

**Методика расчета элементов силовой части  
электропривода постоянного тока  
с тиристорным преобразователем**

Произвести расчет и выбор элементов силовой части реверсивного тиристорного преобразователя, построенного по трехфазной мостовой схеме, предназначенного для работы на двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

Исходные данные для расчета сведены в таблицу П2.1.

Таблица П2.1

**Исходные данные**

Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Величина
1	2	3
<i>Параметры питающей сети</i>		
Линейное напряжение, В	$U_{1л}$	380
Частота, Гц	$f_1$	50
Число фаз	$m_1$	3
<i>Номинальные параметры двигателя постоянного тока независимого возбуждения</i>		
Мощность, Вт	$P_H$	5500
Напряжение якоря, В	$U_{a.н}$	220
Момент, Н·м	$M_H$	35
Ток якоря, А	$I_{a.н}$	29,3
Напряжение возбуждения, В	$U_{в.н}$	220
Ток возбуждения, А	$I_{в.н}$	0,92
Скорость вращения, об/мин	$n_H$	1500

1	2	3
Число полюсов	$2p_n$	4
Сопротивление обмотки якоря при рабочей температуре $75^{\circ}\text{C}$ , Ом	$R_{\text{я}}$	0,331
Сопротивление обмотки добавочных полюсов при рабочей температуре $75^{\circ}\text{C}$ , Ом	$R_{\text{дп}}$	0,179
Сопротивление компенсационной обмотки при рабочей температуре $75^{\circ}\text{C}$ , Ом	$R_{\text{ко}}$	0,025
Момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$J_{\Sigma}$	0,25
Масса двигателя, кг	$m_{\text{дв}}$	123,5

### Пример расчета

#### 1. Расчет и выбор силового трансформатора

Определяем мощность на стороне выпрямленного тока:

$$P_d = U_d I_d = U_{a.n} I_{a.n} = 220 \cdot 29,3 = 6446 \text{ Вт}, \quad (\text{П2.1})$$

где  $U_d$  – напряжение постоянного тока;  $I_d$  – значение постоянного тока.

Определяем типовую мощность трансформатора для трехфазной мостовой схемы выпрямителя:

$$S_T = 1,045 \cdot P_d = 1,045 \cdot 6446 = 6736,07 \text{ ВА}. \quad (\text{П2.2})$$

С учетом коэффициента запаса расчетная мощность трансформатора составляет

$$S_{T,расч} = k_3 S_T = 1,25 \cdot 6736,07 = 8420,088 \text{ ВА.} \quad (\text{П2.3})$$

Выбираем трансформатор общего назначения типа ТСЗ-10/0,66 – трансформатор силовой трехфазный защищенный [11], параметры которого приведены в табл. П2.2.

Таблица П2.2

### Параметры трансформатора ТСЗ-10/0 66

Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Величина
Номинальная мощность, кВА	$S_H$	10
Номинальные напряжение обмоток высокого напряжения, В	$U_{BH}$	380, 500, 660
Номинальные напряжение обмоток низкого напряжения, В	$U_{HH}$	230, 400
Напряжение короткого замыкания, %	$U_K$	4,5
Потери холостого хода, Вт	$P_0$	90
Потери короткого замыкания, Вт	$P_K$	280
Ток холостого хода, %	$I_0$	7
Масса трансформатора, кг	$m_{тр}$	150

Считаем, что используется трансформатор с соединением первичных и вторичных обмоток по схеме звезда/звезда. Номинальные напряжения обмоток соответственно 380 В и 230 В.

Определяем недостающие параметры трансформатора.

Фазный ток вторичной обмотки трансформатора

$$I_{2\phi} = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_{HH}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 25,102 \text{ А,} \quad (\text{П2.4})$$

где  $P_H$  – номинальная мощность трансформатора, Вт (здесь  $P_H$  принимается равной номинальной мощности  $S_H$ ).

Полное, активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки трансформатора на фазу определяем по формулам

$$z = \frac{U_K U_{HH}}{100 I_{2\phi} \sqrt{3}} = \frac{4,5 \cdot 230}{100 \cdot 25,102 \cdot \sqrt{3}} = 0,238 \text{ Ом}; \quad (\text{П2.5})$$

$$R_{\text{тр}} = \frac{P_K \cdot 3U_{HH}^2}{3P_H^2} = \frac{280 \cdot 3 \cdot 230^2}{3 \cdot 10000^2} = 0,148 \text{ Ом}; \quad (\text{П2.6})$$

$$X_a = \sqrt{z^2 - R_{\text{тр}}^2} = \sqrt{0,238^2 - 0,148^2} = 0,186 \text{ Ом}. \quad (\text{П2.7})$$

Индуктивность фалы вторичной обмотки трансформатора

$$L_{\text{тр}} = \frac{X_a}{\omega_1} = \frac{X_a}{2\pi f_1} = \frac{0,186}{2 \cdot 3,141 \cdot 50} = 0,592 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \quad (\text{П2.8})$$

- где  $\omega_1$  – угловая частота сети, рад/с.

## 2. Расчет и выбор тириستоров

Максимальное значение выпрямленной ЭДС для трехфазной мостовой схемы

$$E_{d.\text{max}} = 1,35 \cdot U_{HH} = 1,35 \cdot 230 = 310,5 \text{ В}. \quad (\text{П2.9})$$

Максимальное обратное напряжение на тиристорах

$$U_{\text{обр. max}} = 1,05 \cdot E_{d.\text{max}} = 1,05 \cdot 310,5 = 326,025 \text{ В}. \quad (\text{П2.10})$$

Класс тиристора определяют следующим образом:

$$\text{КЛАСС} = \frac{U_{\text{обр. max}}}{100} = \frac{326,025}{100} = 3,26. \quad (\text{П2.11})$$

Таким образом, тиристоры должны быть не ниже четвертого класса. Среднее значение тока тиристора

$$I_{\text{ср.т}} = \frac{I_d}{3} = \frac{I_{a.n}}{3} = \frac{29,3}{3} = 9,766 \text{ А}. \quad (\text{П2.12})$$

Максимальное значение тока тиристора в момент пуска двигателя

$$I_{\text{max.т}} = \frac{I_{d.\text{max}}}{3} = \frac{k_I \cdot I_{a.n}}{3} = \frac{2 \cdot 29,3}{3} = 19,533 \text{ А}, \quad (\text{П2.13})$$

где  $k_I$  – коэффициент кратности пускового тока в замкнутой системе электропривода.

По данным [12] выбираем тиристор **T122-25-4**, параметры которого приведены в таблице П2.3.

Таблица П2.3

### Параметры тиристора T122-25-4

Наименование параметров, единицы измерения	Обозначение	Величина
Максимально допустимый средний ток, А	$I_{\text{ср.т}}$	25
Пороговое напряжение, В	$U_0$	1,75
Динамическое сопротивление, Ом	$R_{\text{дин}}$	$10,9 \cdot 10^{-3}$
Обратное напряжение, В	$U_{\text{обр}}$	400
Тип рекомендуемого радиатора	O221-60	–

Для построения реверсивного преобразователя тиристоры **T122-25-4** необходимы в количестве двенадцати штук.

### 3. Расчет индуктивности уравнительных реакторов

В реверсивном тиристорном преобразователе при совместном согласованном управлении группами тиристоров за счет соединения двух тиристорных групп образуется замкнутый контур, по которому при наличии результирующей ЭДС может протекать, минуя цепь нагрузки, уравнительный ток  $i_{yp}$ . Этот ток только одного направления создает дополнительные потери в преобразователе, а в ряде случаев, особенно в динамических режимах, может привести к авариям. Поэтому для ограничения уравнительного тока используют уравнительные реакторы  $L1 - L4$  (см. рис. 6.5).

У трехфазного мостового выпрямителя существует два замкнутых контура уравнительного тока. Первый контур замыкается по цепи: вторичная обмотка фазы  $A$  трансформатора  $T1$  – тиристор  $VS1$  – реактор  $L1$  – реактор  $L2$  – тиристор  $VS8$  – вторичная обмотка фазы  $B$ . Второй контур замыкается по цепи: вторичная обмотка фазы  $A$  трансформатора  $T1$  – тиристор  $VS10$  – реактор  $L4$  – реактор  $L3$  – тиристор  $VS5$  – вторичная обмотка фазы  $B$  (см. рис. 6.5).

Уравнительный ток не должен превышать десяти процентов от номинального тока, поэтому уравнительные реакторы целесообразно выбирать исходя из условия, что при нагрузках, близких к номинальным, реактор насыщается рабочим током. Таким образом, в рабочем режиме реактор не будет оказывать практически никакого влияния на работу преобразователя.

Действующее значение уравнительного тока определяем по выражению

$$I_{yp} = 0,1 \cdot I_{a.n} = 0,1 \cdot 29,3 = 2,93 \text{ А.} \quad (\text{П1.14})$$

Требуемая суммарная индуктивность двух уравнительных реакторов при совместном согласованном управлении группами вентилей в реверсивном преобразователе определяется по формуле:

$$L_{yp} = \frac{k_d \sqrt{2} U_{нн}}{2\pi \cdot f_1 \cdot I_{yp}} = \frac{0,12 \cdot \sqrt{2} \cdot 230}{2 \cdot 3,141 \cdot 50 \cdot 2,93} = 0,042 \text{ Гн,} \quad (\text{П1.15})$$

где  $k_d$  – коэффициент, характеризующий отношение действующего значения уравнивающей ЭДС к амплитудному значению вторичной ЭДС.

Значение  $k_d$  зависит от схемы выпрямителя, схемы соединения групп вентилях и угла регулирования  $\alpha$ . На данном этапе расчета значение угла  $\alpha$  еще не известно, поэтому ориентировочно принимаем  $\alpha_{нач}$  равным 30 градусам. Согласно рекомендации [8] значение  $k_d$  для трехфазной мостовой встречно-параллельной схемы при указанном значении  $\alpha_{нач}$  следует принимать равным 0,12.

Если уравнивающие реакторы не насыщаются рабочим током (номинальным током якоря), то индуктивность каждого из них берется равной половине от значения  $L_{ур}$ , рассчитанного по формуле (П1.15).

Если уравнивающие реакторы насыщаются рабочим током, то индуктивность каждого из них берется равной  $L_{ур}$ .

Полагаем, что применяются уравнивающие реакторы без насыщения рабочими токами, индуктивность которых равна расчетной.

#### 4. Расчет индуктивности сглаживающего дросселя

Индуктивность сглаживающего дросселя рассчитываем без учета индуктивности уравнивающих реакторов, поскольку последние насыщаются от рабочих токов:

$$L_{сд} = \frac{e_n E_{d.max}}{i_e 2\pi f_1 m I_{a.n}} - (2L_{тр} + L_a), \text{ Гн}, \quad (\text{П1.16})$$

где  $e_n$  – относительная величина эффективного значения пульсаций первой гармоники выпрямленного напряжения;  $i_e$  – относительная величина эффективного значения пульсаций первой гармоники выпрямленного тока;  $m$  – количество пульсаций выпрямленного напряжения за период переменного.

Величина  $e_n$  выбирается при наибольшем значении угла регулирования. Предварительно принимаем максимальное значение угла регулирования  $\alpha$  равным 90°. Согласно рекомендации [8] значение  $e_n$  для

трехфазной мостовой схемы при указанном значении  $\alpha_{\max}$  следует принимать равным 0,24.

Величина пульсаций  $i_e$  диктуется условиями проектирования стандартных двигателей и не должна превышать 2...5 %.

Определяем номинальную частоту вращения ДПТ НВ:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,141 \cdot 1500}{30} = 157,079 \text{ рад/с.} \quad (\text{П1.17})$$

Определяем индуктивность якорной цепи двигателя:

$$L_a = \frac{\gamma U_{a.n}}{p_n \omega_n I_{a.n}} = \frac{0,25 \cdot 220}{2 \cdot 157,079 \cdot 29,3} = 0,00597 = 5,97 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,} \quad (\text{П1.18})$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий наличие компенсационной обмотки ( $\gamma = 0,25$  для машин с компенсационной обмоткой и  $\gamma = 0,6$  для машин без компенсационной обмотки).

Определяем индуктивность сглаживающего дросселя:

$$L_{сд} = \frac{0,24 \cdot 310,5}{0,02 \cdot 2 \cdot 3,141 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 29,3} - (2 \cdot 0,592 \cdot 10^{-3} + 5,97 \cdot 10^{-3}) \approx 0,060 = 60 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (\text{П1.19})$$

Полагаем, что применяется сглаживающий дроссель на требуемое значение тока, индуктивность которого равна расчетной.

##### *5. Расчет регулировочной характеристики, коэффициента передачи и постоянной времени тиристорного преобразователя*

Регулировочная характеристика тиристорного преобразователя с учетом выбранных элементов силовой части и их параметров может быть построена по уравнению

$$E_{d\alpha} = E_{d,max} \cos \alpha, \text{ В.} \quad (\text{П1.20})$$

Регулировочная характеристика тиристорного преобразователя представлена на рис. П2.1.

Рассчитываем коммутационное сопротивление тиристорного преобразователя:

$$R_k = \frac{X_{am}}{2\pi} = \frac{0,186 \cdot 6}{2 \cdot 3,141} = 0,177 \text{ Ом.} \quad (\text{П1.21})$$

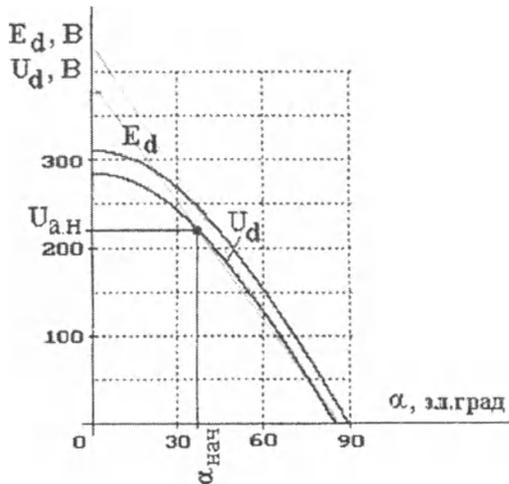


Рис. П2.1. Регулировочная характеристика ТП

Определяем суммарное сопротивление тиристорного преобразователя, принимая сопротивления каждого из уравнивательных реакторов и сглаживающего дросселя равным 0,005 Ом:

$$\begin{aligned} R_{\Pi} &= 2R_{\text{тр}} + R_k + 2R_{\text{дин}} + 2R_{\text{ур}} + R_{\text{сд}} = \\ &= 2 \cdot 0,148 + 0,177 + 2 \cdot 10,9 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 2 \cdot 0,005 + 0,005 = 0,5098 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (\text{П1.22})$$

Зависимость напряжения на якоре электродвигателя в функции угла регулирования при моменте на валу, равном номинальному, может быть определена из уравнения

$$U_{d\alpha} = E_{d.max} \cos\alpha - I_{a.n} R_{\Pi}, \text{ В.} \quad (\text{П1.23})$$

Зависимость  $U_{d\alpha} = f(\alpha)$  показана на рис. П2.1.

По рис. П1.1 графически определяем начальное значение угла регулирования  $\alpha$ , соответствующее номинальному напряжению якоря  $\alpha_{\text{нач}} \approx 38^\circ$ .

Коэффициент усиления тиристорного преобразователя на линейном участке его регулировочной характеристики определяют по формуле

$$k_{\Pi} = \frac{E_{d.max}}{U_{y.n}} = \frac{1,3 \cdot 310,5}{8} = 50,456, \quad (\text{П1.24})$$

где  $U_{y.n}$  – напряжение регулирования, необходимое для изменения угла регулирования  $\alpha$  на  $90^\circ$ .

Напряжение регулирования тиристорных преобразователей обычно составляет 8...10 В.

Принимая постоянную времени фильтра  $T_{\Phi}$  на входе системы импульсно-фазового управления равной 0,008 с, рассчитаем постоянную времени трехфазного мостового управляемого выпрямителя

$$T_{\Pi} = T_{\Phi} + \frac{1}{mf_1} = 0,008 + \frac{1}{6 \cdot 50} \approx 0,01 \text{ с.} \quad (\text{П1.25})$$

## 6. Расчет постоянных времени электропривода

Определяем сопротивление якорной цепи двигателя:

$$R_a = R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{кю}} = 0,331 + 0,179 + 0,025 = 0,535 \text{ Ом.} \quad (\text{П1.26})$$

Определяем сопротивление якорной цепи электропривода:

$$\begin{aligned} R_{a\Sigma} &= 2R_{\text{тр}} + R_{\text{к}} + 2R_{\text{дин}} + 2R_{\text{ур}} + R_{\text{сд}} + R_a = R_{\text{п}} + R_a = \\ &= 0,5098 + 0,535 = 1,045 \text{ Ом} . \end{aligned} \quad (\text{П1.27})$$

Определяем индуктивность якорной цепи электропривода:

$$L_{a\Sigma} = 2L_{\text{тр}} + 2L_{\text{ур}} + L_{\text{сд}} + L_a, \text{ Гн} \quad (\text{П1.28})$$

Поскольку выбраны уравнивательные реакторы, насыщающиеся рабочим током (номинальным током якоря), то их индуктивностью при расчете индуктивности якорной цепи электропривода можно пренебречь, тогда

$$L_{a\Sigma} = 2L_{\text{тр}} + L_{\text{сд}} + L_a = (2 \cdot 0,592 + 60 + 5,97) \cdot 10^{-3} = 67,159 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} . \quad (\text{П1.29})$$

Электромагнитную постоянную времени  $T_{\text{э}}$  электропривода определяем по формуле

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{a\Sigma}}{R_{a\Sigma}} = \frac{67,159 \cdot 10^{-3}}{1,045} = 0,064 \text{ с} . \quad (\text{П1.30})$$

Электромеханическую постоянную времени  $T_{\text{эм}}$  электропривода определяем по формуле

$$T_{\text{эм}} = \frac{R_{a\Sigma} J_{\Sigma}}{c_e c_M} = \frac{1,045 \cdot 0,25}{1,3 \cdot 1,195} = 0,168 \text{ с} . \quad (\text{П1.32})$$

Таким образом, в данном случае между постоянными времени электропривода выполняется соотношение

$$T_{\text{эм}} < 4T_{\text{э}} , \quad (\text{П1.33})$$

которое необходимо учитывать при синтезе системы управления электропривода.