

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО МОДУЛЮ 3

Задача 1.

В схеме рис. 1.1 дано:

Напряжение сети переменного тока $U_1 = 220$ В, коэффициент трансформации силового трансформатора $k_{тр} = 1$, ЭДС источника постоянного тока $E_0 = 100$ В, мощность, потребляемая от сети источником $P_{ист} = 10$ кВт, коэффициент полезного действия преобразователя $\eta = 0,9$, внутреннее сопротивление источника постоянного тока $r_{вн} = 0,1$ Ом, индуктивное сопротивление сглаживающего реактора $X_d = 1$ Ом.

Рассчитать: среднее значение тока I_d , потребляемого от источника питания; коэффициент мощности χ , составляющие полной мощности P_a , Q , T .

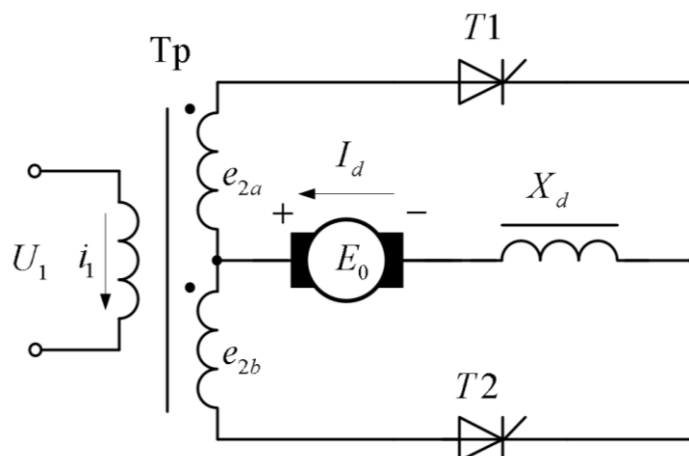


Рис. 1.1

Решение: Работа схемы поясняется диаграммами на рис. 1.2. На 1.2, а показано формирование ЭДС на выходе инвертора, которая уравнивает напряжение источника постоянного тока; на рис. 1.2, б показан ток вентилей $T1$ и $T2$, которые образуют ток I_d , потребляемый от источника постоянного тока.

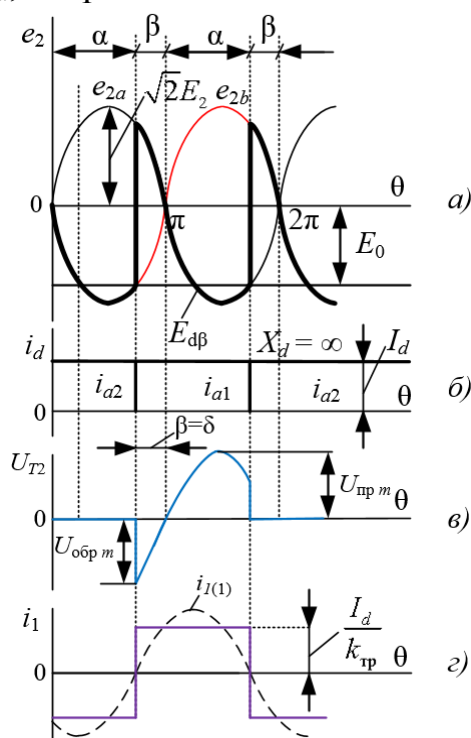


Рис.1.2. Диаграммы напряжений и токов

Поскольку в цепи источника включен сглаживающий реактор с $X_d = 1$ Ом, то ток источника I_d будет идеально сглажен (рис. 1.2, б), а поскольку индуктивное сопротивление рассеяния силового трансформатора не учитывается, то коммутация тока с вентиля на вентиль будет мгновенной. На рис. 1.2, в изображена форма тока в первичной обмотке силового трансформатора i_1 . Этот ток должен быть таким, чтобы в любой момент времени его намагничивающая сила компенсировала намагничивающую силу тока, протекающего по вторичной обмотке трансформатора:

$$i_1 \cdot w_1 + i_2 \cdot w_2 = 0. \quad (1.1)$$

Поскольку намагничивающая сила вторичного тока образуется намагничивающей силой верхней и нижней полуобмоток, направленными в противоположные стороны, то выражение (1.1) можно представить в виде:

$$i_1 \cdot w_1 + w_2 \cdot (i_{2a} - i_{2b}) = 0.$$

Отсюда находим i_1 :

$$i_1 = -\frac{w_2}{w_1} \cdot (i_{2a} - i_{2b}) = -\frac{1}{k_{тр}} \cdot (i_{2a} - i_{2b}). \quad (1.2)$$

Поэтому ток i_1 имеет прямоугольную форму с амплитудой $I_d/k_{тр}$. На рис. 1.2, в изображена форма напряжения на тиристоре $T2$, которая представляет собой разность между потенциалом анода ϕ_a и потенциалом катода ϕ_k этого тиристора. Как видно из рис. 1.2, б, тиристор $T2$ проводит ток на интервале от 0 до $(\pi - \beta)$. Поэтому на этом интервале разность $(\phi_a - \phi_k)$ близка к нулю. В точке $(\pi - \beta)$ открывается тиристор $T1$, а тиристор $T2$ закрывается. Поэтому потенциал катода ϕ_k тиристора $T2$ будет определяться потенциалом e_{2a} . Поэтому напряжение на тиристоре $T2$ представляет собой разность $(e_{2b} - e_{2a})$.

Поскольку мощность, потребляемая от источника постоянного тока $P_{ист}$, преобразуется зависимым инвертором с КПД $\eta = 0,9$, то преобразованная мощность, которая представляет собой активную мощность инвертора, составляет:

$$P_a = P_{ист} \cdot \eta = 10000 \cdot 0,9 = 9000 \text{ Вт}. \quad (1.3)$$

С другой стороны, $P_{ист}$ определяется как:

$$P_{ист} = (E_0 - I_d \cdot r_{вн}) \cdot I_d = (100 - I_d \cdot 0,1) \cdot I_d = 10000 \text{ Вт}, \quad (1.4)$$

где I_d – ток, потребляемый от источника постоянного тока.

Из (1.4) находим $I_{d1} = 887,3$ А, $I_{d2} = 112,7$ А. Из двух найденных корней выбираем меньший вариант ($I_{d2} = 112,7$ А), поскольку в противном случае для получения той же мощности источника его напряжение будет несоизмеримо меньше по сравнению с напряжением сети переменного тока. Кроме того, если пренебречь внутренним сопротивлением источника постоянного тока в формуле (1.4), то $I_d \approx P_{ист}/E_0 = 10000/100 = 100$ А. Таким образом, выбираем вариант $I_{d2} = 112,7$ А, т.к. он ближе по величине к рассчитанному приближенному значению $I_d \approx 100$ А.

Напряжение источника постоянного тока $U_{ист} = E_0 - I_d \cdot r_{вн}$ уравнивается ЭДС на выходе зависимого инвертора, найденной из рис. 1.2, а:

$$E_{a\beta} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\pi-\beta}^{2\pi-\beta} \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \theta \, d\theta = \frac{2\sqrt{2} \cdot E_2}{\pi} \cdot \cos \beta = 0,9 \cdot E_2 \cdot \cos \beta = E_0 - I_d \cdot r_{вн}, \quad (1.5)$$

где E_2 – действующее значение ЭДС на вторичной обмотке трансформатора, определяемое через коэффициент трансформации силового трансформатора:

$$E_2 = U_1/k_{тр} = 220/1 = 220 \text{ В}.$$

Отсюда находим угол опережения β :

$$\beta = \arccos\left(\frac{E_0 - I_d \cdot r_{\text{вн}}}{0,9 \cdot E_2}\right) = \arccos\left(\frac{100 - 112,7 \cdot 0,1}{0,9 \cdot 220}\right) = 63^\circ = 1,1 \text{ рад.}$$

Из рис. 1.2, б следует, что среднее значение анодного тока каждого тиристора:

$$I_{a \text{ ср}} = I_d / 2 = 112,7 / 2 = 56,35 \text{ А.}$$

Амплитудное значение анодного тока тиристора:

$$I_{a \text{ макс}} = I_d = 112,7 \text{ А.}$$

Максимальное значение прямого и обратного напряжения, прикладываемого к тиристорам определяется из рис. 1.2, в.

$$U_{\text{пр м}} = 2\sqrt{2} \cdot E_2 = 2\sqrt{2} \cdot 220 = 622,25 \text{ В,}$$

$$U_{\text{обр м}} = \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \delta = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \sin 63^\circ = 277,2 \text{ В.}$$

Рассчитанные значения токов и напряжений являются исходными данными для выбора силовых тиристоров инвертора.

Полный коэффициент мощности инвертора χ определяется по известному выражению:

$$\chi = (\cos \varphi_1) \cdot v, \quad (1.6)$$

где $\cos \varphi_1$ – коэффициент сдвига зависимого инвертора, определяющий его реактивную мощность, φ_1 – угол сдвига между первой гармоникой тока в первичной обмотке силового трансформатора и напряжением сети переменного тока U_1 , v – коэффициент искажения, определяемый так же, как и в схемах управляемых выпрямителей

$$v = I_{1(1)} / I_1, \quad (1.7)$$

где: $I_{1(1)}$ – действующее значение первой гармоники первичного тока; I_1 – действующее значение первичного тока.

Как видно из рис. 1.2, с сдвиг по фазе между первой гармоникой первичного тока $i_{1(1)}$ и напряжением U_1 определяются как

$$\varphi_1 = \pi - \beta = 180 - 63 = 117^\circ = 2,042 \text{ рад.} \quad (1.8)$$

Следовательно, $\cos \varphi_1 = \cos 117^\circ = -0,45$. Знак (–) в этом выражении говорит о том, что зависимый инвертор является потребителем реактивной мощности.

По (1.8) определяем коэффициент искажения v . I_1 находим из рисунка 1.2, в:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2(\theta) d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{I_d}{k_{\text{тр}}}\right)^2 d\theta} = \frac{I_d}{k_{\text{тр}}} = \frac{112,7}{1} = 112,7 \text{ А.}$$

Первую гармонику этого $I_{1(1)}$ находим из разложения функции i_1 в ряд Фурье. Мгновенное значение первой гармоники первичного тока:

$$i_{1(1)} = \frac{4 \cdot I_d}{k_{\text{тр}} \cdot \pi} \cdot \sin \theta. \quad (1.9)$$

Отсюда действующее значение первичного тока:

$$I_{1(1)} = \frac{4 \cdot I_d}{k_{\text{тр}} \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 112,7}{\sqrt{2} \cdot \pi} = 101,46 \text{ А,}$$

$$v = I_{1(1)} / I_1 = 101,46 / 112,7 = 0,9.$$

Полный коэффициент мощности рассчитывается по (1.6)

$$\chi = (\cos \varphi_1) \cdot v = 0,54 \cdot 0,9 = 0,486.$$

Полная мощность, преобразованная зависимым инвертором:

$$S = U_1 \cdot I_1 = 220 \cdot 112,7 = 24794 \text{ В} \cdot \text{А}. \quad (1.10)$$

Как уже было вычислено ранее (1.3) активные составляющие этой мощности:

$$P_a = 9000 \text{ Вт}.$$

Реактивная составляющая находится из выражения:

$$Q = P_a \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 = 9000 \cdot \operatorname{tg} 117^\circ = 17663,5 \text{ Вт}.$$

Мощность искажения находится из выражения:

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{24794^2 - 9000^2 - 17663,5^2} = 14891,04 \text{ В} \cdot \text{А}. \quad (1.11)$$

Векторная диаграмма преобразованной мощности изображена на рис. 1.3.

Из этой диаграммы следует, что:

$$v = \frac{\sqrt{P_a^2 + Q^2}}{\sqrt{P_a^2 + Q^2 + T^2}} = \cos \varphi_2. \quad (1.12)$$

Отсюда получаем, что угол φ_2 численно равен:

$$\varphi_2 = \arccos v = \arccos 0,9 = 25,2^\circ = 0,469 \text{ рад} \quad (1.13)$$

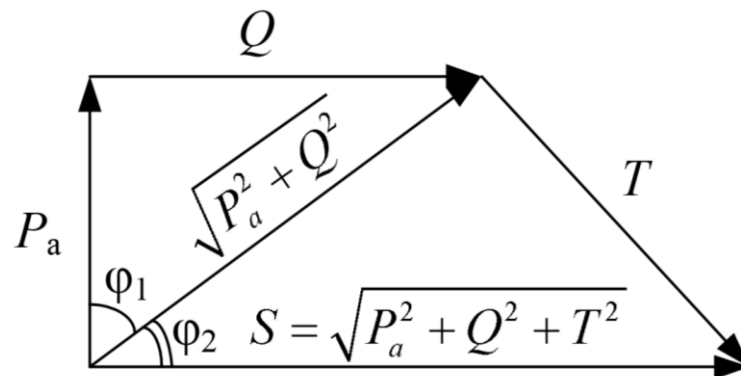


Рис. 1.3. Векторная диаграмма мощностей

Задача 2.

В схеме рис. 2.1 дано:

Напряжение сети переменного тока $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380$ В, коэффициент трансформации силового трансформатора $k_{тр} = 1$, индуктивное сопротивление рассеяния обмоток силового трансформатора $X_a = 0,1$ Ом, частота питающей сети $f_c = 50$ Гц, индуктивное сопротивление сглаживающего реактора $X_d = \infty$; время восстановления управляющих свойств силовых тиристоров $t_{восст} = 100$ мкс.

Построить ограничительную характеристику инвертора. В ответе указать координаты двух характерных точек – $A(I_{dкр1}; E_{d\beta кр1})$ и $B(0; E_{d\beta max})$ (см. рис. 2.2)

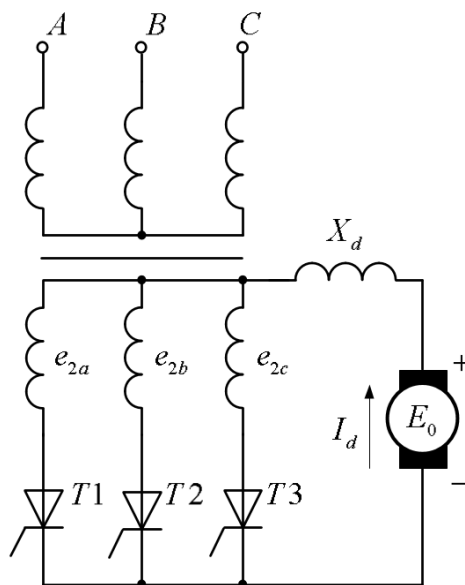


Рис. 2.1. Схема трехфазного инвертора с нулевой точкой

Решение: Ограничительная характеристика строится вместе с семейством входных характеристик инвертора $E_{d\beta} = f(I_d)$. Уравнением входной характеристики является выражение:

$$E_{d\beta} = -E_{d\beta 0} - \frac{I_d \cdot X_a}{(2\pi)/m}.$$

здесь $E_{d\beta} = -1,17 \cdot E_2 \cdot \cos \beta$ – значение противо-ЭДС инвертора для заданного угла опережения β при условии отсутствия коммутационных процессов ($\gamma = 0$).

Для построения ограничительной характеристики нам потребуются две входные характеристики для различных значений угла опережения β . В качестве одного угла выберем любое значение между $\beta_{\min} = \delta_{\min} = \omega \cdot t_{восст}$ и $\beta_{\max} = \pi/2$, например $\beta_1 = \pi/6$. Тогда входную характеристику для этого угла построим следующим образом.

Уравнение этой характеристики

$$E_{d\beta 1} = -1,17 \cdot E_2 \cdot \cos \beta_1 - (I_d \cdot X_a)/(2 \cdot \pi/3) = -1,17 \cdot 220 \cdot \cos (\pi/6) - (I_d \cdot 0,1)/(2 \cdot \pi/3),$$

где $E_2 = 380/\sqrt{3} = 220$ В.

Отложим значение $E_{d\beta 0} = -1,17 \cdot 220 \cdot \cos (\pi/6) = 222,94$ В на оси ординат (рис. 2.2). Это значение противо-ЭДС будет при $I_d = 0$ (режим холостого хода). Для выбранного угла $\beta_1 = \pi/6$ найдем критическое значение тока $I_{dкр1}$, при котором угол запаса $\delta = \delta_{\min} = \omega \cdot t_{восст} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 0,031$ рад.

$$I_{d\text{кр}1} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_2}{X_a} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot (\cos \delta_{\min} - \cos \beta_1) = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{0,1} \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot \left(\cos 0,031 - \cos \frac{\pi}{6} \right) = 356,8 \text{ A.}$$

Отложим это значение на оси абсцисс (рис. 2.2).

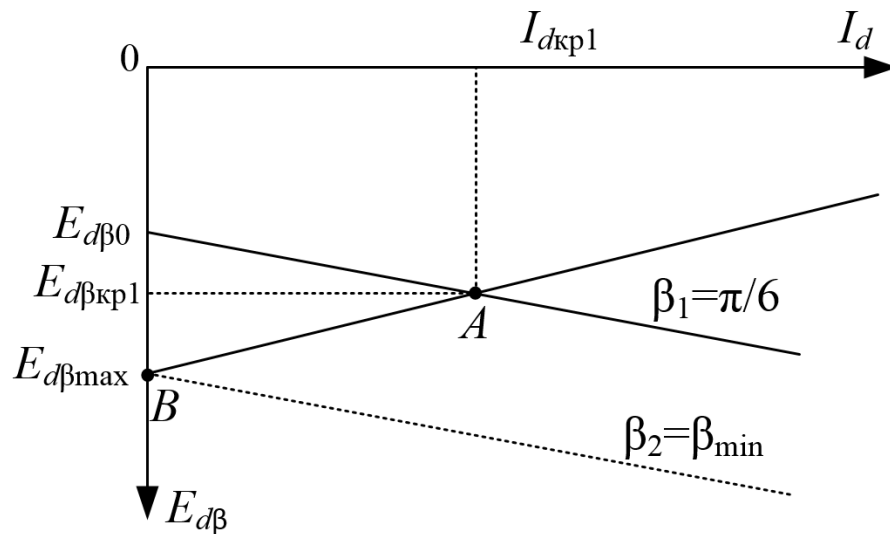


Рис. 2.2. Построение ограничительной характеристики зависимого инвертора

Теперь найдем величину $E_{d\beta \text{кр}1}$ для этого же значения угла β_1 по формуле:
 $E_{d\beta \text{кр}1} = -1,17 \cdot E_2 \cdot (\cos \delta_{\min} + \cos \beta_1)/2 = -1,17 \cdot 220 \cdot (\cos 0,031 + \cos (\pi/3))/2 = -240 \text{ В.}$
 Отложим это значение на оси ординат (рис. 2.2). Из точек $I_{d\text{кр}1}$ и $E_{d\beta \text{кр}1}$ восстановим перпендикуляры и найдем их точку пересечения A . Теперь через точку A и точку $E_{d\beta 0}$ на оси ординат проводим прямую линию, которая и будет представлять собой входную характеристику, соответствующую углу $\beta_1 = \pi/6$, а ограничительная характеристика должна проходить через точку A . Вторую точку для упрощения построения ограничительной характеристики найдем следующим образом. На оси ординат отложим наибольшее значение противо-ЭДС, которое будет при угле $\beta_2 = \delta_{\min} = 0,031$ рад.

$$E_{d\beta \text{max}} = -1,17 \cdot E_2 \cdot \cos \delta_{\min} = -1,17 \cdot 220 \cdot \cos 0,031 = -257,14 \text{ В.}$$

Из этой точки исходит гипотетическая входная характеристика, соответствующая углу $\beta_2 = \delta_{\min}$ и существующая только в одной точке – точке B , соответствующей режиму холостого хода. Теперь проводим через точки B и A прямую линию, которая и будет ограничительной характеристикой нашего инвертора. Итак точки построения ограничительной характеристики зависимого инвертора имеют координаты $A(356,8; -240)$, $B(0; -257,14)$.