

## 6.3 Шестипульсовая нулевая схема «Звезда – две взаимнообратных звезды с уравнительным реактором (УР)»

### 6.3.1 Схема и её описание

Примем, что напряжение в питающей сети, а следовательно во вторичной обмотке трансформатора синусоидальное.

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \Theta \quad (6.3.1)$$

Шестипульсовая нулевая схема «Звезда – две взаимнообратных звезды с уравнительным реактором (УР)» состоит из трехфазного преобразовательного трансформатора Т с двумя трехфазными вторичными обмотками, напряжение в одноименных фазах которых сдвинут на 180 градусов электрических (рис.6.3.2).

Благодаря этому напряжение вторичных обмоток образует шестифазную симметричную систему, т.е. произошло удвоение числа фаз питающей сети (рис.6.3.1).

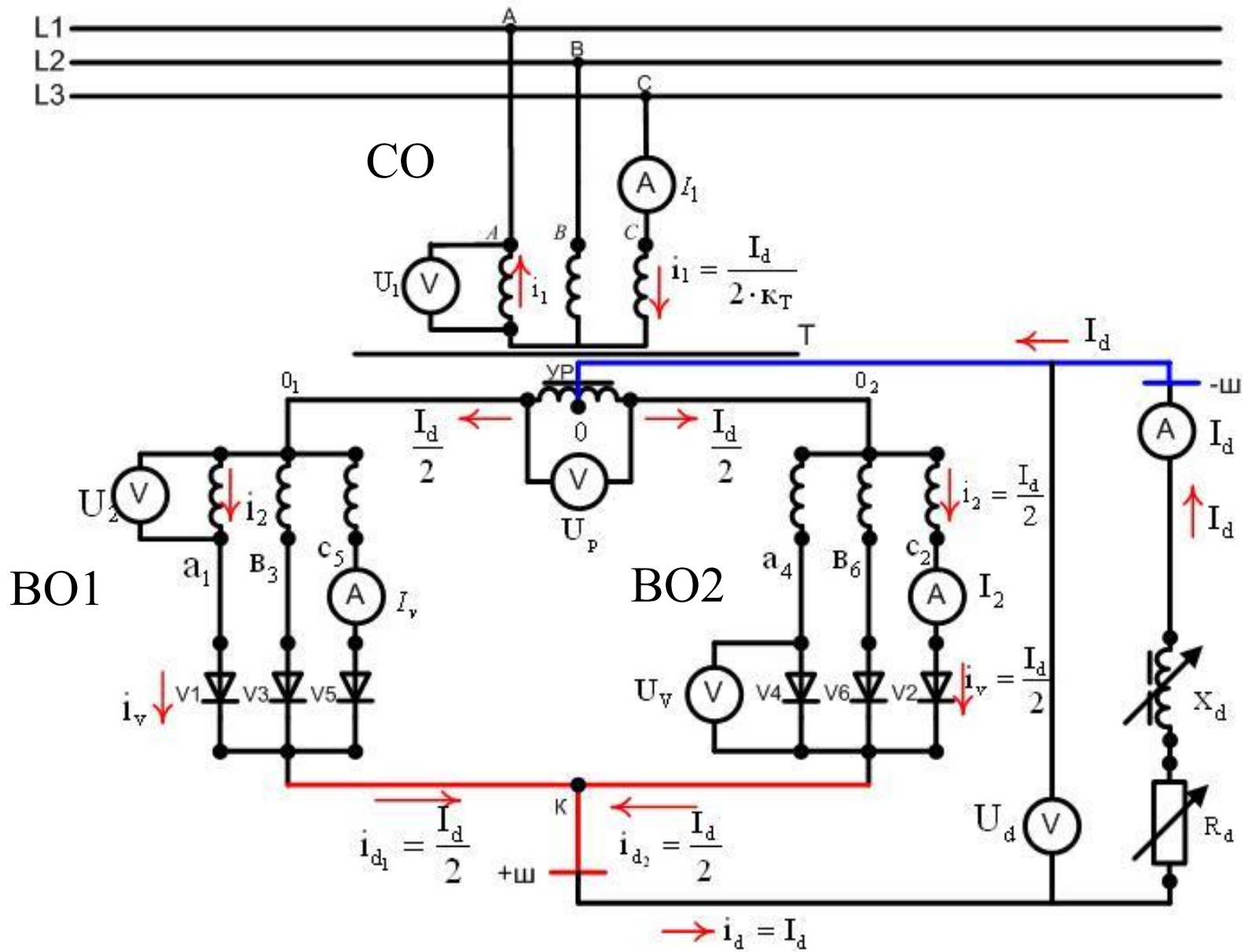


Рисунок 6.3.2 - Шестипульсовая нулевая схема выпрямления «Звезда – две обратные звезды с уравнительным реактором»

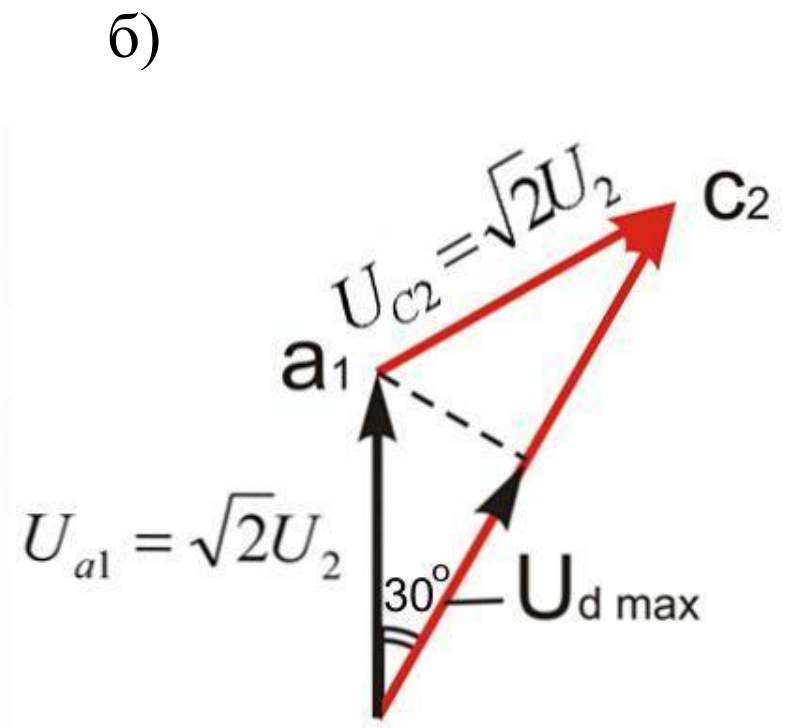
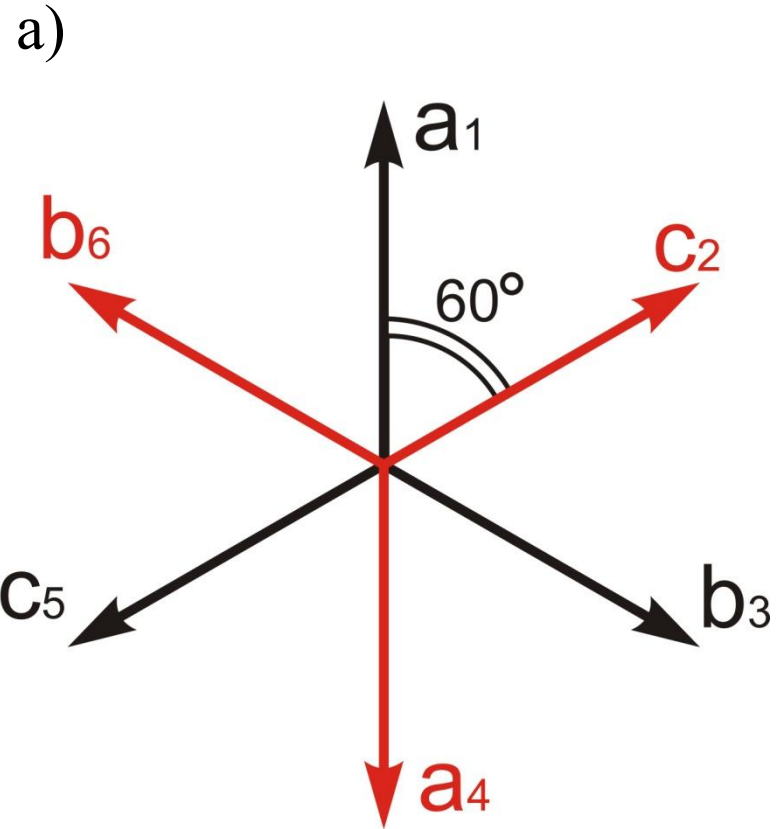
В каждую фазу вторичной обмотки включены диоды, общий катод **К** которых подключается к **+ш**.

Для обеспечения параллельной работы двух диодов прямой и обратной звезды, имеющих в данный момент наибольшее напряжение на аноде, между нулевыми выводами **O<sub>1</sub>** и **O<sub>2</sub>** вторичных обмоток включен уравнивающий реактор **УР**, средний вывод которого **0** подключен к **-ш** (рис.6.3.2).

Электромагнитные процессы и процесс выпрямления трехфазного переменного напряжения в постоянное **U<sub>d</sub>** наглядно иллюстрируются временными диаграммами напряжений и токов в элементах схемы (рис. 6.3.3)

На рисунке 6.3.3,а приведены (построены) временные диаграммы напряжения **U<sub>a1</sub>**, **U<sub>b3</sub>**, **U<sub>c5</sub>** нечетной звезды и **U<sub>c2</sub>**, **U<sub>a4</sub>**, **U<sub>b6</sub>** четной звезды.

### 6.3.2 Векторная диаграмма напряжений



$$U_{d \max} = \sqrt{2}U_2 \cos 30^\circ \quad (6.3.2)$$

Рисунок 6.3.1 – Векторная диаграмма напряжений ВО(а) и амплитуды выпрямленного напряжения  $U_{d \max}$  (б) при работе схемы в режиме  $I_d = I_{d \text{кр}}$

### 6.3.3 Временные диаграммы и порядок их построения

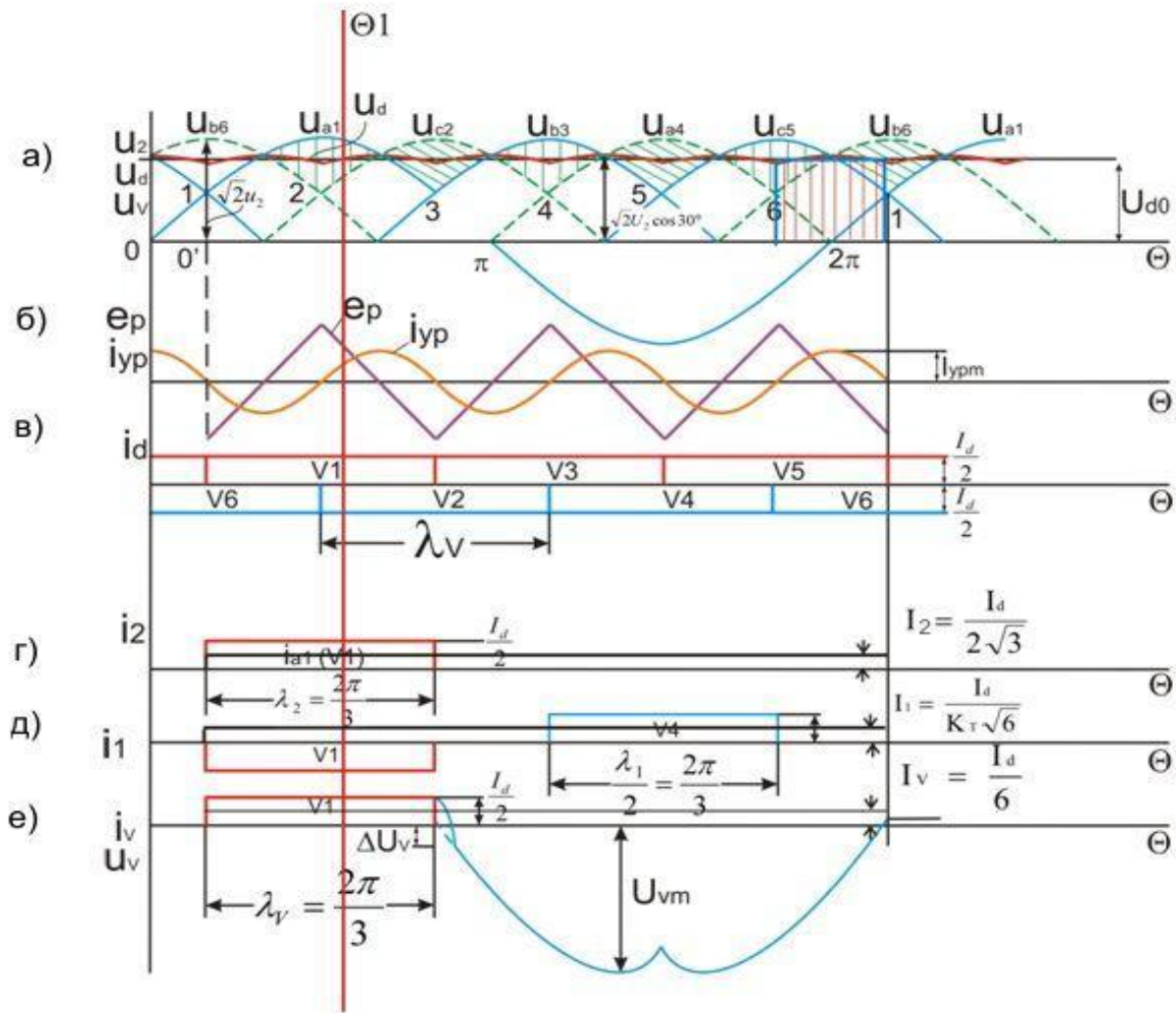


Рисунок 6.3.3 - Временные диаграммы напряжения вторичной обмотки  $u_2$ , выпрямленного напряжения  $u_d$  и тока  $i_d$ , напряжения  $e_p$  и тока  $i_{yp}$  уравнивающего реактора, токов фазы a1 вторичной  $i_2$  и фазы A первичной  $i_1$  обмоток трансформатора, тока  $i_v$  и обратного напряжения диодного плеча  $V_1$   $u_v$  диода шестипульсовой схемы «Звезда – две взаимно обратные звезды с уравнивающим реактором» при  $x_d = \infty$  и  $\gamma = 0$ .

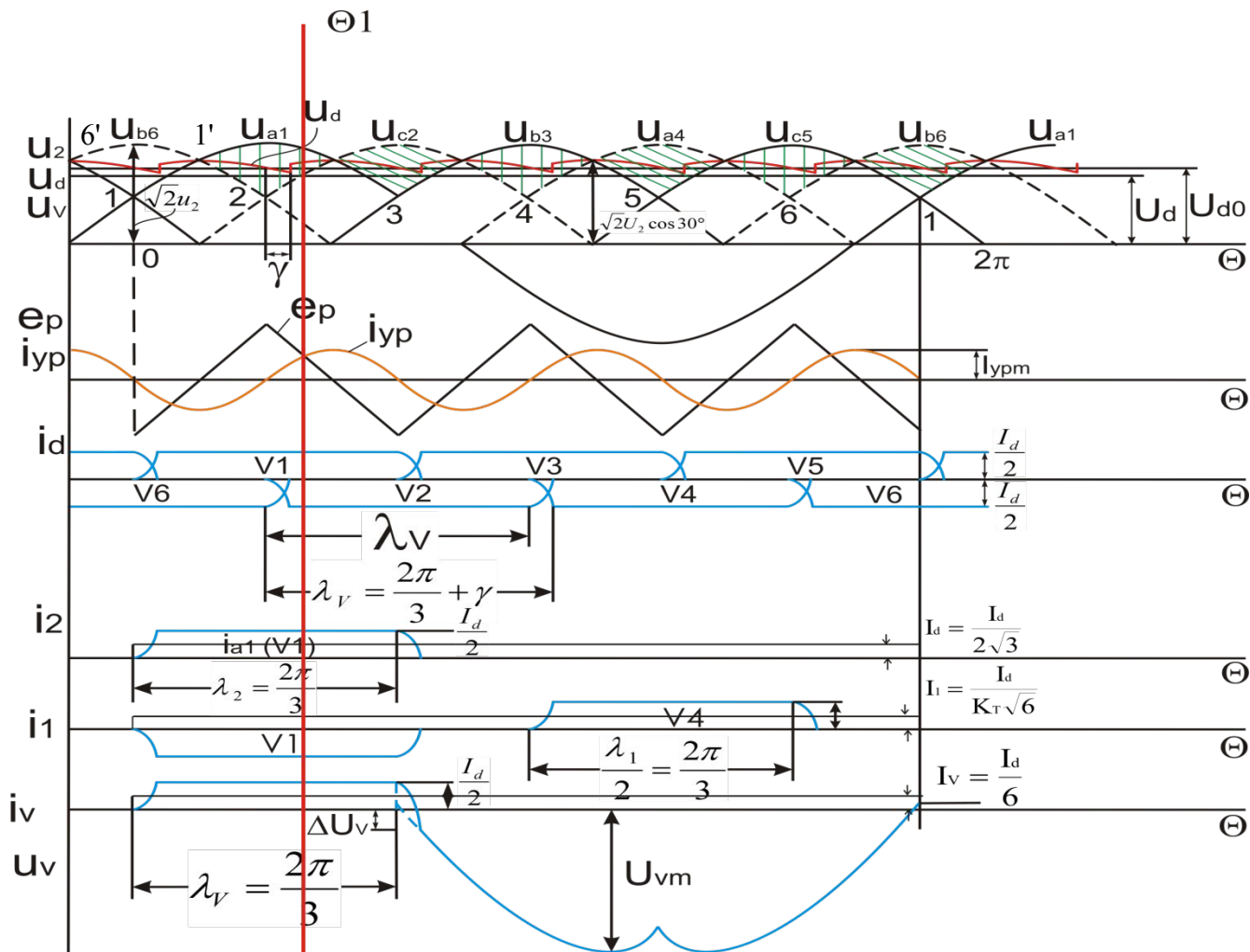


Рисунок 6.3.4 - Временные диаграммы напряжения вторичной обмотки  $u_2$ , выпрямленного напряжения  $u_d$  и тока  $i_d$ , напряжения  $e_p$  и токи  $i_{yp}$  уравнивательного реактора, токов фазы a1 вторичной  $i_2$  и фазы A первичной  $i_1$  обмоток трансформатора, тока  $i_v$  и обратного напряжения диодного плеча  $u_v$  диода шестипульсовой схемы «Звезда – две взаимно обратные звезды с уравнительным реактором» при  $\gamma > 0$

### 6.3.4 Режим работы схемы

При работе схемы возможны четыре режима:

1. Холостой ход, когда  $I_d=0$ . Каждый диод и фаза трансформатор работает независимо в течение  $\lambda_V \approx \frac{2\pi}{6}$ , а мгновенное выпрямленное напряжение изменяется по вершинам  $U_2$  и от точки 6' до 1' оно равно  $u'_d = u_{b6}$ . Амплитуда выпрямленного напряжения в этом режиме равна

$$U'_{d \max} = \sqrt{2}U_2$$

Среднее значение выпрямленного напряжения согласно (6.2.1\*) при  $m=6$  и  $U'_{d \max}$

$$U'_{d0} = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = 1,35U_2 \quad (6.3.3)$$

2.  $0 < I_d < I_{dKP}$ . В этом режиме каждый диод работает независимо в течение  $\lambda_V = \frac{2\pi}{6}$ , а с учетом коммутации  $\lambda'_V = \frac{2\pi}{6} + \gamma$  где  $\gamma$  - угол коммутации тока с диода заканчивающего работу на включившийся

3.  $I_d = I_{dKP}$ , т.е.  $\frac{I_d}{2} = I_{ур\max}$  Режим условного холостого хода. В этом режиме работают параллельно диоды прямой и обратной звезды, имеющие в данный момент максимальное напряжение на аноде. В момент  $\Theta 1$  работают параллельно V1, т.к.  $U_{a1} \rightarrow \max$  в нечетной звезде, и V2, т.к.  $U_{c2} \rightarrow \max$  в четной звезде.

Для обеспечения параллельной работы диодов нечетной и четной звезды, имеющих в данной момент максимальное напряжение на уравнительном реакторе, должно наводиться напряжение  $E_p$ , отмеченное на рис.6.3.3,а ординатами вертикально и наклонно заштрихованных площадок, а на рис.6.3.3,б приведены диаграммы напряжения  $E_p$  и тока  $i_{ур}$ , под действием которого наводится  $E_p$ .

Видно, что частоты напряжения  $E_p$  и тока  $i_{ур}$  имеют тройную частоту по сравнению с частотой питающей сети  $f_{ур} = 3f_c = 3 * 50 = 150$  Гц.



С учетом 6.3.6. Амплитуда выпрямленного напряжения  
равна  $U_{d\max} = \sqrt{2} U_2 \cos 30^\circ$  Эл.

$$U_{d\max} = \sqrt{2} U_2 \cos 30^\circ \text{ Эл.}$$

Среднее значение выпрямленного напряжения при  $m=6$  и  $U_{d\max}$

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{2} U_2 \cos 30^\circ \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = 1,17 U_2$$

Выпрямленное напряжение за период  $2\pi$  имеет шестикратную пульсацию (рис.6.3.3,а).

4.  $I_d > I_{dKP}$ . В этом режиме обеспечивается параллельная работа двух диодов разных звезд, но в момент коммутации тока с диода, заканчивающего работу, на диод вступающий в работу, в течение угла  $\gamma$  одновременно работают 3 диода (рис. 6.3.4)

### 6.3.5 Работа схемы при $I_d = I_{dKP}$

Оказывается, сама схема обеспечивает прохождение тока, если  $I_d/2 > I_{yp\ max}$ . Пусть в момент времени  $\Theta$  работают параллельно  $V1$  и  $V2$  и мгновенная схема имеет вид

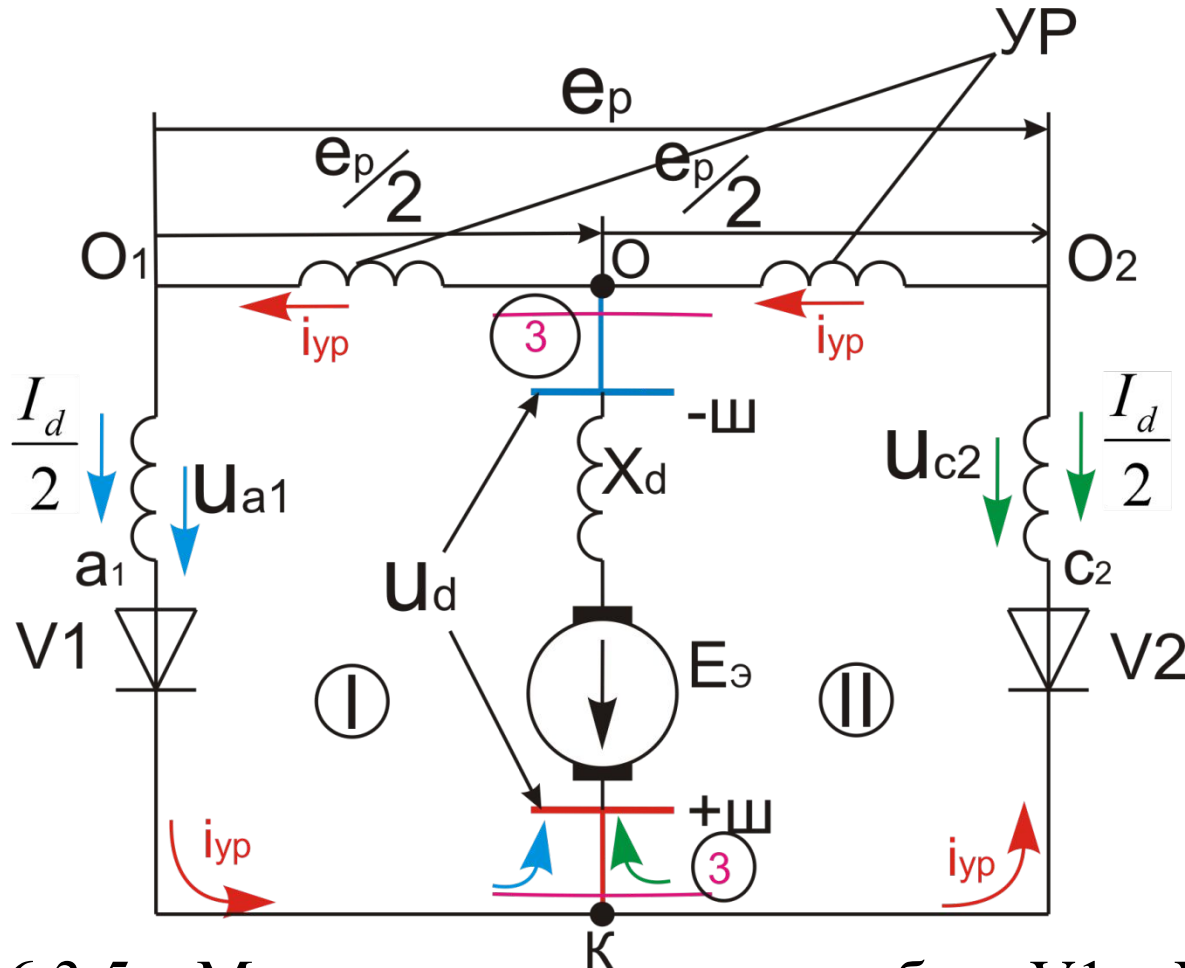


Рисунок 6.3.5 – Мгновенная схема при работе  $V1$  и  $V2$

В этом режиме можно выделить в схеме три рабочих контура:

по контуру  $\textcircled{I}$  протекает ток  $I_d/2$  по цепи  
 $a_1 - V_1 - K - D - X_d - O - O_1 - a_1$ .

по контуру  $\textcircled{II}$  протекает ток  $I_d/2$  по цепи  
 $C_2 - V_2 - D - X_d - O - O_2 - C_2$ .

Работающие диоды можно представить как включенные выключатели, поэтому возникает контур  $\textcircled{3}$ , по которому под действием разности потенциалов  $u_{a_1} - u_{c_2}$  потечет переменный ток  $i_{yp}$  по цепи

$$a_1 - V_1 - K - V_2 - C_2 - O_2 - O - O_1 - a_1.$$

Магнитный поток, создаваемый током  $i_{yp}$  наводит в обмотках  $O_1 - O_2$  ЭДС  $e_p$ . Так как разность анодных напряжений изменяется с тройной частотой по ординатам вертикально и наклонно заштрихованных площадок (рис. 6.3.3,а), то ЭДС  $e_p$  будет иметь тройную частоту (рис. 6.3.3,б)

Рассмотрим мгновенное выпрямленное напряжение при работе V1 и V2.

Из контура  $\textcircled{\text{I}}$  мгновенное значение выпрямленного напряжения равно

$$u_d = u_{a1} - \frac{e_p}{2} \quad (6.3.4)$$

Из контура  $\textcircled{\text{II}}$  мгновенное значение выпрямленного напряжения равно

$$u_d = u_{c2} + \frac{e_p}{2} \quad (6.3.5)$$

После сложения 6.3.4 и 6.3.5 найдем, что мгновенное значение выпрямленного напряжения равно полу сумме напряжений работающих фаз

$$u_d = \frac{u_{a1} + u_{c2}}{2} \quad (6.3.6)$$

В таблице 6.3.1 приведена последовательность работы диодов и напряжение  $u_d$  за период от 0 до  $2\pi$

Таблица 6.3.1 – Последовательность работы диодов за полный период от 0 до  $2\pi$

Период времен между точками	1	2	3	4	5	6	1
Работает диод нечетной звезды	V1		V3		V5		V1
Работает диод четной звезды	V6	V2		V4		V6	
$u_d$	$\frac{u_{a1} + u_{b6}}{2}$	$\frac{u_{a1} + u_{c2}}{2}$	$\frac{u_{c2} + u_{b3}}{2}$	$\frac{u_{b3} + u_{a4}}{2}$	$\frac{u_{a4} + u_{c5}}{2}$	$\frac{u_{c5} + u_{b6}}{2}$	$\frac{u_{a1} + u_{b6}}{2}$

### 6.3.6,а Распределение тока в фазах ВО

В момент  $\Theta 1$  работают параллельно  $V1$  и  $V2$ , поэтому ток в фазе  $a_1$  (рис. 6.3.3,г) и фазе  $c_2$  равны  $I_d/2$

### 6.3.6,б Распределение тока в фазах сетевой обмотки

Примем, что токи  $i_{1A}$ ,  $i_{1B}$ ,  $i_{1C}$  направлены вверх. В момент  $\Theta 1$  по первому закону Кирхгофа для узла электрической цепи

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0 \quad (6.3.7)$$

по второму закону Кирхгофа для магнитной цепи

$$i_{1A} \omega_1 - i_{1C} \omega_1 - \frac{I_d}{2} \omega_2 - \frac{I_d}{2} \omega_2 = 0 \quad (6.3.7)$$

$$i_{1A} \omega_1 - i_{1B} \omega_1 - \frac{I_d}{2} \omega_2 = 0 \quad (6.3.8)$$

Примем число витков первичной и вторичной обмотки равны  $\omega_1 = \omega_2$ ,

Тогда коэффициент трансформации  $k_T = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 1$

$$\left. \begin{array}{l} \text{из (6.2.4) получим } i_{1C} = -2 \frac{I_d}{2} \\ \text{из (6.2.5) получим } i_{1B} = -\frac{I_d}{2} \end{array} \right\} \quad (6.3.10)$$

Подставим из (6.2.6) в (6.2.3) получим  $3i_{1A} = 3I_d/2$

Тогда с учетом (6.2.6)

$$\left. \begin{aligned} i_{1A} &= \frac{I_d}{2} \\ i_{1B} &= 0 \\ i_{1C} &= -\frac{I_d}{2} \end{aligned} \right\} \quad (6.3.11)$$

Если  $K_T \neq 1$ , то токи должны быть разделены на  $K_T$ .

Таким образом в сетевой обмотке ток проходит в фазах, у которых работают одноименные фазы вентиляльной обмотки и токи сетевой и вентиляльных обмоток направлены встречно

### 6.3.7 Основные расчетные соотношения схемы при $I_d = I_{dKP}$

#### Среднее значение выпрямленного напряжения для любой $m$ -пульсовой схемы

Из (6.2.1\*) напряжение  $U_{d0}$  равно 
$$U_{d0} = \frac{U_{d\max} \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}$$

Для шестипульсовой нулевой схемы из рис. 6.3.1

напряжение

$$U_{d\max} = \sqrt{2}U_2 \cos 30^\circ$$

число пульсаций за период  $2\pi$   $m=6$

Подставив значения  $m$  и  $U_{d\max}$  в формулу  $U_{d0}$  получим

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{2}U_2 \cos 30^\circ \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = 1,17U_2 \quad (6.3.1)$$



## Расчетные параметры диодного плеча

Амплитуда обратного напряжения диодного плеча

$$U_{V \max} = U_{2Л \max} = \sqrt{6} \cdot U_2 \quad (6.3.12)$$

С учетом (6.3.I) 
$$U_{V \max} = \frac{\sqrt{6}U_{d0}}{1,17} = 2,09U_{d0} \quad (6.3.II)$$

По  $U_{V \max}$  определяется число последовательно соединенных диодов в рабочем режиме.

Максимальное значение тока диодного плеча

$$I_{V \max} = \frac{I_d}{2} \quad (6.3.III)$$

По  $I_{V \max}$  определяется ток перегрузки  $I_{V \text{пер}}$  и рассчитывается число параллельно включенных диодов в режиме перегрузки

Среднее значение тока диодного плеча 
$$I_V = \frac{1}{3} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{I_d}{6} \quad (6.3.IV)$$

По  $I_V$  рассчитывается число последовательно включенных диодов при токе  $I_{dH}$

# Расчетные параметры обмоток трансформатора

Действующее значение тока ВО определяется из условия равенства нагрева обмотки непрерывно протекающим током  $I_2$  за период  $2\pi$  и реальным током, протекающим через эту обмотку (рис.6.3.3)

$$I_2^2 \cdot 2\pi \cdot r_2 = \left(\frac{I_d}{2}\right) \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot r_2 \quad (6.3.13)$$

откуда 
$$I_2 = \frac{I_d}{2\sqrt{3}} \quad (6.3.V)$$

По  $I_2$  выбирается сечение фаз ВО.

Расчетная мощность, определяющая общие затраты материалов на ВО при  $m_2=6$  с учетом (6.3.I) и (6.3.V)

$$S_2 = 6 \cdot I_2 U_2 = 6 \frac{I_d}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{d0}}{1,17} = 1,48 P_d \quad (6.3.VI)$$

Действующее значение тока СО

$$I_1^2 \cdot 2\pi \cdot r_1 = \left[ \left(\frac{I_d}{K_T \cdot 2}\right)^2 + \left(-\frac{I_d}{K_T \cdot 2}\right)^2 \right] \frac{2\pi}{3} \cdot r_1 \quad (6.3.14)$$

$$I_1 = \frac{I_d}{K_T \sqrt{6}} \quad (6.3.VII)$$

По  $I_1$  выбирается сечение фаз СО

Расчетная мощность всех, определяющая общие затраты активных материалов на фазы СО при  $m_1=3$  с учетом (6.3.I) и (6.3.VII)

$$S_1 = 3 \cdot I_1 \cdot U_1 = 3 \frac{I_d}{K_T \sqrt{6}} \cdot \frac{U_{d0} \cdot K_T}{1,17} = 1,05 P_d \quad (6.3.VIII)$$

Мощность УР  $S_{УР} = 0,07 P_d \quad (6.3.IX)$

Типовая мощность трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{1,48 + 1,05}{2} P_d = 1,26 P_d \quad (6.3.X)$$

Суммарная типовая мощность трансформатора и УР

$$S_{T\Sigma} = S_T + S_{УР} = 1,33 P_d \quad (6.3.XI)$$

Выводы: 1. Основные недостатки  
2. Достоинства

## Основные достоинства:

Все диодные плечи находятся под одним потенциалом, поэтому при применении многоанодных ртутных выпрямителей упрощается изоляция системы охлаждения и поддержания вакуума.

## Основные недостатки:

1. Большая расчетная и типовая мощность трансформатора, а следовательно большой расход активных материалов на конструкцию трансформатора;
2. Наличие УР требует дополнительных затрат активных материалов на конструкцию;
3. Возникновение скачка выпрямленного напряжения (пика холостого хода) с  $U_{d0}=1.17U_2$  до  $U_0'=1,35U_2$  при уменьшении тока с  $I_{d\text{кр}}$  до  $I_d=0$  (рис. 6.3.6)  
Это влияет отрицательно на работу машин ЭПС и освещения вагонов.
4. Для устранения скачка выпрямленного напряжения необходимо устанавливать утроители частоты.

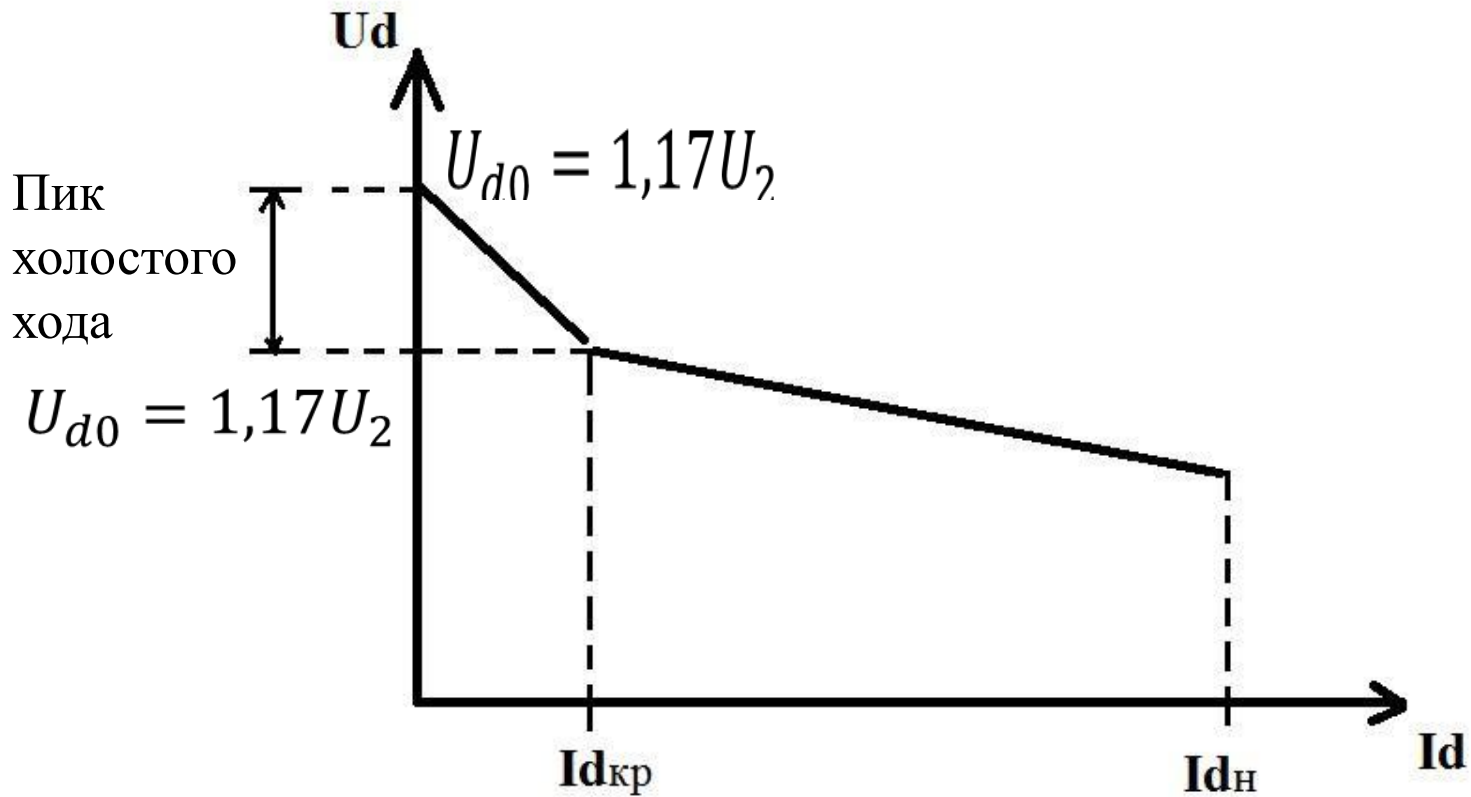


Рисунок 6.3.6 – Внешняя характеристика шести пульсовой схемы звезда – две обратных звезды с уравнительным реактором