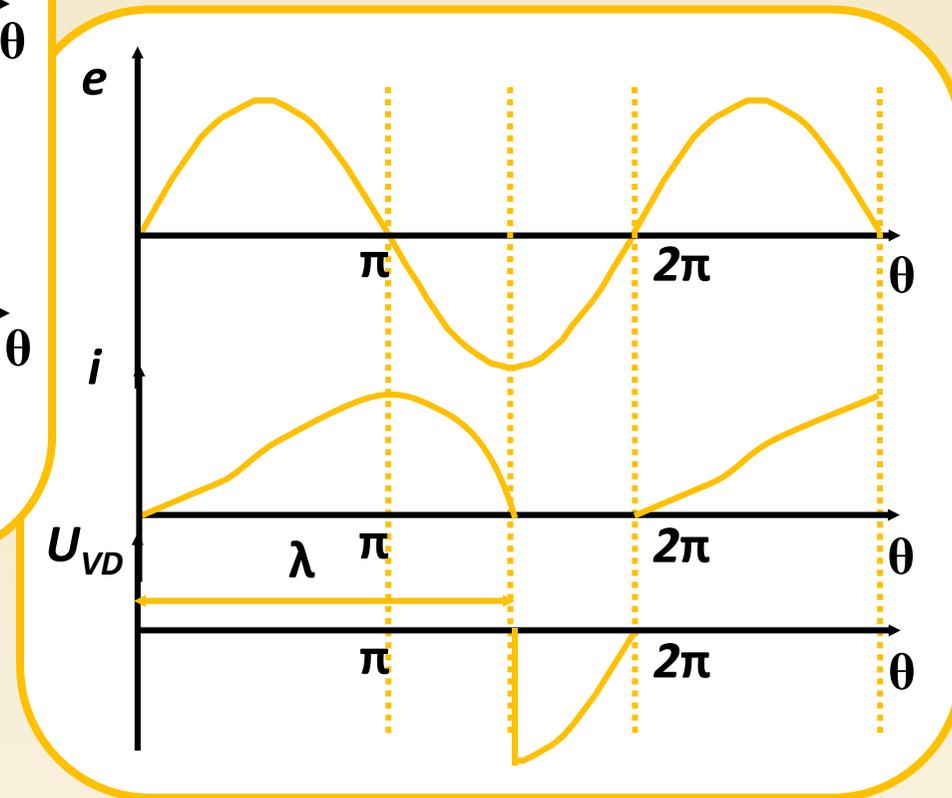
б

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Однополупериодный выпрямитель при активно-индуктивной нагрузке



а



б



Силовые выпрямители с нулевой точкой

Электромагнитные процессы в схеме описываются уравнением

$$e = L \frac{di}{dt} + ri$$

где $e = E_m \sin \theta$ – источник синусоидального напряжения ($\theta = \omega t$);

$$L = L_a + L_d, r = r_a + r_d,$$

где L_a, r_a – эквивалентные сопротивления питающего трансформатора;

L_d, r_d – сопротивления нагрузки.

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Решение уравнения
$$e = L \frac{di}{dt} + ri$$

позволяет найти значение тока в цепи:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} = I_m \sin(\theta - \varphi) + I_m \sin \varphi \cdot e^{-\frac{r}{L}t} \quad (*)$$

где
$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}$$
 – амплитудное значение тока.

На рис. **в** изображена кривая тока, построенная по выражению (*). Характер тока в цепи пульсирующий, а продолжительность импульса тока λ больше продолжительности положительной полуволны ЭДС источника питания π .

Силовые выпрямители с нулевой точкой

Величина угла λ зависит от соотношения между величинами ωL и r . Чем больше

$$\frac{\omega L}{r}$$

тем больше λ . Если $\frac{\omega L}{r}$ стремится к бесконечности, то $\lambda \rightarrow 2\pi$.

Если $\frac{\omega L}{r} \rightarrow 0$, то $\lambda \rightarrow \pi$.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Однофазный выпрямитель с нулевым выводом

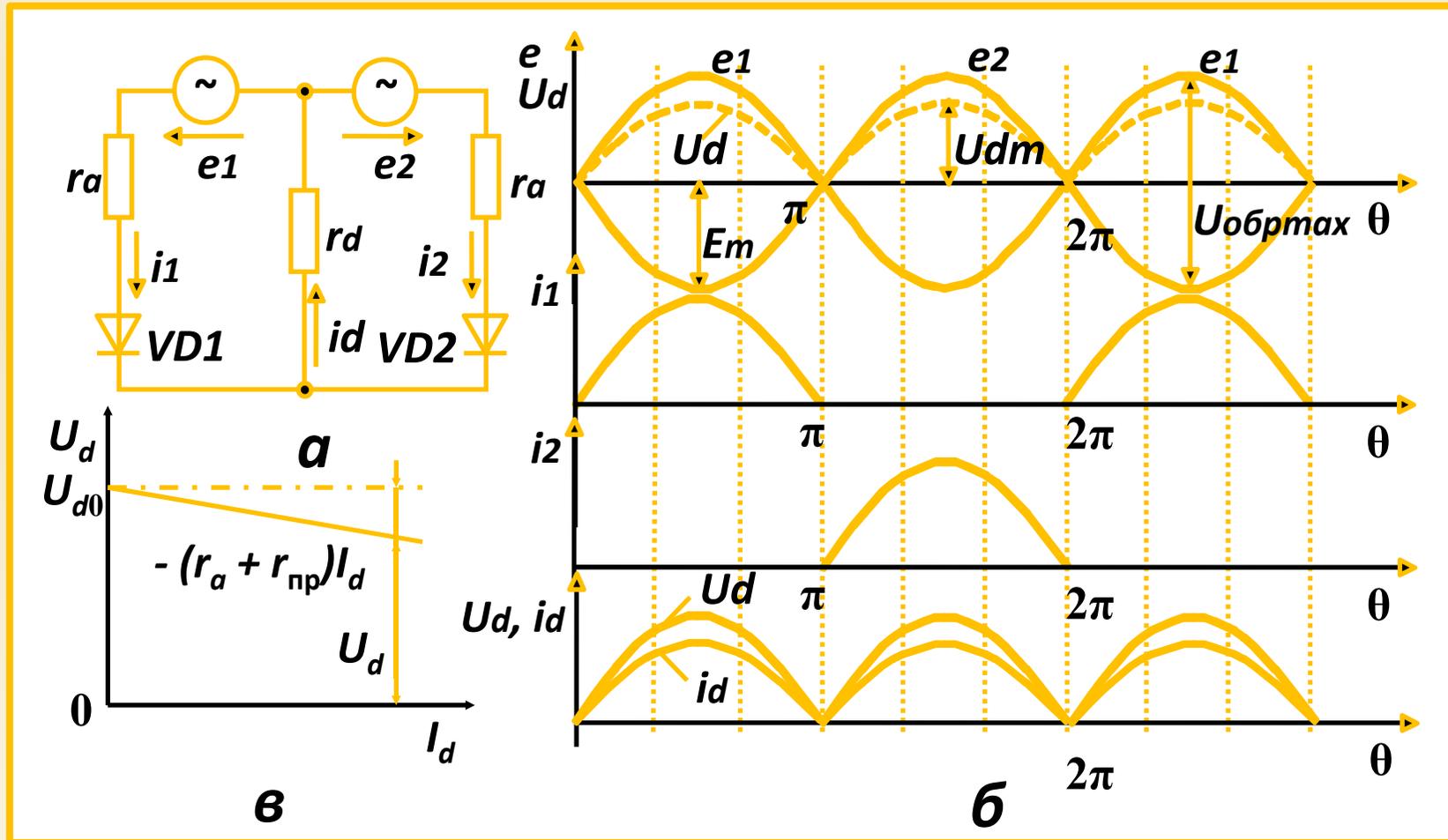
Режим $r_a \neq 0$, $L_a = 0$

Эквивалентная схема выпрямителя, а также временные диаграммы напряжений и токов показаны на рис.

Выпрямитель с нулевым выводом (см. рис. **б**) по существу является двухфазным, так как вторичная обмотка трансформатора с нулевой точкой создает две ЭДС, равные по величине, но противоположные по направлению.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Однофазный выпрямитель с нулевым выводом ($L_a = 0, r_a \neq 0$): а – эквивалентная схема; б – временные диаграммы напряжений и токов; в – внешняя характеристика с учетом потерь



Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Вентили VD_1 и VD_2 пропускают ток поочередно: в течение первого полупериода положительный потенциал имеет анод вентиля VD_1 , поэтому ток проходит через этот вентиль, сопротивление нагрузки и половину обмотки с ЭДС e_1 , в течение второго полупериода положительный потенциал имеет анод вентиля VD_2 , ток проходит через половину обмотки с ЭДС e_2 , вентиль VD_2 и **сопротивление нагрузки** в том же направлении, что и в первый полупериод.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

В отличие от простейшего однополупериодного выпрямителя в выпрямителе с нулевым выводом выпрямленный ток проходит по нагрузке в течение обоих полупериодов переменного тока, но каждая из половин вторичной обмотки трансформатора оказывается нагруженной током только в течение полупериода. В результате встречного направления намагничивающих сил постоянных составляющих токов вторичных полуобмоток в сердечнике трансформатора нет вынужденного намагничивания.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Во вторичной обмотке трансформатора из-за наличия вентилей ток несинусоидален, что обуславливает появление мощности искажения. В первичной обмотке ток синусоидален и мощности искажения нет. Поэтому для рассматриваемого выпрямителя следует проектировать специальный трансформатор с различными расчетными мощностями обмоток. Часто, особенно для маломощных выпрямителей, применяют обычные стандартные трансформаторы с равными мощностями обмоток: $S_1 = S_2 = S_{\text{тр}}$.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Мощность такого трансформатора должна быть не меньше типовой мощности, найденной при расчете выпрямителя. Но нужно учитывать, что в стандартном трансформаторе вторичная обмотка будет работать с перегрузкой, а первичная – с недогрузкой. Тепловой режим трансформатора будет близок к номинальному.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Внешняя характеристика выпрямителя, с учетом потерь в трансформаторе и вентилях, определяется уравнением

$$U_d = U_{d0} - (r_a + r_{\text{пр}}) I_d$$

где $U_{d0} = \frac{2}{\pi} E_m$

– среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе; $r_{\text{пр}}$ – сопротивление вентиля в прямом направлении (считаем его постоянным).
Внешняя характеристика выпрямителя приведена на рис. **в**.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Режим $r_a = 0, L_a \neq 0, r_d \neq 0, L_d \neq 0$

Одной из основных характеристик выпрямителей с числом фаз вторичной обмотки трансформатора две и более является **угол коммутации** (перекрытия), оказывающий большое влияние на вид внешней характеристики выпрямителя.

Наличие потоков рассеяния в обмотках трансформатора приводит к тому, что продолжительность работы вентиля λ может оказаться больше продолжительности положительных значений напряжений между анодом и катодом вентиля.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

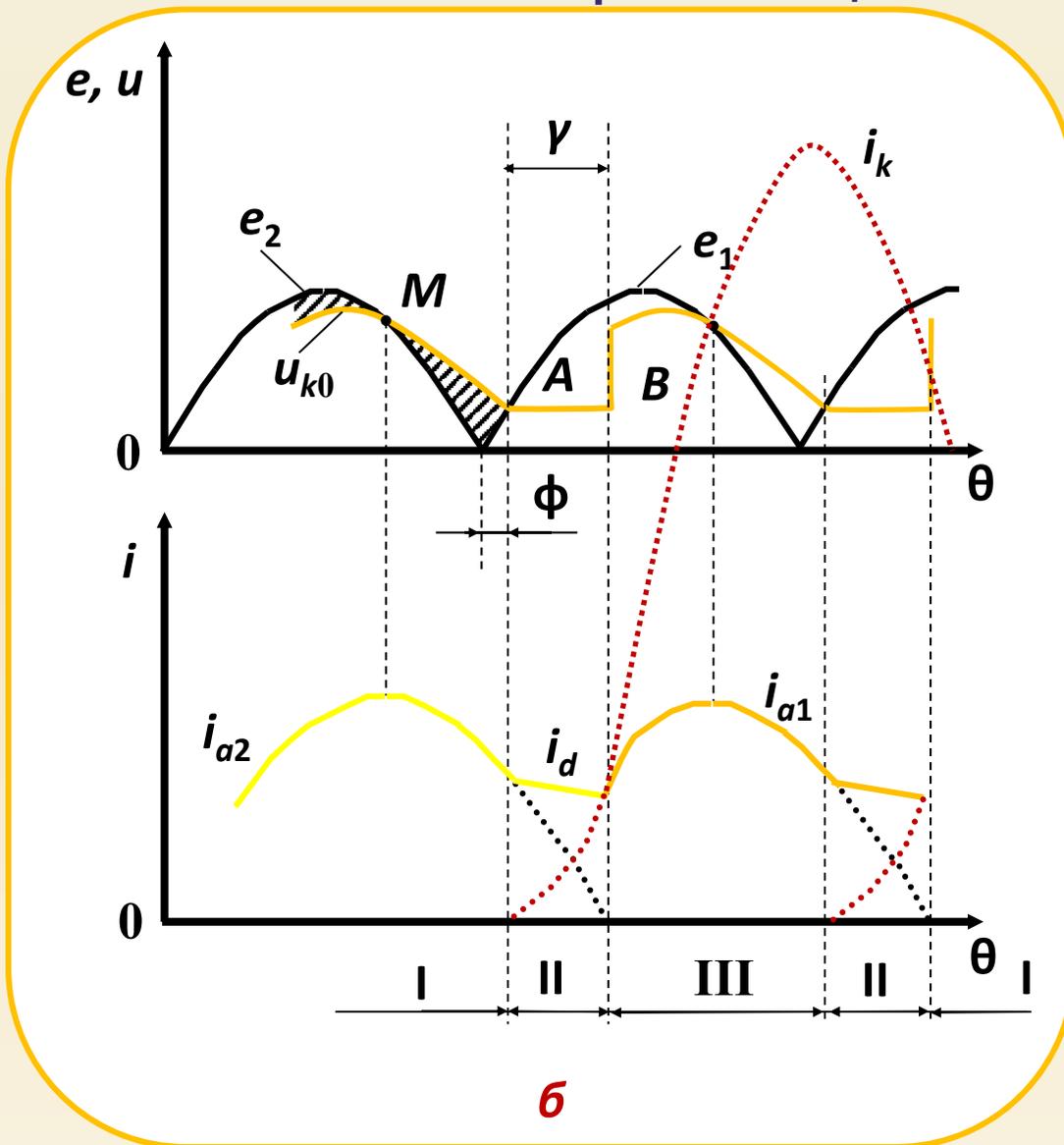
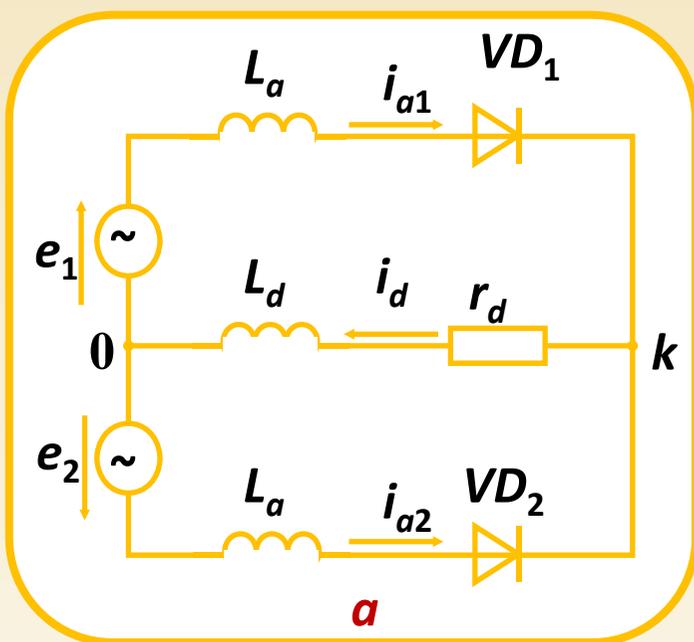
Для выпрямителей, при учете индуктивностей в анодных ветвях вентилей, характерны интервалы работы, когда **одновременно пропускают ток два смежных по фазе вентиля**: в одном ток убывает, во втором – нарастает.

Такие интервалы одновременной работы называют периодами коммутации, которые принято обозначать γ (см. рис. 6).

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

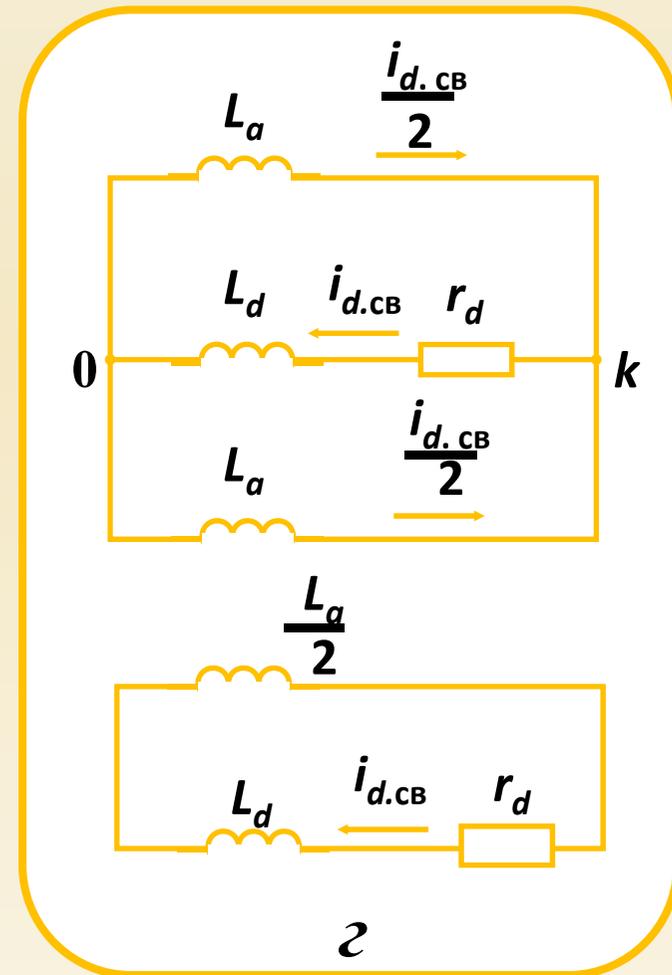
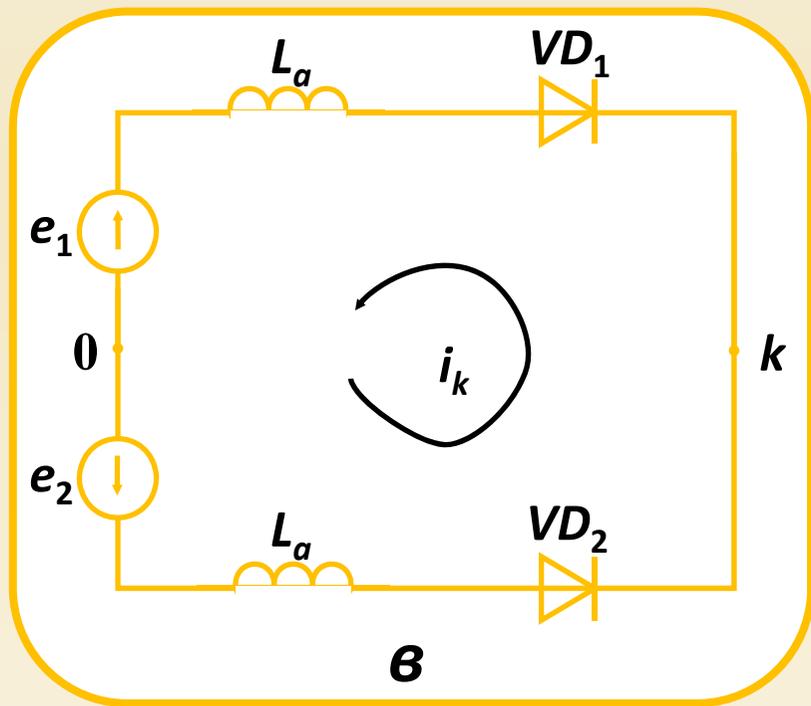
Явление коммутации в выпрямителе с нулевым выводом: **а** – эквивалентная схема выпрямителя; **б** – временные диаграммы токов и напряжений при коммутации, если $0 < L_d < \infty$

$0 < L_d < \infty$



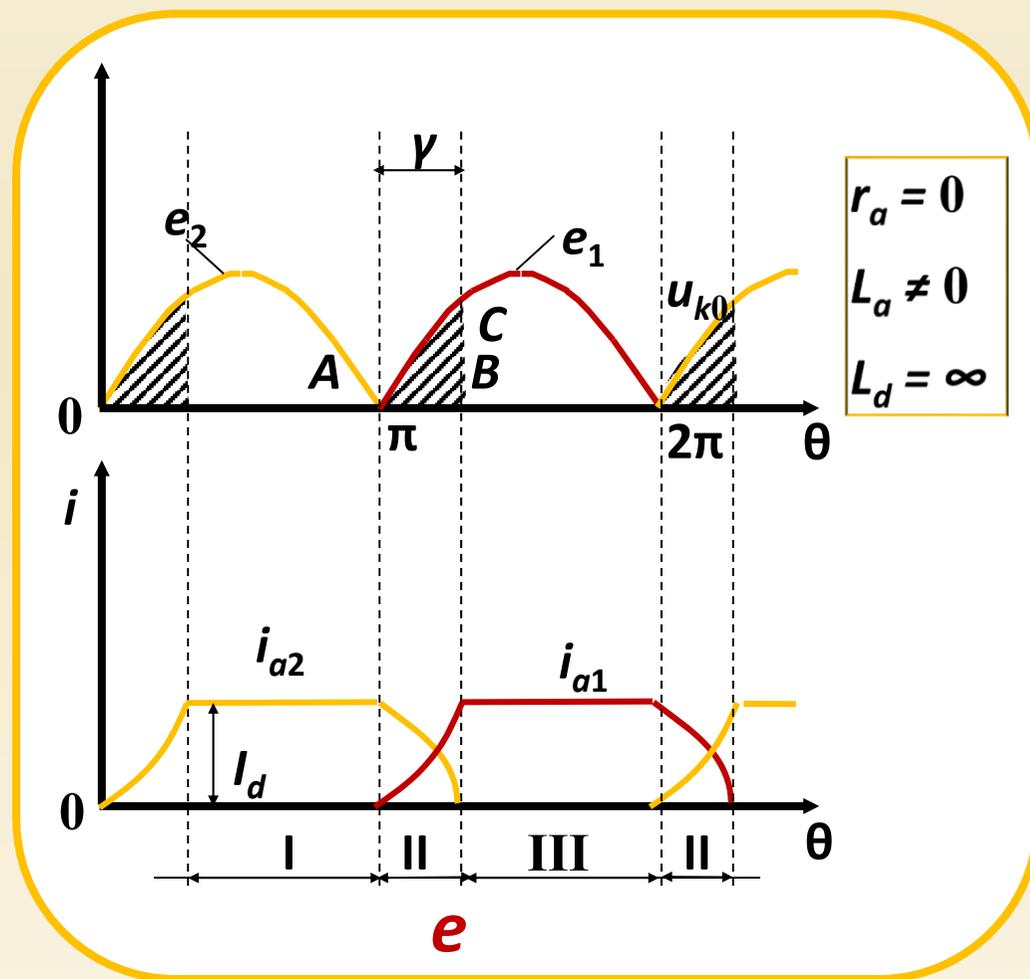
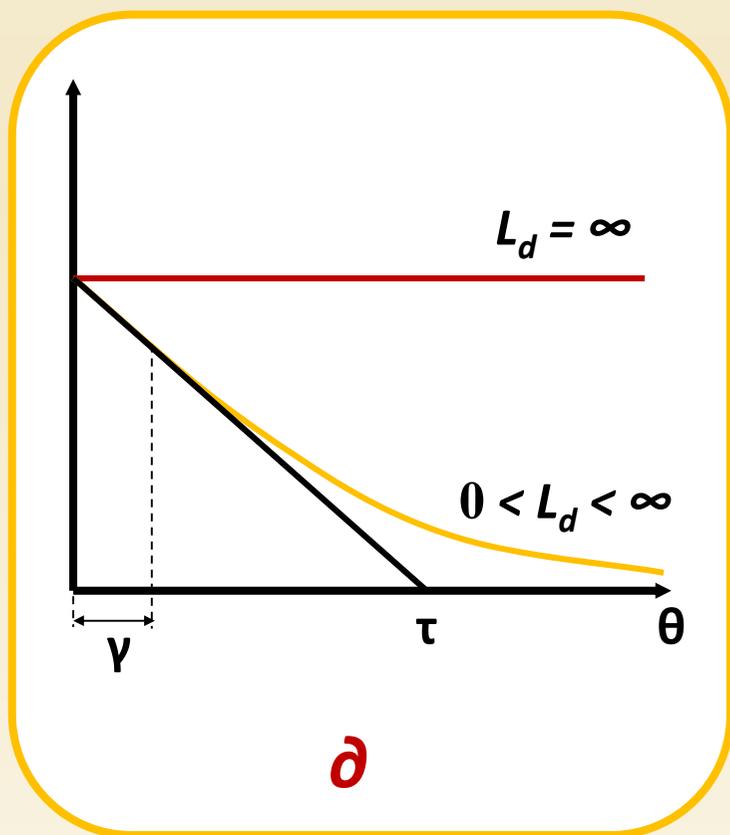
Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Явление коммутации в выпрямителе с нулевым выводом: **в** – эквивалентная схема выпрямителя при действии ЭДС e_1 и e_2 ; **г** – эквивалентная схема выпрямителя при действии ЭДС самоиндукции L_d



Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Явление коммутации в выпрямителе с нулевым выводом: δ – временные диаграммы тока для свободного режима; e – временные диаграммы токов и напряжений при коммутации, если $L_d = \infty$



Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Рассмотрим явление коммутации в однофазном выпрямителе с нулевым выводом, эквивалентная схема которого изображена на рис. **a**. Эта схема соответствует выпрямителю большой мощности, активными сопротивлениями обмоток трансформатора которого можно пренебречь. Для учета индуктивности рассеяния обмоток трансформатора в схему введены индуктивности L_a , а также индуктивность сглаживающего реактора L_d и сопротивление нагрузки r_d .

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Для данной схемы можно выделить три характерных интервала за один период: интервал I, когда ток протекает только через вентиль VD_2 ; интервал II, когда ток пропускают одновременно вентили VD_1 и VD_2 ; интервал III, когда ток протекает только через вентиль VD_1 .

Для каждого из этих интервалов можно составить эквивалентную схему. Рассмотрим электромагнитные процессы по интервалам. Эквивалентная схема для интервала I имеет вид, изображенный на рис. *a*.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Как и в простейшем выпрямителе, ток i_{a2} вначале увеличивается, а затем, достигнув максимума, уменьшается. Чтобы определить момент времени, когда вентиль VD_1 начнет пропускать ток, нужно знать, как изменяется потенциал анода этого вентиля. Как только он станет положительным, вентиль VD_1 вступит в работу и будут пропускать ток одновременно два вентиля.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Потенциал анода вентиля VD_1 относительно потенциала катода равен

$$U_{VD_1} = e_1 - u_{k0}$$

где u_{k0} можно определить из режима работы вентиля VD_2 :

$$u_{k0} = e_2 - L_a \frac{d i_{a2}}{dt} = e_2 - x_a \frac{d i_{a2}}{d\theta}$$

где $x_a = \omega L_a$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

До максимума тока i_{a2} ЭДС

$$x_a \frac{d i_{a2}}{d\theta}$$

противодействует нарастанию тока (действует против ЭДС e_2). После максимума тока ЭДС

$$x_a \frac{d i_{a2}}{d\theta}$$

совпадает по направлению с током, т. е. усиливает действие ЭДС e_2 . В точке M (см. рис. **б**), соответствующей максимуму тока i_{a2} , ЭДС

$$x_a \frac{d i_{a2}}{d\theta}$$

поэтому $u_{k0} = e_2$. В точке A $u_{k0} = e_1$,

поэтому $U_{VD1} = 0$



Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Эквивалентная схема для интервала II представлена на рис. **a**. К моменту начала прохождения тока через вентиль VD_1 энергией, запасенной в индуктивности L_a ветви с вентилем VD_2 (по сравнению с энергией в сглаживающем реакторе с индуктивностью L_d), пренебрегаем, так как обычно $L_d \gg L_a$.

Таким образом, в схеме к началу коммутации имеются две равные внешние ЭДС – e_1 и e_2 , находящиеся в противофазе, и свободная энергия, запасенная в индуктивности L_d , которая обуславливает свободный режим.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

В период коммутации цепь линейна, если считать $r = \text{const}$. Поэтому можно применить метод наложения действий внешних источников ЭДС (e_1 и e_2) и ЭДС самоиндукции индуктивности L_d , обусловленной запасенной в ней энергией магнитного поля.

При действии ЭДС e_1 и e_2 (см. рис. **в**) ветвь нагрузки с элементами r_d , L_d можно не учитывать при номинальном режиме, так как она обладает значительно большим сопротивлением для всех гармоник пульсирующего тока по сравнению с ветвями, содержащими элементы L_a .

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

При таком допущении ток i_k в контуре определяется из уравнения

$$e_1 - e_2 = 2x_a \frac{di_k}{d\theta}$$

Так как $e_1 = e_2 = E_m \sin(\theta + \varphi)$

отсчет времени ведется с момента начала коммутации, поэтому

$$x_a \frac{di_k}{d\theta} = E_m \sin(\theta + \varphi)$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Решение уравнения

$$U_d = U_{d0} - (r_a + r_{пр}) I_d$$

в общем виде дает

$$i_k = \frac{E_m}{x_a} \int \sin(\theta + \varphi) d\theta = -\frac{E_m}{x_a} \cos(\theta + \varphi) + A$$

При этом напряжение на нагрузке $u_{k0} = 0$.

При действии ЭДС самоиндукции индуктивности L_d (рис. 2) ток в цепи нагрузки $i_{d.св}$ определяется из уравнения

$$\omega \left(L_d + \frac{L_a}{2} \right) \frac{d i_{d.св}}{d\theta} + i_{d.св} r_d = 0$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Токи в анодных ветвях

$$i_{a1CB} = i_{a2CB} = \frac{i_{d.CB}}{2}$$

Если ток в индуктивности L_d к началу коммутации имел значение i_{d0} , то из уравнения

$$\omega \left(L_d + \frac{L_a}{2} \right) \frac{d i_{d.CB}}{d\theta} + i_{d.CB} r_d = 0$$

можно определить значение свободного тока в цепи нагрузки

$$i_{d.CB} = i_{d0} e^{-\frac{\theta}{\omega\tau}}$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Напряжение на нагрузке при этом

$$u_{k0} = \frac{x_a}{2} \cdot \frac{d i_{d.св}}{d\theta}$$

Таким образом, форма кривой тока $i_{d.св}$ зависит от величины постоянной времени цепи

$$\tau = \frac{L_d + \frac{L_a}{2}}{r_d}$$

Чем больше величина L_d по сравнению с r_d , тем более пологая кривая $i_{d.св}$ в период коммутации. На рис. δ представлены кривые $i_{d.св}$ для $L_d = \infty$ и $0 < L_d < \infty$.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Если длительность периода коммутации γ меньше величины T , что справедливо при больших значениях L_d , то ток $i_{d.cв}$ на интервале можно считать изменяющимся по прямолинейному закону; тогда напряжение $U_{к0}$ будет неизменно по величине (линия AB на рис. 6).

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Произведя наложения действий источников ЭДС и определив постоянные интегрирования, получим выражения для токов в вентиллях и напряжения на нагрузке в период коммутации:

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= \frac{E_m}{x_a} [\cos \varphi - \cos(\theta + \varphi)] - \frac{i_{d0}}{2} \left(1 - e^{-\frac{\theta}{\omega\tau}} \right); \\ i_{a2} &= \frac{E_m}{x_a} [\cos(\theta + \varphi) - \cos \varphi] + \frac{i_{d0}}{2} \left(1 - e^{-\frac{\theta}{\omega\tau}} \right); \\ |u_{k0}| &= \frac{x_a i_{d0}}{2\omega\tau} e^{-\frac{\theta}{\omega\tau}}. \end{aligned} \right\}$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Период коммутации закончится в момент, когда $i_{a2} = 0$. Затем наступает интервал III, когда пропускает ток только вентиль VD_1 . Этот интервал не отличается по своему характеру от интервала I.

В выпрямителях со сглаживающим реактором обычно $L_d \gg L_a$, поэтому ЭДС

$$x_a \frac{d i_{a2}}{d\theta}$$

мала по сравнению с ЭДС полуобмоток трансформатора, и ею можно пренебречь.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Тогда кривая напряжения u_{k0} совпадает с кривыми ЭДС e_1 и e_2 для интервалов I и III и с осью абсцисс для интервала II, где $u_{k0} = 0$ (см. рис. e). Этот режим соответствует индуктивности $L_d = \infty$. Реактор с бесконечно большой индуктивностью L_d в течение интервалов I и III идеально сглаживает пульсации токов в вентилях VD_1 и VD_2 таким образом, что эти токи оказываются неизменными по величине, равными току нагрузки I_d .

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

В течение интервала коммутации цепь нагрузки следует рассматривать как идеальный источник тока бесконечно большой мощности, обеспечивающий неизменный ток в нагрузке I_d .

Токи в вентиллях в период коммутации при $L_d = \infty$ определяются из выражений

$$\omega \left(L_d + \frac{L_a}{2} \right) \frac{d i_{d.CB}}{d\theta} + i_{d.CB} r_d = 0$$

с учетом, что при $\tau = \infty$ и $\varphi = 0$

$$i_{d.CB} = i_{d0} = \text{const} = I_d:$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= \frac{E_m}{x_a} (1 - \cos \theta); \\ i_{a2} &= \frac{E_m}{x_a} (\cos \theta - 1) + I_d. \end{aligned} \right\}$$

Так как в случае $\theta = \gamma$ $i_{a1} = I_d$, угол коммутации при $L_d = \infty$ определяется из выражения

$$1 - \cos \gamma = \frac{x_a I_d}{E_m}$$

Таким образом, чем меньше индуктивность рассеяния трансформатора, тем меньше угол коммутации.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Для маломощных выпрямителей X_a – величина малая, поэтому при расчете можно допустить, что $\gamma = 0$.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Режим $r_a = 0, L_a \neq 0, L_d = \infty$

Эквивалентная схема выпрямителя для данного режима представлена на слайде **50** (рис. **a**).

Среднее значение выпрямленного напряжения определим с помощью временных диаграмм напряжений, представленных на рис. **a**:

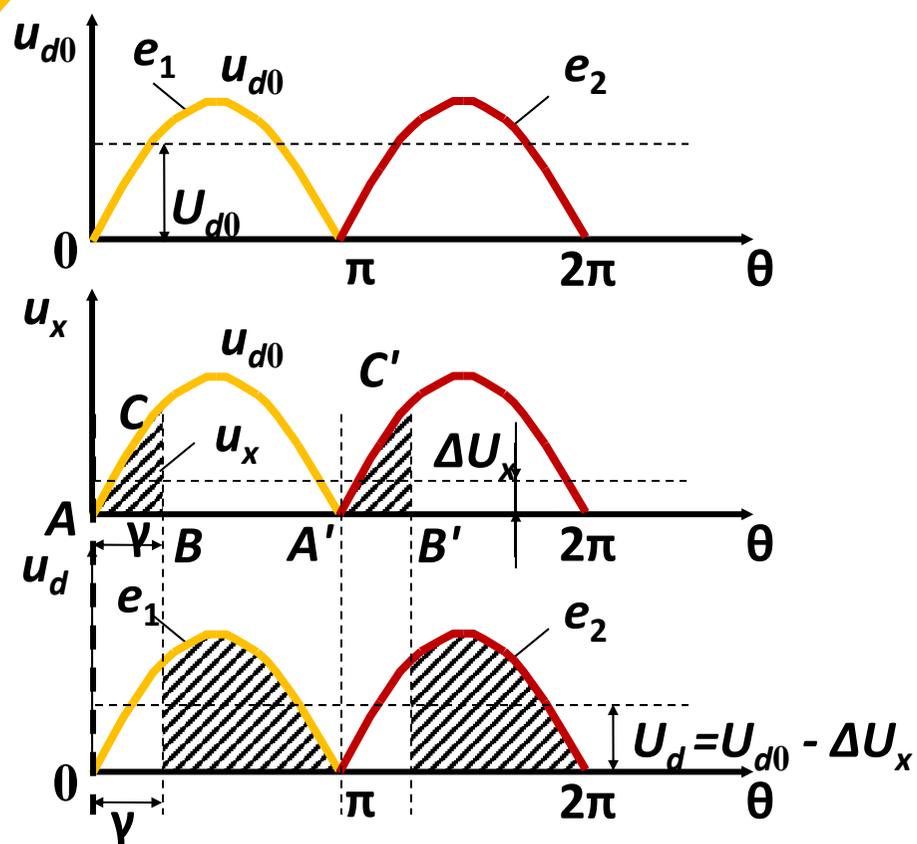
$$U_d = U_{d0} - \Delta U_x$$

где U_{d0} – среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе;

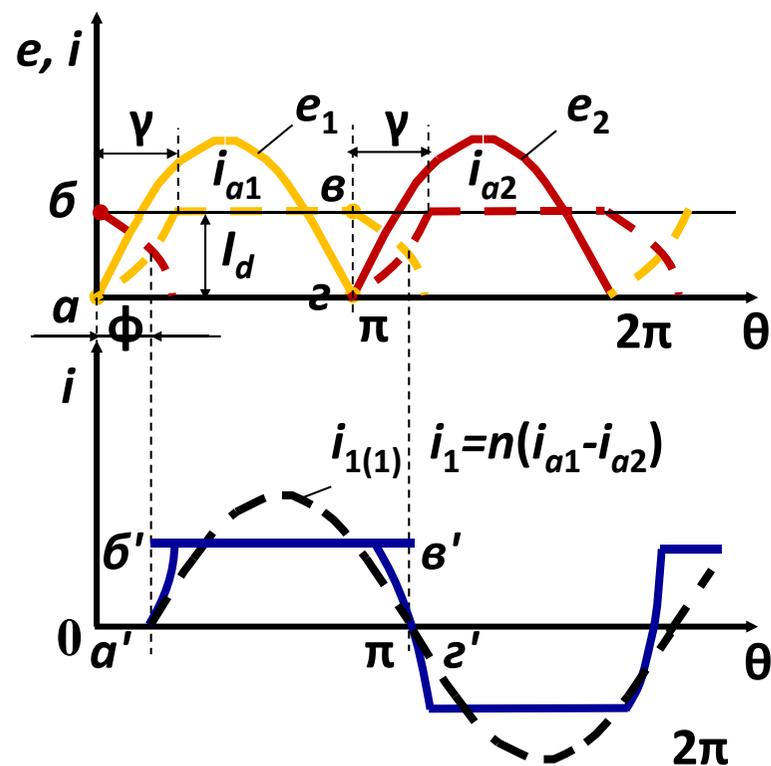
ΔU_x – среднее значение потери выпрямленного напряжения, обусловленного коммутацией.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Временные диаграммы выпрямленного напряжения однофазного выпрямителя с нулевым выводом при $L_a \neq 0, L_d = \infty$ (а);
временные диаграммы токов в обмотках трансформатора (б)



а



б



Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

На рис. **a** ΔU_x представляет собой среднее значение заштрихованных площадей **ABC** и **A'B'C'**, ограниченных кривыми **e₁** и **e₂** на период коммутации.

Если ЭДС **e₁** и **e₂** изменяются по закону синуса, то среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе определяется выражением

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m \sin \theta \cdot d\theta = \frac{2 E_m}{\pi} = 0,9 E_d$$

где **E_д** – действующее значение ЭДС вторичной обмотки трансформатора.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Среднее значение потери выпрямленного напряжения, обусловленного коммутацией

$$\Delta U_x = \frac{1}{\pi} \int_0^\gamma E_m \sin \theta \cdot d\theta = \frac{E_m}{\pi} (1 - \cos \gamma)$$

Подставляя (формулу слайд 65) в (формулу слайд 69), получим

$$\Delta U_x = \frac{x_a I_d}{\pi}$$

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_x = \frac{2 E_m}{\pi} - \frac{x_a I_d}{\pi}$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Данное уравнение представляет собой внешнюю характеристику выпрямителя, которая на графике выразится прямой линией. В соответствии с уравнением внешней характеристики выпрямитель по отношению к нагрузочному сопротивлению можно представить в виде эквивалентного генератора постоянного тока, ЭДС которого равна U_{d0} . Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора

$$r_{\text{ЭКВ}} = \frac{\Delta U_x}{I_d} = \frac{x_a I_d}{\pi I_d} = \frac{x_a}{\pi}$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Таким образом, потоки рассеяния в обмотках трансформатора оказывают существенное влияние на величину выпрямленного напряжения: чем больше x_a , тем меньше U_d .

Определим среднее, действующее и максимальное значения тока в вентиле, необходимые для правильного выбора вентиля, а также действующие значения токов в обмотках трансформатора, необходимые для правильного выбора типовой мощности трансформатора. Временные диаграммы этих токов приведены на рис. 6.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Среднее значение тока в вентиле

$$I_a = \frac{I_d}{2}$$

максимальное его значение $I_m = I_d$.

Действующее значение тока в вентиле (во вторичной обмотке трансформатора) определим приближенно, заменяя действительный ток эквивалентным током, мгновенные значения которого изменяются по закону прямоугольника **аввг** (рис. **б**):

$$I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_a^2 d\theta} = 0,707 I_d$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

При активной нагрузке $I_a = 0,785 I_d$.

Следовательно, сечение вторичной обмотки трансформатора при индуктивной нагрузке несколько уменьшается.

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле при индуктивной нагрузке такое же, как и в случае активной нагрузки:

$$U_{\text{обр. max}} = \pi U_d$$

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

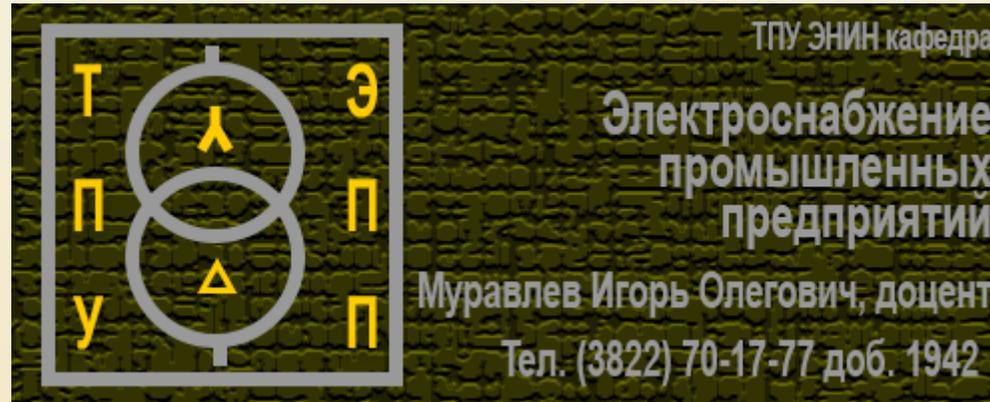
Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора

$$S_{\text{тр}} = 2 E_{\text{д}} I_{\text{д}} = \frac{\pi}{2} U_{\text{д}} I_{\text{д}} = 1,57 P_{\text{д}}$$

При активной нагрузке $S_{\text{тр}} = 1,73 P_{\text{д}}$. Следовательно, при индуктивной нагрузке трансформатор используется лучше. Следует отметить, что мощность постоянной составляющей выпрямленного тока в случае $L_{\text{д}} = \infty$ равна полезной мощности, потребляемой нагрузкой.

Физические процессы работы выпрямителя на нагрузку активно-индуктивного характера с питанием от сети соизмеримой мощности

Ток $i_{1(1)}$ в выпрямителе, с учетом реально существующих магнитных полей рассеяния, отстает по фазе от приложенного внешнего напряжения. Таким образом, обычные выпрямители для внешних источников электропитания представляют активно-индуктивную нагрузку, способствующую ухудшению коэффициента мощности предприятия, на котором установлен данный выпрямитель, так как он является потребителем реактивной мощности.



Кафедра
**Электроснабжение промышленных
предприятий**