

7.4 Двенадцатипульсовые выпрямительно-инверторные преобразователи

7.4.1 Схемы и техническая характеристика ВИП

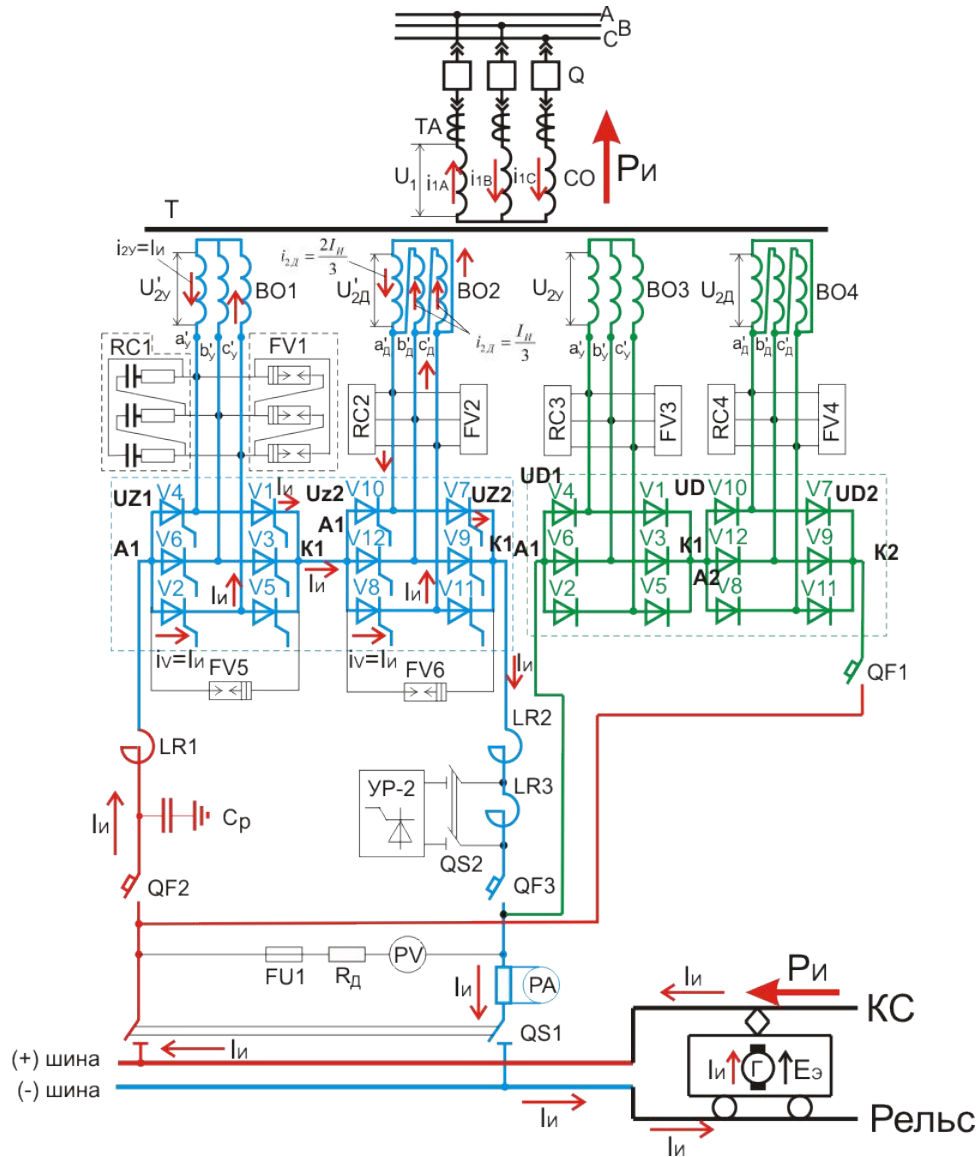


Рисунок 7.4.1 – Принципиальная схема 12-пульсового ВИП-3 последовательного типа с отдельными вторичными обмотками для инвертора BO1, BO2 и выпрямителя BO3, BO4

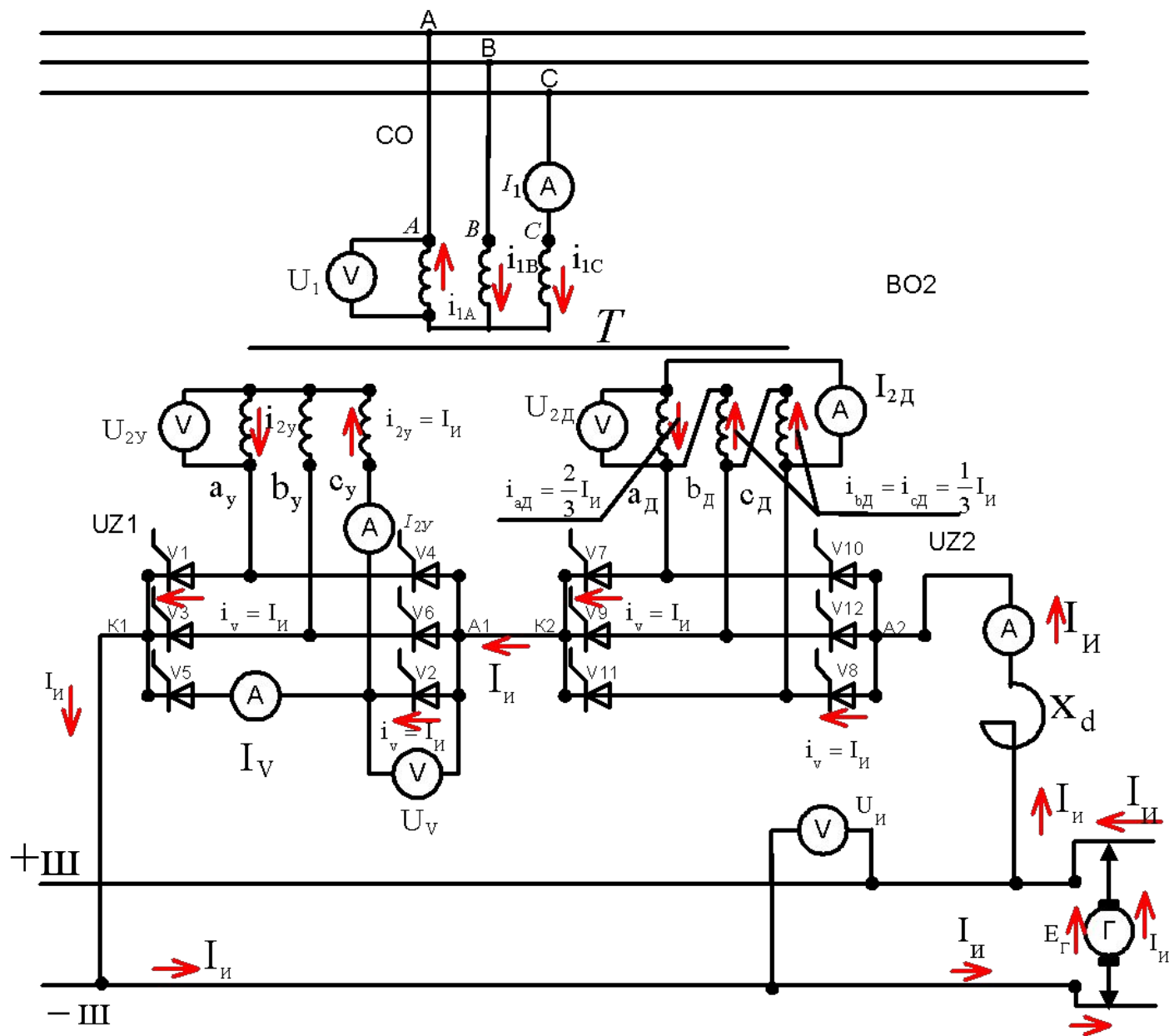


Рис. 7.4.1, а – Схема 12 П инвертора последовательного типа

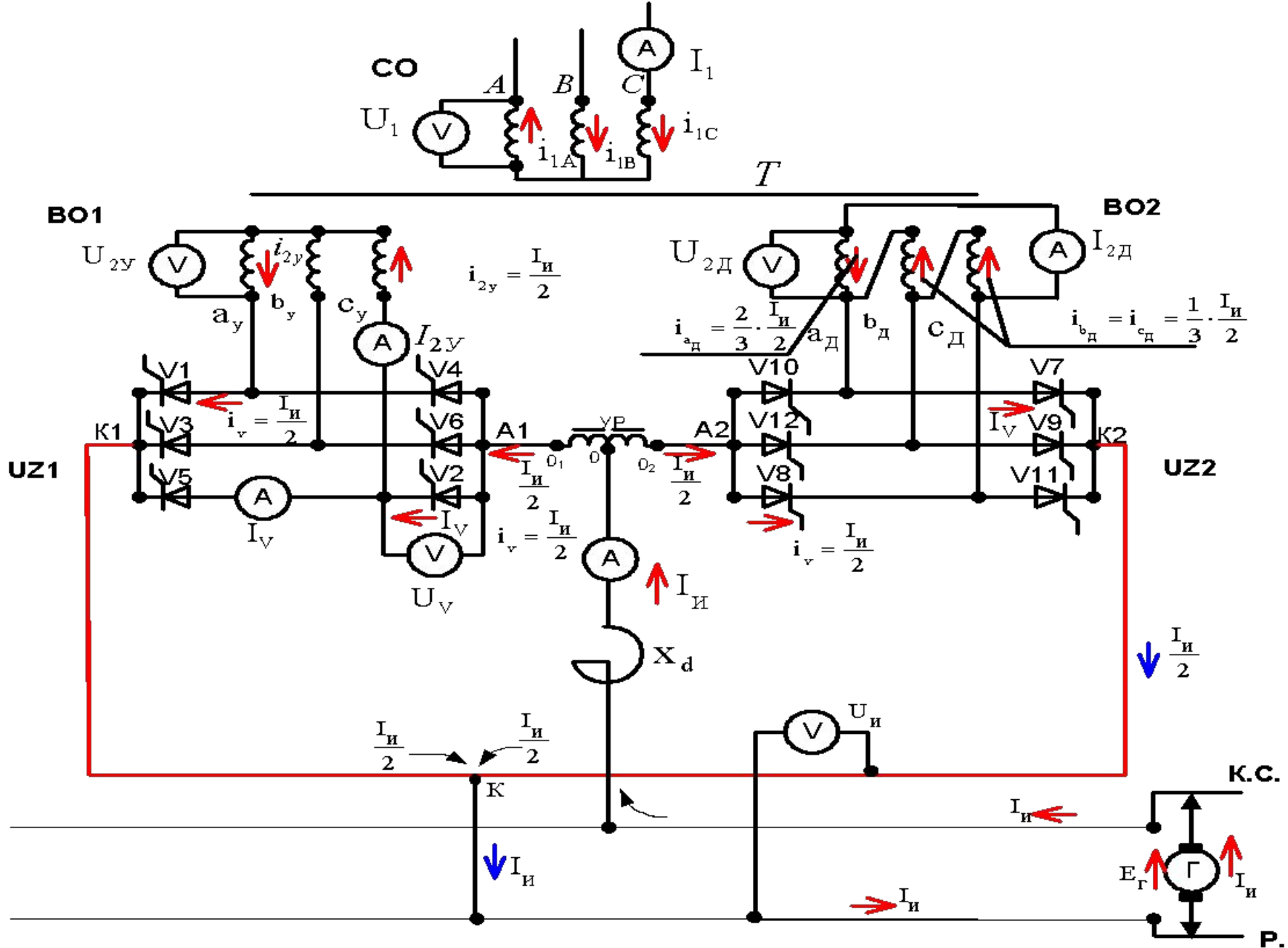


Рисунок 7.4.1, б – Схема 12 П инвертора параллельного типа

1. Преобразовательный трансформатор

T – трансформатор ТРДТП-20000/10И (особенности его конструктивного выполнения)

СО – соединена в «У» или «Д» выполнена на

$$U_{1H} = \frac{10}{\sqrt{3}}, \text{ кВ}$$

$$I_1 = \frac{604}{357}, \text{ А}$$

Выпрямительная часть

ВО3 – соединена в «У» выполнена на

$$U_{2Y} = 755, \text{ В}$$

$$I_{2Y} = 2610, \text{ А}$$

ВО4 – соединена в «Д» выполнена на

$$U_{2D} = 1310, \text{ В}$$

$$I_{2D} = \frac{2610}{\sqrt{3}}, \text{ А}$$

2. Выпрямитель

UD – 12п. Выпрямитель последовательного типа В-ТПЕД – 3,15к – 3,3к; собран из диодов ДЛ 252 – 2000 – 20
диодном плече а=2 шт, S=2 шт, N=48 шт.

3. Инвертор

UZ – 12п. Инвертор последовательного типа И–ПТП – 2,4к – 4,0к

Собран из тиристоров Т173-2000-18

В тиристорном плече $a=1$ шт; $S=3$ шт; $N=36$.

4. Защитные и коммутационные аппараты

FU1 ... FU4 – разрядники (ограничители перенапряжений) РВКУ – 1,65 (ОПН – 1,5);

FU5, FU6 – разрядники (ОПН) РВКУ – 3,3 (ОПН – 3,0);

RC1, RC2 – резисторно-емкостной контур ($R=100$ Ом, $C=0,25$ мкФ);

RC3, RC4 – резисторно-емкостной контур ($R=56$ Ом, $C=0,25$ мкФ);

LR1, LR2 – помехоподавляющие реакторы РОСВ – 2000;

C_p – помехоподавляющие конденсаторы ФСТ – 4,0 – 16;

LR3 – токоограничивающий реактор РБФАУ–3250 $L_p=11; 25$ мГн;

Q – масляный (вакуумный) выключатель ВМПЭ – 10 – 1000 ;

QF1...QF3 - быстродействующий выключатель ВАБ – 49 – 4000;

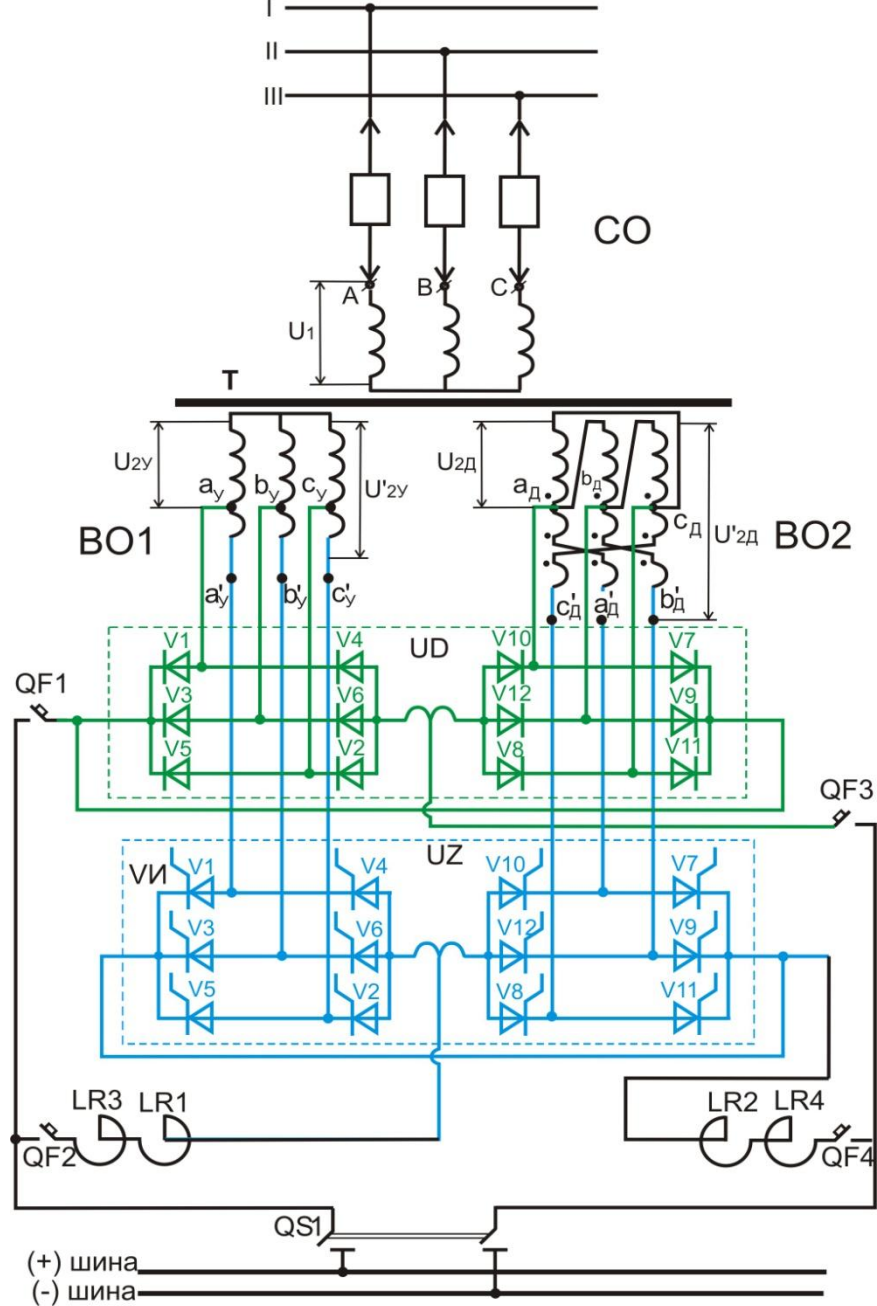


Рисунок 7.4.2 – Принципиальная схема 12-пульсового ВИП-3 параллельного типа на трансформаторе с дополнительными секциями

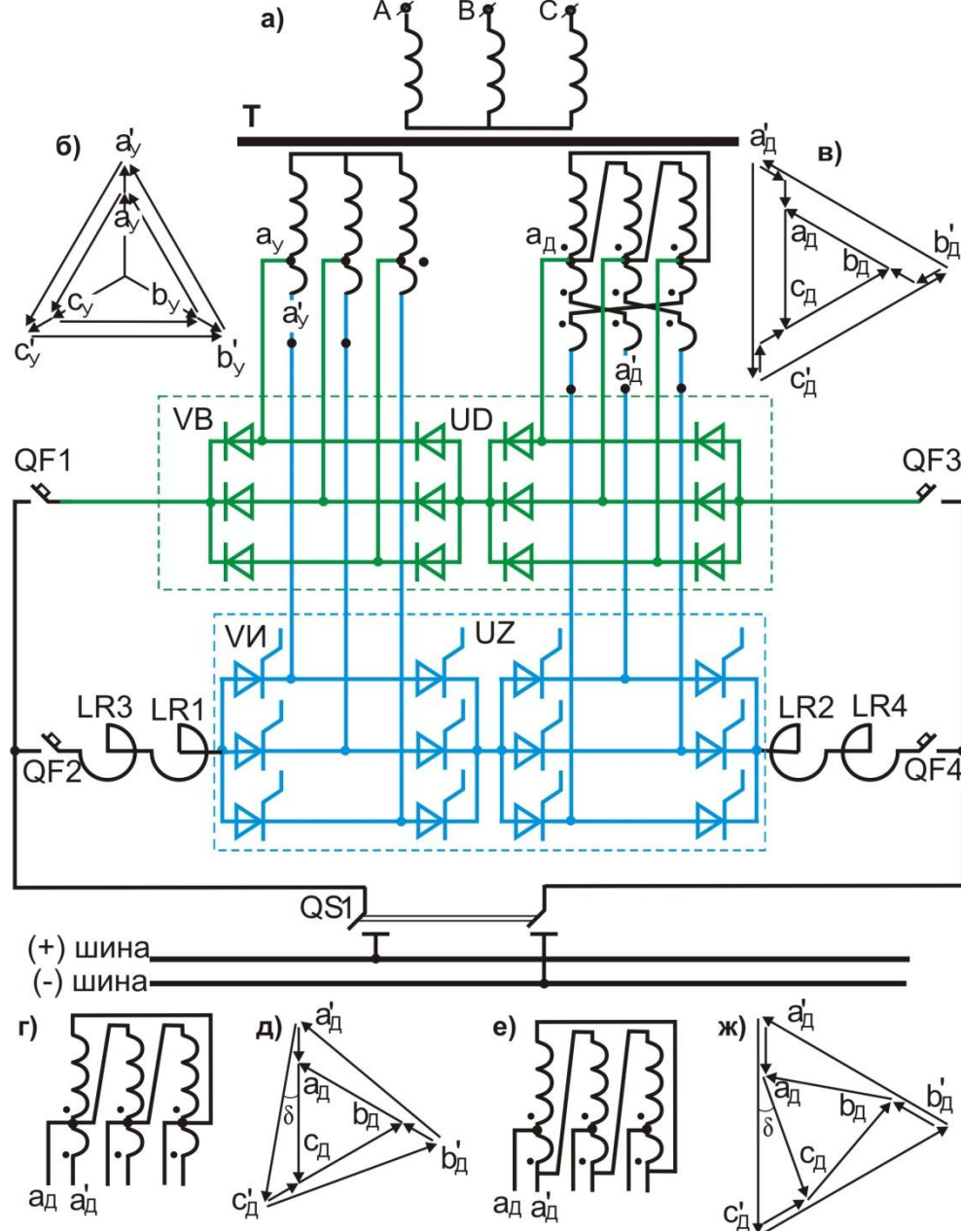


Рисунок 7.4.3 – Схема 12-пульсового ВИП-3 последовательного типа на трансформаторе с дополнительными секциями в ВО(а), векторные диаграммы ВО «У»(б) и ВО «Д» (в). Варианты выполнения вентильной обмотки «Д» (г,е) и их векторная диаграмма (д,ж)

7.4.2 Отличительные особенности инвертора от выпрямителя

Инверторный преобразователь имеет следующие особенности по сравнению с выпрямительным преобразователем:

1. ВО выполнены отдельно (рис. 7.4.1) или имеют отпайки (рис. 7.4.2 и 7.4.3), а напряжение в фазах вентильных обмоток повышается и равно
$$U_{2И} = k_{И} \cdot U_{2В} \quad (7.4.1)$$
2. Инверторные мосты UZ1 и UZ2 комплектуется из тиристоров
3. Системой управления, т.е. токами управления $i_{y1}, i_{y3}, i_{y5}, i_{y2}, i_{y4}, i_{y6}$, подаваемыми на управляющие электроды тиристоров V1, V3, V5, V2, V4, V6 инверторного моста UZ1, эти тиристоры открываются в точках 1", 3", 5", 2", 4", 6" на угол β раньше точек естественного включения при обратной полярности напряжения $U_{2У}$. Токами управления $i_{y7}, i_{y9}, i_{y11}, i_{y8}, i_{y10}, i_{y12}$, подаваемые на управляющие электроды тиристоров V7, V9, V11, V8, V10, V12, эти тиристоры открываются в точках 7", 9", 11", 8", 10", 12" в UZ2 на угол β раньше точек естественного включения при

Благодаря этому тиристоры открываются и проводят ток при обратной полярности напряжения вторичных обмоток u_{2y} , $u_{2д}$ по сравнению с выпрямителем (рис. 7.4.5).

4. Изменяется полярность подключения инвертора к +ш и –ш по сравнению с выпрямителем.

В 12 П.ПОСЛ. схеме инвертора к +ш подключается анод А2, а к –ш катод К1, в то время как у выпрямителя наоборот к + ш подключается катод К1, а к –ш анод А2 (рис.7.4.1,а).

В 12 ПАР.схеме к +ш подключается 0 УР, а к –ш общий катод К, в то время как у выпрямителя +ш подключается общий катод К, а к –ш 0 УР.

5. Генератором энергии постоянного тока становится ЭПС (электроподвижной состав).
6. Мощность $P_{и}$ и ток $I_{и}$ передаются от ЭПС через контактную сеть к ВИП, установленному на тяговой подстанции.

7.4.3 Условия получения 12п. режима

1. В01 и В02 тиристорных мостов UZ1 и UZ2 соединенные в «У» и «Д». Это создаст сдвиг линий напряжений однолинейных фаз на 30° эл.

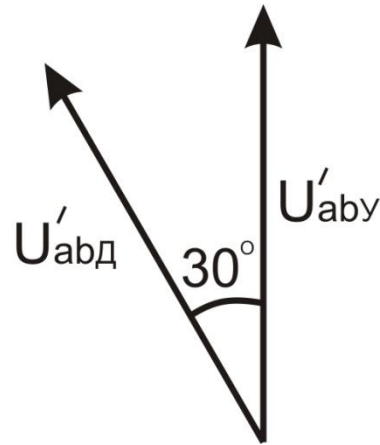


Рис. 7.4.4 – векторная диаграмма линейного напряжения смежных фаз инвертора

2. Входное напряжение инверторных мостов UZ1 и UZ2 должны быть равны $U_{и01} = U_{и02}$

Это возможно если напряжение

$$U'_{2д} = \sqrt{3}U'_{2у};$$

т.е. число витков обмоток $\omega'_{2д} = \sqrt{3}\omega'_{2у}$ (7.4.2)

7.4.4 Отличительные особенности 12п. посл. 12п. пар. схемы

В 12п. последовательной схеме:

Мгновенное значение входного напряжения

$$\begin{aligned} u_{\text{И}} &= u_{\text{И1}} + u_{\text{И2}} \\ u_{\text{И}} &= u_{\text{И1}} + u_{\text{И2}} \end{aligned}$$

Среднее значение входного напряжения

$$U_{\text{И}} = U_{\text{И1}} + U_{\text{И2}}$$

Откуда входное напряжение каждого инверторного моста UZ1 и UZ2 равно

$$U_{\text{И1}} = U_{\text{И2}} = \frac{U_{\text{И}}}{2} \quad (7.4.3)$$

Входной ток UZ1 и UZ2 равен току $I_{\text{И}}$

$$I_{\text{И1}} = I_{\text{И2}} = I_{\text{И}} \quad (7.4.4)$$

В 12п. параллельной схеме:

Мгновенное значение входного напряжения

$$u_{\text{И}} = u_{\text{И1}} = u_{\text{И2}}$$

Среднее значение входного напряжения каждого

инверторного моста UZ1 и UZ2 равны $U_{\text{И}}$

$$U_{\text{И}} = U_{\text{И1}} = U_{\text{И2}} \quad (7.4.3')$$

Входной ток UZ1 и UZ2 равны

$$I_{\text{И1}} = I_{\text{И2}} = \frac{I_{\text{И}}}{2} \quad (7.4.4')$$

7.4.5 Теория работы инвертора и процесс преобразования постоянного тока ЭПС в трехфазный переменный ток

Физические процессы в 12 П. инверторе наглядно иллюстрируются временными диаграммами напряжения и тока в элементах схемы. Методика построения временных диаграмм аналогична 12 П. выпрямителем (разд. 6.4) с учетом особенностей работы инвертора (разд. 7.2). При изучении теории примем:

1. Напряжение в питающей сети, а следовательно в ВО1 и ВО2 синусоидальные и равно

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \Theta$$

2. Индуктивное сопротивление трансформатора и питающей цепи >0 . Поэтому угол коммутации $\gamma > 0$.

На рисунке 7.4.5 приведены временные диаграммы напряжения и токов 12 П инвертора с учетом угла опережения β и угла коммутации γ .

Рекомендуются следующая последовательность построения и объяснения временных диаграмм.

Рассмотрим работу 12 пульсового инвертора последовательного типа (рис. 7.4.1,а) и параллельного типа (рис. 7.4.1, б) в момент $\Theta 1$.

Согласно разделов 7.2.1, 7.2.3 в инверторе тиристоры должны работать с углом опережения β при обратной полярности напряжения $u_{2у}$ и $u_{2д}$ по сравнению с диодами выпрямителя.

Из рис.7.4.5,а, б следует, что в UZ1 током $i_{у1}$, $i_{у2}$ должны быть включены V1, V2, т.к.

$$u_{ау} \rightarrow \min, \quad u_{су} \rightarrow \max$$

При этом потенциал общего катода K1 равен

$$u_{K1} = u_{ау}$$

Потенциал общего анода A1 равен

$$u_{A1} = u_{су}$$

Мгновенное значение входного напряжения между K1 и A1 равно

$$u_{и1} = u_{K1} - u_{A1} = u_{ау} - u_{су} \quad {}^{13}(7.4.5)$$

Из рис.7.4.5, д, е следует, что в UZ2 током i_{y7} , i_{y8} должны быть включены V7, V8.

т.к. $u_{ад} \rightarrow \min, u_{сд} \rightarrow \max$

При этом потенциал общего катода K2 равен

$$u_{K2} = u_{ад}$$

Потенциал общего анода A2 равен

$$u_{A2} = u_{сд}$$

Мгновенное значение входного напряжения между K2 и A2 равно

$$u_{И2} = u_{K2} - u_{A2} = u_{ад} - u_{сд} \quad (7.4.6)$$

В таблице 7.4.6 приведена последовательность включения тиристоров за период $0 \leq \Theta \leq 2\pi$

Таблица 7.4.1 - Последовательность подачи импульсов тока управления и работы тиристоров инвертора за период $0 \leq \Theta \leq 2\pi$

в UZ1		
на тиристоры	V1, V3, V5	V2, V4, V6
подать ток управления	i_{y1}, i_{y3}, i_{y5}	i_{y2}, i_{y4}, i_{y6}
в точках	1", 3", 5"	2", 4", 6"
на угол β раньше точек	1, 3, 5	2, 4, 6

в UZ2		
на тиристоры	V7, V9, V11	V8, V10, V12
подать ток управления	i_{y7}, i_{y9}, i_{y11}	i_{y8}, i_{y10}, i_{y12}
в точках	7", 9", 11"	8", 10", 12"
на угол β раньше точек	7, 9, 11	8, 10, 12

Временные диаграммы тока управления i_{y1} , потенциала общего катода u_{K1} , общего анода u_{A1} , входного напряжения $u_{И1}$, входного тока $i_{И1}$ и порядок его прохождения через тиристоры инверторного моста UZ1 за период $0 \leq \Theta \leq 2\pi$ приведены на рис. 7.4.5, а, б, в, г.

Аналогично временные диаграммы для инверторного моста UZ2 приведены на рис. 7.4.5 д, е, ж.

Результирующее входное напряжение $u_{И12}$ 12-пульсового инвертора приведена на рис. 7.4.5, з. С учетом (7.4.3) и (7.4.3') получим:

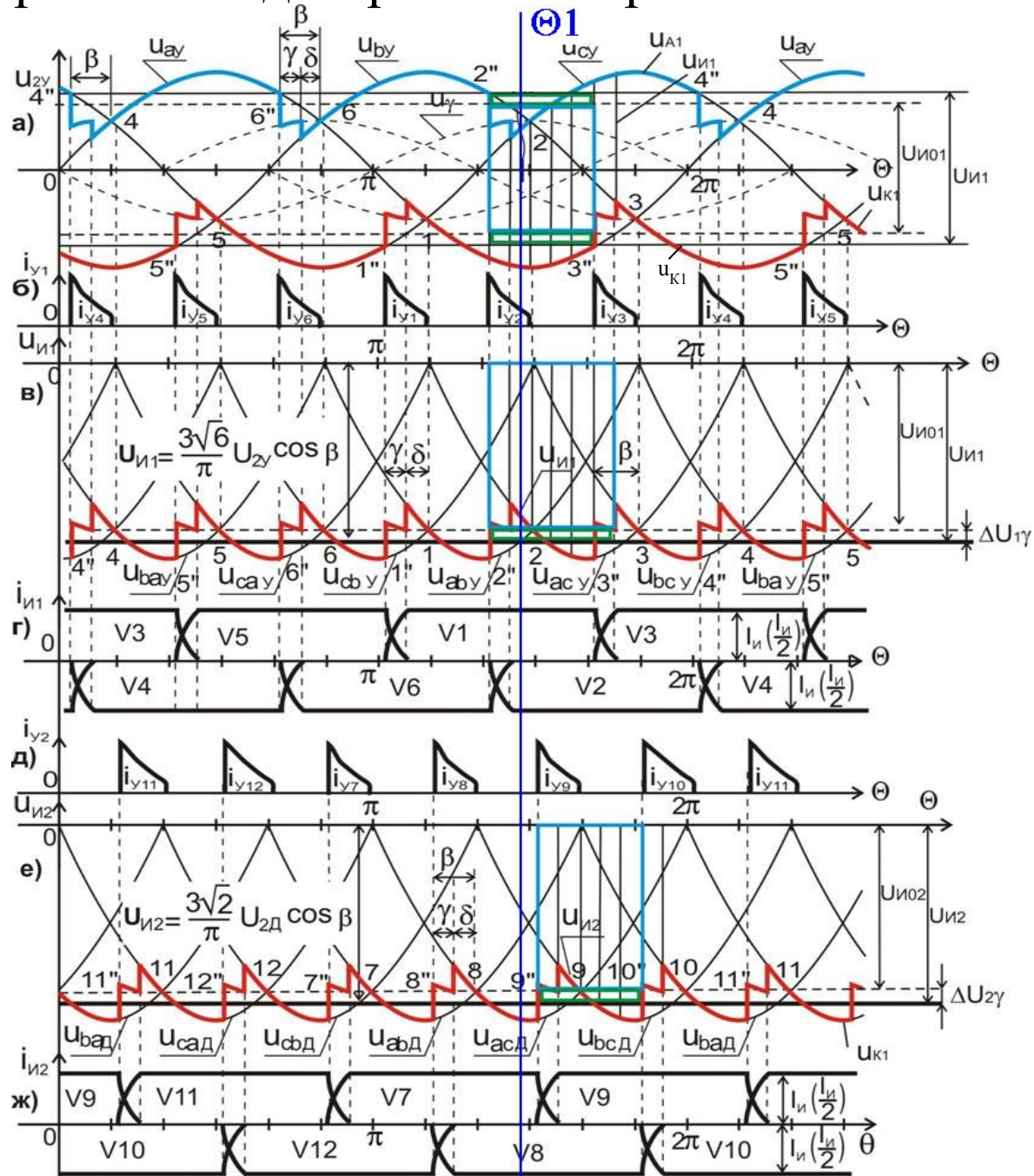
Для 12-пульсовой последовательной схемы

$$u_{И12} = u_{И1} + u_{И2}$$

Для 12-пульсовой параллельной схемы

$$u_{И12} = (u_{И1} + u_{И2}) / 2$$

Временные диаграммы напряжений и токов



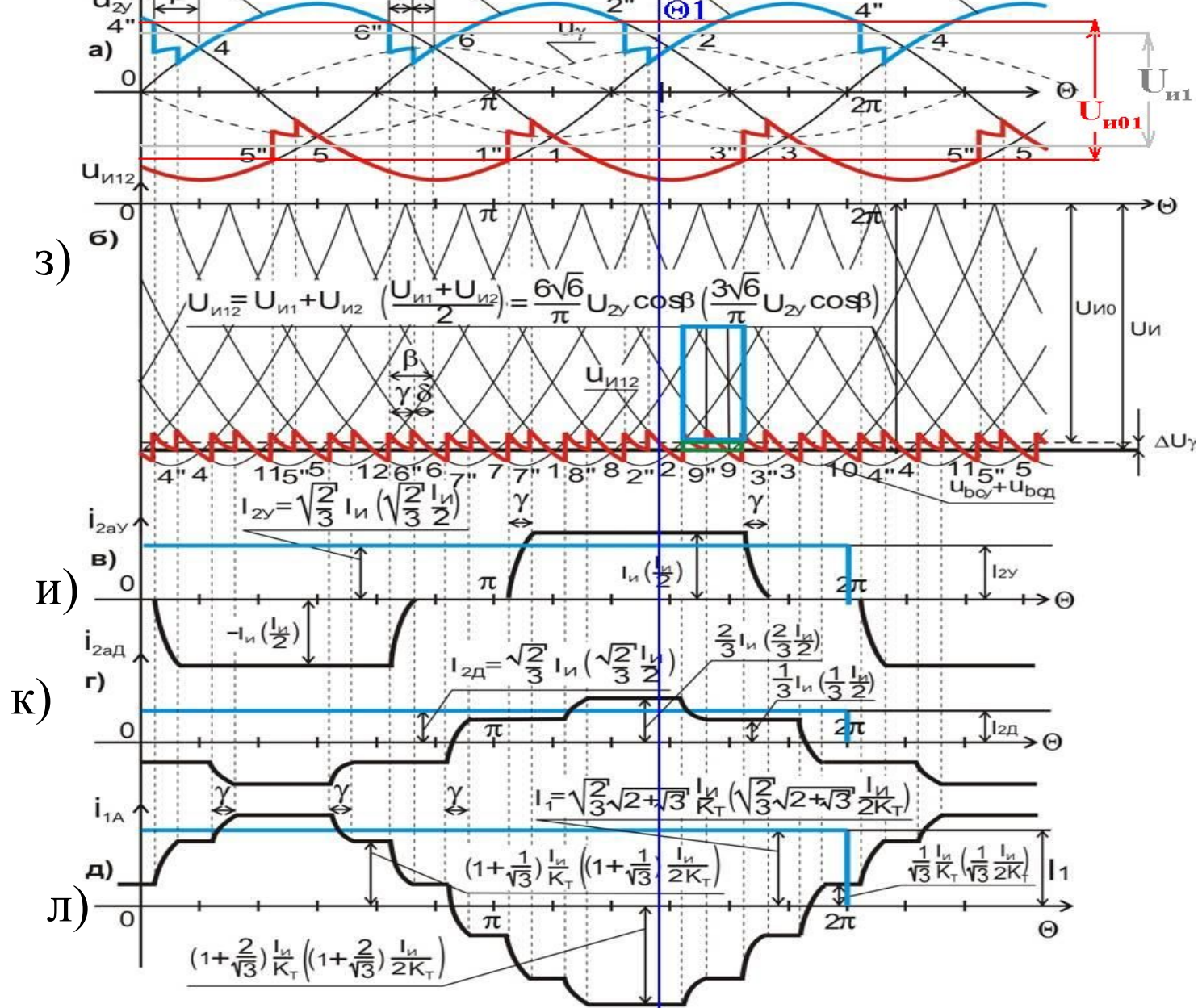


Рисунок 7.4.5 – Временные диаграммы напряжения u_{2y} (а), токи управления i_{y1} (б), входного напряжения $u_{И1}$ (в), входного тока $i_{И1}$ (г), тока вентильной обмотки i_{2ay} (и) инверторного моста UZ1; тока управления i_{ya2} (д), входного напряжения $u_{И2}$ (е), входного тока $i_{И2}$ (ж), тока вентильной обмотки $i_{2aД}$ (к), инверторного моста UZ2; результирующего входного напряжения $u_{И12}$ (з) и тока сетевой обмотки i_{1A} (л) 12пульсового инвертора.

На рис.(7.4.1, а) и (7.4.1, б) показаны цепь прохождения тока от ЭПС через контактную сеть, рельсы, шины ВВП, тиристоры, фазы $BO1$, $BO2$ и фазы CO для момента $\Theta1$ при работе тиристоров $V1$, $V2$, $V7$, $V8$.

За период 2π открывая поочередно тиристоры $V1$, $V3$, $V5$, $V2$, $V4$, $V6$ синхронно с напряжением u_{ay} , u_{by} , u_{cy} , ток инвертора поочередно проходит через фазы a_y , b_y , c_y в $UZ1$. Аналогично, открывая поочередно тиристоры $V7$, $V9$, $V11$, $V8$, $V10$, $V12$ синхронно с $u_{ад}$, $u_{бд}$, $u_{сд}$, ток инвертора поочередно проходит через фазы a_d , b_d , c_d в $UZ2$.

При этом в фазах А, В, С сетевой обмотки создается трехфазный переменный ток, т.е. постоянный ток $I_{И}$, создаваемый ЭПС преобразуется в трехфазный переменный ток (рис.7.4.5).

Примечание: в 12П параллельной схеме физические процессы и цепь прохождения тока аналогичны, но вместо тока $I_{И}$ необходимо подставлять $I_{И}/2$. Т.к. мосты $UZ1$, $UZ2$ работают параллельно.

7.4.6 Особенности распределения тока в фазах ВО2, соединенной в «Д»

В ВО2 соединенной в Д в любой момент времени работают все фазы $a_{\text{Д}}, b_{\text{Д}}, c_{\text{Д}}$.

Ток распределяется обратно пропорционально сопротивлению цепи тока.

В момент $\Theta 1$, когда работают V7 и V8, токи $i_{\text{аД}} = \frac{2}{3} I_{\text{И}}$, а $i_{\text{бД}} = i_{\text{сД}} = \frac{1}{3} I_{\text{И}}$.

Т.о., ток в фазе начало и конец которой подключен к работающим тиристорам, равен $\frac{2}{3} I_{\text{И}}$, а в остальных фазах $\frac{1}{3} I_{\text{И}}$.

Примечание: В 12П пар. схеме вместо $I_{\text{И}}$ подставлять $\frac{I_{\text{И}}}{2}$

Временная диаграмм тока $i_{2\text{аУ}}$ в фазе $a_{\text{У}}$ приведены на рис.7.4.5 и, тока $i_{2\text{аД}}$ в фазе $a_{\text{Д}}$ на рис.7.4.5 к.

7.4.7 Распределение тока в фазах СО

Мгновенное значение токов в фазах СО

$$i_1 = - \left\{ \frac{i_{2y}}{K_{TY}} + \frac{i_{2д}}{K_{ТД}} \right\}, \quad (7.4.9)$$

где K_{TY} – коэффициент трансформации обмотки звезда

$$K_{TY} = \frac{U_1}{U_{2y}}, \quad (7.4.10)$$

где $K_{ТД}$ – коэффициент трансформации обмотки треугольник

$$K_{ТД} = \frac{U_1}{U_{2д}} = \frac{U_1}{\sqrt{3}U_{2y}} = \frac{K_{TY}}{\sqrt{3}} \quad (7.4.10)$$

С учетом (6.4.10)

$$i_1 = - \left[i_{2y} + i_{2д} \sqrt{3} \right] \frac{1}{K_{TY}} \quad (7.4.11)$$

На рис.7.4.5 и, к, л приведены временные диаграммы i_{2ay} , $i_{2ад}$, i_{1A} для фазы a_y , $a_д$ вторичных обмоток и фазы А сетевой обмотки

7.4.8 Основные расчетные соотношения двенадцатипульсовых схем инвертирования

Расчетные параметры тиристорного плеча и обмоток трансформатора зависят от схемы выпрямительного или инверторного преобразователя, поэтому все выводы и расчетные формулы разделов 6.4.7 справедливы для инвертора. В таблице 7.4.2 приведены расчетные соотношения 12 пульсовых схем инвертирования с учетом особенностей работы тиристорных инверторов, подробно изложенных в разделах 7.2.2, 7.2.3, 7.2.4.

Таблица 7.4.2 – Основные расчетные соотношения 12 П инверторов

Обозначение параметра		Последовательного типа	Параллельного типа
D_{cx}	ВО «У»	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$
	ВО «Д»	1	1
$U_{d0\ 1,2}$	ВО «У»	$2,34 U_{2Y}$	$2,34 U_{2Y}$
	ВО «Д»	$1,35 U_{2Д}$	$1,35 U_{2Д}$
$U_{И0(\beta=0)}$		$4,68 U_{2Y}$	$2,34 U_{2Y}$
$U_{И0}$		$4,68 U_{2Y} \cos\beta$	$2,34 U_{2Y} \cos\beta$
$Uv\ max$		$\sqrt{6} U_{2Y}$	$\sqrt{6} U_{2Y}$
$K_{СК}$		1	0,5
I_v		$I_{И}/3$	$I_{И}/6$
$I_{v\ max}$		$I_{И}$	$0,5 I_{И}$
I_{2Y}		$\sqrt{2/3} I_{И}$	$\sqrt{2/3} I_{И} /2$
$I_{2Д}$		$\sqrt{2/3} \cdot I_{И}$	$\sqrt{2/3} \cdot I_{И} /2$
I_1		$1,577 I_{И}/K_r$	$0,789 I_{И}/K_r$
S_2		$S_{2Y}=S_{2Д}=0,51 P_{И}$	$S_{2Y}=S_{2Д}=0,51 P_{И}$
S_1		$1,02 P_{И}$	$1,02 P_{И}$
S_T		$1,02 P_{И}$	$1,02 P_{И}$
A		0,26	0,26
v		0,988	0,988

Продолжение таблицы 7.4.1

7.4.8 Условия надежной работы инвертора

Надежная работа инвертора обеспечивается, если угол опережения

$$\beta \geq \gamma_{\text{MAX}} + \delta_{\text{MIN}} \quad (7.4.12)$$

$$\delta_{\text{MIN}} = \delta_0 + \tau, \quad (7.4.13)$$

где β – угол опережения;

γ_{max} – угол коммутации при I_{Imax} ;

δ_0 – время выключения тиристора;

τ – угол запаса.

7.4.9 Угол коммутации

Угол коммутации из (6.6.13) равен

$$\gamma = \beta - \arccos \left(\cos \beta + \frac{2K_{сх} \cdot I_{И} X_V}{\sqrt{6} U_2} \right), \quad (7.4.14)$$

где X_V – индуктивное сопротивление фазы цепи коммутации.

Из (7.2.14) видно, что при изменении тока $0 \leq I_{И} \leq I_{И \max}$, угол коммутации γ изменяется в пределах

$$0 \leq \gamma \leq \gamma_{\max} \quad (7.4.15)$$

После завершения коммутации с V1 на V3 в работе остается V3 мгновенное значение входного напряжения будет равно

$$u_{И} = u_b$$

Индуктивное сопротивление фазы цепи коммутации определяется по формуле (7.4.16).

$$X_v = \frac{3 \cdot U_{2Y}^2}{S} \cdot \frac{u_K}{100} \cdot 10^{-3}, \quad (7.4.16)$$

где U_{2Y} – номинальное действующее значение фазных напряжений вентиляльных обмоток, соединенных в «звезду», кВ;

u_K – напряжение КЗ цепи коммутации, %;

S_{1H} – номинальная мощность сетевой обмотки, кВА.

Напряжение короткого замыкания цепи коммутации равно

$$u_K = u_{KC} + u_{KT}, \quad (7.4.17)$$

где u_{KT} – коммутационное напряжение КЗ преобразовательного трансформатора, %;

u_{KC} – напряжение КЗ питающей цепи, %.

$$u_{KC} = \frac{S_{1H}}{S_{K3}} \cdot 100\%, \quad (7.4.18)$$

где S_{K3} – мощность КЗ на шинах, питающих преобразовательный трансформатор, кВА.

7.4.10 Входные характеристики инвертора

Входной характеристикой инвертора называется зависимость

$$U_{И} = f(I_{И})$$

Согласно теории работы инвертора входное напряжение с увеличением тока инвертора возрастает и с учетом (7.2.19), (7.2.22) равно

$$U_{И} = U_{И0} + \Delta U_{\gamma} + \Delta U_{\Pi} \quad (7.4.19)$$

Через известные параметры схемы и преобразовательного трансформатора входное напряжение инвертора определяется уравнением

$$U_{И} = U_{И0(\beta=0)} \left[\cos \beta + A \frac{u_{кз}}{100} \cdot \frac{I_{И}}{I_{ИН}} \right] + \Delta U_{\Pi} \quad (7.4.20)$$

Падение напряжения в тиристорах инвертора

$$\Delta U_{\Pi} = ps \left[U_{(TO)} + \frac{K_{CX} I_{И}}{3 \cdot a} \cdot r_T \right], \quad (7.4.21)$$

где p – число последовательно работающих плеч преобразователя;

$p=4$ для 12 П.ПОСЛ.

$p=2$ для 12 П.ПАР.

s, a – число последовательно и параллельно включенных тиристоров в одном плече инвертора;

A – коэффициент наклона входной характеристики схемы ($A=0,5$ для $m=6$; $A=0,266$ для $m=12$);

$u_{КЗ}$ – напряжение короткого замыкания цепи коммутации;

U_{TO}, r_T – пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление тиристора

Для инверторных преобразователей, применяемых на тяговых подстанциях, входные напряжения холостого хода определяются следующими соотношениями

Для 6П.М. и 12 П. ПАР

$$U_{И0(\beta=0)} = 2,34U_{2У} ; U_{И0} = 2,34U_{2У} \cos\beta \quad (7.4.22)$$

Для 12 П. ПОСЛ.

$$U_{И0(\beta=0)} = 4,68U_{2У} ; U_{И0} = 4,68U_{2У} \cos\beta \quad (7.4.23)$$

7.4.11 Ограничительная характеристика инвертора

При работе инвертора входной ток изменяется в пределах

$$0 \leq I_{\text{И}} \leq I_{\text{Иmax}}$$

Следовательно согласно (7.2.14) угол коммутации также изменяется в пределах $0 \leq \gamma \leq \gamma_{\text{max}}$

Надежная работа инвертора обеспечивается, если при любом токе $I_{\text{И}}$ (угле коммутации γ), сохраняется условие

$$\beta \geq \gamma_{\text{MAX}} + \delta_{\text{MIN}} \quad (7.4.24)$$

Если при $\beta = \text{const}$ с увеличением тока $I_{\text{И}}$ (угла коммутации γ) условие (7.4.24) нарушается, то произойдет опрокидывание инвертора и аварийный ток увеличится в десятки раз по сравнению с номинальным током.

Для предупреждения опрокидывания инвертор имеет ограничительную характеристику

$$U_{\text{ог}} = U_{\text{И0}(\beta=0)} \left[\cos \delta_{\text{MIN}} - A \frac{u_{\text{кз}}}{100} \cdot \frac{I_{\text{И}}}{I_{\text{ИН}}} \right] - \Delta U_{\text{П}} \quad (7.4.25)$$

7.4.12 Предельный (максимальный) ток инвертора

Величина предельного (максимального) тока инвертора $I_{ИМАХ}$, при котором еще сохраняется его устойчивая работа, графически определяется точкой пересечения внешней и ограничительной характеристик (рис.7.4.6).

Аналитический расчет $I_{ИМАХ}$ может быть выполнен по следующим формулам

а) при естественной внешней характеристике

$$I_{ИМАХ1} = \frac{50}{u_K \cdot A} \cdot I_{ИН} (\cos \delta_{MIN} - \cos \beta) \quad (7.4.26)$$

б) при стабилизированной внешней характеристике

$$I_{ИМАХ3} = \frac{100}{u_K \cdot A} \cdot I_{ИН} \left(\cos \delta_{MIN} - \frac{U_{СТ} - \Delta U_{П}}{U_{ИО(\beta=0)}} \right), \quad (7.4.27)$$

где $U_{СТ}$ – напряжение стабилизированной внешней характеристики ВП, равное U_{d0} , кВ;

A – коэффициент наклона входной (внешней) характеристики инвертора.

