

## 6.4 Двенадцатипульсовые схемы выпрямления

### 6.4.1 Типы двенадцатипульсовых схем и их описание

- |                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| 1. 12п. последовательного типа | 12посл (рис.6.4.1)  |
| 2. 12п. параллельного типа     | 12п пар (рис.6.4.2) |

### 6.4.2 Условия получения 12 пульсового режима выпрямления

Для получения 12-пульсового режима выпрямления необходимо выполнить 2 условия:

1. Угол сдвига между одноименными линейными напряжениями ВО “У” и ВО “Д” должен составлять  $30^\circ$  эл;
2. Выпрямленные напряжения  $U_{d1}$ ,  $U_{d2}$  выпрямительных мостов UD1 и UD2 должны быть равны.

Первое условие достигается тем, что вентиляные обмотки трансформатора соединены в “У” и “Д”, векторные диаграммы которых приведены соответственно на рисунке 6.4.3.



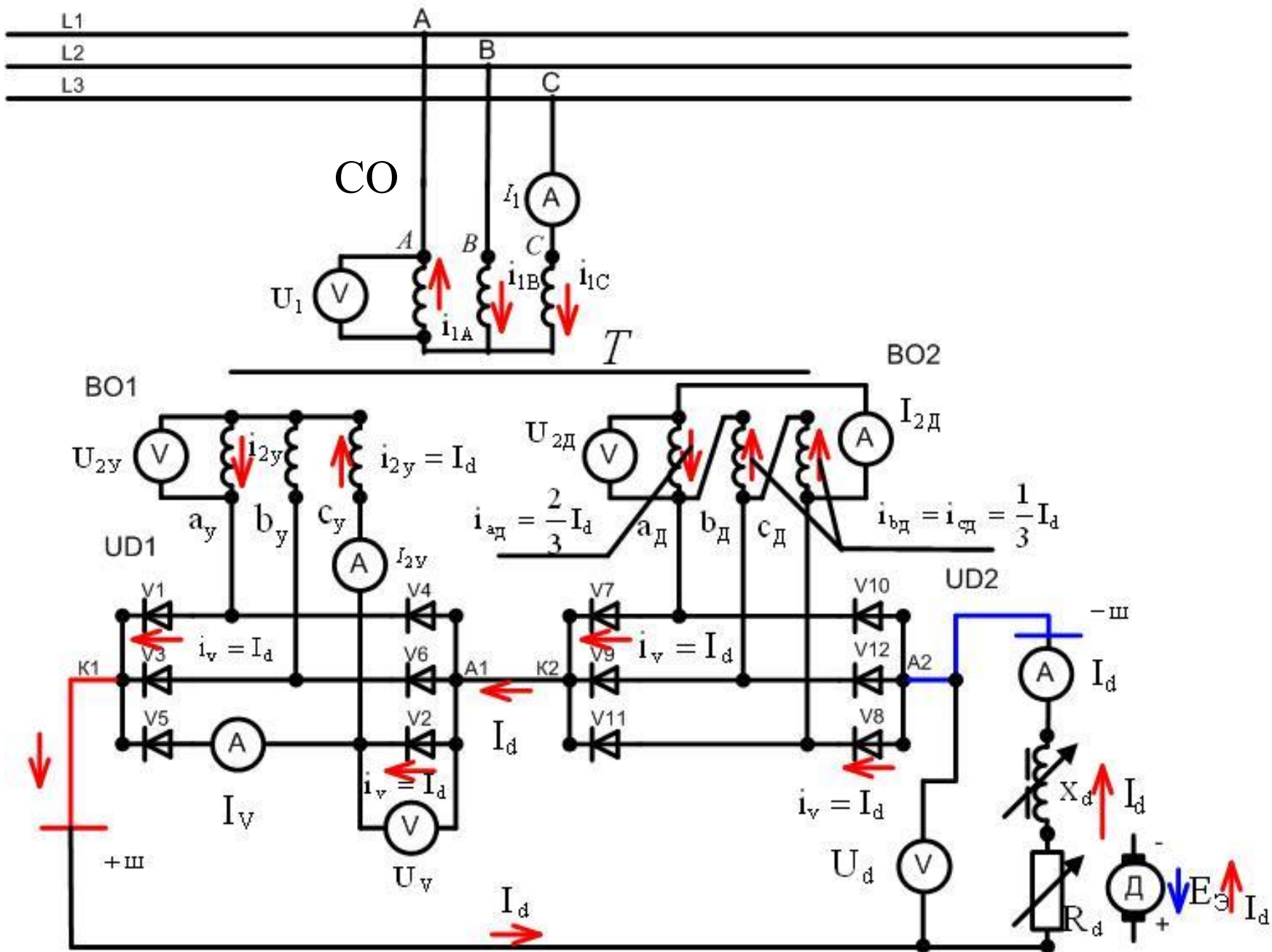


Рисунок 6.4.1 – Схема 12П выпрямителя последовательного типа

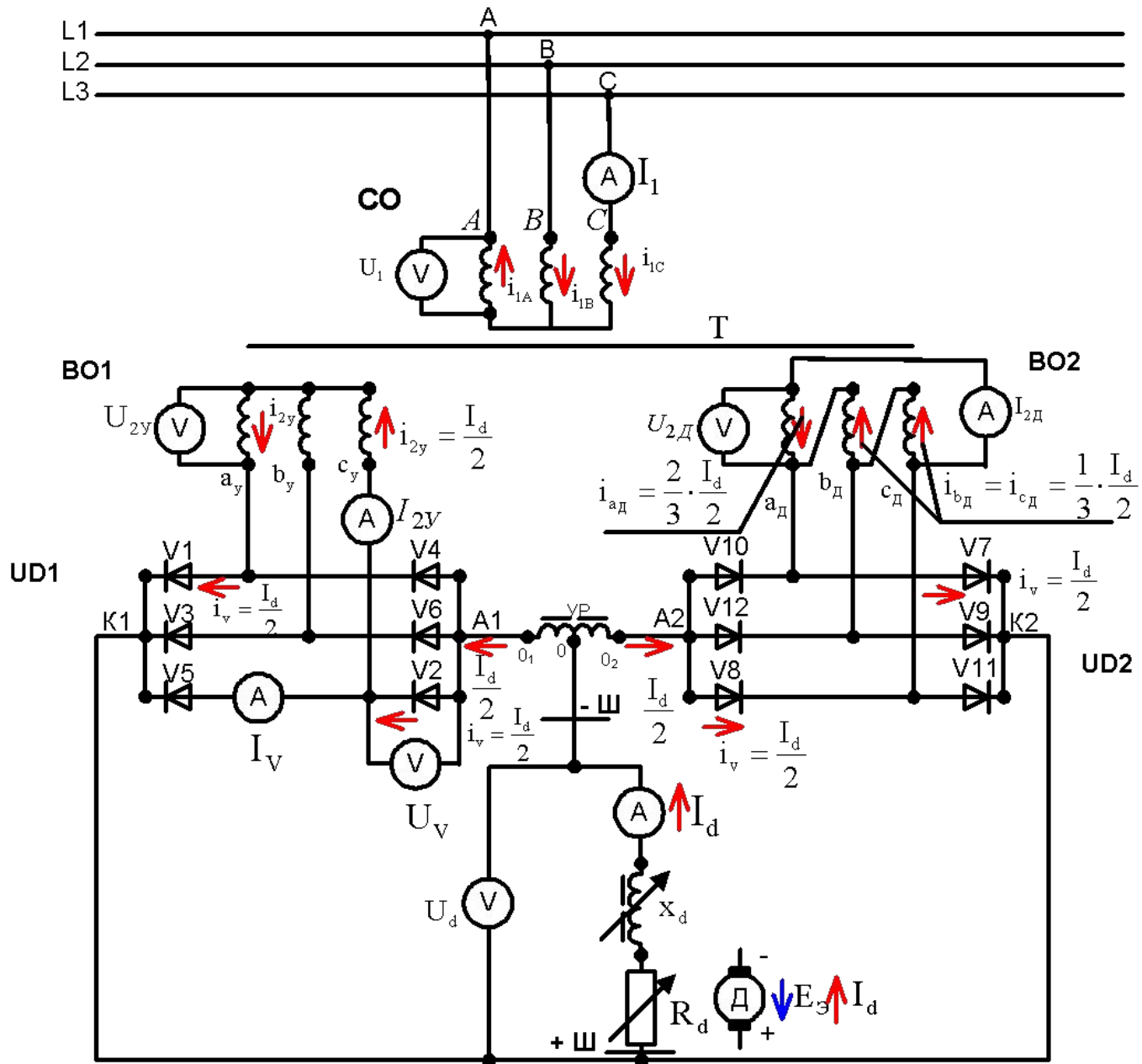


Рисунок 6.4.2 – Схема 12П выпрямителя параллельного типа

### 6.4.3 Отличительные особенности схем

а) 12п. посл.

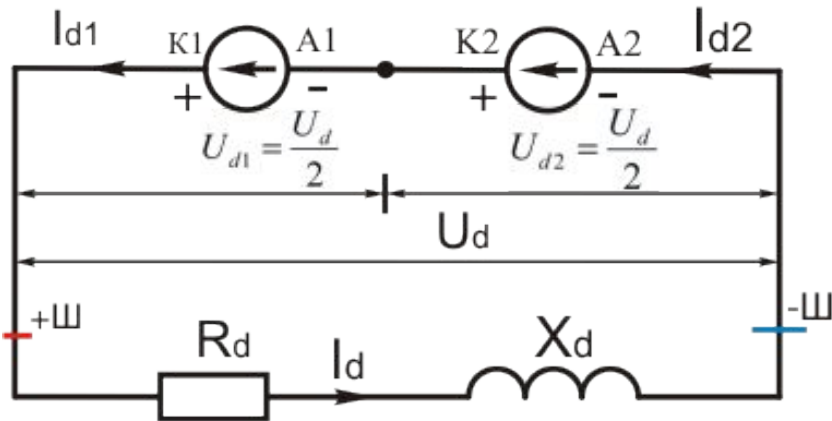
б) 12п. пар.

1. По включению UD1 и UD2

$$U_d = U_{d1} + U_{d2},$$

$$U_{d1} = U_{d2} = \frac{U_d}{2}, \quad (6.4.4)$$

$$I_{d1} = I_{d2} = I_d$$



$$U_{d1} = U_{d2} = U_d \quad (6.4.5)$$

$$I_{d1} = I_{d2} = \frac{I_d}{2}$$

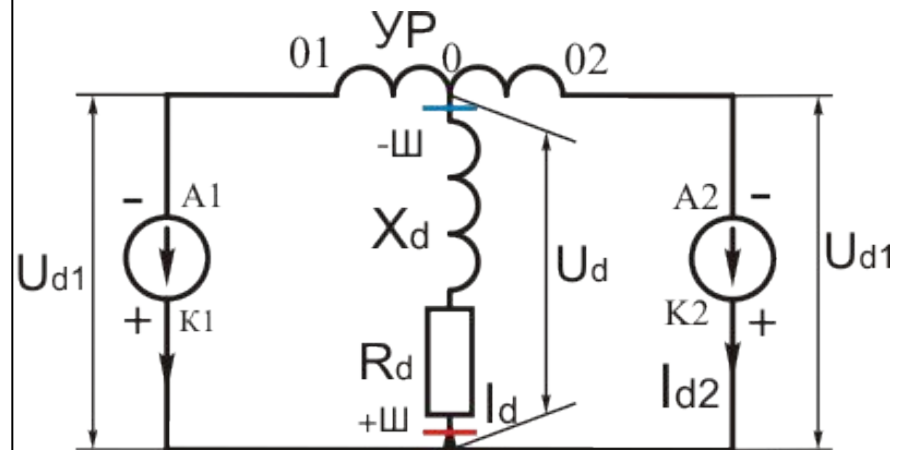


Рисунок 6.4.3 - Схемы замещения 12-пульсовых выпрямителей последовательного (а) и параллельного (б) типов

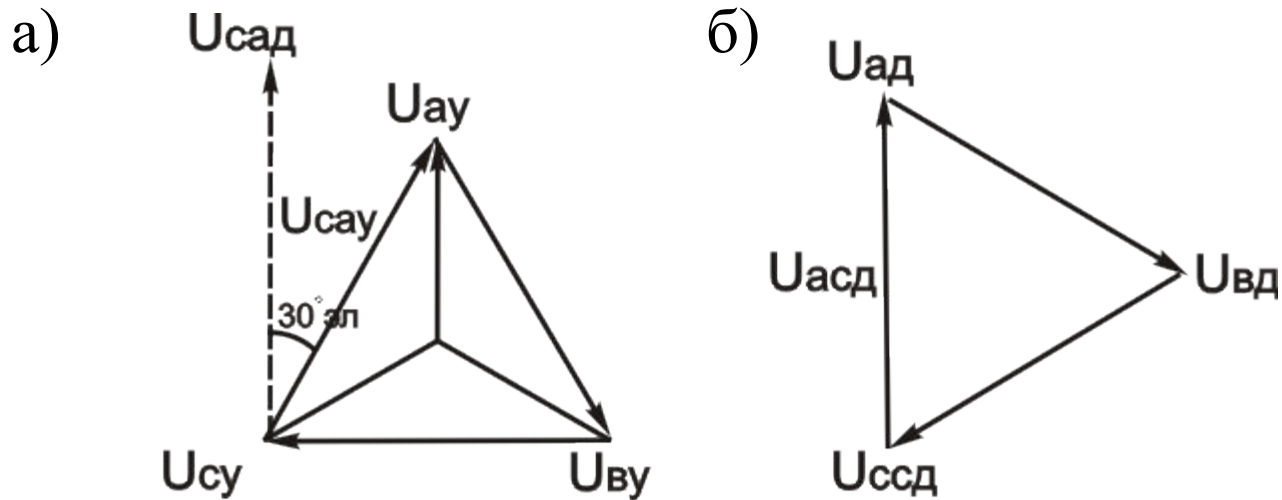


Рисунок 6.4.4 - Векторные диаграммы напряжений ВО «У» (а) и ВО «Д» (б).

Чтобы  $U_{d1} = U_{d2}$  необходимо  $U_{2ЛУ} = U_{2ЛД}$ , (6.4.1)

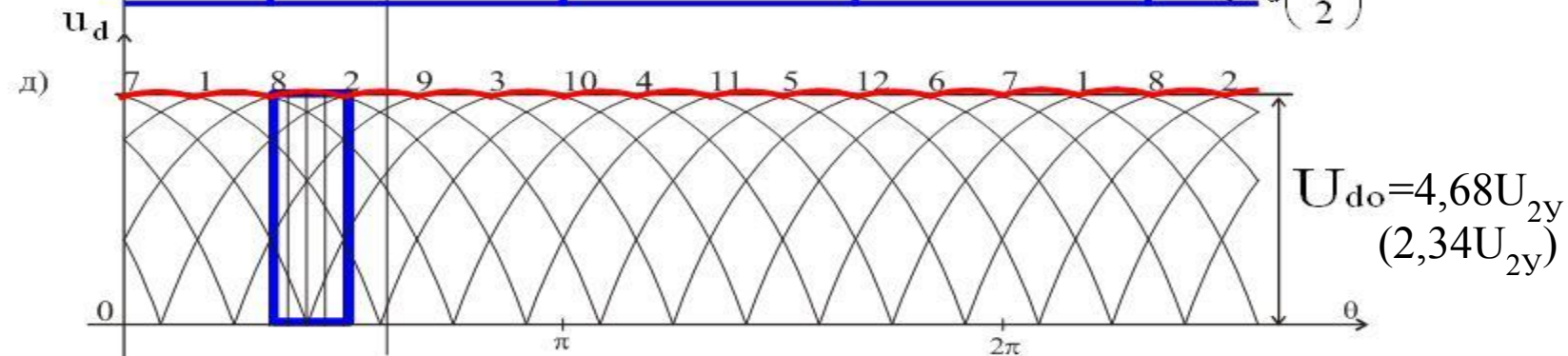
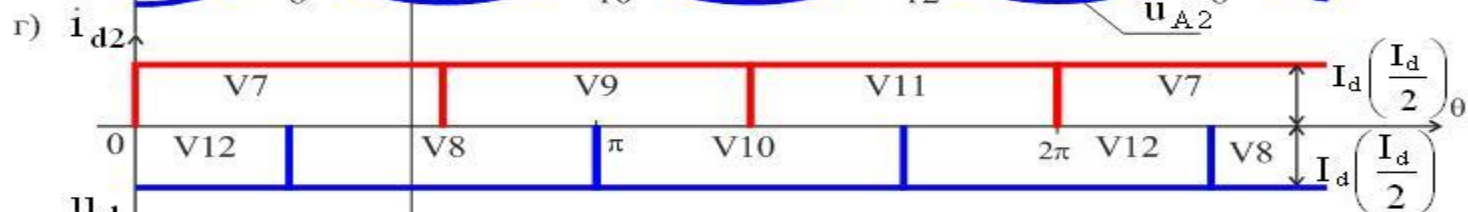
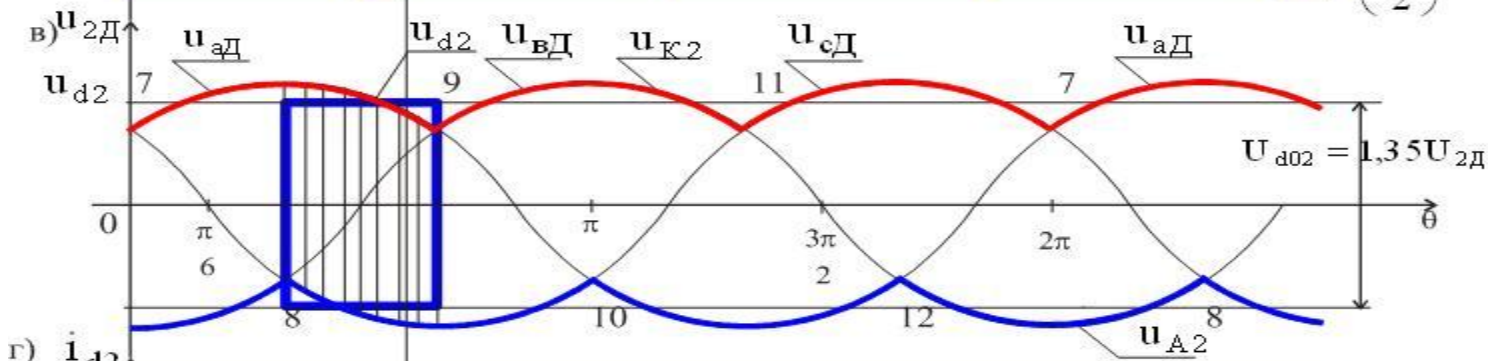
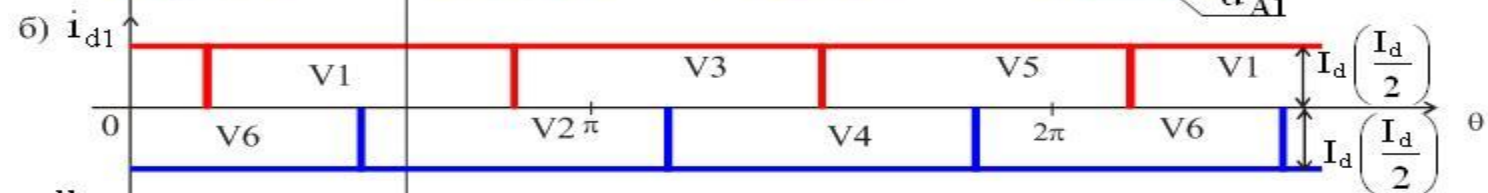
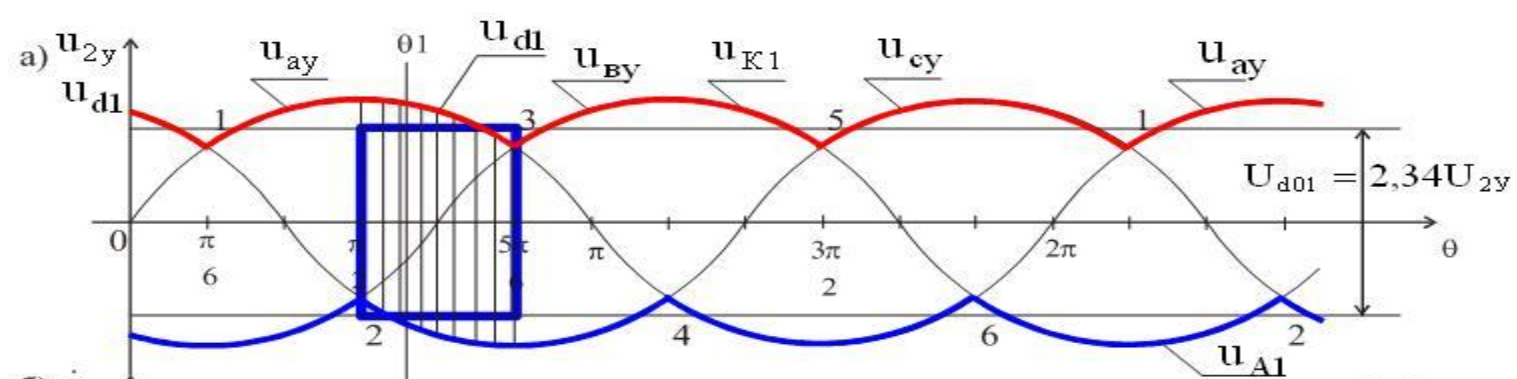
Но в «У»  $U_{2ЛУ} = \sqrt{3}U_{2ФУ}$ , (6.4.2)

а в «Д»  $U_{2ЛД} = U_{2ФД}$ .

Подставив из (6.4.2) в (6.4.1), найдем связь действующего значения напряжения и числа витков ВО «У» и «Д»

$$U_{2ЛД} = \sqrt{3}U_{2ФУ}, \quad (6.4.3)$$

$$\omega_{2Д} = \sqrt{3}\omega_{2У}$$



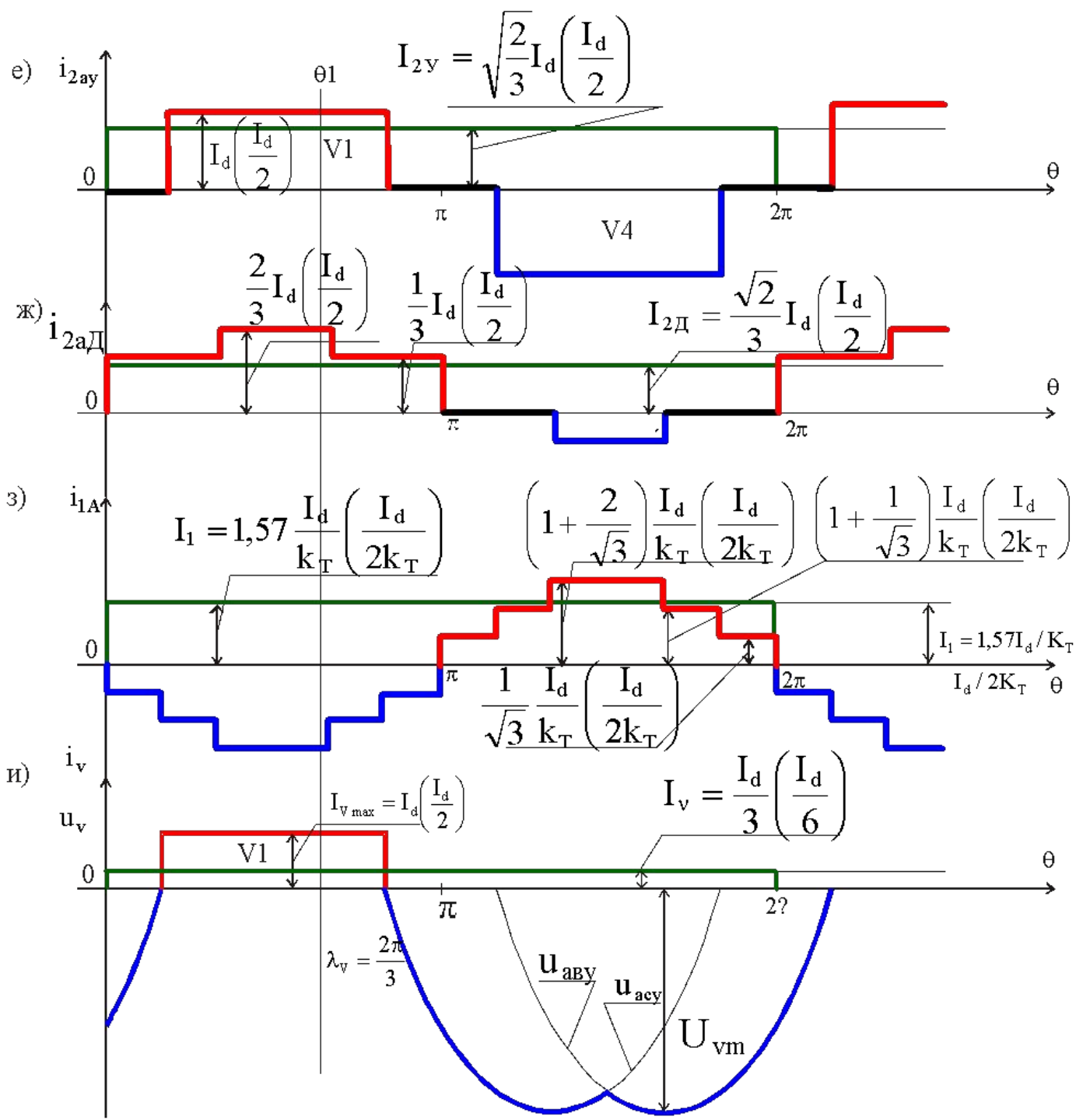




Рисунок 6.4.5 - Временные диаграммы напряжений  $u_{2д}$  и тока  $i_{2д}$  ВО"Д", выпрямленного напряжения  $u_{d2}$  и тока  $i_{d2}$  выпрямительного моста UD2, напряжений  $u_{2у}$  и тока  $i_{2у}$ , ВО"У", выпрямленного напряжения  $u_{d1}$  и тока  $i_{d1}$  выпрямительного моста UD1, результирующего выпрямленного напряжения  $u_d$ , тока  $i_1$  первичной обмотки, тока  $i_v$  и обратного напряжения  $u_v$  диодного плеча (12П посл и 12П пар схемы) при  $\gamma=0$ .

\* Примечание

Параметры, указанные на диаграммах в скобках относятся к двенадцатипульсовой параллельной схеме (12п пар)

## 6.4.5 Теория работы схемы

Примем, что напряжение в питающей сети, а следовательно во вторичных обмотках синусоидальное

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \Theta \quad (6.4.6)$$

Построим временные диаграммы  $u_{2у}$ ,  $u_{2д}$  с учетом сдвига их на  $30^\circ$  эл.

Рассмотрим работу схемы в момент  $\Theta_1$

UD1 работает V1, т.к.

$$u_{ay} \rightarrow \max$$

и V2, т.к.

$$u_{cy} \rightarrow \min$$

Потенциал K1 принимает значение

$$u_{K1} = u_{ay}$$

Потенциал A1 принимает значение

$$u_{A1} = u_{cy}$$

Мгновенное значение выпрямленного напряжения

$$u_{d1} = u_{K1} - u_{A1} = u_{ay} - u_{cy}$$

$$(6.4.7)$$

Аналогично в UD2 работает V7, т.к.

V8, т.к.

$$u_{ад} \rightarrow \max$$

$$u_{сд} \rightarrow \min$$

Потенциал K2 принимает значение

$$u_{K2} = u_{ад}$$

Потенциал A2 принимает значение

$$u_{A2} = u_{сд}$$

Мгновенное значение выпрямленного напряжения

$$u_{d2} = u_{K2} - u_{A2} = u_{ад} - u_{сд} \quad (6.4.8)$$

Таблица 6.4.1 - Последовательность работы диодов UD1 и мгновенное значение  $u_d$  за полный период от 0 до  $2\pi$

Период времени, между точками	1	2	3	4	5	6	1
Работает диод катодной группы	$V1$		$V3$		$V5$		$V1$
Работает диод анодной группы	$V6$	$V2$		$V4$		$V6$	
$u_K$	$u_{aY}$		$u_{eY}$		$u_{cY}$		$u_{aY}$
$u_A$	$u_{eY}$	$u_{cY}$		$u_{aY}$		$u_{eY}$	
$u_d$	$u_{aeY}$	$u_{acY}$	$u_{ecY}$	$u_{eaY}$	$u_{caY}$	$u_{ceY}$	$u_{aeY}$

Таблица 6.4.2 - Последовательность работы диодов UD2 и мгновенные значения выпрямленного напряжения за полный период от 0 до  $2\pi$

Период времени между точками	7	8	9	10	11	12
Работает диод катодной группы	$V7$		$V9$		$V11$	
Работает диод анодной группы	$V12$	$V8$		$V10$		$V12$
Мгновенное значение $u_{d2}$	$u_{aeD}$	$u_{acD}$	$u_{eaD}$	$u_{eaD}$	$u_{caD}$	$u_{ceD}$
Ток в фазе $a_D$	$\frac{1}{3}I_d \downarrow$	$\frac{2}{3}I_d \downarrow$	$\frac{1}{3}I_d \downarrow$	$\frac{1}{3}I_d \uparrow$	$\frac{2}{3}I_d \uparrow$	$\frac{1}{3}I_d \uparrow$
Ток в фазе $e_D$	$\frac{2}{3}I_d \uparrow$	$\frac{1}{3}I_d \uparrow$	$\frac{1}{3}I_d \downarrow$	$\frac{2}{3}I_d \downarrow$	$\frac{1}{3}I_d \downarrow$	$\frac{1}{3}I_d \uparrow$
Ток в фазе $c_D$	$\frac{1}{3}I_d \downarrow$	$\frac{1}{3}I_d \uparrow$	$\frac{2}{3}I_d \uparrow$	$\frac{1}{3}I_d \uparrow$	$\frac{1}{3}I_d \downarrow$	$\frac{2}{3}I_d \downarrow$

Примечание: в схеме параллельного типа вместо  $I_d$  (подставлять  $I_d/2$ )

## 6.4.6 Особенности распределения тока в фазах ВО2

В ВО2 соединенной в Д в любой момент  $\Theta 1$  ток проводят все фазы  $a_d, b_d, c_d$ .

Ток распределяется обратно пропорционально сопротивлению цепи тока.

В момент времени  $\Theta 1$ , когда работают V7 и V8, токи  $i_{ад} = \frac{2}{3} I_d$  и  $i_{bd} = i_{cd} = \frac{1}{3} I_d$ .

Таким образом, ток в фазе начало и конец которой подключен к работающим диодам, равен  $\frac{2}{3} I_d$ , а в остальных фазах  $\frac{1}{3} I_d$ .

**Примечание:** В 12П пар. схеме вместо  $I_d$  подставлять  $\frac{I_d}{2}$

## Распределение тока в фазах СО

Мгновенное значение токов в фазах СО формируется током ВО «У» и ВО «Д» и равен

$$i_1 = - \left\{ \frac{i_{2Y}}{K_{TY}} + \frac{i_{2D}}{K_{TD}} \right\}, \quad (6.4.9)$$

где  $K_{TY}$  – коэффициент трансформации обмотки звезда «У»

$$K_{TY} = \frac{U_1}{U_{2Y}}, \quad (6.4.10)$$

$K_{TD}$  – коэффициент трансформации обмотки треугольник «Д»

$$K_{TD} = \frac{U_1}{U_{2D}} = \frac{U_1}{\sqrt{3}U_{2Y}} = \frac{K_{TY}}{\sqrt{3}} \quad (6.4.10)$$

С учетом (6.4.10)

$$i_1 = - \left[ i_{2Y} + i_{2D} \sqrt{3} \right] \frac{1}{K_{TY}} \quad (6.4.11)$$

По данным таблиц 1 и 2 с учетом (6.4.11) построим диаграммы  $i_d$ ,  $i_{2Y}$ ,  $i_{2D}$ ,  $i_1$ .

## 6.4.7 Основные расчетные соотношения

### Среднее значение выпрямленного напряжения

По аналогии с разделом 6.4.3 с учетом соотношений (6.4.4) и (6.4.5) рассмотрим основные расчетные соотношения и их вывод.

Из 6.4.2 для 6 п м известно

$$U_{d0}^{(6)} = 2,34 \cdot U_{2y}$$

Тогда

для схемы 12п посл

$$\begin{aligned} U_{d0} &= U_{d0_1} + U_{d0_2} = \\ &= 2U_{d0}^{(6)} = 4,68U_{2y} \end{aligned}$$

(6.4.I)

для схемы 12п пар

$$\begin{aligned} U_{d0} &= \frac{U_{d0_1} + U_{d0_2}}{2} = \\ &= U_{d0}^{(6)} = 2,34U_{2y} \end{aligned}$$

(6.4.I')



## Расчетные параметры диодного плеча

для схемы 12п посл

$$U_{v \max} = U_{2\dot{E} \max} = \sqrt{3} \left( \sqrt{2} U_{2y} \right) = \sqrt{6} U_{2y} \quad (6.4.II)$$

с учетом (6.4.I)

$$U_{v \max} = \frac{\sqrt{6} U_{d0}}{4,68} = 0,529 U_{d0} \quad (6.4.II)$$

для схемы 12п пар

$$U_{v \max} = \sqrt{6} U_{2y} \quad (6.4.II)'$$

с учетом (6.4.I')

$$U_{v \max} = \frac{\sqrt{6} U_{d0}}{2,34} = 1,045 U_{d0} \quad (6.4.II)'$$

Максимальное значение тока диодного плеча

$$I_{v \max} = I_d \quad (6.4.III)$$

$$I_{v \max} = \frac{I_d}{2} \quad (6.4.III)'$$

Среднее значение тока диодного плеча

$$I_v = \frac{I_d}{3} \quad (6.4.IV)$$

$$I_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{I_d}{6} \quad (6.4.IV)'$$

# Расчетные параметры обмоток трансформатора

Действующее значение тока ВО1 “У”

$$I_{2y} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left[ I_d^2 \cdot \frac{2\pi}{3} \right] \cdot 2} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (6.4.V) \quad \left| \quad I_{2y} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{I_d}{2} \quad (6.4.V)' \right.$$

Аналогично из временной диаграммы  $i_{2Д}$  действующее значение тока ВО2 “Д” равно:

$$I_{2\ddot{A}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \left( \frac{1}{3} I_d \right)^2 \frac{2\pi}{6} + \left( \frac{2}{3} I_d \right)^2 \frac{2\pi}{6} + \left( \frac{1}{3} I_d \right)^2 \frac{2\pi}{6} \right] \cdot 2} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (6.4.VI) \quad \left| \quad I_{2\ddot{A}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{I_d}{2} \quad (6.4.VI)' \right.$$

Из диаграммы  $i_1$  действующее значение тока  $I_1$  СО равно:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left[ 2 \left( \frac{I_d}{K_T} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{\pi}{6} + 2 \left( \frac{I_d}{K_T} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \right)^2 \frac{\pi}{6} + 2 \left( \frac{I_d}{K_T} \left( 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \right)^2 \frac{\pi}{3} \right] \cdot 2} = 1,577 \frac{I_d}{K_T} \quad (6.4.VII) \quad \left| \quad I_1 = 1,577 \cdot \frac{I_d}{2K_T} \quad (6.4.VII)' \right.$$

## Расчетная мощность вентиляльных обмоток

Расчетная мощность всех фаз ВО1 «У» и ВО «Д» равна

12п посл

12п пар

$$S_2 = S_{2y} + S_{2д} = 2 \cdot S_{2y} = 2 \cdot m_{2y} \cdot U_{2y} \cdot I_{2y}$$

После подстановки значений  $U_2$  из формул (6.4.1) и (6.4.1') и  $I_{2y}$  из (6.4.5) и (6.4.5') и  $I_{2д}$  из (6.4.6) и (6.4.6') получим

$$S_2 = 2 \cdot 3 \cdot \frac{U_{d0}}{4,68} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d = 1,047P_d \quad \left| \quad S_2 = 2 \cdot 3 \cdot \frac{U_{d0}}{2,34} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d / 2 = 1,047P_d$$

(6.4.VIII)

(6.4.VIII)'

## Расчетная мощность СО

Расчетная мощность всех фаз СО равна

$$S_1 = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 = 3 \cdot \frac{1,57I_d}{K_T} \cdot \frac{K_T \cdot U_{d0}}{4,68} = 1,012P_d \quad (6.4.IX)$$
$$S_1 = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 = 3 \cdot \frac{1,57I_d}{2K_T} \cdot \frac{K_T \cdot U_{d0}}{2,34} = 1,012P_d \quad (6.4.IX)'$$

## Мощность УР

$$S_{ур} = 0 \quad (6.4.X)$$

$$S_{ур} = 0,02P_d \quad (6.4.X)'$$

Полная типовая мощность трансформатора с учетом  
уравнительного реактора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,029P_d \quad (6.4.XI)$$

$$S_T = (1,029 + 0,02)P_d \quad (6.4.XI)'$$

Таблица 6.4.3 - Основные расчетные соотношения.

	12п. посл	12п. пар.
$U_{d0}$	$U_{d01} + U_{d02} = 4,68U_{2Y}$	$U_{d0} = \frac{U_{d01} + U_{d02}}{2} = 2,34U_{2Y}$
$U_{V \max}$	$\sqrt{6}U_{2Y}$ или $0,525U_{d0}$	$\sqrt{6}U_{2Y}$ или $1,045U_{d0}$
$I_{V \max}$	$I_d$	$I_d/2$
$I_V$	$I_d/3$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{I_d}{6}$
$I_{2Y}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}I_d$	$\sqrt{\frac{2}{3}}I_d/2$
$I_{2Д}$	$\frac{\sqrt{2}}{3}I_d$	$\frac{\sqrt{2}}{3}I_d/2$
$S_{2Y}, S_{2Д}$	$3I_2, U_2 = 0,52P_d$	$0,52P_d$
$I_1$	$1,577 \frac{I_d}{\kappa_r}$	$1,577 \frac{I_d}{2\kappa_r}$
$S_1$	$3 \cdot I_1 \cdot U_1 = 1,577 \frac{I_d}{\kappa_r} \times$ $\times \kappa_r \cdot \frac{U_{D0}}{4,68} \cdot 3 = 1,012P_d$	$3 \cdot 1,577 \frac{I_d}{2\kappa_r} \cdot \frac{\kappa_r \cdot U_{d0}}{2,34} =$ $= 1,012P_d$
$S_T$	$1,029P_d$	$1,049P_d$