

7.2 Теория работы многофазного “m” пульсового инвертора

7.2.1 Теория работы “m” пульсового инвертора при идеальном трансформаторе

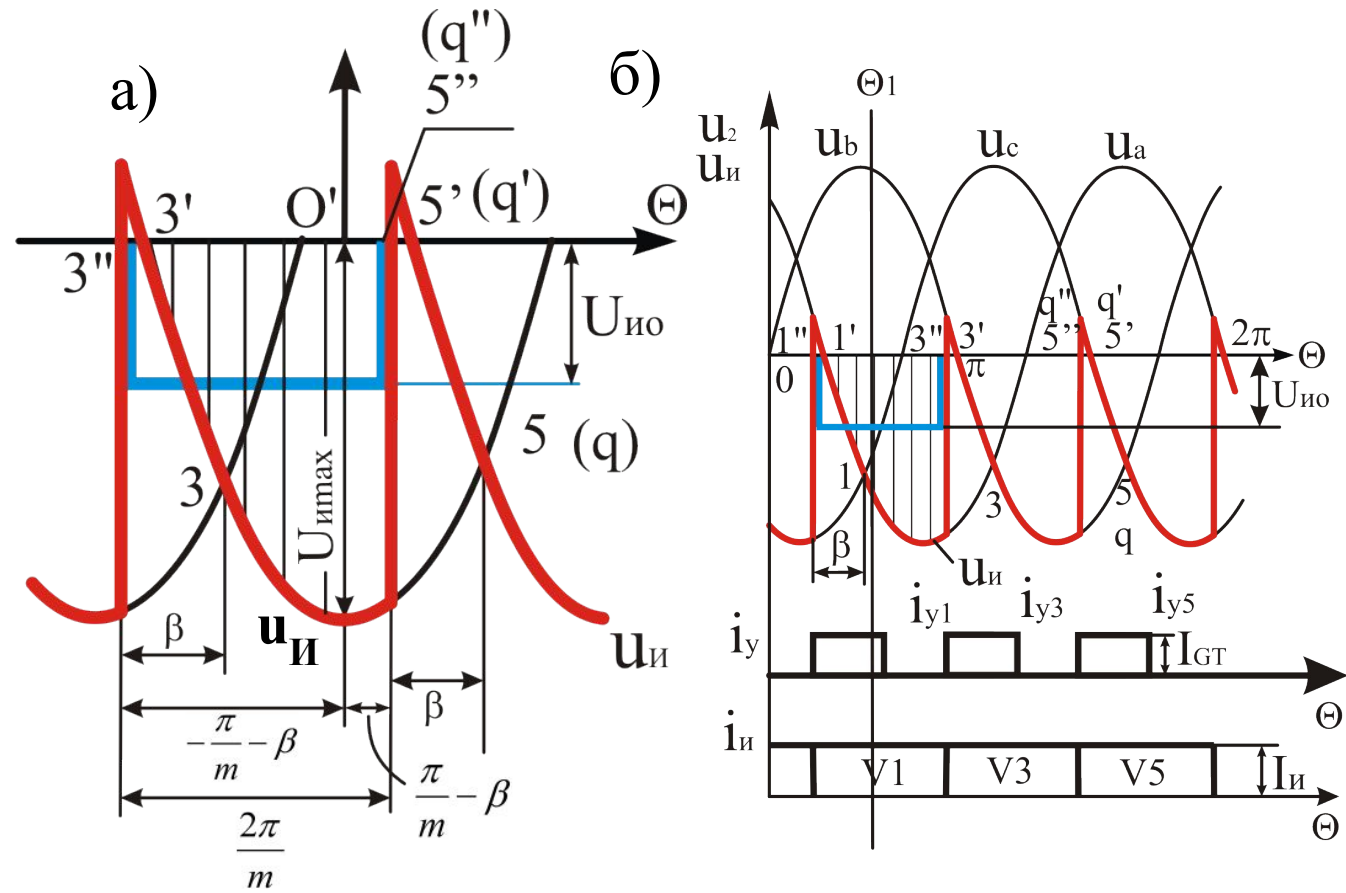
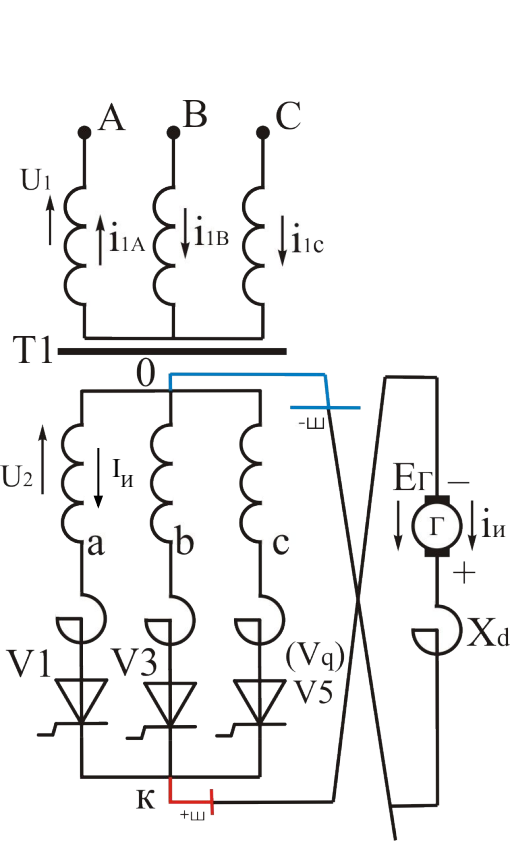


Рисунок 7.2.1 -
Принципиальная
схема многофазного
инвертора

Рисунок 7.2.2 – Временные диаграммы
напряжения u_2 ВО, входного напряжения
 $u_{и}$, тока управления i_{y} и тока инвертора $i_{и}$

Принятые допущения:

1. Напряжение в питающей сети, а следовательно в вентильной обмотке трансформатора синусоидальное

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \Theta \quad (7.2.1)$$

2. Индуктивное сопротивление питающей сети и преобразовательного трансформатора равны 0

$$X_C = X_T = 0$$

Поэтому коммутация тока (переход тока) с тиристора, заканчивающего работу на тиристор, включившийся в работу, происходит мгновенно, а угол коммутации (время совместной работы этих тиристорov) в этом случае равен 0

$$\gamma=0$$

3. Индуктивное сопротивление сглаживающего реактора равно $X_d = \infty$, поэтому мгновенное значение тока инвертора равно среднему значению $i_{И} = I_{И}$

Теория работы “m” пульсового инвертора при идеальном трансформаторе

К моменту Θ_1 током $i_{y1} = I_{GT}$ должен быть открыт $V1$,
имеющий u_{amin}

Мгновенное значение входного напряжения

инвертора
$$u_{И} = u_a \quad (7.2.2)$$

Мгновенное значение тока
$$i_{И} = \frac{E_{Г} - u_a}{\sum Z_{Э-И}} \dots \quad (7.2.3)$$

В т.3 минимальное напряжение устанавливается в фазе b, т.е. u_{bmin} , поэтому в т.3” на угол β раньше т.3 током $i_{y3} = I_{GT}$ открывается $V3$ и ток $I_{И}$ потечет через $V3$ и фазу b.

Мгновенное значение входного напряжения

$$u_{И} = u_b$$

Если током управления $i_{y3} = I_{GT}$ тиристор $V3$ по какой либо причине не откроется, то $V1$ будет продолжать работу на положительной полуволне напряжения u_a и возникнет аварийный режим называемый **опрокидыванием инвертора**.

Мгновенное значение тока инвертора увеличится в десятки раз и будет равно

$$i_{и} = \frac{E_{\Gamma} + u_a}{\sum Z_{\text{Э-И}}} \quad (7.2.4)$$

Аналогично т.5'' (Vq'') током управления i_{y5} открывается V5 и ток переходит на V5 и фазу с.

Мгновенное значение входного напряжения

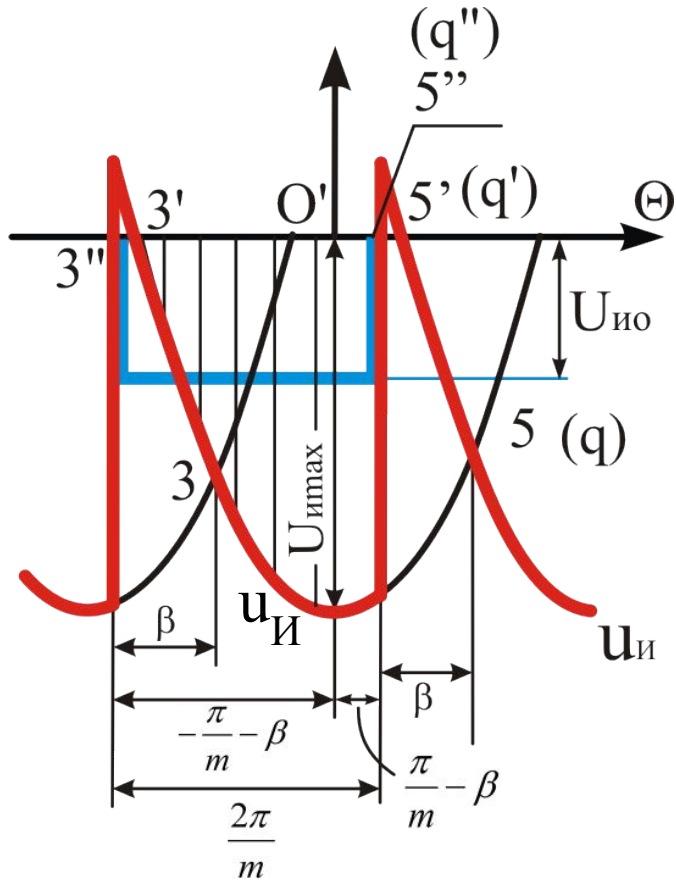
$$u_{И} = u_{с}$$

В т.1'' вновь включается V1 и процесс повторяется.

Таким образом, поочередно открывая V1, V3, V5, током i_{y1} , i_{y3} , i_{y5} синхронно с напряжением питающей сети частотой $f_c = 50$ Гц, постоянный ток $I_{И}$ поочередно проходит через фазы а, b, с вентильной обмотки, поэтому в фазах А, В, С первичной обмотке наводится трехфазный переменный ток i_1 .

7.2.2 Входное напряжение инвертора

Мгновенное значение входного напряжения относительно точки O'



$$u_{И} = U_{И \max} \cos \Theta \quad (7.2.5)$$

при изменении Θ в пределах (см. рис.7.2.2)

$$-\frac{\pi}{m} - \beta \leq \Theta \leq \frac{\pi}{m} - \beta$$

$$U_{И \max} = D_{СХ} \sqrt{2} U_2 \quad (7.2.5')$$

Рисунок 7.2.2 - Временная диаграмма входного напряжения инвертора

Среднее значение входного напряжения определяется высотой прямоугольника равновеликого по площади входному напряжению, отмеченному на рис.7.2.2 ординатами вертикально заштрихованной площадки

$$U_{\text{и0}} = \frac{1}{2\pi/m} \int_{-\frac{\pi}{m}-\beta}^{\frac{\pi}{m}-\beta} U_{\text{и max}} \cos \Theta d\Theta \quad (7.2.6)$$

Из решения
7.2.6 получим

$$U_{\text{и0}} = \frac{U_{\text{и max}}}{2\pi/m} \left[\sin\left(\frac{\pi}{m} - \beta\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{m} - \beta\right) \right] \dots$$

$$2 \sin \frac{\pi}{m} \cdot \cos \beta \quad (7.2.7)$$

Из (7.2.7) получим формулу для расчета среднего значения входного напряжения

$$U_{\text{и0}} = \frac{U_{\text{и max}} \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \cos \beta \quad (7.2.8)$$

Для упрощения дальнейших формул выражение, отмеченное пунктирной линией, обозначим $U_{И0(\beta=0)}$ тогда входное напряжение холостого хода инвертора запишется в виде

$$U_{И0} = U_{И0(\beta=0)} \cdot \cos \beta \quad (7.2.9),$$

где $U_{И0(\beta=0)}$ – условное входное напряжение холостого хода (см.(7.28))

Для 6 П. М. $D_{сх} = \sqrt{3}$ тогда из (7.2.5) $U_{И \max} = \sqrt{6}U_{2у}$

Подставив $m=6$ и $U_{И \max}$ в формулу (7.2.8) для 6 П.М. получим

$$U_{И0} = 2,34U_{2у} \cos \beta \quad (7.2.10)$$

Т.к. 12 П. ПАР. состоит из двух 6 П.М. схем, включенных параллельно, то

$$U_{и0} = U_{и01} = U_{и02} = 2,34 U_{2y} \cdot \cos\beta$$

Т.к. 12 П. ПОСЛ. состоит из двух 6 П.М. схем, включенных последовательно, то результирующее входное напряжение

$$U_{и0} = U_{и01} + U_{и02} = 4,68U_{2у} \cdot \cos\beta \quad (7.2.11)$$

где $U_{и01}, U_{и02}$ - входное напряжение соответственно инверторного моста U_{z1} и U_{z2} рис.(7.4.1,а) и (7.4.1,б)

Изменяя угол β можно получить семейство точек холостого хода входного напряжения $U_{и0}$

Для упрощения дальнейших формул выражение, отмеченное пунктирной линией, обозначим $U_{\text{и}0(\beta=0)}$ тогда входное напряжение холостого хода инвертора запишется в виде

$$U_{\text{и}0} = U_{\text{и}0(\beta=0)} \cdot \cos \beta \quad (7.2.9),$$

где $U_{\text{и}0(\beta=0)}$ – условное входное напряжение холостого хода (см.(7.28))

Для 6 П. М. и 12 П. ПАР. с учетом (6.2.I), (6.4.I) и (6.4.I)'

$$U_{\text{и}0} = 2,34 U_{2\text{У}} \cos \beta \quad (7.2.10)$$

Для 12 П. ПОСЛ.

$$U_{\text{и}0} = 4,68 U_{2\text{У}} \cos \beta \quad (7.2.11)$$

Изменяя угол β можно получить семейство точек $U_{\text{и}0}$

7.2.3 Теория работы многофазного инвертора при реальном трансформаторе

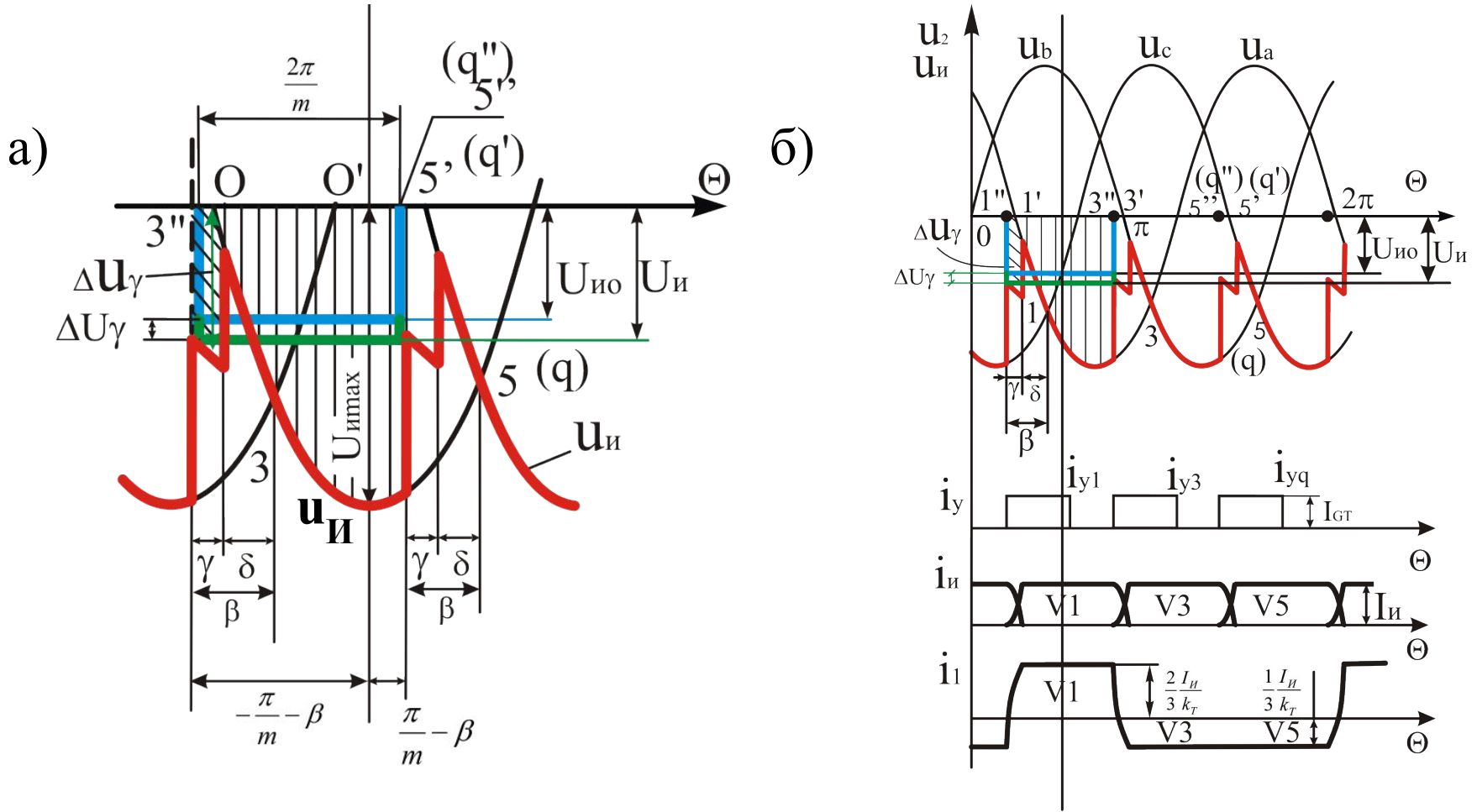


Рисунок 7.2.3 – Временные диаграммы напряжения u_2 ВО, входного напряжения $u_{и}$, тока управления i_y , тока СО i_1 с учетом коммутации

Принятые допущения:

1. Напряжение в питающей сети, а следовательно в вентильной обмотке синусоидальное

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \Theta \quad (7.2.12)$$

2. Индуктивное сопротивление трансформатора и питающей сети больше 0

$$X_{V1} = \dots = X_{Vm} = X_V > 0,$$

Поэтому коммутация тока (переход тока) с тиристора, заканчивающего работу на тиристор, включившийся в работу, происходит плавно, а угол коммутации (время совместной работы этих тиристорov) в этом случае

$$\gamma > 0$$

3. Индуктивное сопротивление сглаживающего реактора $X_d = \infty$, поэтому входной ток идеально сглажен и мгновенное значение тока равно среднему значению

$$i_{И} = I_{И}$$

Теория работы инвертора

К моменту Θ_1 током $i_{y1} = I_{GT}$ должен быть открыт V_1 и через него потечет ток

Мгновенное значение входного напряжения

$$u_{И} = u_a \quad (7.2.13)$$

В т.3 напряжение u_{bmin} поэтому в т.3'' током $i_{y3} = I_{GT}$ открывается V_3 и начинается процесс коммутации тока с V_1 на V_3 .

Мгновенное значение входного напряжения в течение угла коммутации γ равно

$$u_{И} = \frac{u_a + u_b}{2} \quad (7.2.14)$$

Угол коммутации

Угол коммутации из (6.6.13) равен

$$\gamma = \beta - \arccos \left(\cos \beta + \frac{2K_{CX} \cdot I_{ИХV}}{\sqrt{6} U_2} \right) \quad (7.2.15)$$

Из (7.2.15) видно, что при изменении тока $0 \leq I_{ИХV} \leq I_{ИХV \max}$, угол коммутации γ изменяется в пределах $0 \leq \gamma \leq \gamma_{\max}$

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

$$u_{И} = u_b$$

В т.5'' током $i_{y5}=I_{GT}$ открывается V5 и начинается процесс коммутации тока с V3 на V5, а входное напряжение

$$u_{И} = \frac{u_b + u_c}{2} \quad (7.2.16)$$

После завершения коммутации с V3 на V5

$$u_{И} = u_c$$

Таким образом, поочередно открывая V1, V3, V5 током i_{y1}, i_{y3}, i_{y5} синхронно с напряжением u_2 , постоянный ток $I_{И}$ поочередно проходит через фазы a, b, c и преобразуется в переменный трехфазный ток, который через фазы А, В, С первичной обмотки поступает потребителям.

Условия надежной работы инвертора

Надежная работа инвертора обеспечивается, если угол опережения

$$\beta \geq \gamma_{\text{MAX}} + \delta_{\text{MIN}} \quad (7.2.17)$$

$$\delta_{\text{MIN}} = \delta_0 + \tau, \quad (7.2.18)$$

где β – угол опережения;

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

δ_0 – время выключения тиристора;

τ – угол запаса.

Коммутационное падение напряжения.

Мгновенное коммутационное падение напряжение Δu_{γ} согласно (6.6.16) из рис. 7.2.3 при переходе тока с V1 на V3 рис. (7.2.3,б) определяется ординатами наклонно заштрихованной площадки и равно $\Delta u_{\gamma} = u_b - u_{\text{И}}$

после подстановки значения $u_{\text{И}}$ из (7.2.14) получим

$$\Delta u_{\gamma} = u_b - \frac{u_a + u_b}{2} = \frac{u_b - u_a}{2} \quad (7.2.19)$$

Среднее коммутационное падение напряжение ΔU_{γ} определится высотой прямоугольника ΔU_{γ} равновеликого наклона заштрихованной площадки и согласно (6.6.22) из рис. (7.2.3)

$$\Delta U_{\gamma} = \frac{K_{сх} \cdot I_{и} \cdot x_{v}}{2\pi / q} \cdot n_{к} \quad (7.2.20)$$

где $K_{сх}$ – коэффициент схемы потоку;

q – число фаз в ВО коммутирующей группы;

$n_{к}$ – число последовательно работающих коммутирующих групп

x_{v} – индуктивное сопротивление цепи коммутации.

Таблица 7.2.1 – Коэффициенты схемы 6 и 12 пульсовых инверторов

Схема	$K_{сх}$	q	n_K
12 П.ПОСЛ	1	3	4
12 П.ПАР.	0,5	3	2
6 ПМ	1	3	2
6 ПН	0,5	3	1

7.2.4 Входные характеристики инвертора

Входной характеристикой инвертора называется зависимость

$$U_{И} = f(I_{И}) \quad (7.2.21)$$

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

$$U_{И} = U_{И0} + \Delta U_{\gamma} + \Delta U_{\Pi} \quad (7.2.22)$$

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

$$U_{И} = U_{И0(\beta=0)} \left[\cos \beta + A \frac{u_{кз}}{100} \cdot \frac{I_{И}}{I_{ИН}} \right] + \Delta U_{\Pi} \quad (7.2.23)$$

Падение напряжения в тиристорах инвертора

$$\Delta U_{\Pi} = ps \left[U_{(TO)} + \frac{K_{CX} I_{И}}{3 \cdot a} \cdot r_T \right], \quad (7.2.23)$$

где p – число последовательно работающих плеч преобразователя

$$p = n_k \quad (\text{табл. 7.2.1});$$

s, a – число последовательно и параллельно включенных тиристоров в одном ключе инвертора.

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

$u_{KЗ}$ – напряжение короткого замыкания цепи коммутации);

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

Для 6П.М. и 12 П. пар $U_{И0(\beta=0)} = 2,34U_{2У} ; U_{И0} = 2,34U_{2У} \cos\beta$

Для 12 П. ПОСЛ. $U_{И0(\beta=0)} = 4,68U_{2У} ; U_{И0} = 4,68U_{2У} \cos\beta$

7.2.5 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

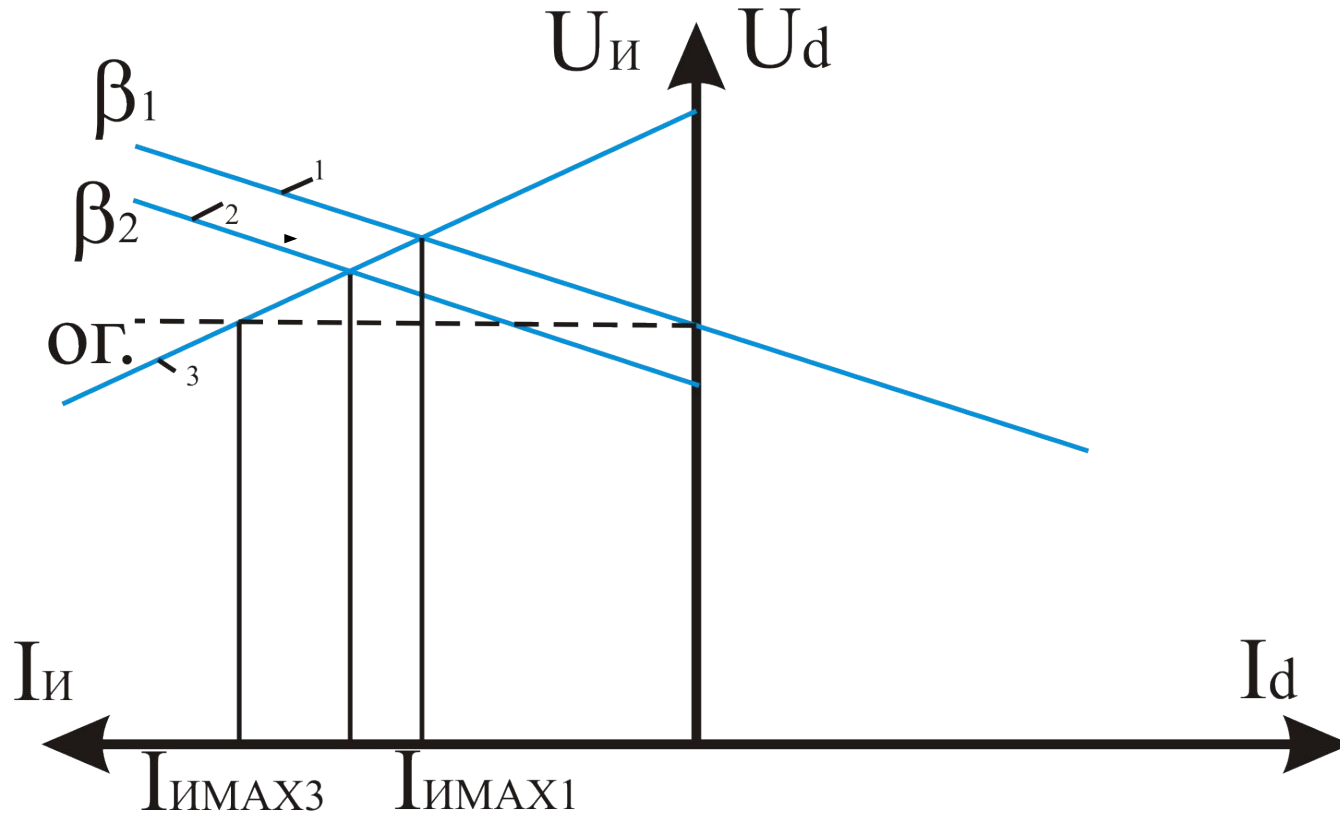
$$\beta \geq \gamma_{\text{MAX}} + \delta_{\text{MIN}} \quad (7.2.24)$$

Если при $\beta = \text{const}$ с увеличением тока $I_{\text{И}}$ (угла коммутации γ) условие (7.2.24) нарушается, то произойдет опрокидывание инвертора и аварийный ток увеличится в десятки раз по сравнению с номинальным током.

Для предупреждения опрокидывания инвертор имеет ограничительную характеристику

$$U_{\text{ог}} = U_{\text{и0}(\beta=0)} \left[\cos \delta_{\text{MIN}} - A \frac{u_{\text{кз}}}{100} \cdot \frac{I_{\text{И}}}{I_{\text{ИН}}} \right] - \Delta U_{\text{п}} \quad (7.2.25)$$

Внешние и ограничительные характеристики ВИП инвертор выпрямитель



Входные характеристики и предельные максимальные токи инвертора при угле $\beta_1 = \text{const}$ (1), $\beta_2 = \text{const}$ (2), искусственная (компаундированная) при $\beta \neq \text{const}$ (3)

Рисунок 7.2.4 – Внешние и ограничительные характеристики ВИП