

# ИНВЕРТОРЫ

## Практическая работа № 1

### Основные параметры, характеризующие работу зависимых инверторов

Зависимый инвертор преобразует электрическую энергию постоянного тока в электрическую энергию переменного тока. Любой управляемый выпрямитель может быть переведен в режим инвертирования. Так, если выход управляемого выпрямителя подключен к якорю электрической машины постоянного тока, работающей в двигательном режиме, то для перевода выпрямителя в режим инвертирования необходимо изменить величину и полярность ЭДС машины  $E_d$  и напряжения преобразователя  $U_d$  так, чтобы  $E_d > U_d$ , а ток цепи постоянного тока сохранил бы свое неизменное направление. Электрическая машина должна быть переведена в генераторный режим. Для этого необходимо к валу этой машины подвести механическую энергию от внешнего источника механической энергии (постороннего двигателя). Полупроводниковый преобразователь переходит в режим приемника электрической энергии. Электрическая энергия переменного тока, вырабатываемая зависимым инвертором, передается в сеть переменного тока, в которой кроме потребителей электрической энергии содержатся и генераторы. Поэтому величина и частота напряжения переменного тока зависимого инвертора определяется параметрами сети переменного тока, к которой подключен выход зависимого инвертора.

Действующее значение тока цепи переменного тока зависимого инвертора можно рассчитать, воспользовавшись коэффициентом ( $I_2/I_d$ ), приведенным в таблице 1 для заданной схемы преобразователя:

$$I_2 = (I_2/I_d) I_{dN}. \quad (1)$$

Выражение внешней характеристики зависимого инвертора

$$U_d = U_{d0} \cos \beta + \Delta U_x + \Delta U_{R\Phi} + \Delta U_{L\Phi} + \Delta U_{в.пр} \quad (2)$$

Здесь  $\Delta U_x$ ,  $\Delta U_{R\Phi}$ ,  $\Delta U_{L\Phi}$ ,  $\Delta U_{в.пр}$  - падения напряжения на элементах схемы (см. формулы (11), (12), (13)).

Угол  $\beta$  – это угол сопряженный с углом  $\alpha$ :

$$\beta = 180^\circ - \alpha \quad \text{или} \quad \alpha = 180^\circ - \beta. \quad (3)$$

После подстановки значений  $\Delta U_x$ ,  $\Delta U_{R\Phi}$ ,  $\Delta U_{L\Phi}$ ,  $\Delta U_{в.пр}$  в формулу (2), получим:

$$U_d = E_d = U_{d0} \cos \beta + I_d \left( \frac{k_T m_2}{2\pi} x_\Phi + R_\Phi + R_{L\Phi} \right) + k_T \Delta U_{в.пр}, \quad (4)$$

где  $U_d=E_d$  – напряжение источника постоянного тока;

$U_{d0}=k_{cx}U_{\phi 2N}$  – напряжение цепи постоянного тока при работе в выпрямительном режиме с углом регулирования  $\alpha=0$ .

$I_d$  – ток, потребляемый инвертором от источника постоянного тока:

$$I_d = \frac{E_d - U_{d0} \cos \beta - k_T \Delta U_{в.пр.}}{\frac{k_T m_2}{2\pi} x_\phi + R_\phi + R_{L\phi}}. \quad (5)$$

Обозначим

$$\frac{k_T m_2}{2\pi} x_\phi + R_\phi + R_{L\phi} = R_{cx},$$

где  $R_{cx}$  – эквивалентное сопротивление схемы.

Тогда внешняя характеристика зависимого инвертора принимает вид

$$U_d=E_d=U_{d0} \cos \beta + I_d R_{cx} + k_T \Delta U_{в.пр.} \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что для увеличения тока  $I_d$ , а значит и для увеличения инвертируемой мощности, необходимо:

– увеличивать напряжение источника постоянного тока ( $U_d=E_d$ ) (при постоянном угле  $\beta$ ) или уменьшать угол  $\beta$  (при постоянном напряжении источника постоянного тока).

Внешние характеристика  $U_d=f(I_d)$  для выпрямительного ( $0<\alpha<90^\circ$ ) и инверторного ( $90^\circ<\alpha<180^\circ$ ) режимов приведена на рис.8.

Важным параметром, определяющим устойчивость работы зависимого инвертора, является угол  $\delta_3$ . На интервале, определяемым углом  $\delta_3$ , к выключаемому тиристорному приложено отрицательное напряжение. Для устойчивой работы инвертора необходимо, чтобы угол  $\delta_3$  превышал угол, необходимый для восстановления запирающих свойств тиристора, который при частоте 50 Гц находится в пределах

$$\delta_{восст} \approx \frac{360^\circ}{T_c} t_q = \frac{360^\circ}{0,02} t_q = \delta_{3 \min},$$

где  $t_q$  – время, необходимое для восстановления управляющих свойств тиристора.

$T_c=1/f_c$ . При  $f_c=50$  Гц  $T_c=0,02$ с.

Угол  $\delta_3$  зависит от угла  $\beta$  и угла коммутации  $\gamma$ :

$$\delta_3 = \beta - \gamma,$$

$$\text{где } \gamma = \arccos \left[ \cos \alpha - \frac{x_\phi}{\sqrt{2} U_{2л} \sin \frac{\pi}{k_T m_2}} I_d \right] - \alpha. \quad (7)$$

При режиме инвертирования  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$   $\cos \alpha = -\cos \beta$  и выражение (7) приобретает вид:

$$\gamma = \arccos \left[ -\cos \beta - \frac{x_\phi}{\sqrt{2} U_{2л} \sin \frac{\pi}{k_T m_2}} I_d \right] - 180 + \beta. \quad (8)$$

Зависимость противо-ЭДС инвертора  $U_d$  от допустимого инвертируемого тока  $I_d$  при  $\delta_3 = \text{const}$  называют ограничительной характеристикой, выражение которой

$$U_d = -\frac{3}{\pi} (\sqrt{6} U_{2\Phi N} \cos \delta_{3 \min} - I_d x_\phi). \quad (9)$$

Ограничительная характеристика приведена на рис. 1.

**Коэффициент мощности зависимого инвертора** рассчитывается по такой же формуле, что и для управляемого выпрямителя

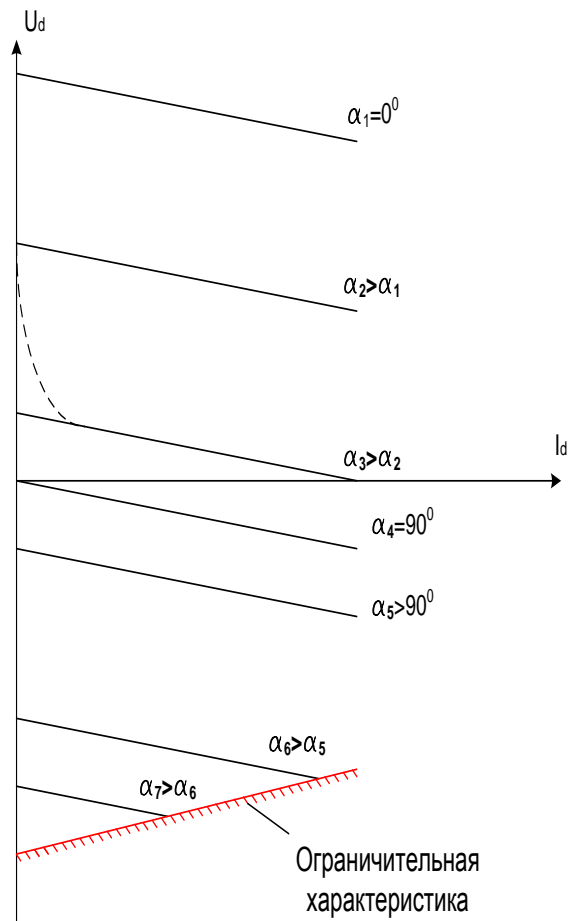
$$x = \frac{P_{1(1)}}{S_1} = k_{иск} k_{сдв}$$

С учетом того, что  $\alpha = \pi - \beta$  для зависимого инвертора

$$x = k_{иск} \cos \left( \beta - \frac{\gamma}{2} \right). \quad (10)$$

При непрерывном характере тока цепи постоянного тока зависимого инвертора коэффициент искажения можно принять постоянным и равным 0,955. С учетом этого коэффициент мощности зависимого инвертора можно рассчитать по формуле:

$$x = 0,955 \cos \left( \beta - \frac{\gamma}{2} \right). \quad (11)$$



**Рис.1.** Внешние характеристики выпрямителя и зависимого инвертора

**Коэффициент полезного действия зависимого инвертора**

$$\eta = \frac{P_2}{P_d} = \frac{P_d - \sum P_{\pi}}{P_d} = 1 - \frac{\sum P_{\pi}}{P_d}, \tag{12}$$

где

$P_d = U_d I_d$  – мощность, потребляемая инвертором от источника электрической энергии постоянного тока;

$P_2 = m_2 U_2 I_2 \chi$  – активная мощность, отдаваемая инвертором в сеть переменного тока;

$\sum P_{\pi}$  – сумма потерь мощности инвертора.

$$\sum P_{\pi} = I_d^2 R_{cx} + k_T \Delta U_{в.пр} I_d. \tag{13}$$

$$P_d = m_1 U_1 I_1 \chi + \sum P_{\pi}$$

## Методика расчета зависимого инвертора

Порядок выполнения задания:

1. Изучить устройство, принцип работы, вывод основных расчетных соотношений зависимого инвертора.
2. Перед получением задания каждый студент должен пройти коллоквиум по теме практического задания. Тестовые вопросы для коллоквиума по теме приведены в таблице 1.
3. Варианты заданий к практическому занятию приведены в таблице 2.
4. Для заданного варианта задачи рассчитать:

- напряжение цепи постоянного тока  $U_{d0}$ ;
- номинальное значение тока цепи переменного тока,  $I_{2N}$ ;
- угол коммутации  $\gamma$ , град;
- угол, необходимый для восстановления управляющей способности тиристора,  $\delta_{\text{восст}}$ , град;
- и построить внешнюю характеристику зависимого инвертора,  $U_d=f(I_d)$  при заданных значениях угла  $\beta$ ,  $\beta=\beta_1$ ;  $\beta=\beta_2$ ;  $\beta=\beta_3$  и изменении тока  $I_d$  в пределах:  $0 < I_d < I_{dN}$ ;
- и построить ограничительную характеристику зависимого инвертора,  $U_d=f(I_d)$  при рассчитанном значении  $\delta_{3 \text{ min}}=\delta_{\text{восст}}$  и 4-5 значениях тока цепи постоянного тока  $I_d$  в пределах:  $0 < I_d < I_{dN}$ ;
- и построить зависимость коэффициента мощности зависимого инвертора,  $\chi$ , для трех заданных значениях угла  $\beta$  и изменении тока  $I_d$  в пределах:  $0 < I_d < I_{dN}$ ;
- и построить зависимость коэффициента полезного действия зависимого инвертора в функции тока,  $\eta=f(I_d)$ , для трех заданных значениях угла  $\beta$  и изменении тока  $I_d$  в пределах:  $0 < I_d < I_{dN}$ ;

Таблица 1

## Тестовые вопросы для коллоквиума

№ п/п	Перечень вопросов для коллоквиума
1	Дайте пояснение принципу работы зависимого инвертора
2	Поясните каким образом осуществляется перевод управляемого выпрямителя в режим инвертирования
3	Укажите способы регулирования величины мощности, отдаваемой зависимым инвертором в сеть переменного тока.
4	Напишите формулу для расчета напряжения $U_{a0}$
5	Напишите формулу для расчета угла коммутации $\gamma$
6	Напишите формулу для расчета угла восстановления управляющей способности тиристора, $\delta_{\text{восст}}$ , град;
7	Напишите формулу для расчета внешней характеристики зависимого инвертора, $U_d=f(I_d)$
8	Напишите формулу для расчета ограничительной характеристики зависимого инвертора $U_d=f(I_d)$
9	Напишите формулу для расчета коэффициента полезного действия зависимого инвертора
10	Напишите формулу для расчета коэффициента мощности зависимого инвертора

Таблица 2

## Варианты заданий к практическому занятию

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I_{dN}$ , А	3,0	6,0	4,0	5,0	15,0	16,0	8,0	9,0	25,0	27,0	14,0
$U_{\phi 2N}$ , В	127	127	220	220	127	127	220	220	127	127	220
$m_c$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$k_T$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$f_c$ , Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$x_{\phi}$ , Ом	5,0	3,0	4,0	4,0	1,0	1,0	2,0	2,0	0,5	0,5	1,0
$R_{cx}$ , Ом	1,0	0,9	0,8	0,9	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5

$\Delta U_{в.пр}, В$	1,5	1,75	2,0	1,5	1,75	2,0	1,5	1,75	2,0	1,5	1,75
$t_q, мкс$	50	75	100	125	150	50	75	100	125	150	125
$\beta_1, град$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\beta_2, град$	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
$\beta_3, град$	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Продолжение табл. 2

Вариант	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$I_{dN}, А$	2,0	4,0	5,0	6,0	7,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	15,0
$U_{ф2N}, В$	127	127	220	220	127	127	220	220	127	127	220
$m_c$	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$k_T$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$f_c, Гц$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$x_{ф}, Ом$	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,25	0,25	0,2
$R_{сх}, Ом$	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4
$\Delta U_{в.пр}, В$	1,5	1,75	2,0	1,5	1,75	2,0	1,5	1,75	2,0	1,5	1,75
$t_q, мкс$	60	65	70	75	80	85	95	100	110	120	125
$\beta_1, град$	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\beta_2, град$	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
$\beta_3, град$	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Окончание табл. 2

Вариант	23	24	25	26	27	28	29	30	31
$I_{dN}, А$	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5
$U_{ф2N}, В$	127	220	220	127	127	220	220	127	127
$m_c$	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$k_T$	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$f_c, Гц$	50	50	50	50	50	50	50	50	50
$x_{ф}, Ом$	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,25	0,25
$R_{сх}, Ом$	1,5	0,9	0,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5
$\Delta U_{в.пр}, В$	1,75	2,0	1,5	1,75	2,0	1,5	1,75	2,0	1,5
$t_q, мкс$	75	100	125	150	50	75	100	125	150
$\beta_1, град$	30	30	30	30	30	30	30	30	30
$\beta_2, град$	45	45	45	45	45	45	45	45	45
$\beta_3, град$	60	60	60	60	60	60	60	60	60

