ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Oleg Stukach

TPU, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: tomsk@ieee.org

Более 1/3 всей вырабатываемой электроэнергии используется потребителями постоянного тока

Например, многие энергоемкие производства по технологическим нормам требуют использования постоянного тока

В тяговом и промышленном электроприводе использование постоянного тока предпочтительно и т.д.

ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Вторичными называются источники, полученные путем преобразования электрической энергии некоторого первичного источника (напряжения промышленной сети, аккумулятора, фотобатарей и т.п.).

Состав выпрямителя:

1. Трансформатор:
- понижение ~U, электрическая развязка источника и нагрузки.

2. Выпрямитель – преобразование ~U в пульсирующее напряжение $U_П$.

3. Фильтр – снижение переменной составляющей в пульсирующем $U_П$.

4. Стабилизатор - поддерживает неизменным выпрямленное напряжение.

Основные параметры выпрямителей

- средние значения выпрямленных тока и напряжения: I_D, U_D

- мощность нагрузочного устройства:

$$P_D = U_D \cdot I_D$$

- амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения и тока:

$$U_{ОСН.М}, I_{ОСН.М}$$

- коэффициент пульсации выпрямленного напряжения: $p = U_{ОСН.М} / U_D;$

Основные параметры выпрямителей

- действующие значения тока и напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$I_1, \quad U_1, \quad I_2, \quad U_2.$$

- мощность трансформатора:

$$S_{TP} = 0{,}5 \cdot (S_1 + S_2);$$

$$S_1 = U_1 I_1; \quad S_2 = U_2 I_2.$$

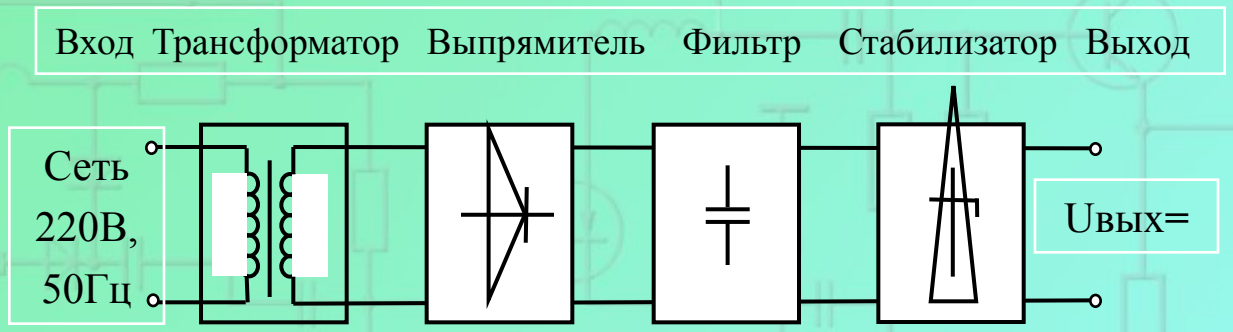
- коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_D / (P_D + P_{TP} + P_Д),$$

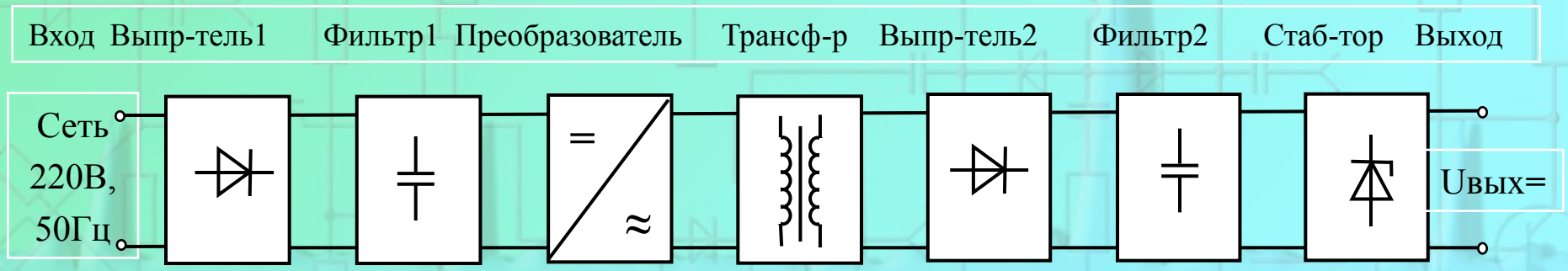
потери в трансформаторе: P_{TP}

потери в диодах: $P_Д$

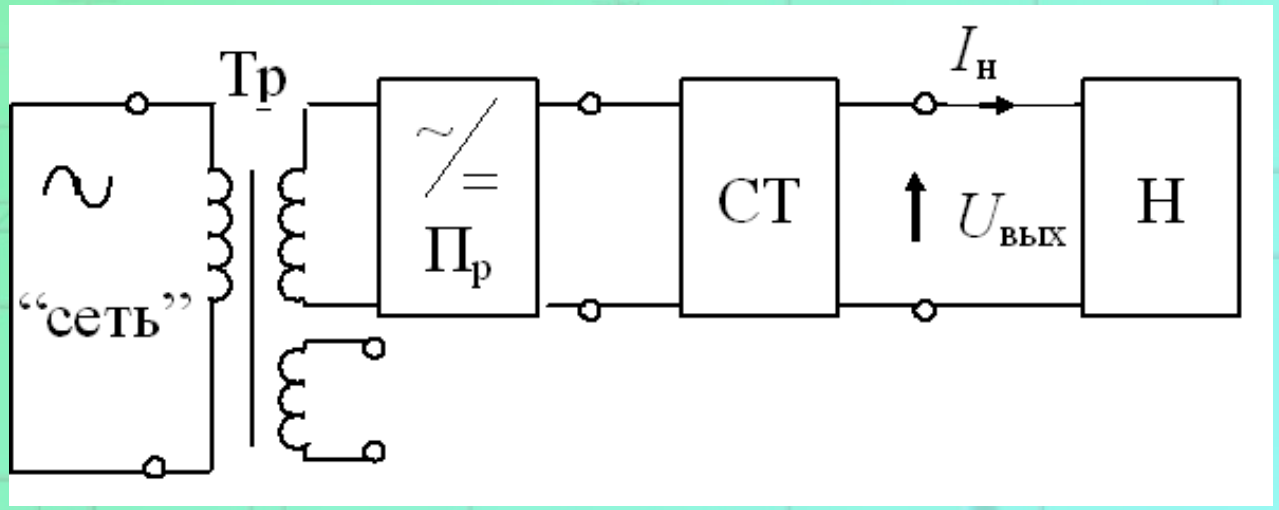
Источник вторичного электропитания со стабилизатором постоянного напряжения



Источник вторичного электропитания с промежуточным преобразованием постоянного напряжения в переменное

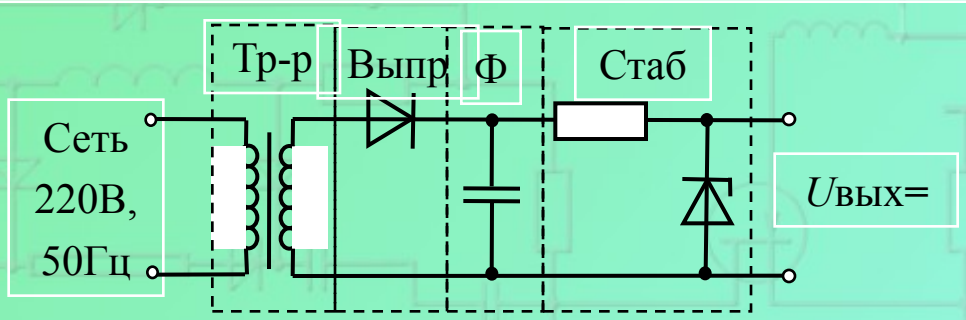


Классическая схема вторичного источника

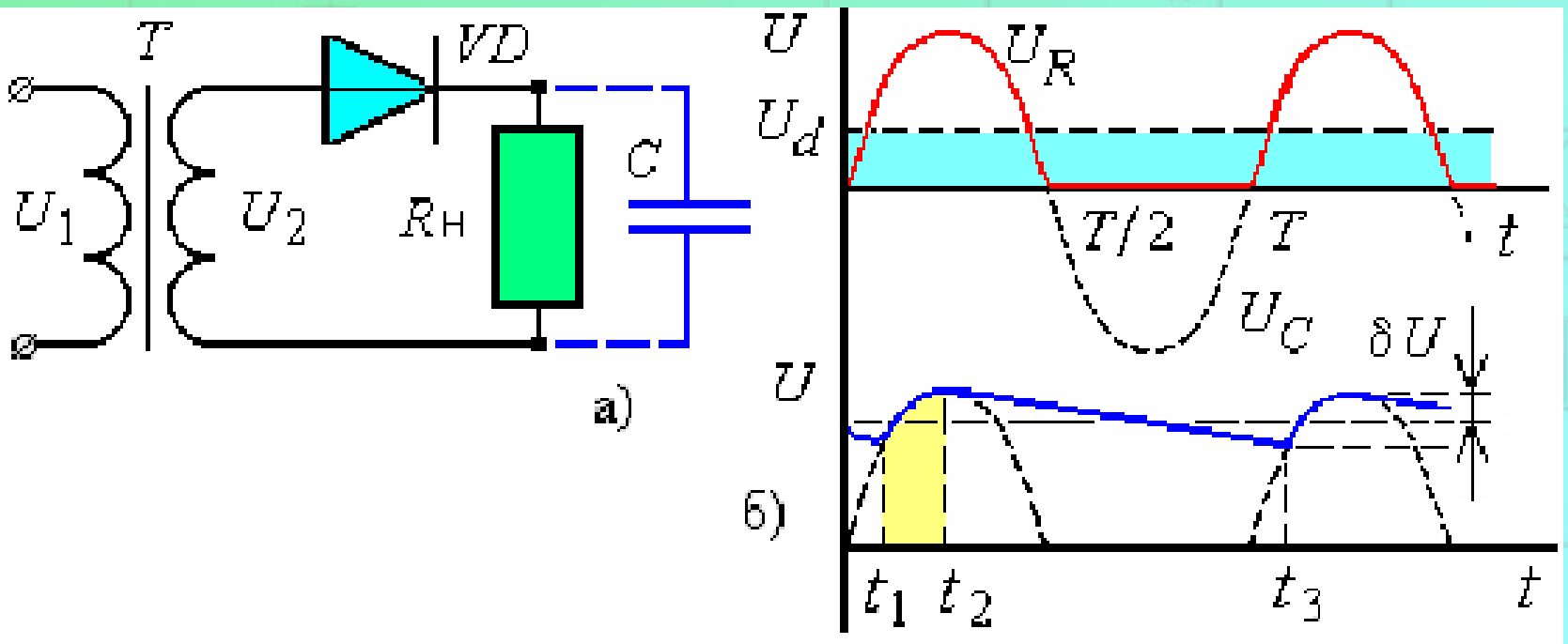


- Из теории электромагнитных устройств известно, что число витков первичной обмотки прямо пропорционально напряжению и обратно пропорционально частоте. Высокий уровень первичного напряжения (220В, 110В) и низкая частота приводят к необходимости применения (при имеющихся ферромагнитных сердечниках) большого числа витков (более тысячи).
- Во многих случаях масса и габариты такого трансформатора могут составлять более 90% от всего электронного устройства.

Источник питания с однополупериодным выпрямителем



Однополупериодный выпрямитель



$t_1 – t_2$: заряд конденсатора через диод;
$t_2 – t_3$: разряд конденсатора в нагрузку.

Однополупериодный выпрямитель

$$U_D = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} U_{2M}\sin\omega t d\omega t =$$

- среднее значение выпрямленного напряжения

$$-\frac{U_{2M}}{2\pi}(\cos\pi - \cos 0) =$$

$$-\frac{U_{2M}}{2\pi}(-1-1) = \frac{\sqrt{2}\cdot U_2}{\pi} \approx 0{,}45\cdot U_2$$

$$U_2 = \frac{\pi\cdot U_D}{\sqrt{2}} \approx 2{,}22\cdot U_D;$$

$$I_{ПР.СР} = I_D = \frac{U_D}{R_H} \approx \frac{0{,}45\cdot U_2}{R_H}$$

средний прямой ток диода

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H}; \qquad I_D = \frac{U_D}{R_H}.$$

- среднее значение выпрямленного тока

Однополупериодный выпрямитель

Действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} i_2^2 d\omega t} = \frac{\pi}{2} I_D \approx 1{,}57 \cdot I_D;$$

$$i^2 = I_{2M}^2 \sin^2 \omega \cdot t; \qquad \sin^2 \omega \cdot t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2};$$

$$i^2{}_2 = \frac{I_{2M}^2 (1 - \cos 2\omega t)}{2};$$

т.к.: $I_D = \frac{U_D}{R_н} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{R_н \cdot \pi} = \frac{U_{2M}}{R_н \cdot \pi} = \frac{I_{2M}}{\pi};$

и: $I_D = \frac{U_D}{R_н};$ **то:** $I_{2M} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{R_н} = \frac{\pi \cdot U_D}{R_н} = \pi \cdot I_D.$

Однополупериодный выпрямитель

$$S_{TP} \approx S_2 = U_2 \cdot I_2 = 2{,}22 \cdot U_D \cdot 1{,}57 \cdot I_D \approx 3{,}5 \cdot P_D$$

мощность трансформатора

$$U_{ОБР.MAX} = U_{2M} = \sqrt{2} U_2 = \frac{\pi}{2} U_D \approx 1{,}57 \cdot U_D,$$

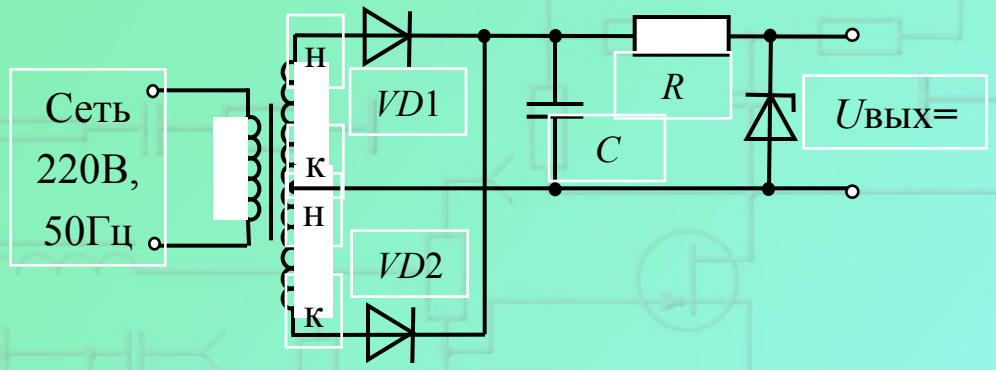
т. к.:

$$U_H = U_D \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2}\cos\omega t + \frac{2}{3}\cos 2\omega t - \ldots\right)$$

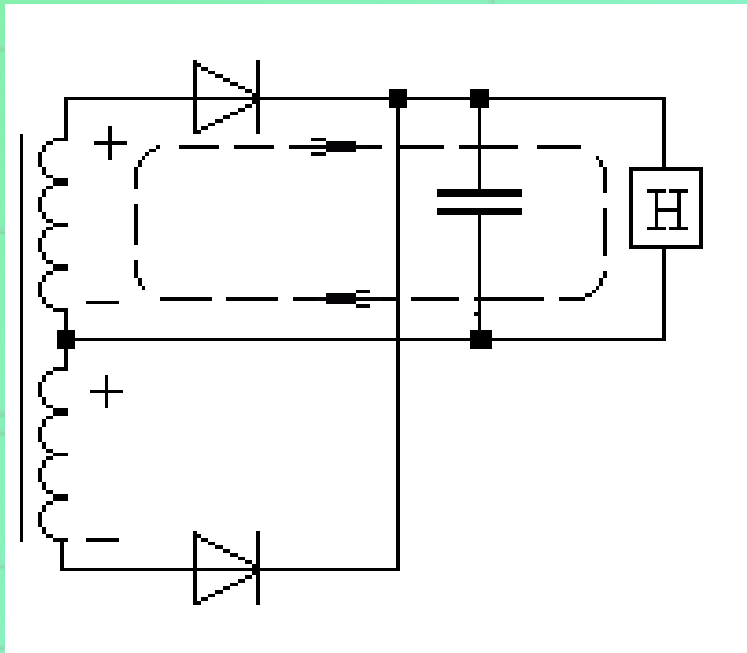
Коэффициент пульсаций:

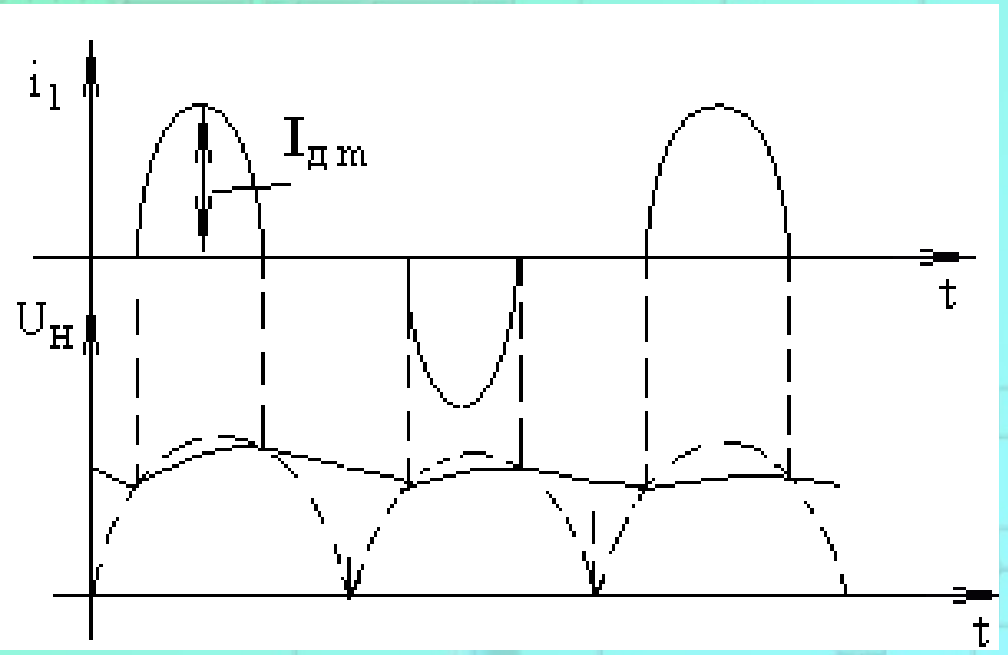
$$p = \frac{U_D \, \pi/2}{U_D} = \frac{\pi}{2} \approx 1{,}57$$

Источник питания с двухполупериодным выпрямителем



Двухполупериодная схема на основе трансформатора со средней точкой





Двухполупериодная схема на основе трансформатора со средней точкой

$$U_D = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} U_{2M}\sin\omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_2 \approx 0{,}9U_2;$$

$$U_2 = \frac{\pi \cdot U_D}{2\sqrt{2}} \approx 1{,}11 \cdot U_D$$

$$I_D = U_D / R_н = 2I_{2M} / \pi;$$

$$U_{ОБР.MAX} = 2 \cdot U_{2M} = 2 \cdot \sqrt{2}U_2 =$$

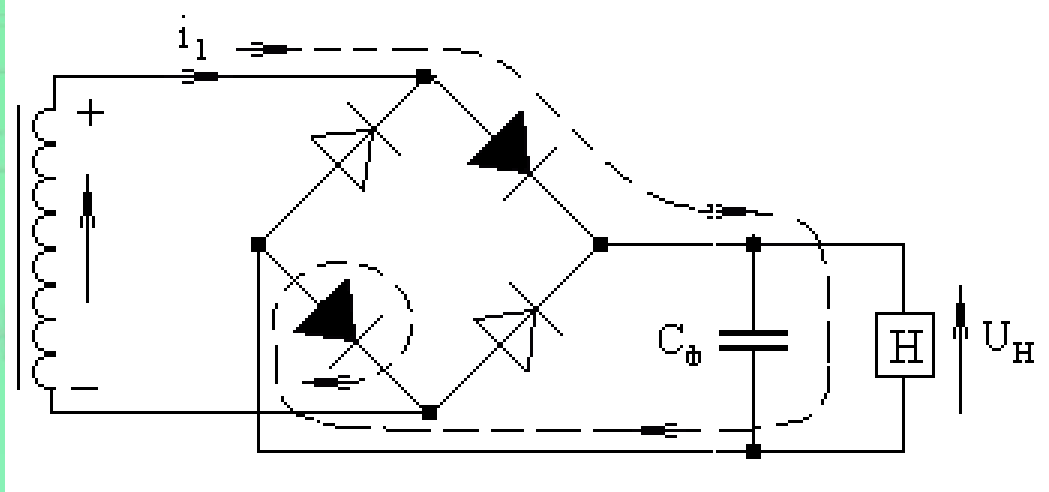
$$2\sqrt{2}\frac{\pi \cdot U_D}{2\sqrt{2}} = \pi U_D \approx 3{,}14 \cdot U_D$$

U_{2M} – напряжение на половине вторичной обмотки

Так как: $u_H = U_D\left(1 + \frac{2}{3}\cos 2\omega t - \frac{2}{15}\cos 4\omega t + \ldots\right)$

коэффициент пульсаций: $\rho = \frac{2}{3} \approx 0{,}67;$

Двухполупериодные выпрямители



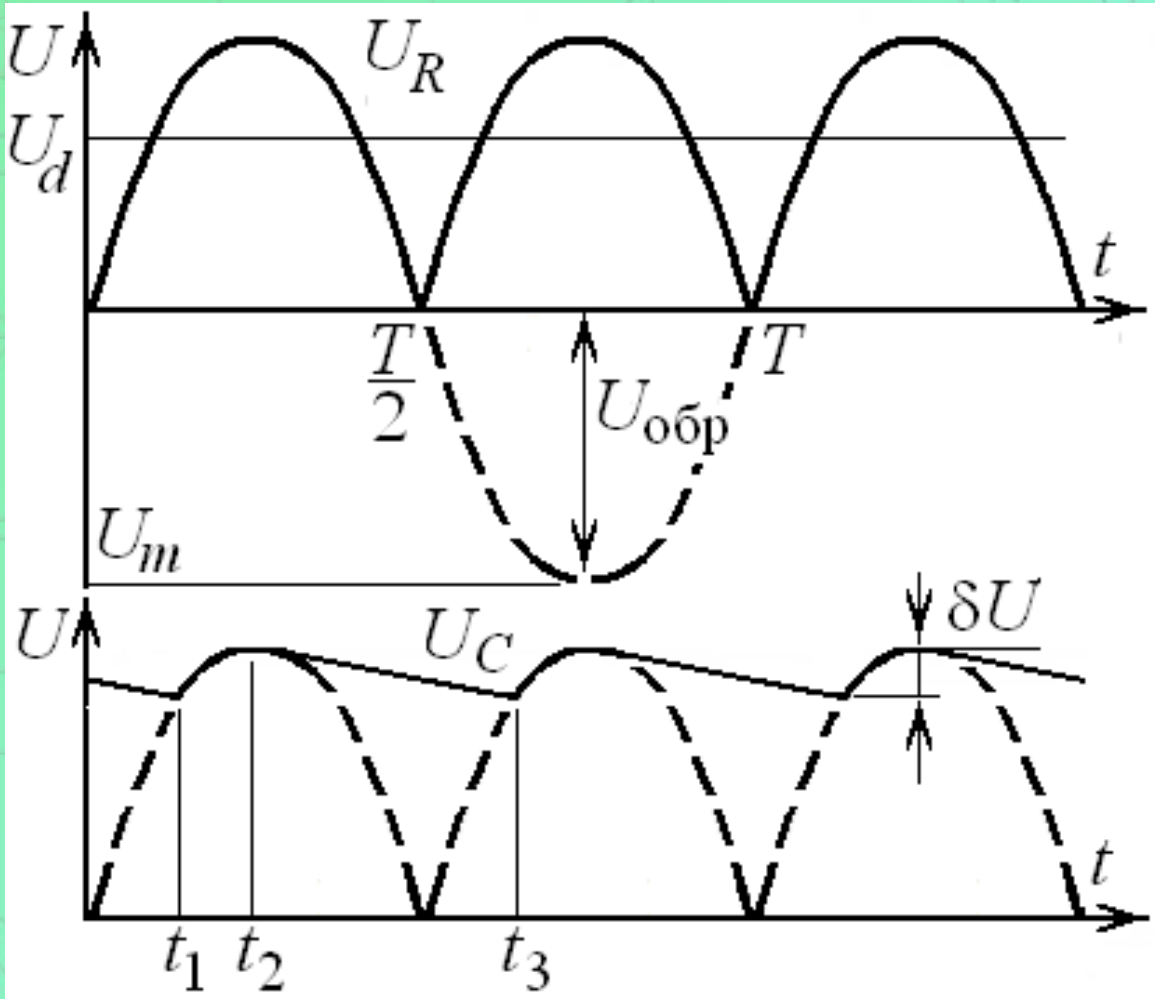
$$\Delta U_1 = \frac{I_H}{2Cf_C}\left(1 - \frac{R_i}{2R_H}\right)$$

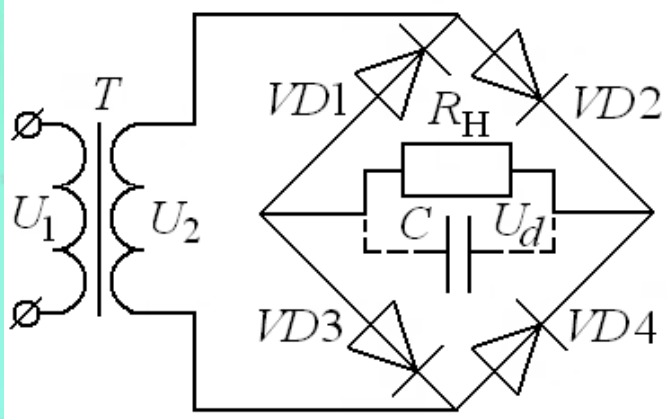
$I_{д\ ср.} = 0{,}5 I_H \sqrt{2R_1R_H}$

$$I_{д\ m} \approx (U_{1\ m} - 2U_{д\ пр})/\sqrt{2R_1R_H}$$

При этом ток *i1* меняет направление на противоположное, а через нагрузку ток направления не меняет

Временная диаграмма мостового выпрямителя





$$\delta U = \frac{U_d}{2\pi \cdot R_н C \cdot f}$$

Мостовой выпрямитель

$$U_D = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} U_{2M}\sin\omega t d\omega t = \frac{2U_{2M}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0{,}9U_2; \quad U_2 = \frac{\pi \cdot U_D}{2\sqrt{2}} \approx 1{,}11 \cdot U_D$$

$$I_D = U_D / R_H \approx 0{,}9 \cdot U_2 / R_H;$$

Средний ток каждого диода (I_2): $I_{ПР.СР} = I_{2СР} = 0{,}5 \cdot I_D$

Максимальный ток вторичной обмотки: $I_{2m} = U_{2m} / R_H$

Действующее значение тока вторичной обмотки: $I_2 = \frac{\pi \cdot U_D}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot R_H} \approx 1{,}11 \cdot I_D$

$$U_{ОБР.MAX} = U_{2m} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{2}\frac{U_D}{\sqrt{2}}$$

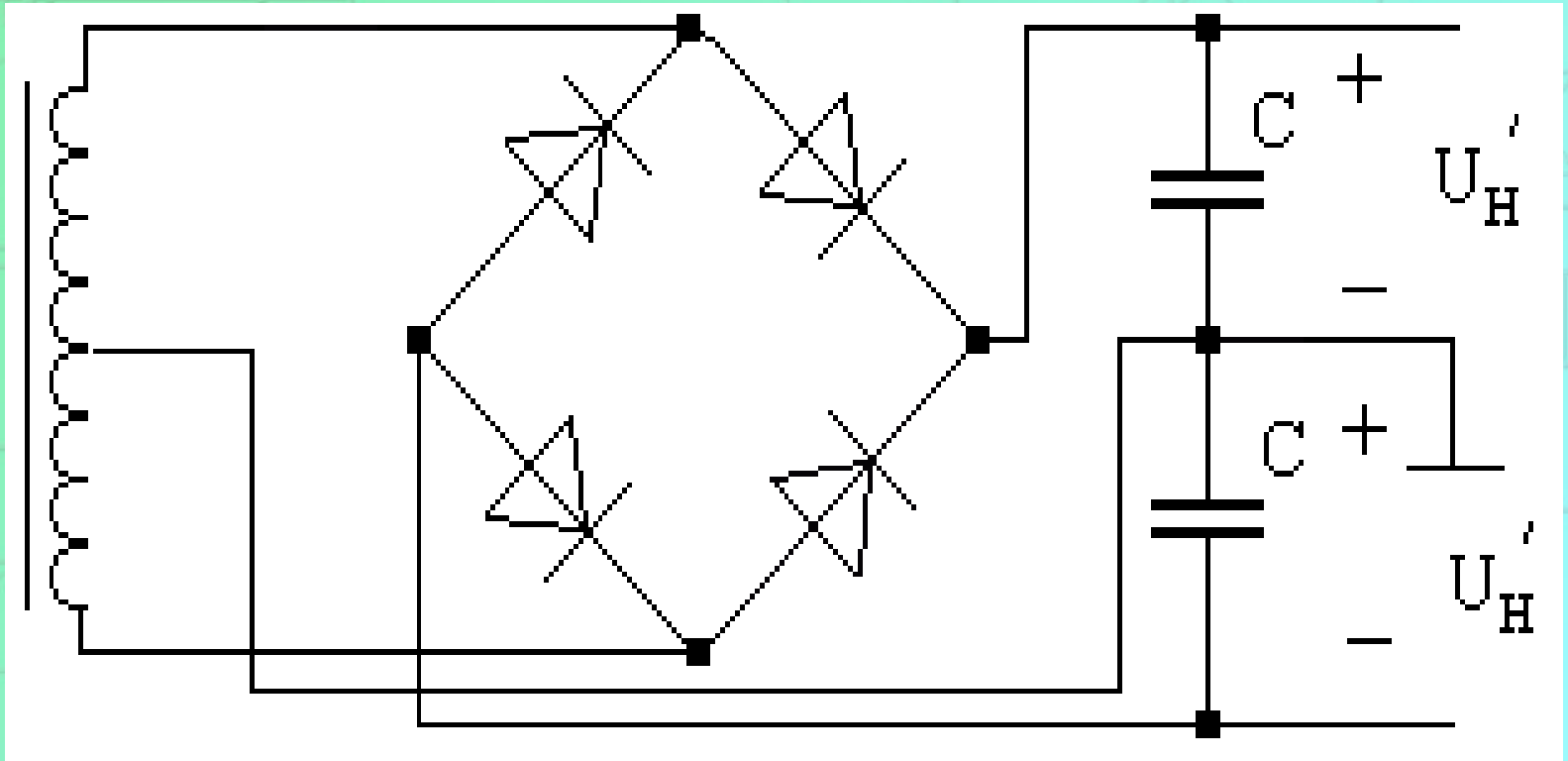
$$= \frac{\pi}{2} \cdot U_D \approx 1{,}57 \cdot U_D.$$

Максимальный прямой ток диода: $I_2 = \frac{U_{2m}}{R_H} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_D}{R_H} \approx 1{,}57 \cdot I_D$

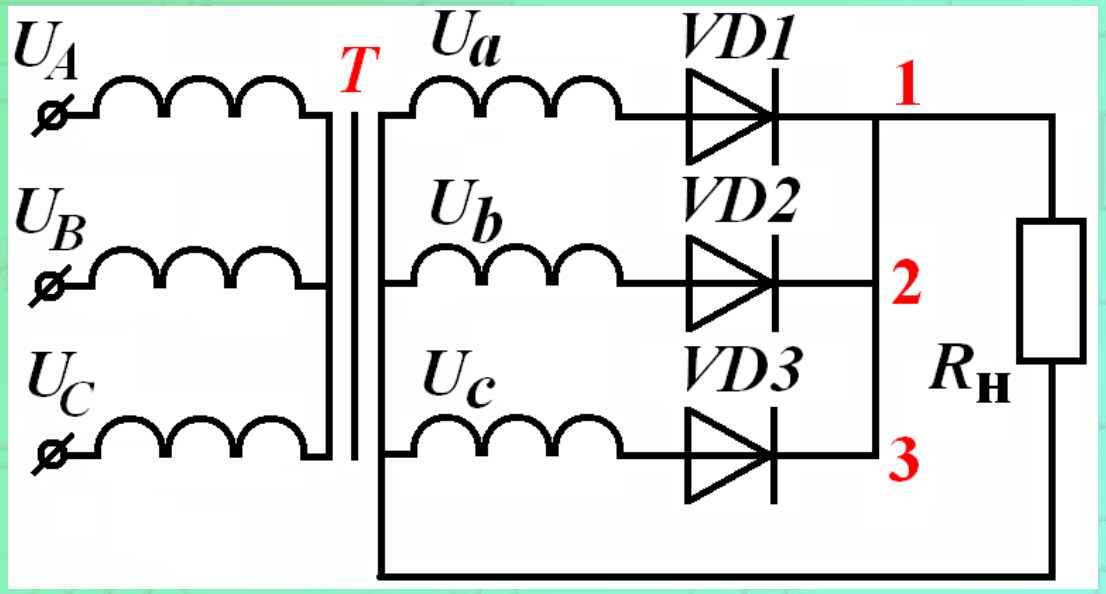
Так как: $u_H = U_D\left(1 + \frac{2}{3}\cos 2\omega t - \frac{2}{15}\cos 4\omega t + \ldots\right)$

Коэффициент пульсаций: $\rho = 0{,}67$

Разнополярные напряжения



Трехфазные выпрямители средней и большой мощности



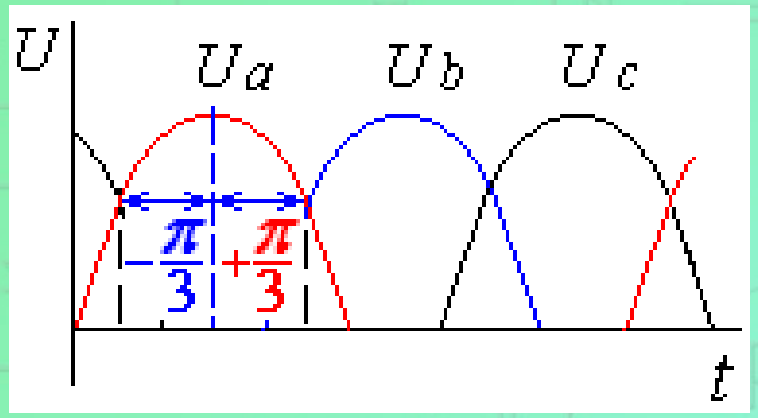
трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом

Назначение - питание нагрузочных устройств со средним значением выпрямленного тока до сотен ампер, напряжение — до десятков киловольт.

Достоинства: о высокая надежность (минимальное количество диодов).

Недостатки: подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током (снижение к.п.д.).

Трехфазный выпрямитель



Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_D = \frac{3}{2\pi}\int_{-\pi/3}^{\pi/3} U_{2ФМ}\cos\omega t d\omega t = \frac{3}{\pi}U_{2ФМ}\sin\frac{\pi}{3} \approx 1{,}17\cdot U_{2Ф}$$

$$U_D = U_{н.ср} = \frac{m}{2\pi}\cdot\int_{\pi/2-\pi/m}^{\pi/2+\pi/m} U_{2M}\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot d\omega t = \frac{m}{\pi}\cdot U_{2m}\cdot\sin\frac{\pi}{m} =$$

$$= \frac{3}{\pi}\cdot U_{2M}\cdot\sin 60^\circ = \frac{3\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot U_2\cdot\sin 60^\circ = \frac{3\cdot\sqrt{2}}{\pi}\cdot U_2\cdot\frac{\sqrt{3}}{2} \approx$$

$$1{,}17\cdot U_2$$

m - коэффициент фазности

Трехфазный выпрямитель

Средний и максимальный прямой ток диодов:

$$I_{ПР.СР} = \frac{I_D}{3};$$

$$I_{ПР.\max} = \frac{U_{ФМ}}{R_H} = \frac{U_D}{\frac{3\cdot\sqrt{3}}{2\pi}R_H} = \frac{U_D}{0{,}827\cdot R_H} \approx 1{,}21\cdot I_D.$$

где: $U_{ФМ} = \frac{U_D\cdot 2\pi}{3\cdot\sqrt{3}}.$

Разложим напряжение $U_Н$ в ряд Фурье:

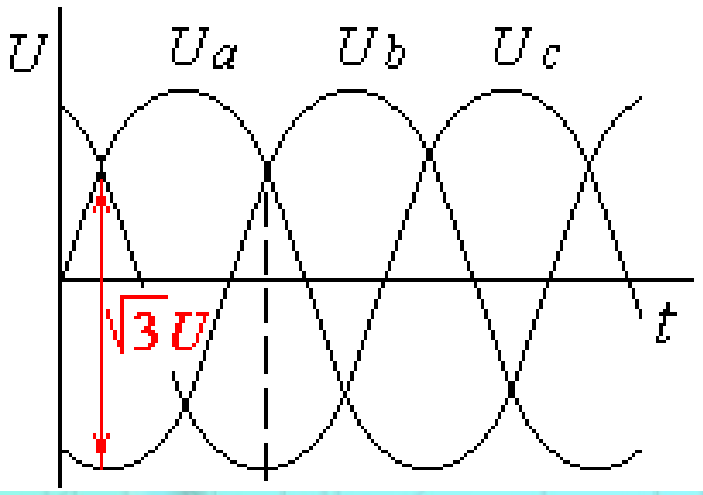
$$U_H = U_D\left(1+\frac{1}{4}\cos 3\omega t - \frac{2}{35}\cos 6\omega t + \frac{1}{40}\cos 9\omega t - \ldots\right)$$

Трехфазный выпрямитель

$$U_{ОБР.max} = \sqrt{2}\sqrt{3}U_{2Ф} = \sqrt{6}U_{2Ф} = \frac{2\pi}{3}\cdot U_D \approx 2{,}09\cdot U_D$$

Первая гармоника: $\delta U = U_Г = U_d \cdot \frac{1}{4}\cos 3\omega t = 0{,}25\cdot U_d.$

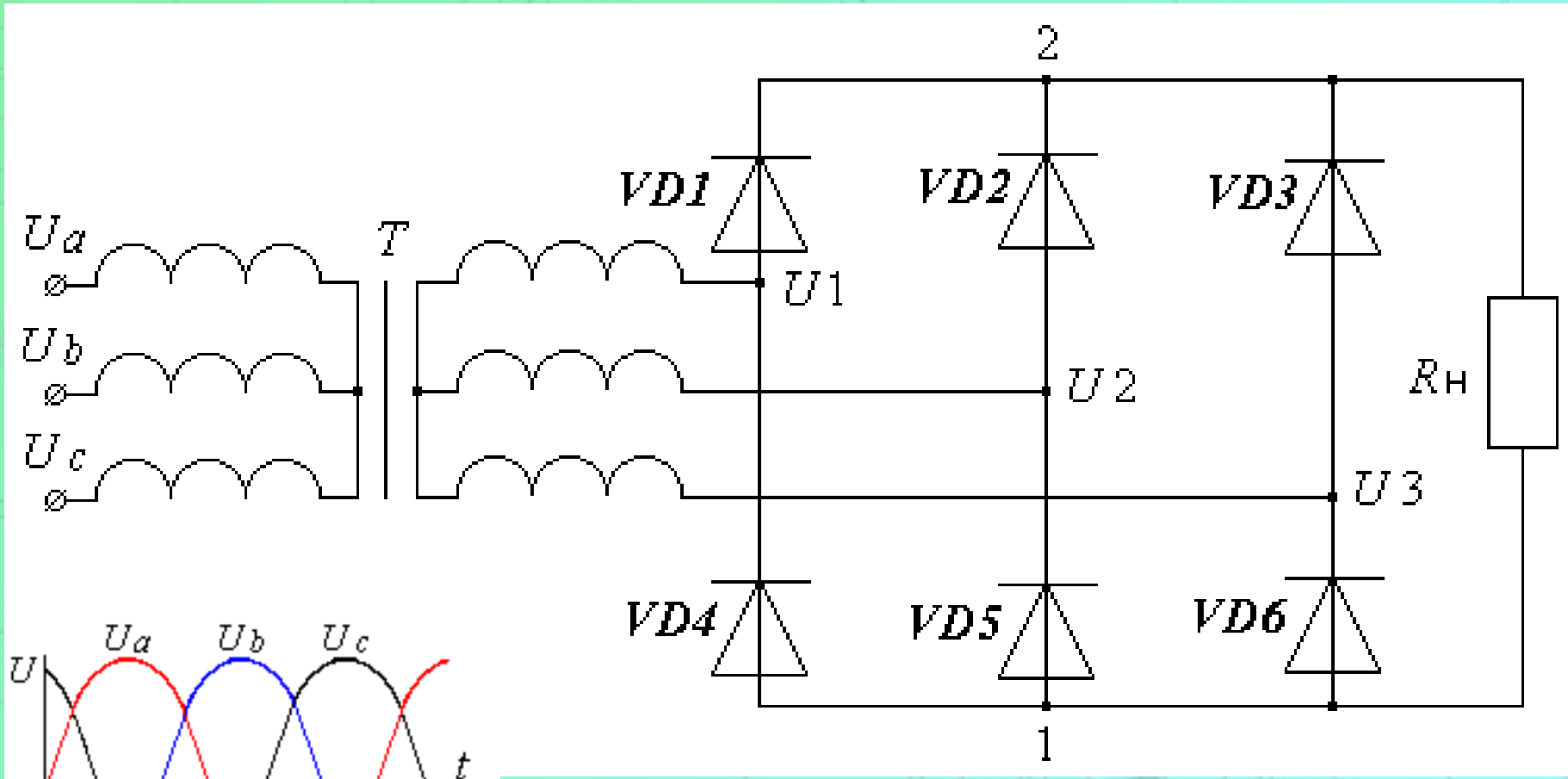
Или: $q_1 = {}^{2}/_{m^2-1} = {}^{2}/_{3^2-1} = 0{,}25$

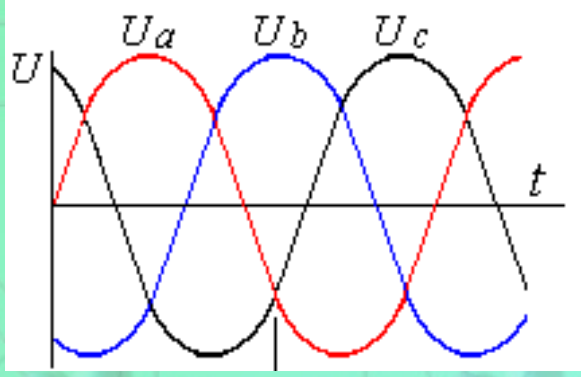


Коэффициент пульсаций: 0,25.

Частота пульсаций $f_п = mf = 3f$

Трехфазный мостовой выпрямитель





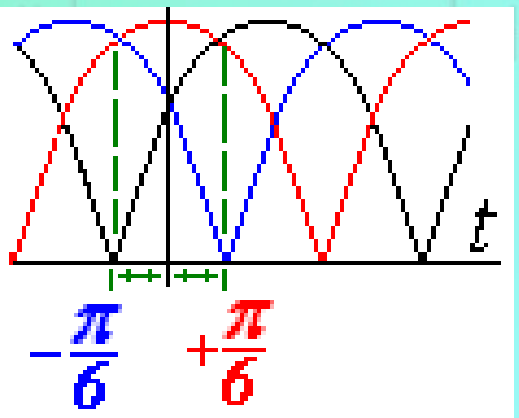
(схема Ларионова)

Трехфазный мостовой выпрямитель

$$U_D = U_{H.CP} =$$

$$\frac{3}{\pi}\int_{-\pi/6}^{\pi/6}\sqrt{2}U_{2Л}\cos\omega t d\omega t =$$

$$\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\cdot U_{2Л} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_2 \approx 2{,}34\cdot U_2$$



Где $U_{2Л}$ –действующее значение линейного напряжения

Трехфазный мостовой выпрямитель

$$U_D = U_{H.CP}\left(1 + \frac{2}{35}\cos 6\omega t - \frac{2}{143}\cos 12\omega t + \frac{2}{323}\cos 18\omega t + \ldots\right)$$

Первая гармоника: $\delta U = U_{\Gamma} = U_d \cdot \frac{2}{35}\cos 6\omega t = 0{,}057 \cdot U_d.$

Коэффициент пульсаций: 0,057.

Частота пульсаций: $f_п = mf = 6f$

$$U_{ОБР.\max} = \sqrt{3}\sqrt{2}U_{2Ф} \approx 2{,}45 \cdot U_{2Ф}$$

$$\approx 2{,}09U_d$$

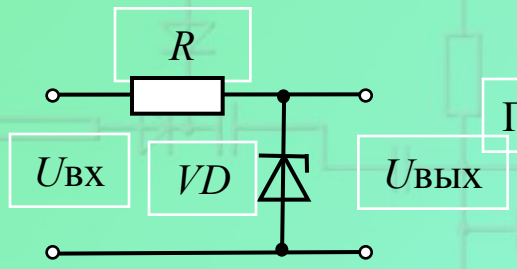
КПД выпрямителя Ларионова больше КПД выпрямителя с нейтральным выводом, так как нет подмагничивания сердечника трансформатора постоянным током.

Стабилизаторы постоянного напряжения (СПН)

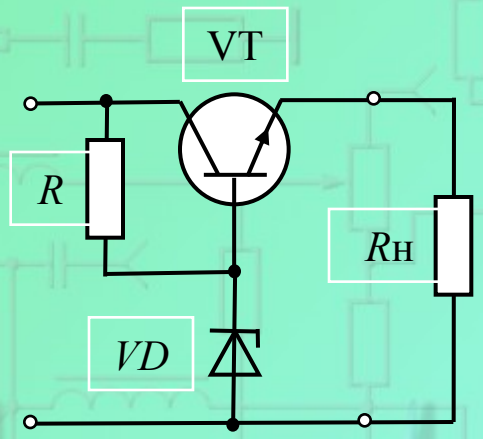
СПН обеспечивают стабильный уровень выходного напряжения источника питания при действии двух дестабилизирующих факторов - нестабильности входного напряжения и изменениях выходного (нагрузочного) тока *U*2=*F*(*U1, I*2)

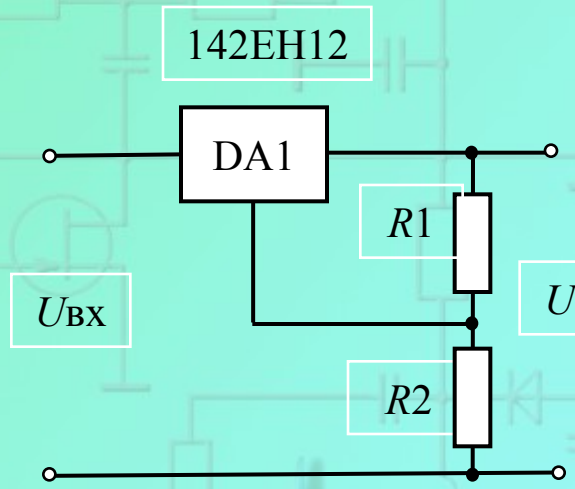
$$\Delta U_2 = \frac{1}{k}\Delta U_1 + r_{22}\Delta I_2 \qquad k = \left.\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}\right|_{\substack{\Delta I_2 = 0 \\ I_2 = I_2^0}} \qquad r_{22} = \left.\frac{\Delta U_2}{\Delta I_2}\right|_{\substack{\Delta U_1 = 0 \\ U_1 = U_1^0}}$$

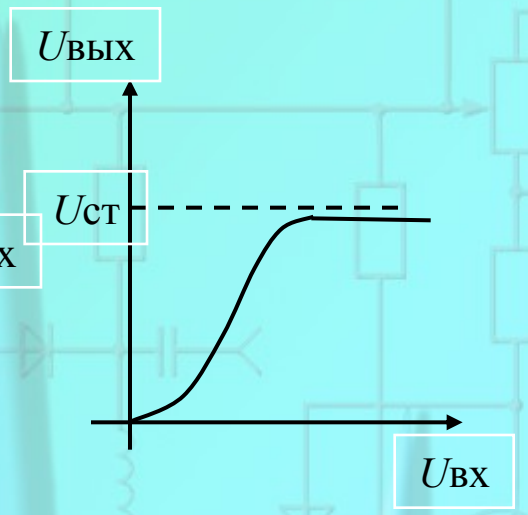
Стабилизаторы постоянного напряжения (СПН)



Параметрический стабилизатор постоянного напряжения







Компенсационные стабилизаторы постоянного напряжения

Стабилитроны

Рабочий участок $U_{СТ}$ лежит в области лавинного пробоя диода и характеризуется малым изменением напряжения $\Delta U_{СТ}$ при больших изменениях тока $\Delta I_{СТ}$.

Основные параметры стабилитронов:

– номинальное напряжение стабилизации $U_{СТ.НОМ}$ (оптимальное для использования) при $I_{СТ.НОМ}$;

– номинальный ток стабилизации $I_{СТ.НОМ}$;

– минимальный ток стабилизации $I_{СТ.MIN}$ (при котором начинается стабилизация);

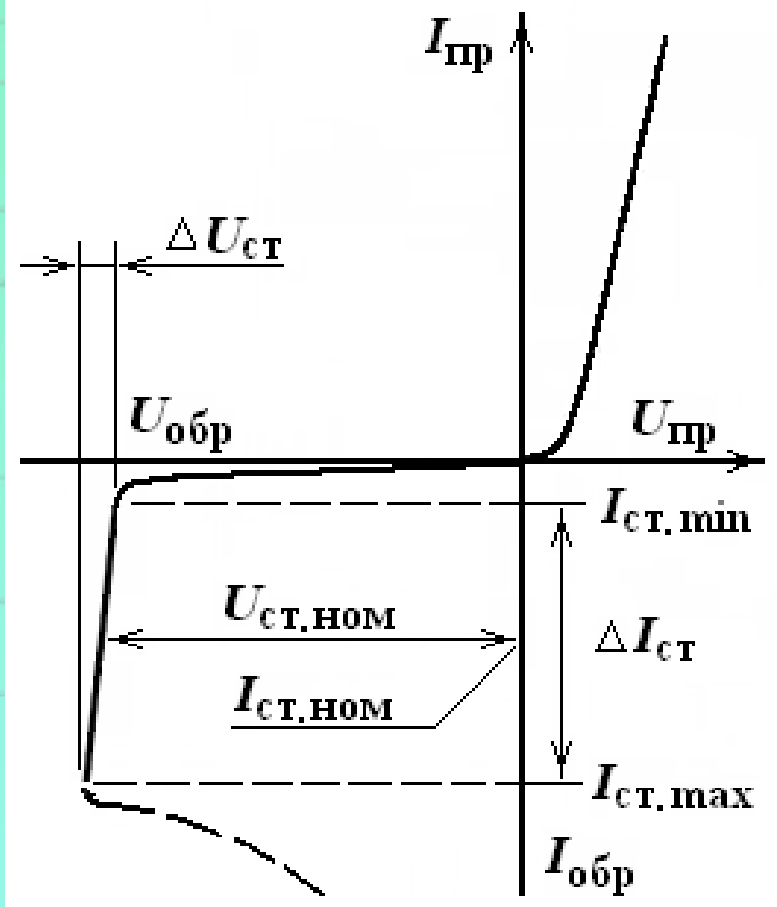
– максимальный ток стабилизации $I_{СТ.MAX}$ (его превышение ведет к тепловому пробою);

– дифференциальное сопротивление $r_{ДИФ}$ (или стабилитрона $r_{СТ}$; $r_{ДИФ} = \Delta U_{СТ} / \Delta I_{СТ}$);

– допустимая мощность рассеивания P_{MAX} (для расчета радиаторов отвода тепла);

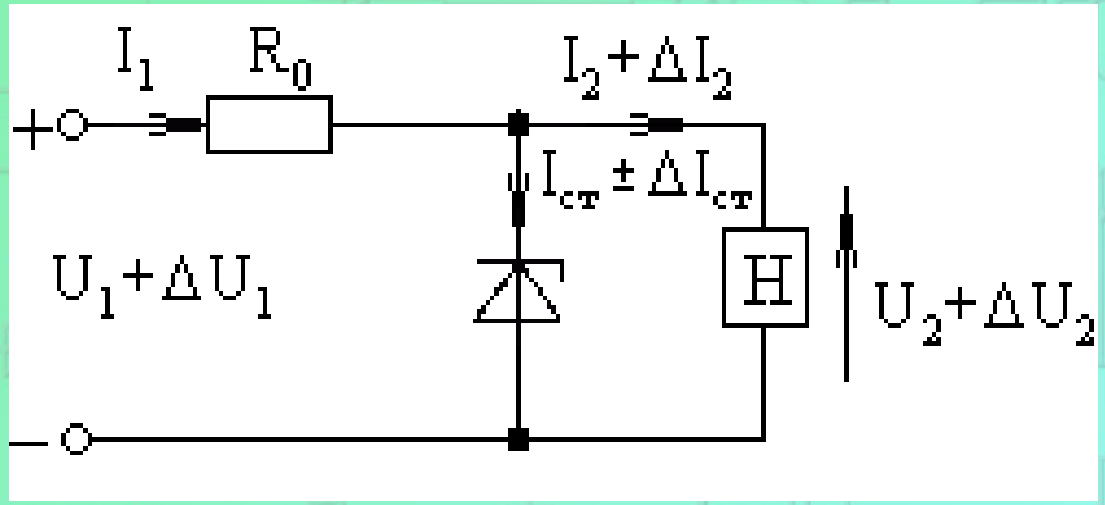
– температурный коэффициент напряжения стабилизации $a_{СТ}$, (%/˚С).

– максимально допустимая температура $T_{К\,MAX}$, ° С.



Вольтамперная характеристика стабилитрона

Параметрический (пассивный) СПН



Изменение входного напряжения (ΔU1) или тока нагрузки (ΔI2) в этой схеме приводит лишь к изменению тока через стабилитрон (ΔIст), а напряжение на нем, которое и равняется выходному напряжению, меняется незначительно

Стабилизатор напряжения

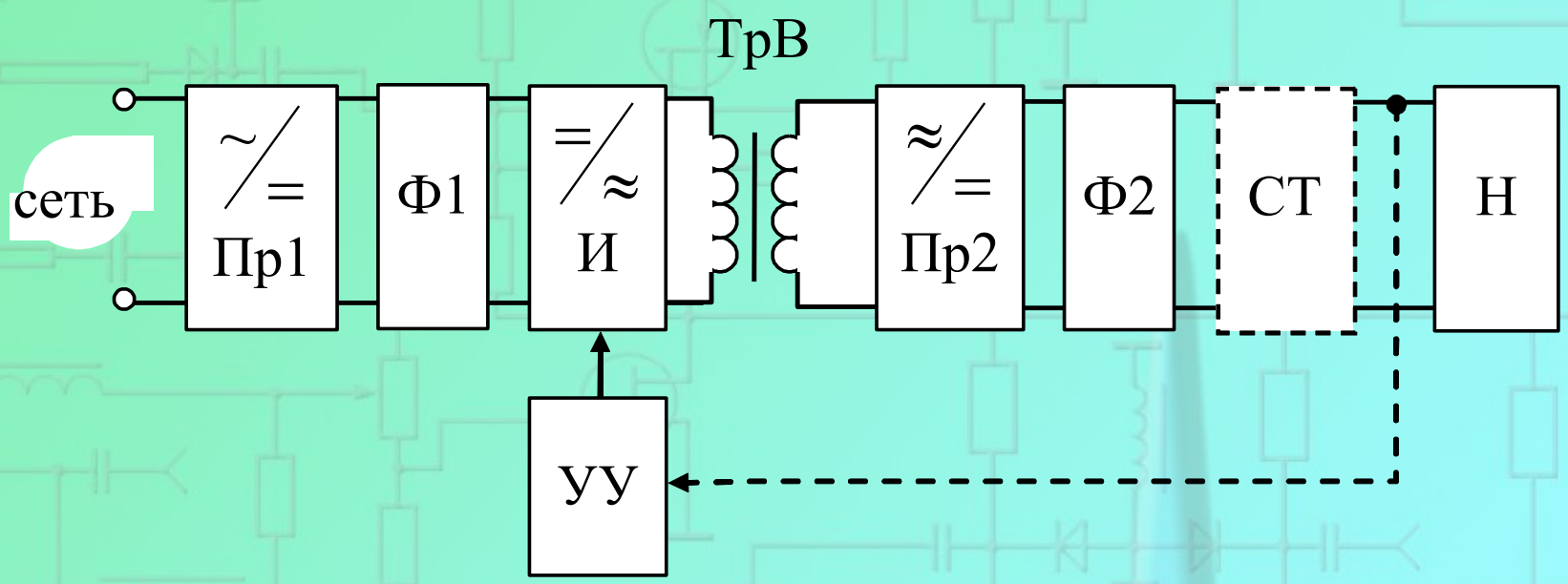
Коэффициент стабилизации напряжения $K_{СТ}$ (во сколько раз относительное изменение напряжения на выходе стабилизатора $\Delta U_Н/U_Н$ меньше относительного изменения напряжения на его входе $\Delta U_{ВХ}/U_{ВХ}$):

$$K_{СТ} = \frac{\Delta U_{ВХ}}{U_{ВХ}} \Big/ \frac{\Delta U_Н}{U_Н} = \frac{U_Н}{U_{ВХ}}\left(1 + \frac{R_Б}{R_Н} + \frac{R_Б}{r_{ДИФ}}\right) = \frac{U_{СТ}}{U_{ВХ}} \cdot \frac{R_Б + r_{ДИФ}}{r_{ДИФ}}.$$

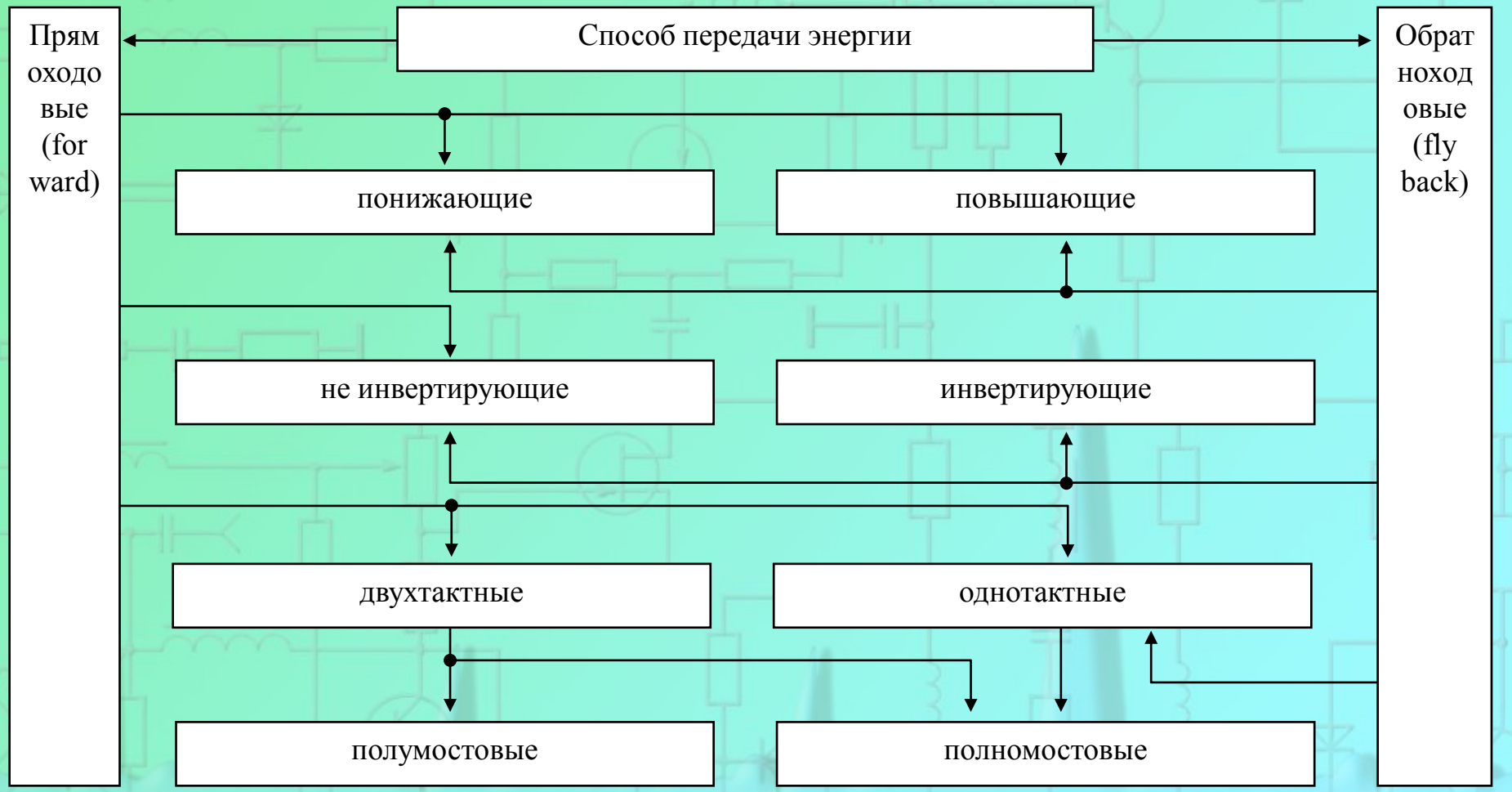
Напряжение пульсации на выходе составит:

$$\Delta U_Н = \frac{\Delta U_{ВХ}}{K_{СТ}}.$$

Вторичные источники с преобразованием частоты сети



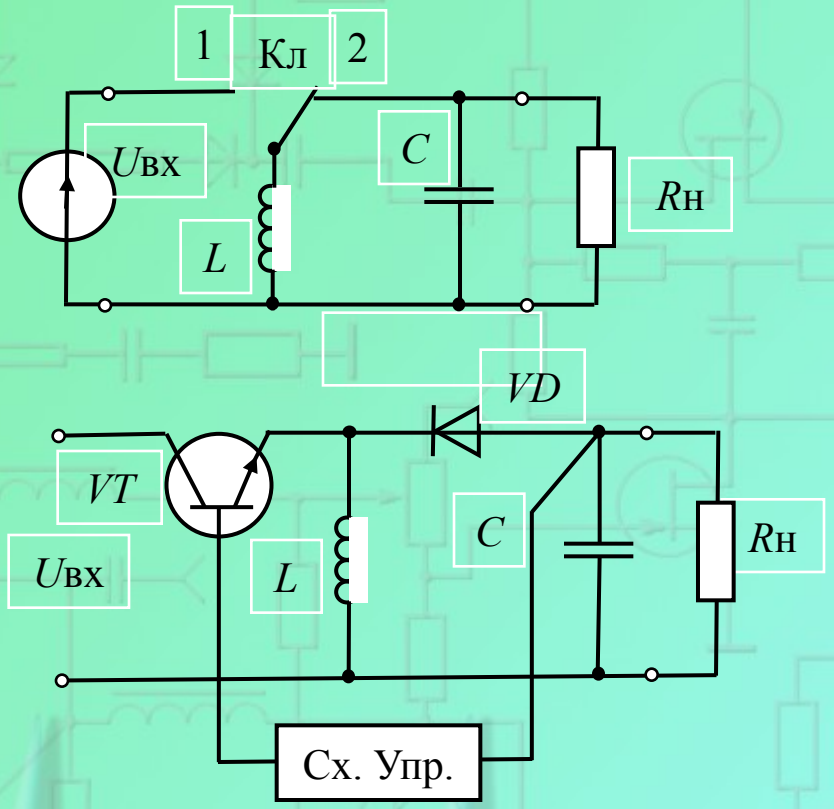
Классификация импульсных источников вторичного питания

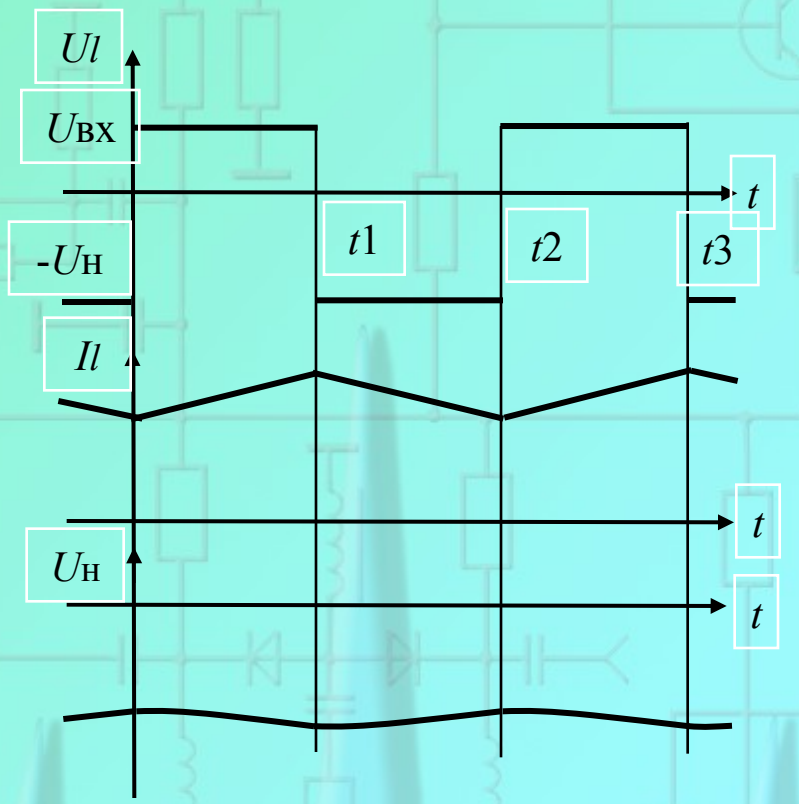


Классификация импульсных источников вторичного питания

Параметр	Источники питания	
	линейные	импульсные
Нестабильность по выходному напряжению	(0,01÷0,05)%	(0,05÷0,1)%
Нестабильность по току нагрузки	(0,01÷0,1)%	(0,1÷1)%
Выходное напряжение	(0,5÷2) мВ	(25÷100) мВ
Диапазон входных напряжений	± 10 %	± 20 %
КПД	(40÷55)%	(60÷80)%
Средняя удельная мощность	30 Вт/дм^2	> 250 Вт/дм^2
Время восстановления	50 мс	300 мс
Время удержания	2 мс	30 мс

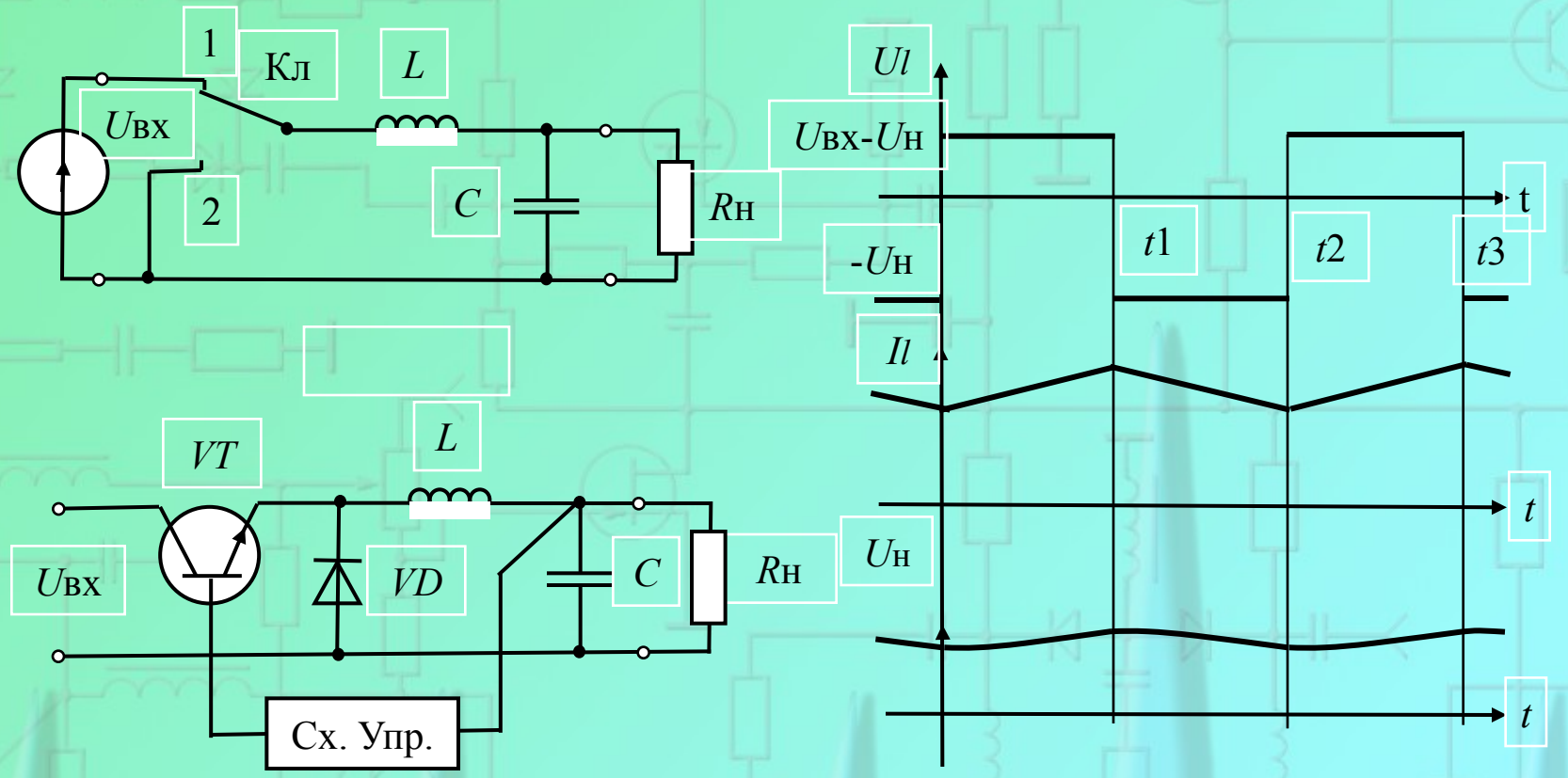
Ключевой стабилизатор постоянного напряжения





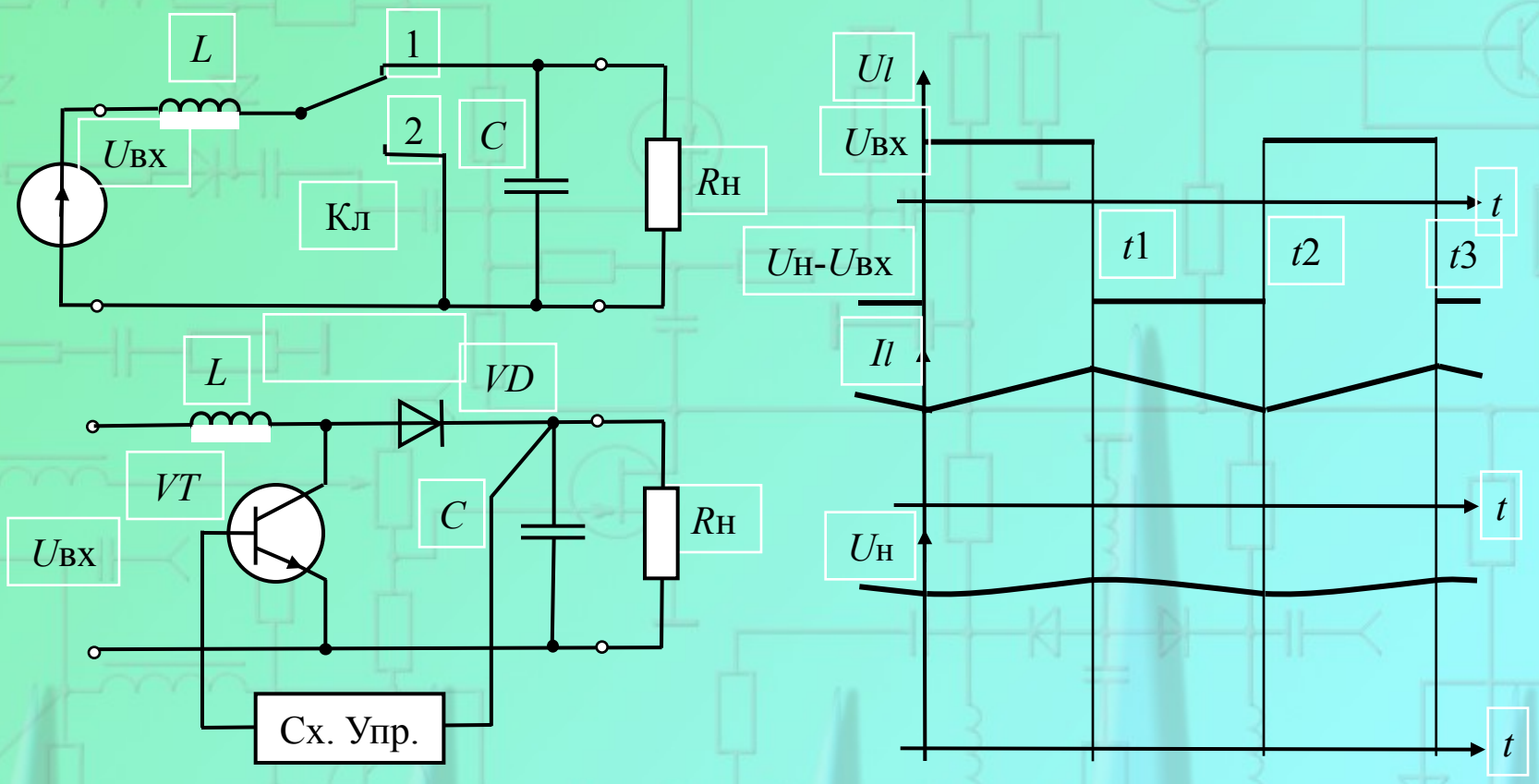
Инвертирующий импульсный стабилизатор постоянного напряжения

Ключевой стабилизатор постоянного напряжения



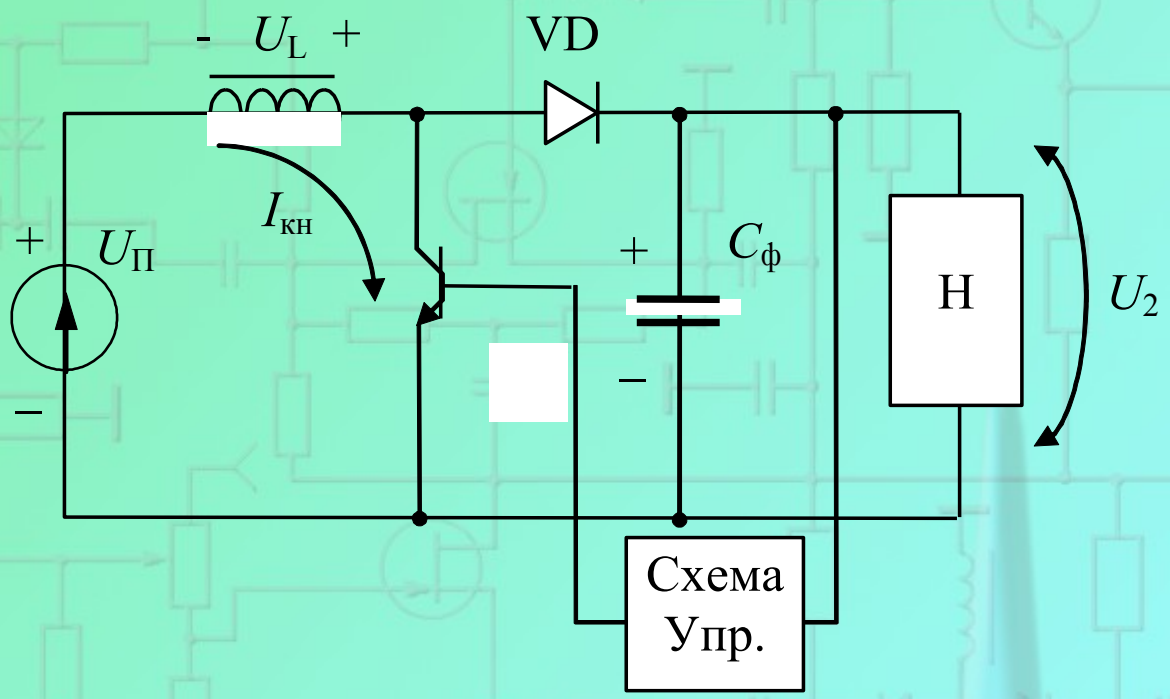
Понижающий импульсный стабилизатор постоянного напряжения

Ключевой стабилизатор постоянного напряжения

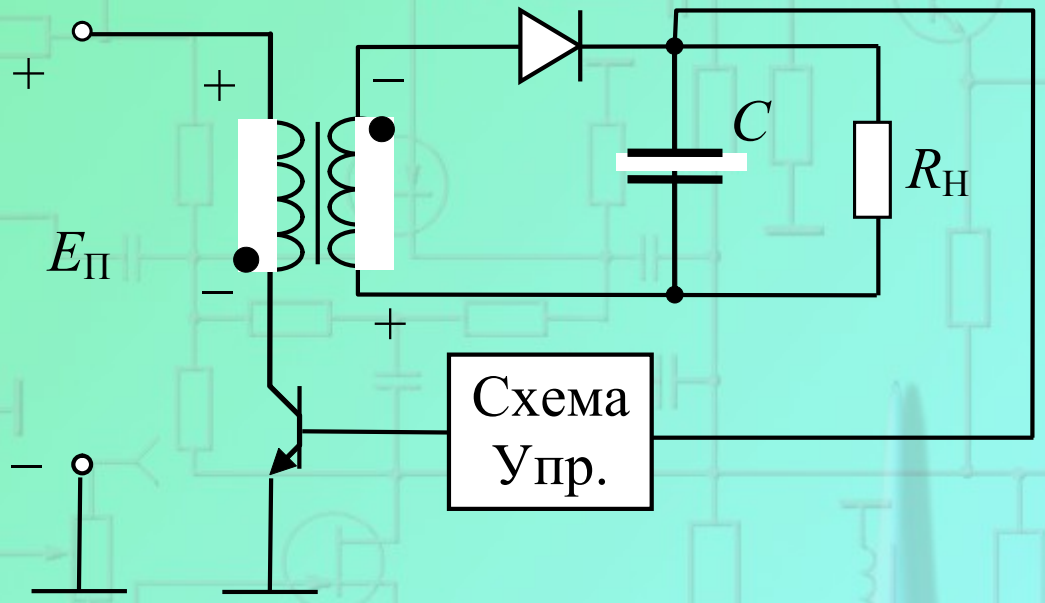
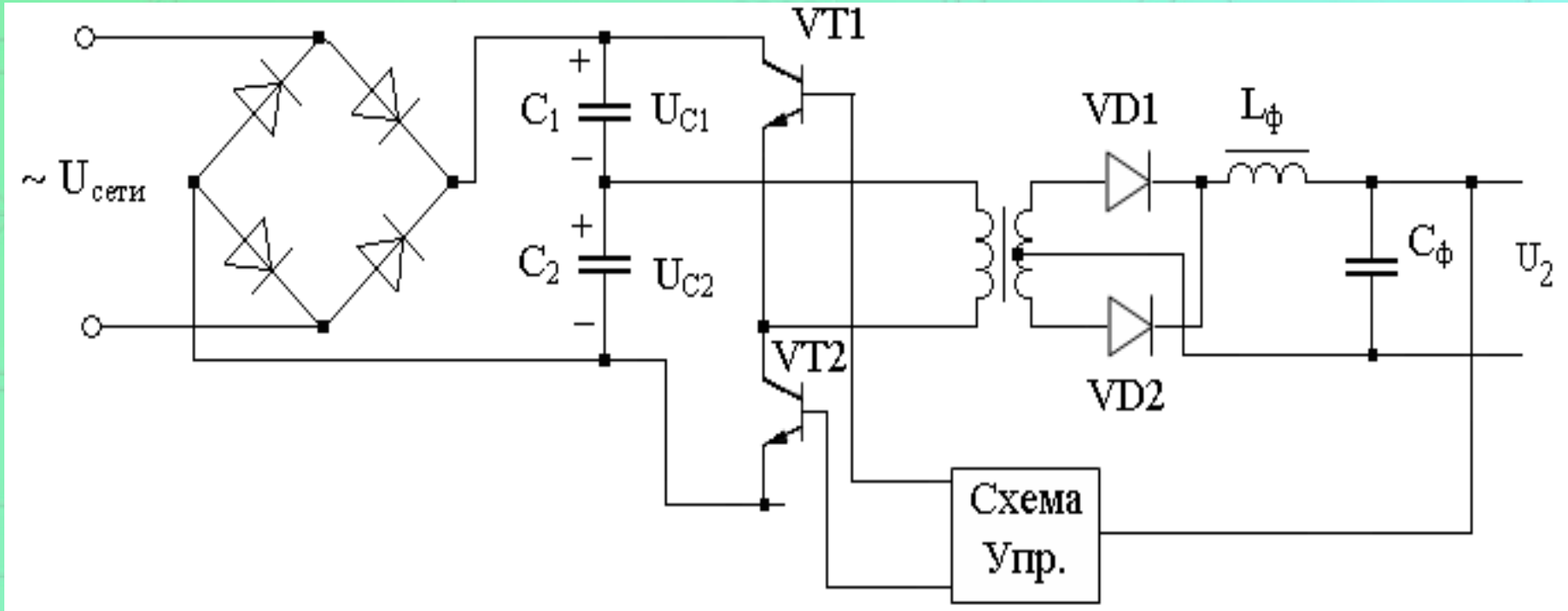


Повышающий импульсный стабилизатор постоянного напряжения

Повышающий стабилизатор



Обратноходовой преобразователь



Полумостовой преобразователь