

Электроника курс лекций

Лектор
Ваттана Артур Бунтавович

Компонентная база электроники

2. Классификация полупроводниковых приборов

- 1. Диоды**
- 2. Тиристоры**
- 3. Транзисторы**
- 4. Интегральные микросхемы (ИМС)**

Условные графические обозначения полупроводниковых приборов



Выпрямительный и
импульсный диод



Стабилитрон
и
стабистор



Симметричный
стабилитрон



Варикап



Динистор



Тиристор



Тринистор

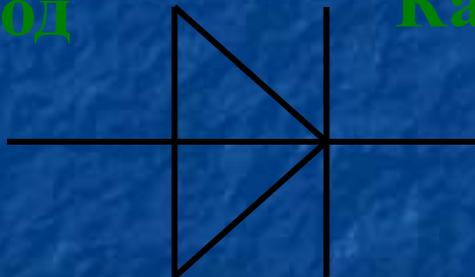
УЭ – управляющий электрод

Полупроводниковые диоды

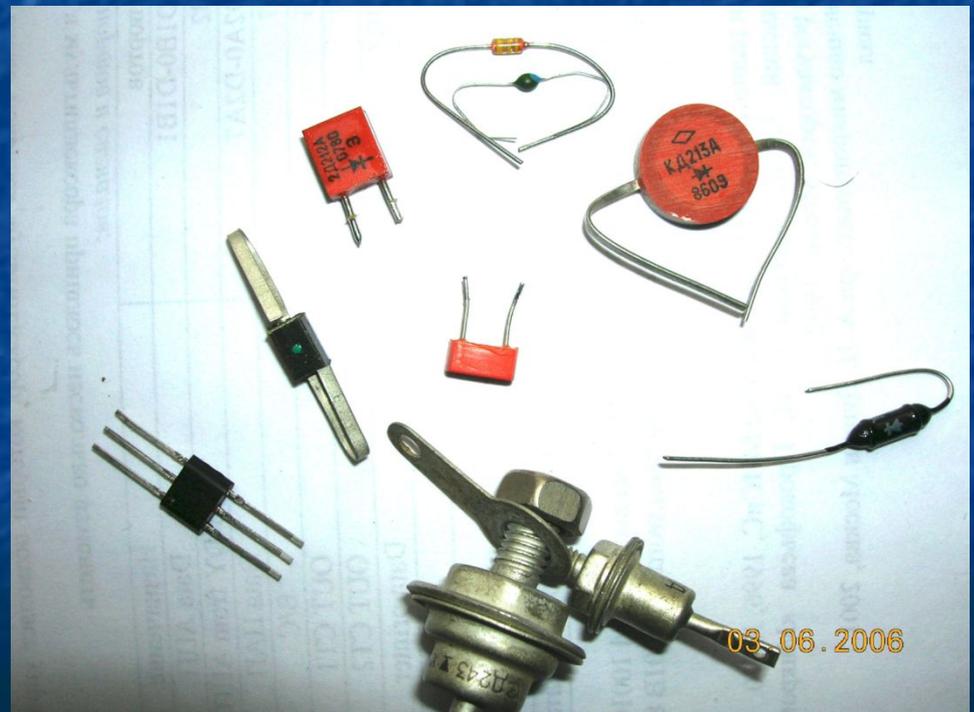
Полупроводниковый *диод*

содержит одним $p-n$ – переходом и имеет два вывода:
вывод A (анод) от p -области и K (катод) от n -области.

Анод



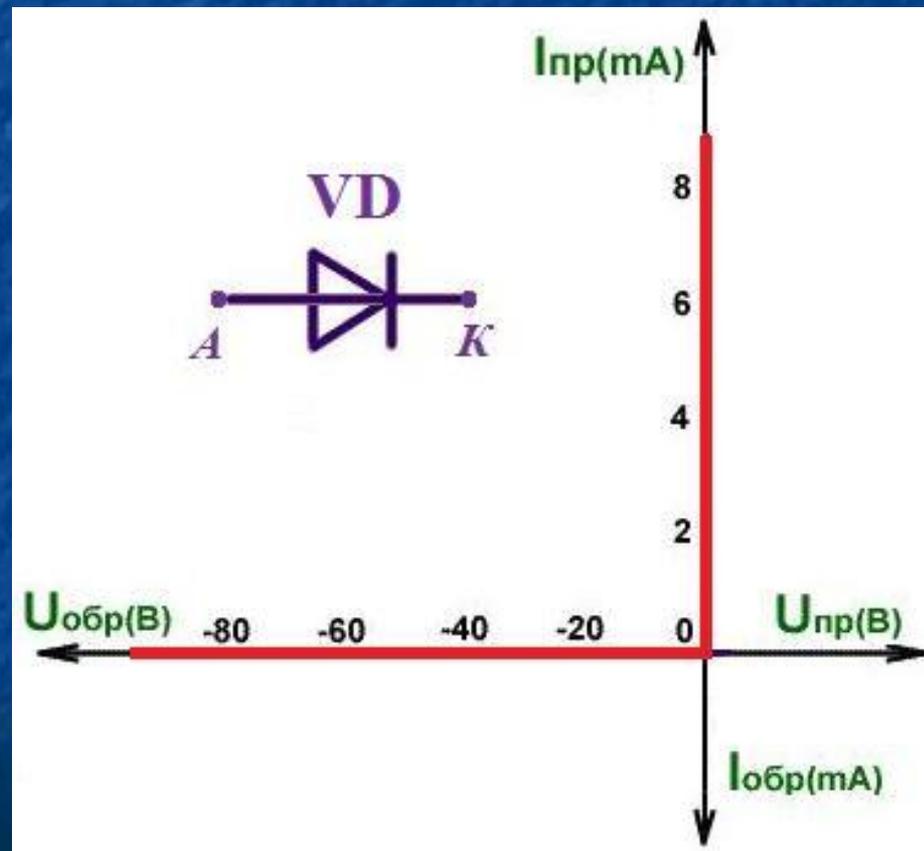
Катод



Идеальный электрический вентиль (диод)

не имеет потерь, его сопротивление в проводящем направлении от анода **A** к катоду **K** равно нулю, в непроводящем – бесконечности.

ВАХ



Таким образом, полупроводниковый диод обладает **односторонней проводимостью**,

т. е. является электрическим вентиляем.

Диод характеризуется **статическим и дифференциальным сопротивлениями**.

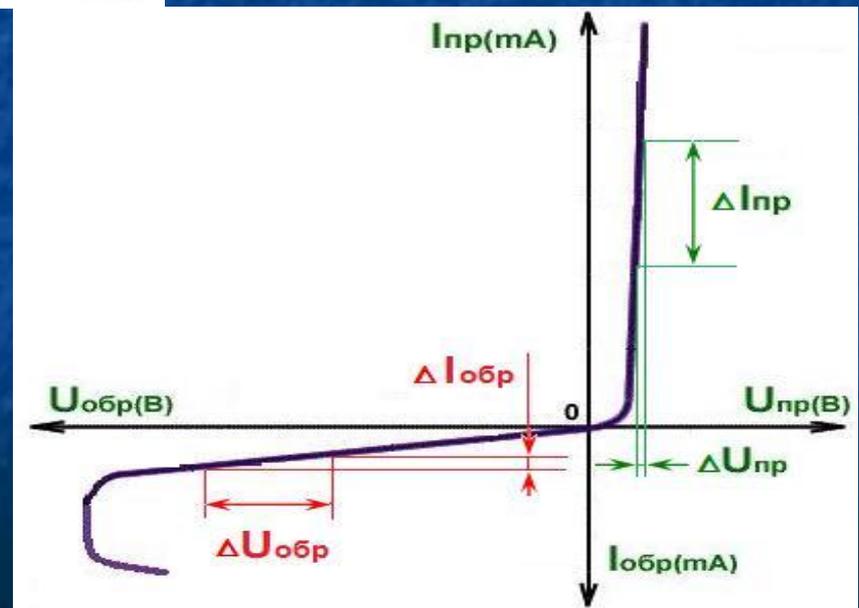
$$R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}$$

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}}$$

$$R_{\text{ст}} > R_{\text{диф}}$$

У линейных элементов

$$R_{\text{ст}} = R_{\text{диф}}$$



КС225А

К – кремний

С – стабилитрон

2 – мощность рассеивания 0,3-5 Вт,
диапазон напряжений $U = 10 - 100$ В

25 – $U = 25$ В

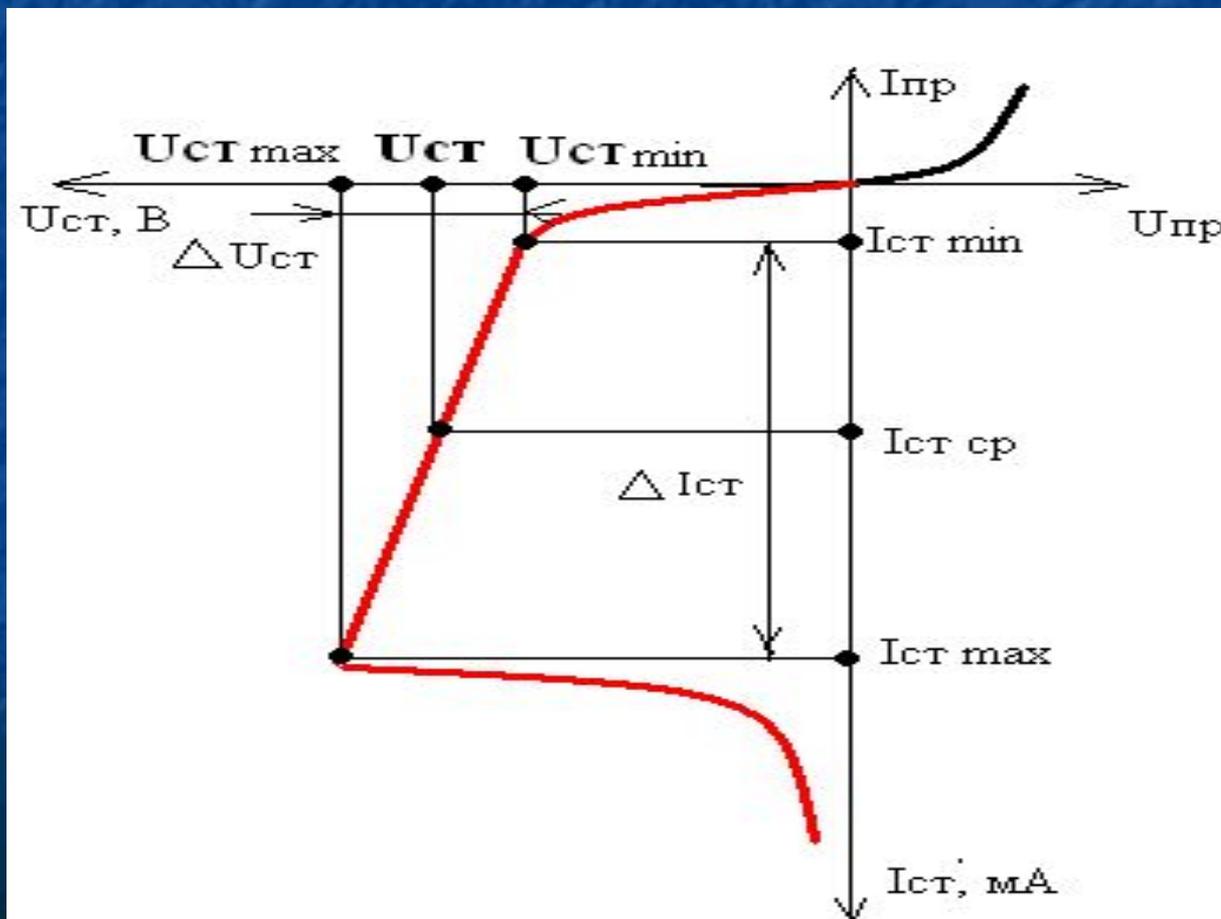
А – порядковый номер разработки

стабилитрон

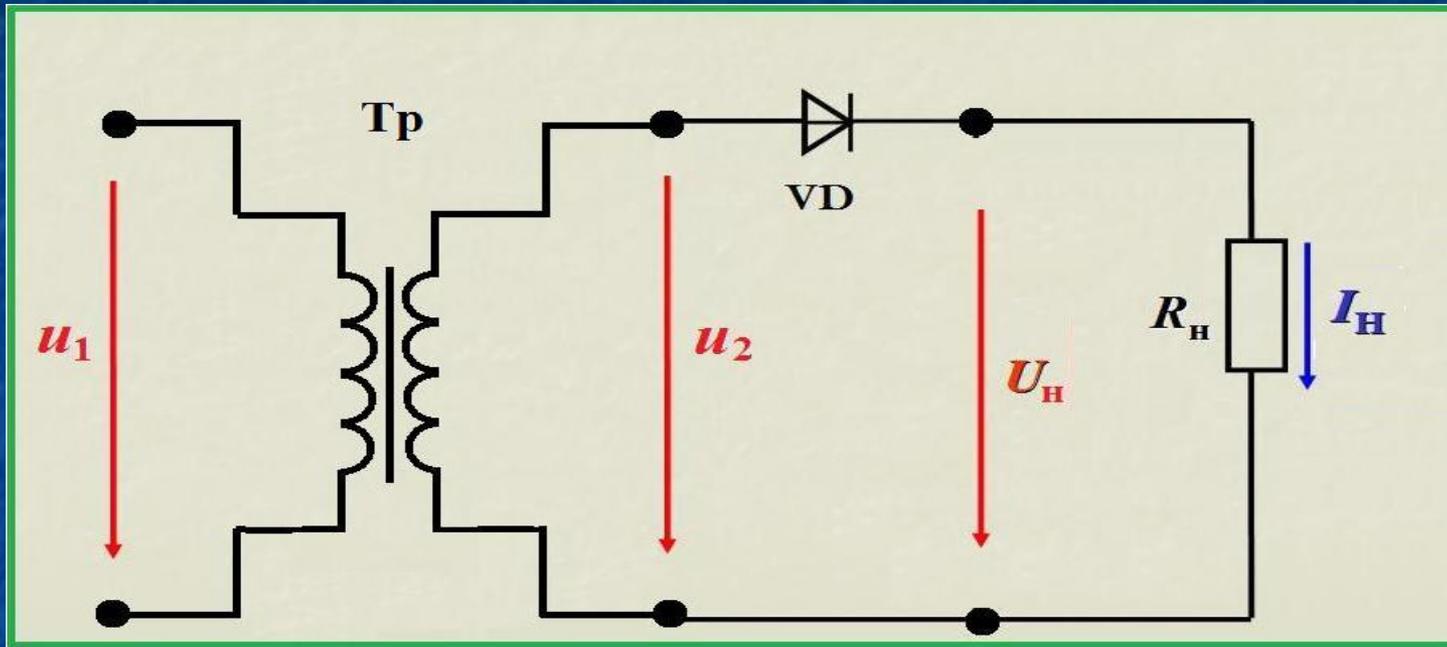


В отличие от диода
стабилитрон работает при обратном напряжении

ВАХ стабилитрона реальная:

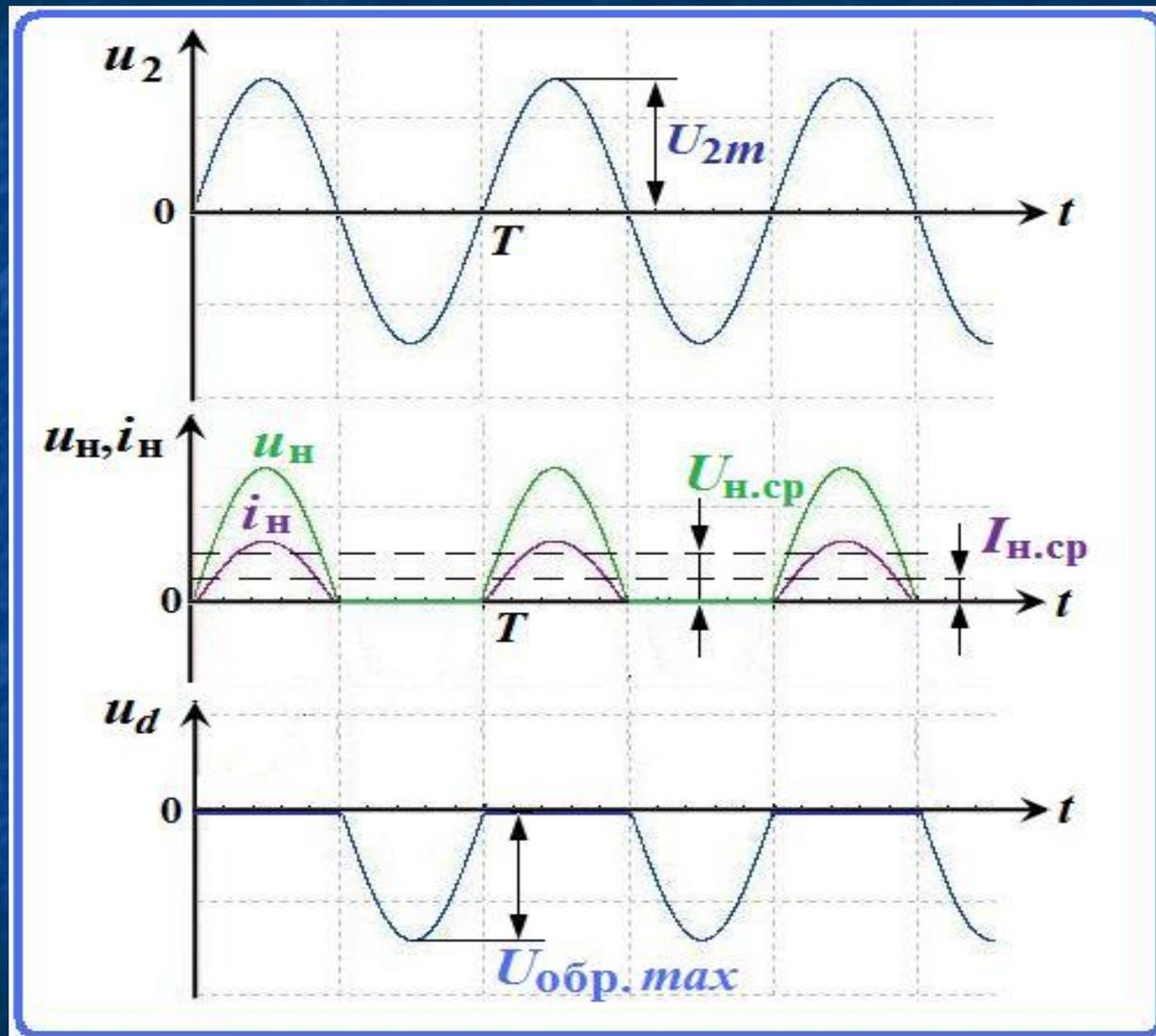


□ Однополупериодный выпрямитель



- ◆ *Однофазная однополупериодная схема* выпрямления с активной нагрузкой является простейшей из известных схем выпрямления.

Временные диаграммы



Среднее выпрямленное напряжение и ток за период:

$$U_{\text{н.ср}} = \frac{U_{2m}}{\pi} \approx 0,318 \cdot U_{2m} \quad \text{или} \quad U_{\text{н.ср}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,45 \cdot U_2$$

$$U_{\text{в.ср}} = \frac{\pi U_{\text{н.ср}}}{\sqrt{2}} \approx 2,22 \cdot U \quad U_{\text{обр.мах}} = \sqrt{2} \cdot U_2$$

$$I_{\text{н.ср}} = \frac{U_{\text{н.ср}}}{R_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad I_{\text{н.ср}} = \frac{0,45 \cdot U_2}{R_{\text{н}}}$$

Прямой ток диода равен току нагрузки:

$$I_{\text{н.ср}} = I_{\text{пр.д}}$$



Выпрямленное напряжение u_H имеет несинусоидальную форму сигнала и может быть разложено в ряд Фурье:

$$u_H = U_{H.cp} + U_{всн} = \frac{U_m}{\pi} + \frac{1}{2} U_{m2} \sin \omega t + \dots$$

❖ Амплитуда основной гармоники:

$$U_{\text{тосн}} = \frac{1}{2} U_{2\text{т}}$$

❖ Частота пульсаций выпрямленного напряжения равна частоте сетевого напряжения.

$$f_{\text{п}} = f_{\text{с}}$$

❖ Отношение амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей называется *коэффициентом пульсации*:

$$q_{\text{п}} = \frac{U_{\text{тосн}}}{U_{\text{н.ср}}} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57$$

При выборе выпрямительных диодов

используются максимально допустимые
параметры:

- ✓ максимальный прямой ток $I_{\text{пр.мах}}$,
- ✓ максимальное обратное напряжение $U_{\text{обр.мах}}$.

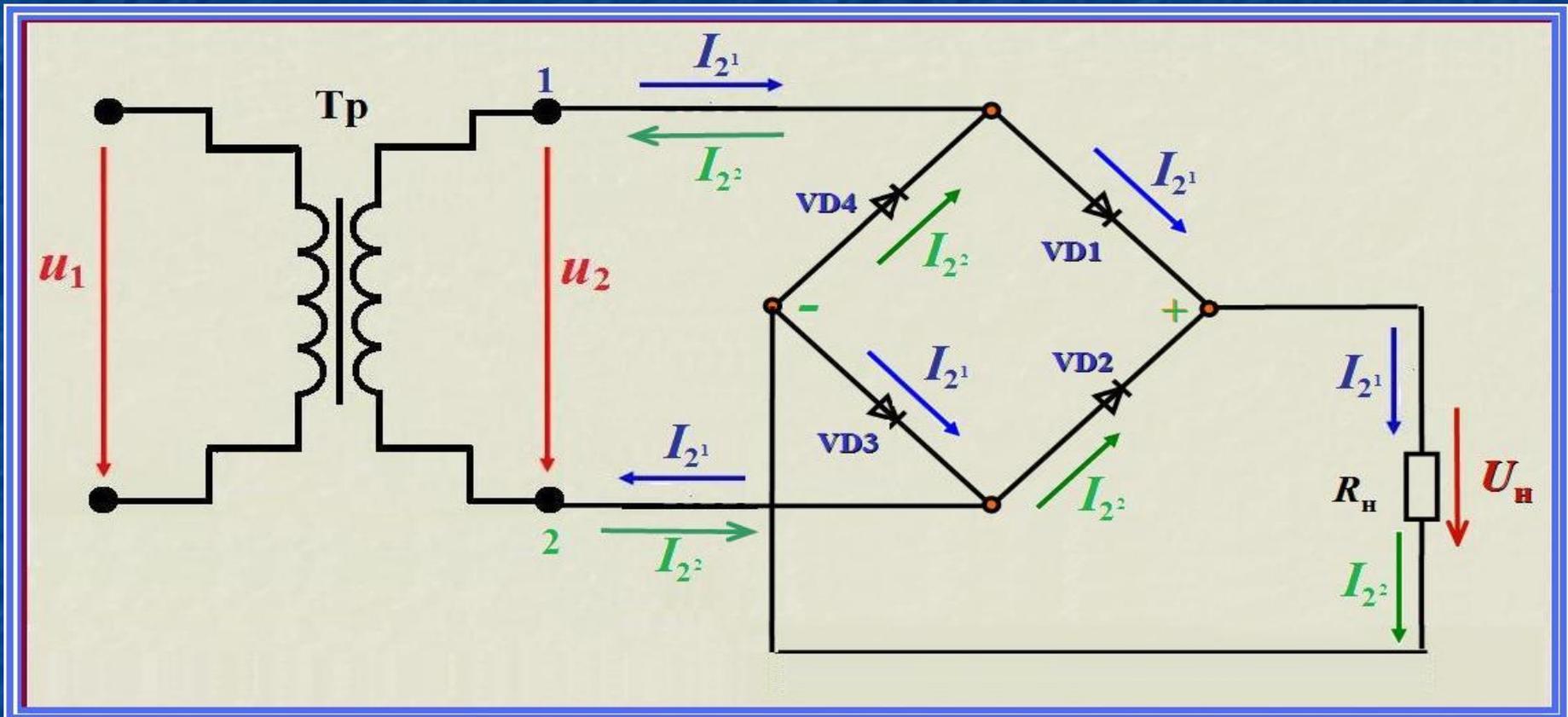
□ Преимущества однополупериодного выпрямителя

- его простота и минимальное количество элементов.

□ Недостатки однополупериодного выпрямителя:

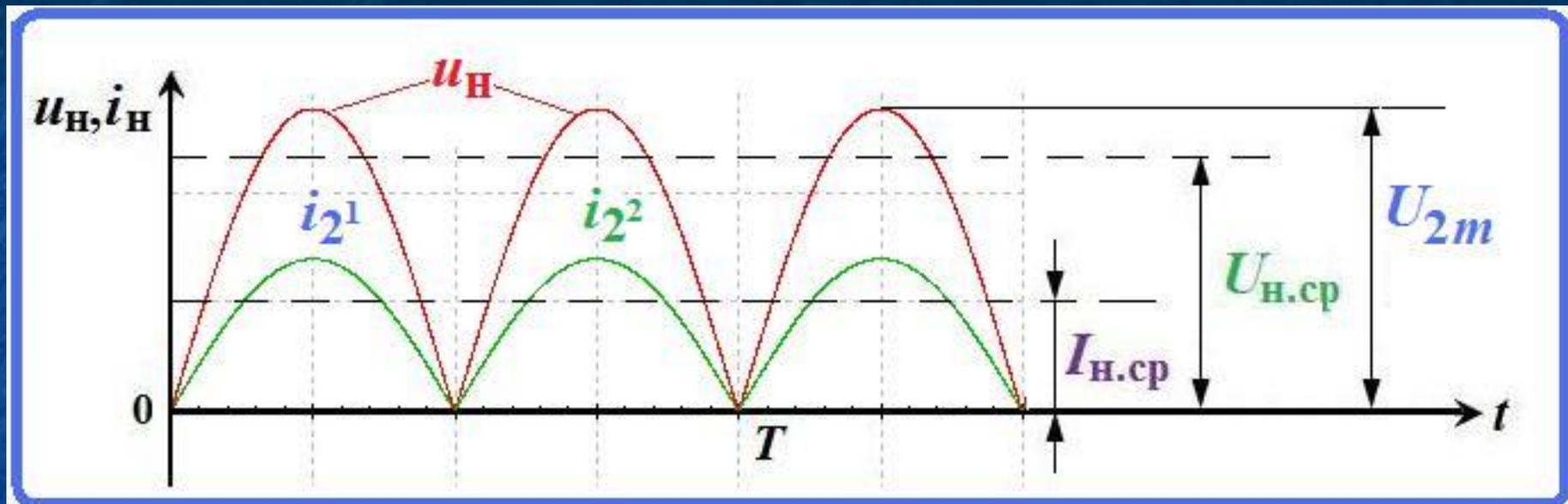
- 1. большой коэффициент пульсаций;**
- 2. малые значения выпрямленного тока и напряжения;**
- 3. выпрямленный ток через нагрузку протекает через обмотки трансформатора, что вызывает подмагничивание сердечника трансформатора (как следствие снижение к.п.д всего выпрямителя).**

Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя:



состоит из трансформатора Tr и четырех диодов, собранных по мостовой схеме.

Временные диаграммы



- Кривые напряжения и тока на нагрузке повторяют (при прямом напряжении на диодах $U_{пр} \approx 0$) по величине и форме выпрямленные полуволны напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора.
- Они пульсируют от нуля до максимального значения U_{2m} .

❖ **Среднее выпрямленное напряжение и ток (постоянные составляющие):**

$$U_{\text{н.ср}} = \frac{2}{\pi} \cdot U_{2m} \approx 0,636 \cdot U_{2m} \quad \text{или} \quad U_{\text{н.ср}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9 \cdot U_2$$

$$U_{\text{в.ср}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{\text{н.ср}} \approx 1,11 \cdot U$$

$$I_{\text{н.ср}} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{2m} \approx 0,636 \cdot I_{2m} \quad \text{где} \quad I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R_{\text{H}}}$$

❖ **Прямой ток диода** (диоды работают поочередно, поэтому нагружены вдвое меньше):

$$I_{\text{пр.д}} = 0,5 \cdot I_{\text{н.ср}}$$

❖ **Обратное напряжение** на вентиле:

$$U_{\text{обр.мах}} \approx U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 1,57 \cdot U_{\text{н.ср}}$$

❖ **Амплитуда основной (второй) гармоники** выпрямленного напряжения, определенная из разложения в ряд Фурье:

$$U_{\text{тошн}} = \frac{4}{3\pi} U_{2m} \approx 0,424 \cdot U_{2m}$$

❖ Частота пульсаций выпрямленного напряжения:

$$f_{\text{п}} = 2f_{\text{с}}$$

❖ Тогда *коэффициентом пульсации*:

$$q_{\text{п}} = \frac{U_{\text{мосн}}}{U_{\text{н.ср}}} = \frac{2}{3} \approx 0,667$$

❖ или можно определить по эмпирической формуле:

$$q_{\text{п}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0,667$$

❖ где m – кратность частоты изменения сигнала к частоте тока в сети;
для мостовой схемы $m = 2$.

□ Недостатки двухполупериодного выпрямителя

- увеличение числа элементов.

□ Преимущества:

1. Лучше используется трансформатор (*работает без подмагничивания*);
2. Меньше коэффициент пульсации ($q = 0,67$), хотя его величина остается значительной.
3. $U_{\text{обр.мах}}$ не изменилось по сравнению с 1 п/п;
4. Увеличились средневывпрямленные значения тока и напряжения.

2. Сглаживающие фильтры

Качество фильтра характеризует
коэффициент сглаживания

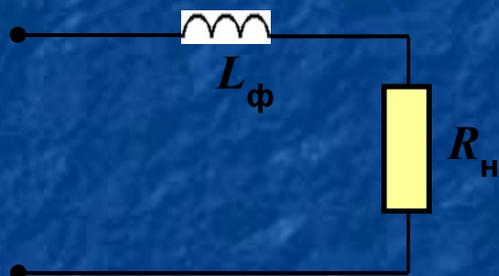
- отношение коэффициента пульсаций на выходе выпрямителя $q_{п.вх}$ (до фильтра) к коэффициенту пульсации на нагрузке $q_{п.вых}$ (после фильтра).

$$K_{сгл} = \frac{q_{п.вх}}{q_{п.вых}}$$

◆ Чем больше $K_{сгл}$, тем лучше фильтр (всегда больше 1).

Наиболее распространены сглаживающие фильтры типов *L*, *C* и *LC*.

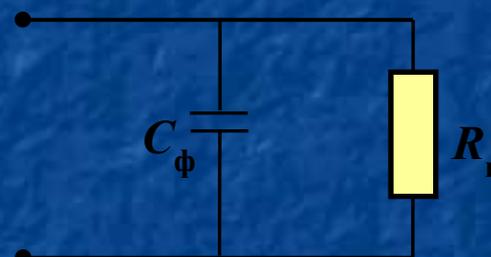
индуктивный



В мощных ИВЭ

R_H - мало $X_{сф} \geq R_H$

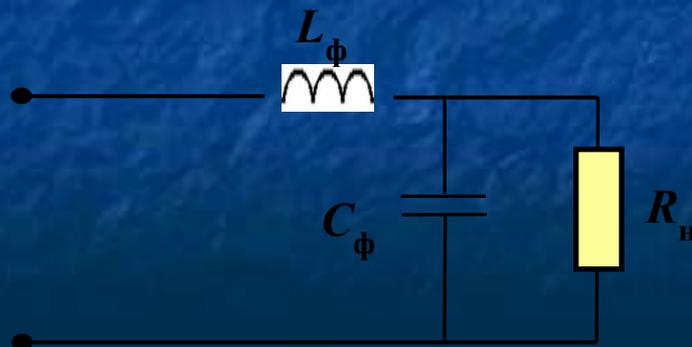
ёмкостной



В маломощных ИВЭ

R_H - велико $X_{сф} \leq R_H$

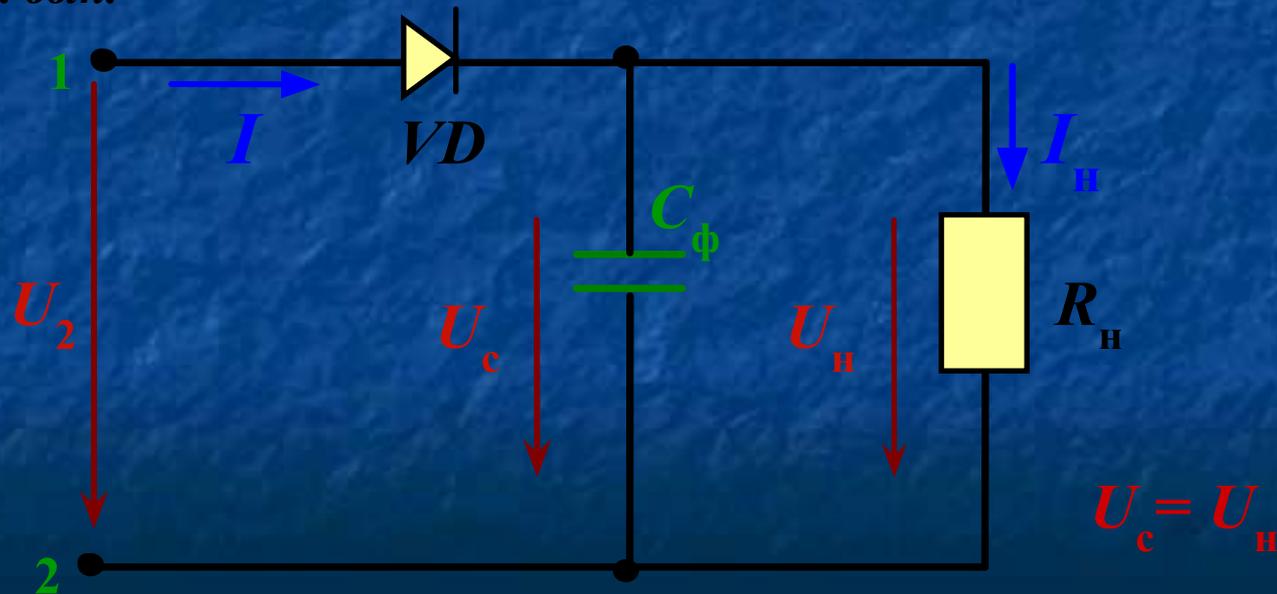
Индуктивно-ёмкостной



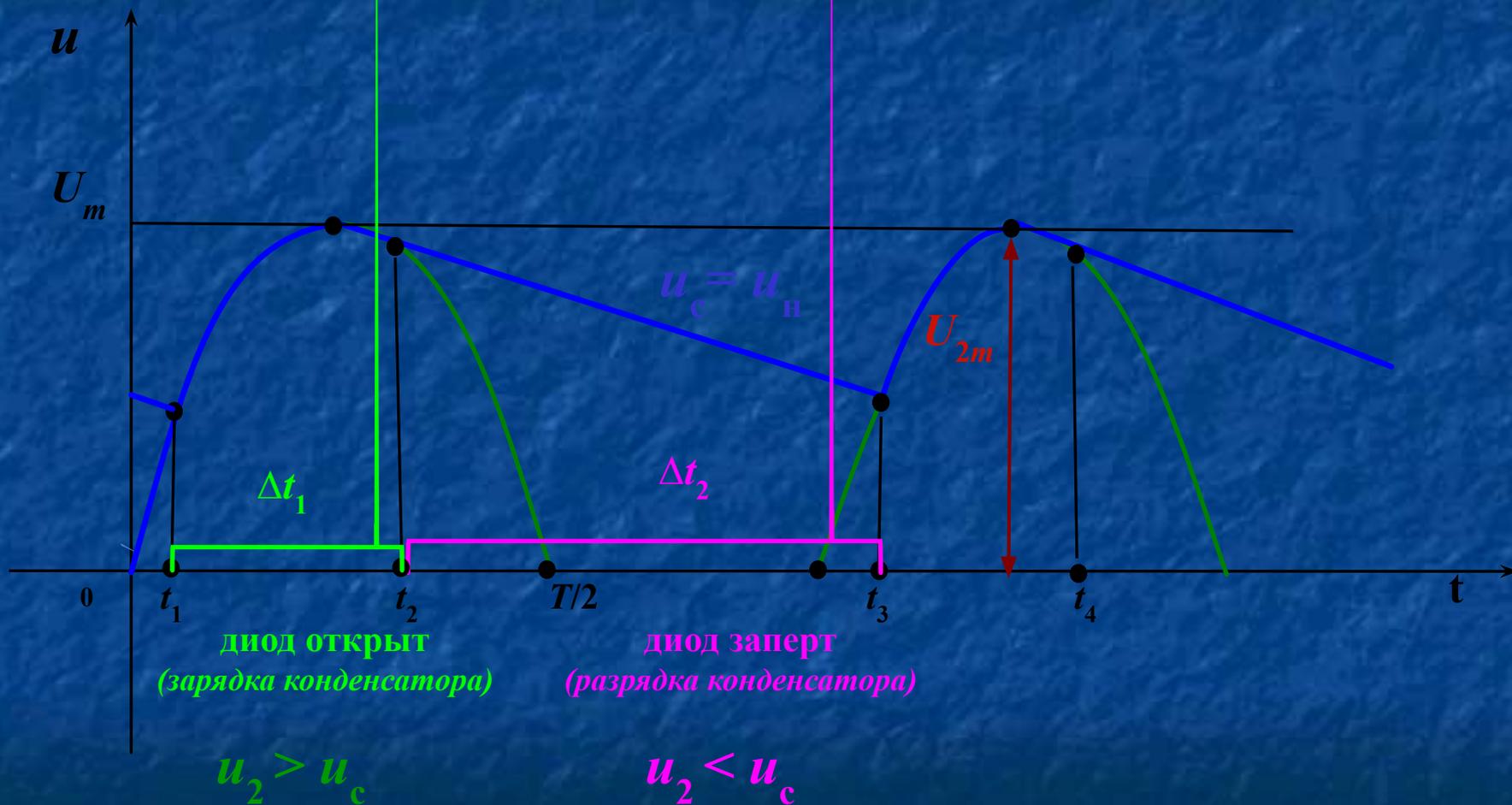
Емкостной C-фильтр

- ✓ В выпрямителях малой мощности используются **емкостные фильтры**. Конденсатор C_{ϕ} включен параллельно нагрузке и напряжение на конденсаторе равно напряжению на нагрузке.

1 п/п. схема. вып.



Временная диаграмма однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром



- Чем меньше разрядится конденсатор C_{ϕ} , тем меньше будут пульсации в выпрямленном токе i_{Π} .
- Время разрядки зависит от постоянной времени

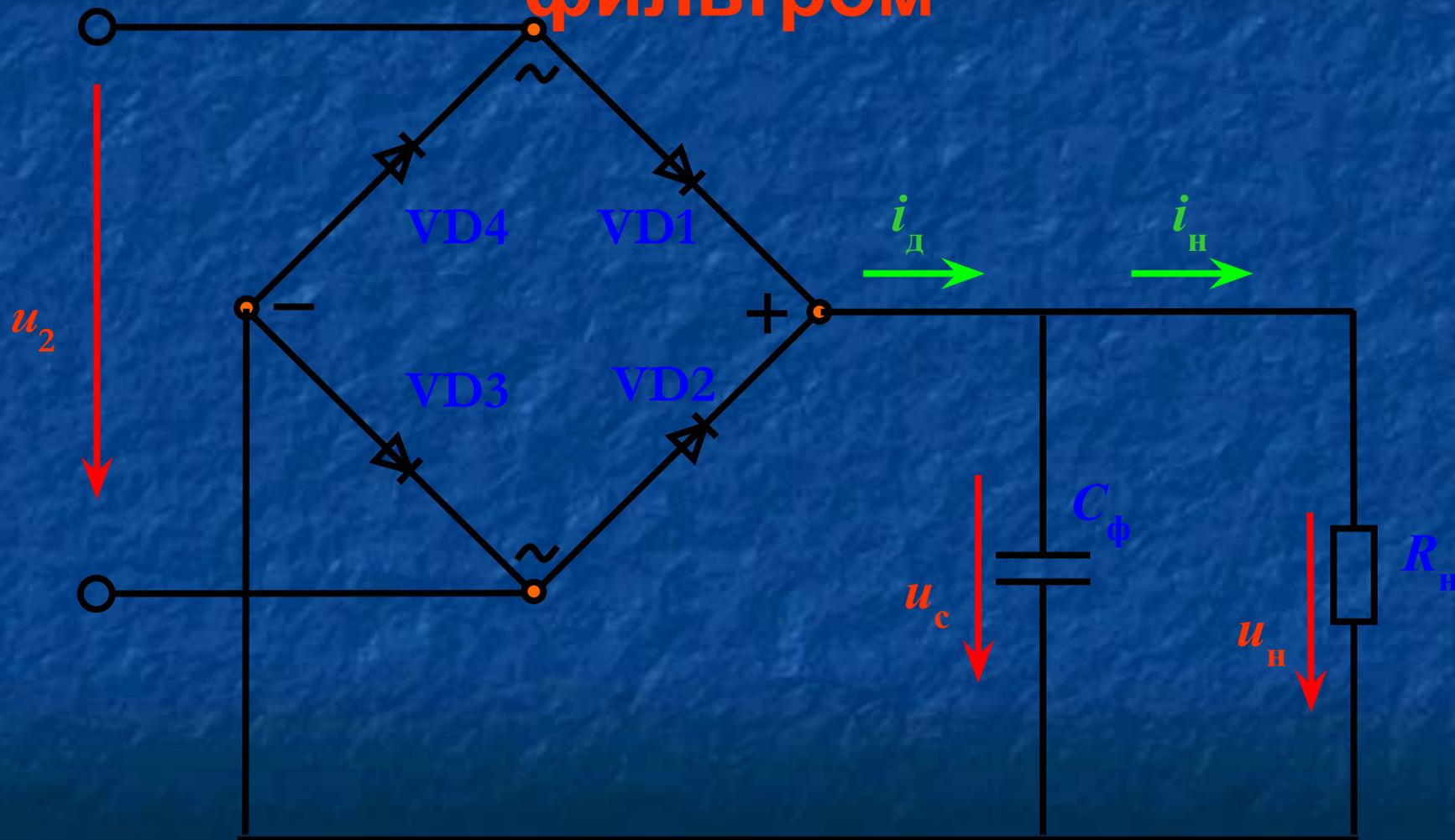
$$\tau_{\text{раз}} = C_{\phi} \cdot R_{\Pi}$$

которая показывает, в течение какого времени напряжение на конденсаторе уменьшится в e раз (2,72).

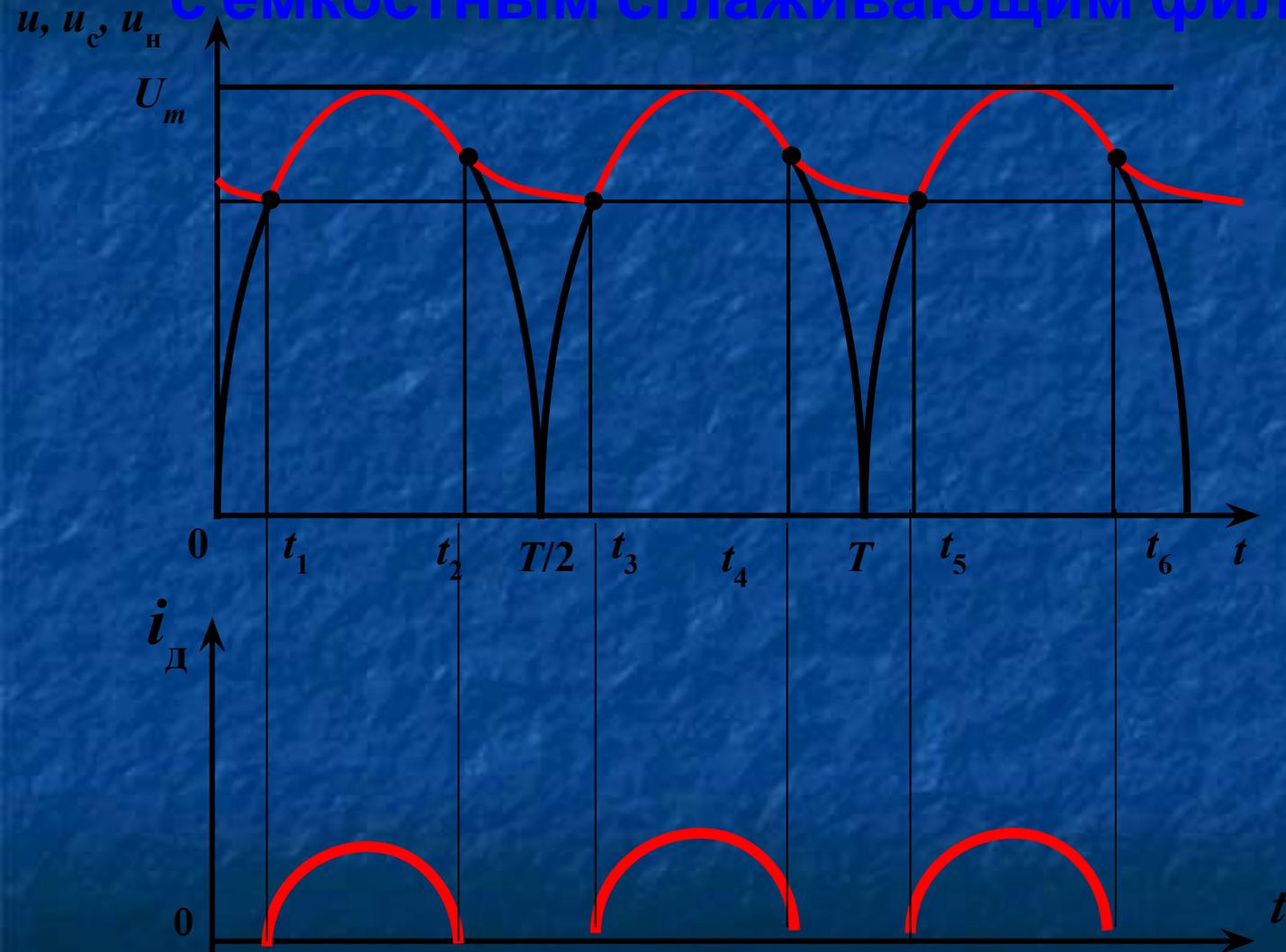
❖ *Коэффициент пульсации:*

$$q_{\Pi} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{осн}} \cdot \tau_{\text{разр}}}$$

выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром



Временная диаграмма работы схемы двухполупериодного выпрямителя с емкостным сглаживающим фильтром.



❖ **Выбор емкости конденсатора** для получения нужного коэффициента пульсации можно осуществить по следующим формулам:

□ для однополупериодной схемы выпрямления

$$C_{\phi} \geq \frac{1}{q_{\Pi} \cdot \omega \cdot R_{\text{H}}}$$

□ для двухполупериодной схемы выпрямления

$$C_{\phi} \geq \frac{1}{2 \cdot q_{\Pi} \cdot \omega \cdot R_{\text{H}}}$$

где ω – угловая частота напряжения u_2 трансформатора.

❖ Обратное максимальное напряжение и коэффициент пульсации :

для однополупериодной схемы выпрямления с C_ϕ :

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

$$q_{\text{п}} \leq \frac{1}{2 \cdot f_C \cdot \tau_{\text{разр}}} = \frac{1}{2 \cdot f_C \cdot R_{\text{н}} \cdot C_\phi}$$

для двухполупериодной схемы выпрямления с C_ϕ :

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

$$q_{\text{п}} \leq \frac{1}{4 \cdot f_C \cdot \tau_{\text{разр}}} = \frac{1}{4 \cdot f_C \cdot R_{\text{н}} \cdot C_\phi}$$

Одноэлементный L-фильтр

- включают последовательно с нагрузкой R_H .

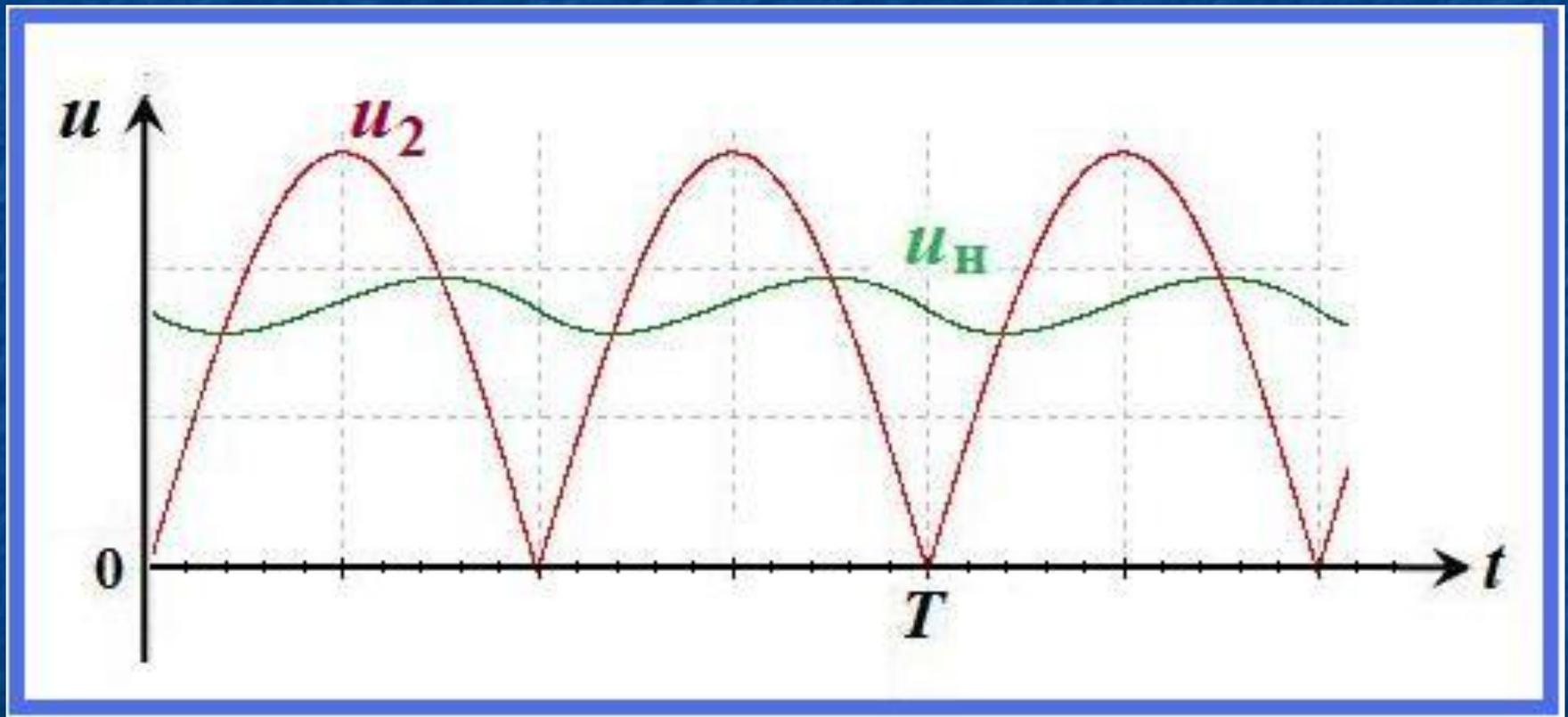
- При нарастании выпрямленного напряжения и тока нагрузки i_H магнитная энергия запасается в индуктивном элементе L (дросселе).
- При снижении напряжения u_2 ток в нагрузке поддерживается за счет накопленной энергии в дросселе.
- В мощных выпрямителях (когда сопротивление R_H мало) L -фильтр действует наиболее эффективно.

- Индуктивность дросселя :

$$L \approx \frac{K_{\text{сгл}} \cdot R_H}{n \cdot \omega}$$

где n - номер основной гармоники выпрямленного напряжения u_2

Временная диаграмма двухполупериодного выпрямителя с L - фильтром



- Коэффициент сглаживания ***L***-фильтра:

$$K_{\text{сгл}} = \frac{X_L}{R_H}$$

❖ **Коэффициент сглаживания** МОЖНО определить и по отдельным формулам, например:

RC-фильтр:

$$K_{\text{сгл}} \cong m \cdot \omega \cdot R \cdot C$$

RL-фильтр:

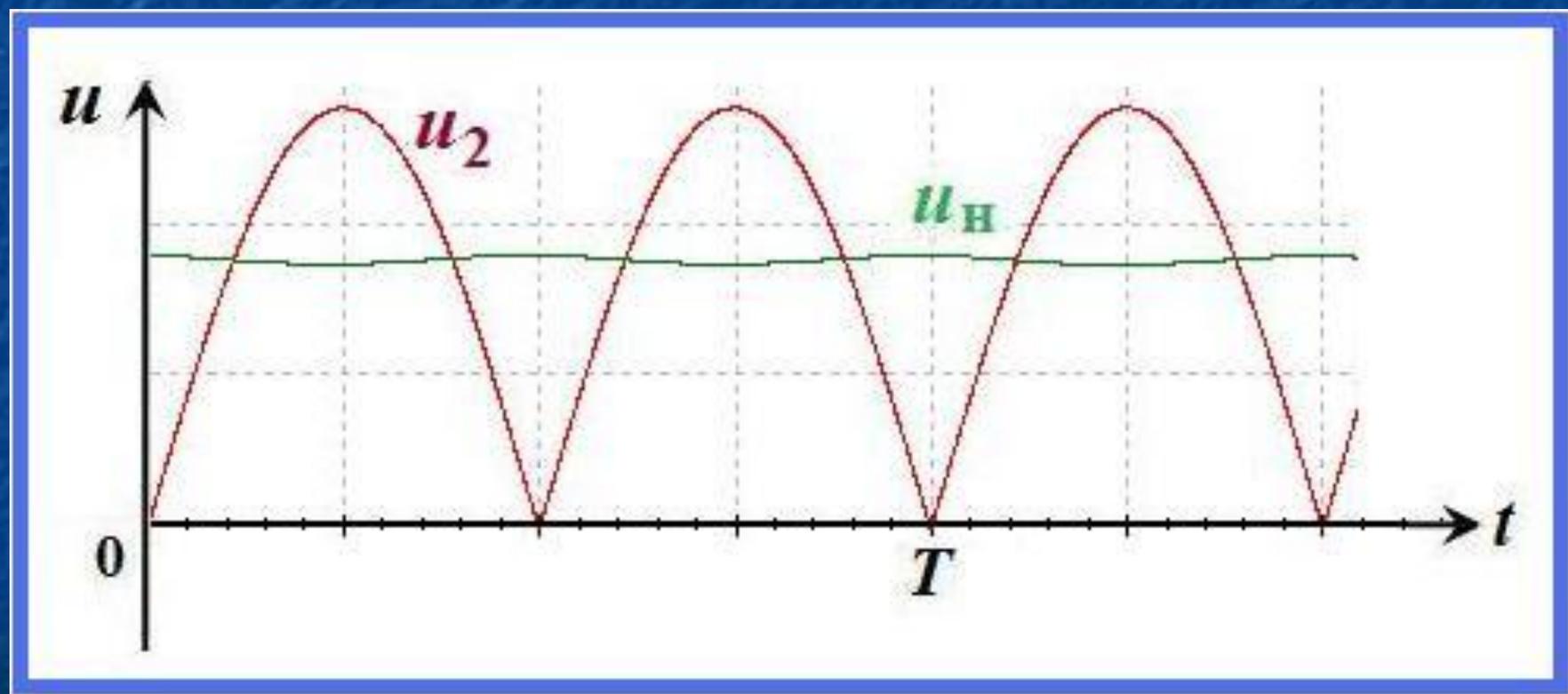
$$K_{\text{сгл}} \cong \frac{m \cdot \omega \cdot L}{R}$$

LC-фильтр:

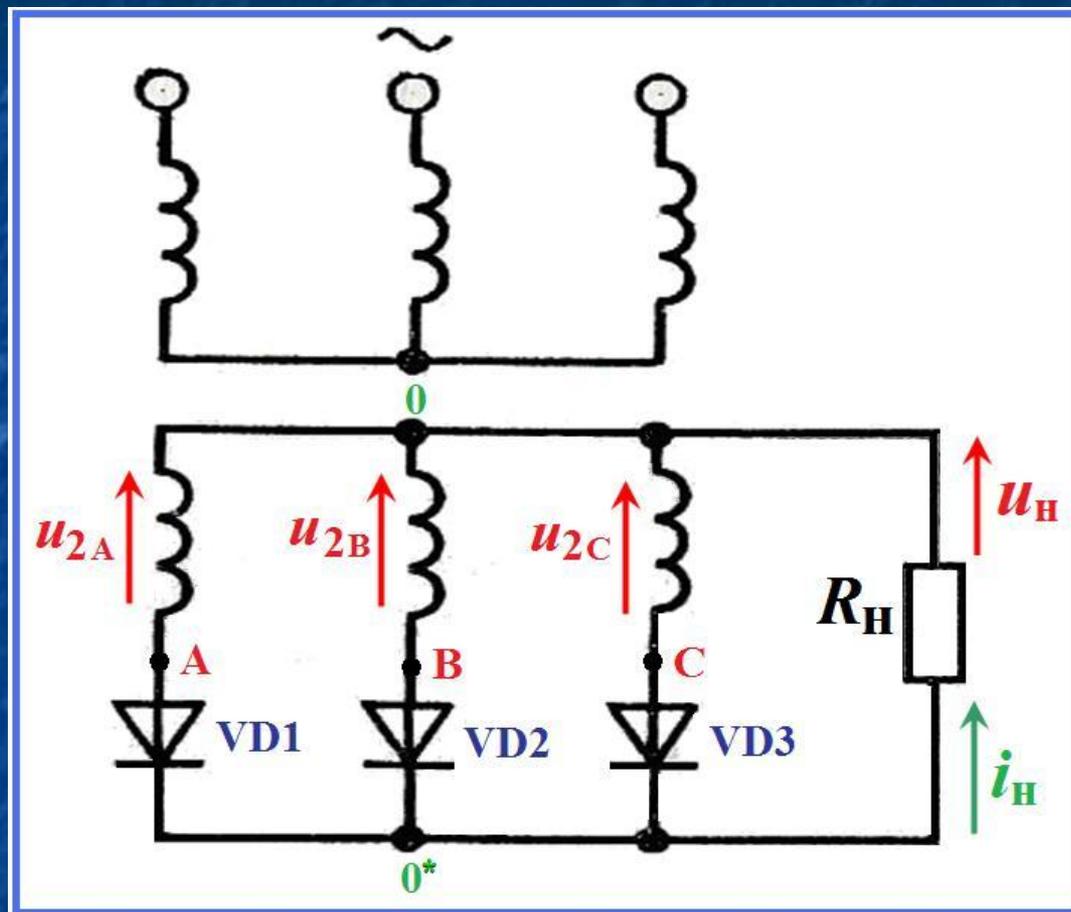
$$K_{\text{сгл}} \cong (m\omega)^2 \cdot L \cdot C$$

где m – число фаз выпрямления; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока сети.

Временная диаграмма двухполупериодного выпрямителя с LC-фильтром

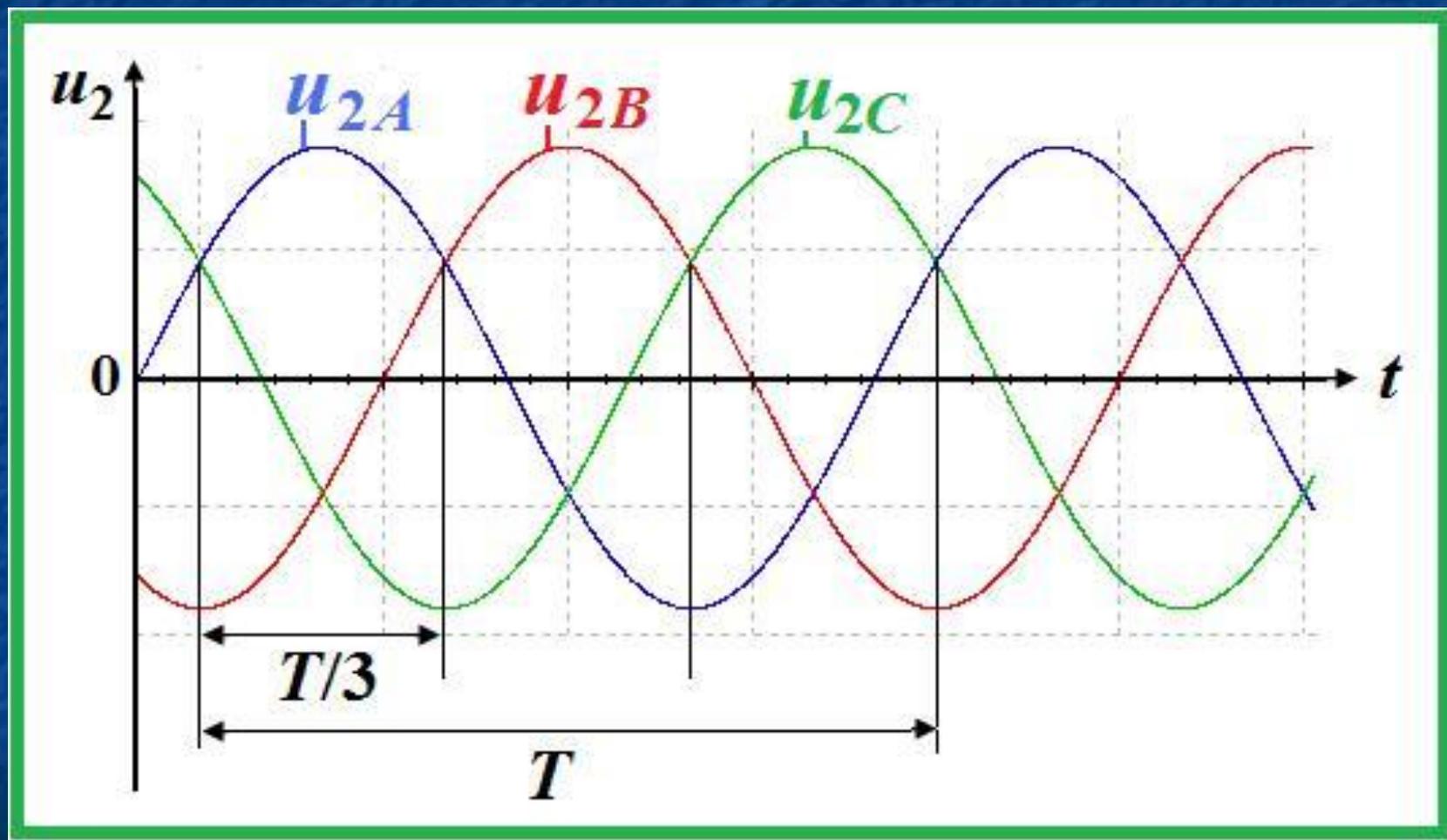


2. ТРЕХФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

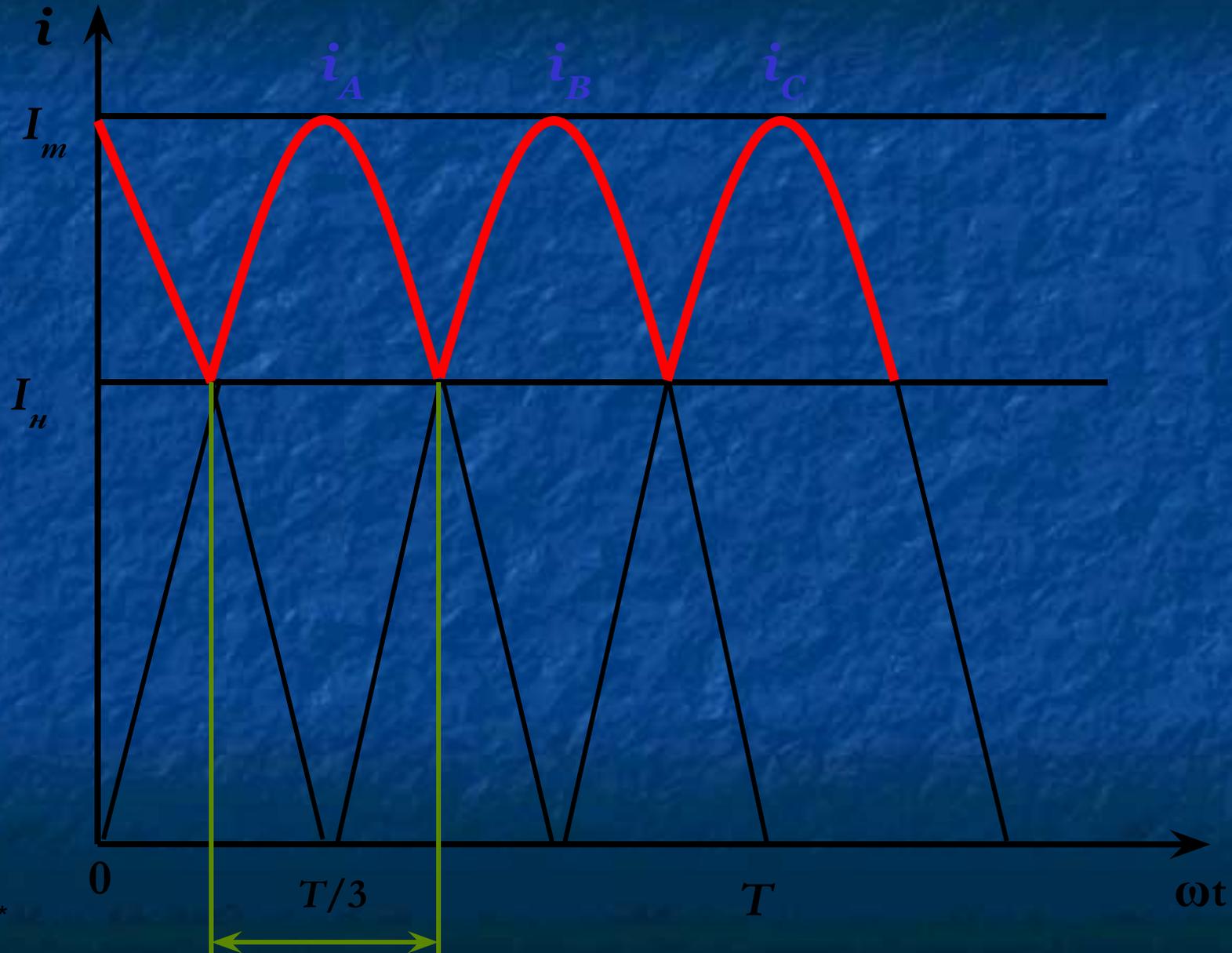


- Трехфазные выпрямители применяют в устройствах средней и большой мощностей.

□ *Временная диаграмма трехфазного тока*



□ Временная диаграмма выпрямленного трехфазного тока



*

- Если считать диоды *идеальными*, то *напряжение на нагрузке R_n* равно *напряжению фазы* с открытым диодом, следовательно, ток в нагрузке изменяется по тому же закону. Т.е. *ток не падает до нуля*, как это имело место в 1 п/п и 2 п/п выпрямителей.

❖ Частота пульсаций выпрямленного напряжения:

$$f_{\text{п}} = 3f_{\text{с}}$$

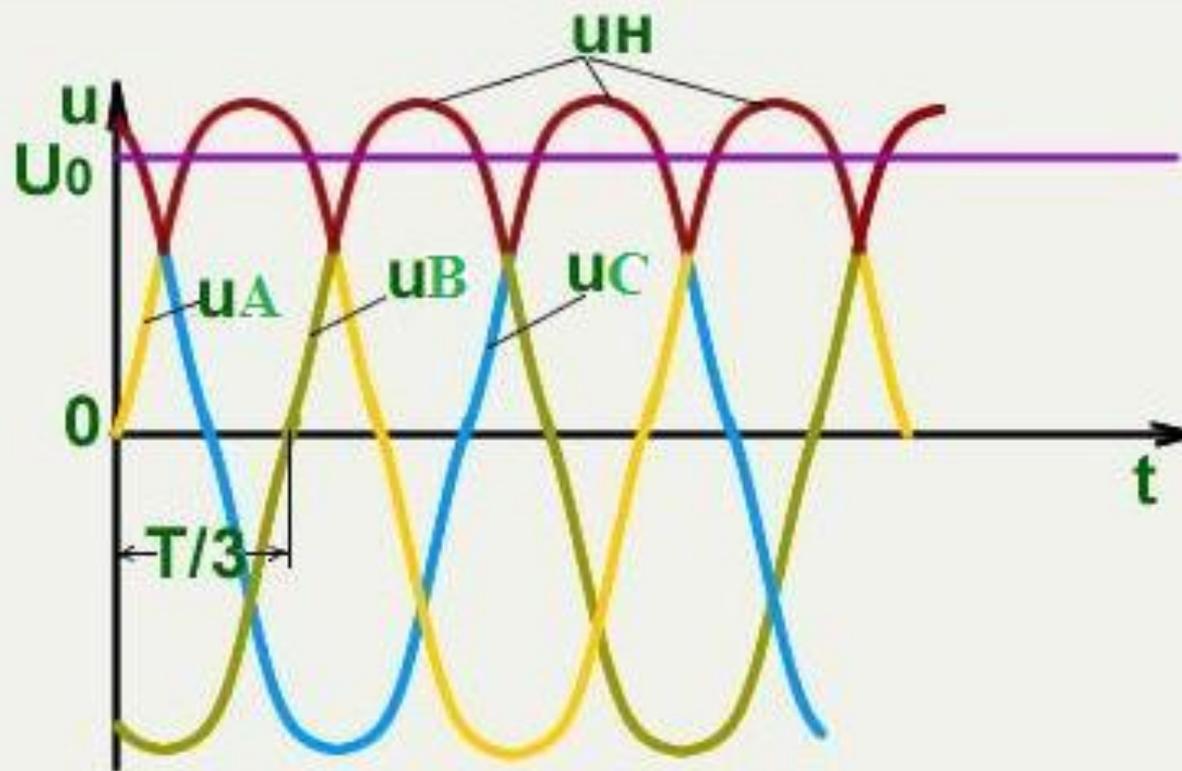
- пульсация тока в трехфазном выпрямителе относительно невелика и *коэффициент пульсации* :

$$q_{\text{п}} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{3^2 - 1} = 0,25$$

где m – кратность частоты изменения сигнала к частоте тока в сети, $m = 3$

□ Временная диаграмма

Кривая выпрямленного напряжения



❖ **Среднее выпрямленное напряжение и ток на нагрузке.**

$$U_{\text{н.ср}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot U_{2m} \approx 0,827 \cdot U_{2m}$$

или $U_{\text{н.ср}} = 1,17 \cdot U_{2\phi}$

$$I_{\text{н.ср}} \approx 0,827 \cdot I_{2m}$$

❖ **Максимальное обратное напряжение**
на каждом диоде определяется амплитудой
линейного напряжения:

$$U_{\text{обр.мах}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi} = \frac{2\pi}{3} \cdot U_{\text{н.ср}} \approx 2,09 \cdot U_{\text{н.ср}}$$

- ❖ В каждом диоде **ток** проходит в течение $T/3$, и поэтому его **среднее значение**:

$$I_{\text{пр.ср}} = \frac{I_{\text{н.ср}}}{3}$$

- ❖ **Максимальный прямой ток**:

$$I_{\text{пр.мах}} = \frac{U_{\text{фт}}}{R_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н.ср}}}{0,827 \cdot R_{\text{н}}} \approx 1,21 \cdot I_{\text{н.ср}}$$

▣ Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом служит *для питания нагрузочных устройств*, в которых средние значения выпрямленного тока доходят до сотен ампер, а напряжение – до десятков киловольт.

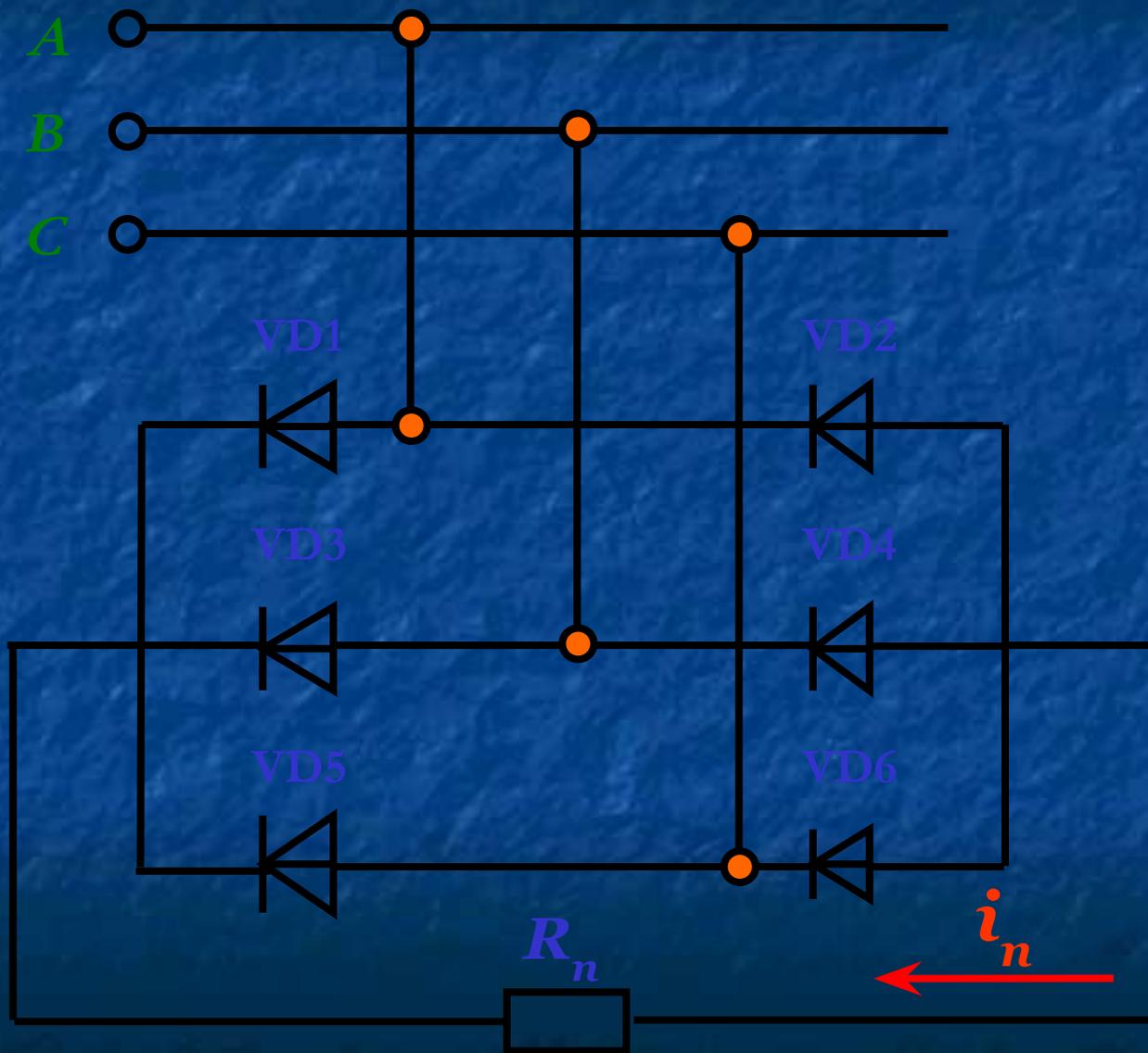
▣ *Преимущества:*

достаточно высокая надежность и минимальное количество диодов.

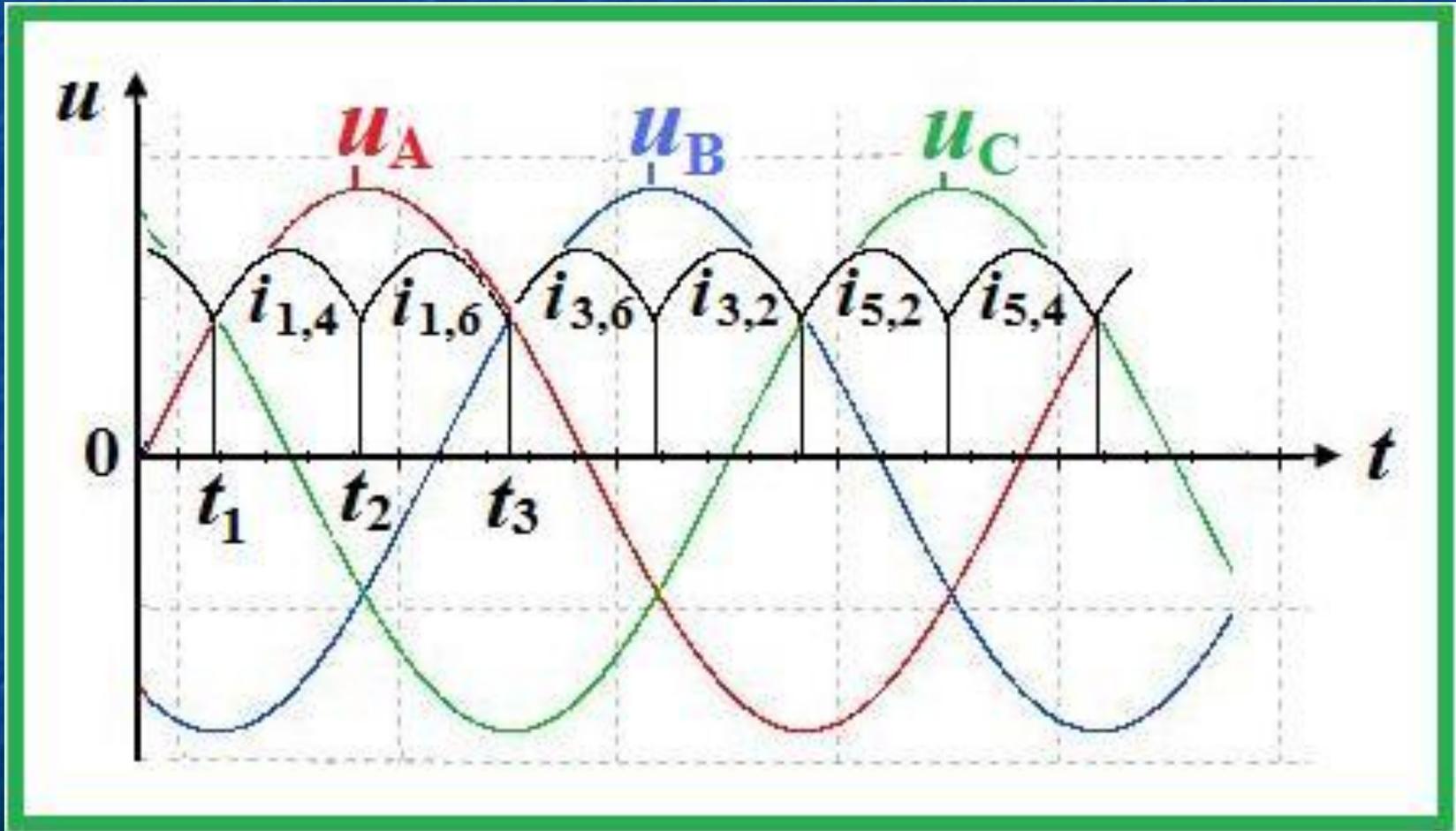
▣ *Недостатки:*

подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током, что приводит к снижению к.п.д. выпрямителя.

Схема двухполупериодного выпрямления трехфазного тока



Временная диаграмма напряжений и токов трехфазного мостового выпрямителя



Временная диаграмма выпрямленного трехфазного тока



*

- Из временных диаграмм видно, что **пульсации** выпрямленного напряжения значительно **меньше**, чем в трехфазном выпрямителе с нейтральным выводом.
- Частота пульсаций выпрямленного напряжения в 6 раз больше сетевой частоты:

$$f_{\Pi} = 6f_c$$

- **Коэффициент пульсации:**

$$q_{\Pi} = \frac{2}{m^2 - 1} = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057$$

- где m – кратность частоты изменения сигнала к частоте тока в сети, $m = 6$.

❖ Среднее выпрямленное напряжения

- ❖ Его значение в рассматриваемом выпрямителе **в 2 раза больше**, чем в выпрямителе с нейтральным выводом.

$$U_{\text{н.ср}} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} U_{2\text{л}} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} U_2 \approx 2,34 \cdot U_2$$

где: $U_{2\text{л}}$ – линейное напряжение на вторичной обмотке трансформатора

❖ Среднее выпрямленное значение тока:

$$I_{\text{н.ср}} = \frac{3I_m}{\pi} \approx 0,956 \cdot I_m$$

❖ Максимальное обратное напряжение:

$$U_{\text{обр.мах}} \approx 1,045 \cdot U_{\text{н.ср}}$$

□ **Преимущества:**

- **Трехфазный мостовой выпрямитель**, несмотря на то что в нем используется в два раза больше диодов, **по всем показателям превосходит** трехфазный выпрямитель.

- У него **выше к.п.д. выпрямителя**, т.к. нет подмагничивания сердечника трансформатора постоянным током.

Параметры схем выпрямления

Параметры	Однополупериодный однофазный выпрямитель	Двухполупериодный однофазный выпрямитель	Трёхфазный выпрямитель с нейтральным выводом	Трёхфазный мостовой выпрямитель
Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{н.ср}$	$0,45 \cdot U_2$	$0,9 \cdot U_2$	$1,17 \cdot U_{2ф}$	$2,34 \cdot U_{2л}$
Обратное максимальное напряжение $U_{обр.мах}$	$1,57 \cdot U_{н.ср}$	$1,57 \cdot U_{н.ср}$	$2,09 \cdot U_{н.ср}$	$1,045 \cdot U_{н.ср}$
Частота пульсаций $f_{п}$	f_c	$2f_c$	$3f_c$	$6f_c$
Коэффициент пульсации $q_{п}$	$1,57$	$0,67$	$0,25$	$0,057$

Внешняя характеристика выпрямителя

$$U_{н.ср.} = E_{н.ср.} - \Delta U_{н.ср.}$$

