

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**А. В. Лукутин, Е. Б. Шандарова**

## **РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

**Учебное пособие по курсу «Электротехника, электроника»,  
часть 2 – «Электрические машины»**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2011

УДК 621.313.001.24(075.8)

ББК 31.261я73

Л843

**Лукутин А. В., Шандарова Е. Б.**

Л843 Расчет характеристик электрических машин: учебное пособие /А. В. Лукутин, Е. Б. Шандарова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск. Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 112 с.

Учебное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов неэлектротехнических направлений и специальностей Национального исследовательского Томского политехнического университета. В него включены учебно-методические материалы, предусмотренные образовательной программой по курсу «Электротехника, электроника».

В учебном пособии изложены краткие теоретические пояснения по таким разделам курса, как «Трехфазный трансформатор», «Двигатель постоянного тока», «Электропривод», «Синхронный турбогенератор», варианты заданий к каждому разделу, примеры расчета, справочные данные.

**УДК 621.313.001.24(075.8)**

**ББК 31.261я73**

*Рецензенты*

Ведущий научный сотрудник  
научно-исследовательского института  
оптики атмосферы СО РАН,  
доктор физико-математических наук

*Ф. Ю. Канев*

Инженер-конструктор  
ООО «ЭлеТим»,  
кандидат технических наук

*А. И. Теплов*

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», 2011

© Лукутин А. В., 2011

© Обложка. Издательство Томского  
политехнического университета, 2011

# 1. ТРЕХФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

## 1.1. Общие сведения

Электрическую энергию в мощных электромашинных генераторах экономически целесообразно вырабатывать уровнем напряжения в несколько десятков киловольт. Для уменьшения потерь в линиях электропередач от источника к потребителю передача электрической энергии производится при высоких напряжениях порядка нескольких сотен киловольт. Потребители электрической энергии, в основном, питаются низким напряжением: от сотен вольт до нескольких киловольт. Поэтому в процессе выработки, передачи и потребления электрической энергии возникает необходимость в многократном изменении уровня напряжения. Для этой цели служат трансформаторы.

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока при неизменной частоте.

Основными составными частями двухобмоточного трансформатора являются замкнутый ферромагнитный сердечник и две электрически не связанные между собой обмотки. На одну из обмоток трансформатора подается напряжение от источника электрической энергии – эта обмотка называется первичной. К другой обмотке, называемой вторичной, подключаются приемники.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Переменный магнитный поток, возбуждаемый в сердечнике трансформатора, наводит в обеих обмотках электродвижущие силы, действующие значения которых равны

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m,$$

где  $\Phi_m$  – амплитуда магнитного потока;

$f$  – частота переменного тока;

$w_1, w_2$  – числа витков первичной и вторичной обмоток, соответственно.

В комплексной форме уравнения, описывающие работу реального трансформатора, выглядят следующим образом:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jx_1 \dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jx_2 \dot{I}_2 - R_2 \dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_{1xx} w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2,$$

где  $x_1 = \omega L_{\sigma 1}$ ,  $x_2 = \omega L_{\sigma 2}$  – индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Величина

$$K_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2},$$

определяющая отношение электродвижущих сил первичной и вторичной обмоток, называется коэффициентом трансформации трансформатора.

При номинальной нагрузке мощного трансформатора его коэффициент полезного действия очень высок и находится в пределах  $95,5 \div 99$  %. Он существенно понижается лишь при малых нагрузках или у маломощных трансформаторов. Это дает возможность в первом приближении считать одинаковыми первичную и вторичную полные мощности нагруженного трансформатора:

$$S_1 = U_1 I_1 \approx S_2 = U_2 I_2,$$

поэтому отношение токов у нагруженного трансформатора можно полагать обратным отношению напряжений а, следовательно, и чисел витков соответствующих обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{K_{12}}.$$

Трансформаторы с соотношением электродвижущих сил первичной и вторичной обмоток  $E_1 > E_2$  называют понижающими, с  $E_1 < E_2$  – повышающими.

Номинальный линейный ток для обмоток высокого или низкого напряжения определяется по формуле

$$I_{\text{ном}} = \frac{S \times 10^3}{\sqrt{3} \times U_{\text{ном}}},$$

где  $S$  – номинальная полная мощность трехфазного трансформатора, кВА;

$U_{\text{ном}}$  – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки трансформатора, В.

Для трехфазного трансформатора фазный ток обмотки одного стержня равен:

– при соединении обмоток в звезду (Y)

$$I_{\phi} = I;$$

– при соединении обмоток в треугольник ( $\Delta$ )

$$I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}.$$

Фазные напряжения трехфазного трансформатора:

– при соединении обмоток в звезду (Y)

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}};$$

– при соединении обмоток в треугольник ( $\Delta$ )

$$U_{\phi} = U,$$

где  $U$  – номинальное линейное напряжение соответствующей обмотки трансформатора, В.

Параметры схемы замещения трансформатора могут быть определены экспериментально из режимов холостого хода и короткого замыкания.

Режим холостого хода трансформатора осуществляется при номинальном напряжении первичной обмотки и отсутствии нагрузки на вторичной. По заданному в процентах току холостого хода первичной обмотки определяется его абсолютное значение в амперах

$$I_{1xx} = \frac{(i_{1xx}\%) \times I_{1ном}}{100\%}, \text{ А.}$$

Тогда полное сопротивление холостого хода схемы замещения трансформатора ищется по закону Ома

$$z_0 = \frac{U_{1ном}}{I_{1xx}}.$$

Считая, что в режиме холостого хода в трансформаторе выделяются активные потери только в его магнитопроводе, а потери в обмотках пренебрежительно малы, находим

$$R_0 = \frac{P_x}{I_{1xx}^2}.$$

Из треугольника сопротивлений следует

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}.$$

Режим короткого замыкания трансформатора производится при пониженном первичном напряжении  $U_{кз}$  – напряжении короткого замыкания. Его значение в процентах от номинального задается в паспортных данных трансформатора. Под напряжением короткого замыкания понимают такое подводимое к первичной обмотке напряжение, при котором в первичной и вторичной обмотках трансформатора в режиме короткого замыкания протекают номинальные токи. Абсолютное

значение напряжения короткого замыкания определится по следующему выражению

$$U_{кз} = \frac{(U_{кз\%}) \times U_{1ном}}{100\%}, \text{ В.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{к} = \frac{U_{кз}}{I_{1ном}}.$$

Полагая, что при пониженном напряжении питания первичной обмотки потери в магнитопроводе трансформатора пренебрежимо малы, а все активные потери выделяются в первичной и вторичной обмотках трансформатора, определяем активное сопротивление короткого замыкания

$$R_{к} = \frac{P_{к}}{I_{1ном}^2}.$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания находим из треугольника сопротивлений

$$x_{к} = \sqrt{z_{к}^2 - R_{к}^2}.$$

Г-образная схема замещения трансформатора приведена на рисунке 1.1.1.

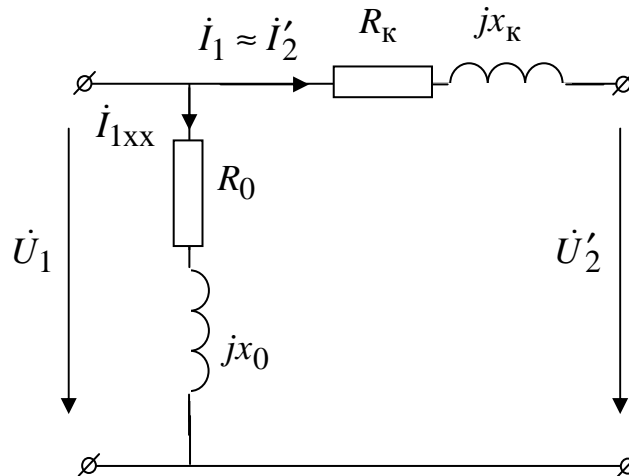


Рис. 1.1.1

Г-образная схема замещения трансформатора

Зависимость напряжения вторичной обмотки трансформатора от тока нагрузки  $U_2 = f(I_2)$  называется внешней характеристикой трансформатора. Обычно изменение напряжения вторичной обмотки определяется в относительных единицах или в процентах

$$\Delta U_{\%} = f(\beta),$$

где  $\Delta U_{\%}$  – относительное изменение напряжения вторичной обмотки в процентах;

$\beta$  – коэффициент нагрузки, равный

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} \approx \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}.$$

Тогда напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора запишется

$$U_2 = U_{2x} \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right),$$

где  $U_{2x}$  – напряжение холостого хода вторичной обмотки трансформатора.

Изменение напряжения вторичной обмотки  $U_2$  зависит не только от величины, но и от характера (активно-индуктивный, активно-емкостной, чисто активный) нагрузки

$$\Delta U_{2\%} = \beta(U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2),$$

где  $U_{\text{ка}}$  – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора

$$U_{\text{ка}} = (U_{\text{кз}\%}) \cos \varphi_{\text{к}} = \frac{(U_{\text{кз}\%}) R_{\text{к}}}{Z_{\text{к}}};$$

$U_{\text{кр}}$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора

$$U_{\text{кр}} = (U_{\text{кз}\%}) \sin \varphi_{\text{к}} = \frac{(U_{\text{кз}\%}) x_{\text{к}}}{Z_{\text{к}}}.$$

Зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки определяется по следующей формуле

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{\text{х}}}.$$

В качестве исходных данных или в задании на проект двухобмоточного трансформатора указываются следующие номинальные данные:

- номинальная полная мощность трансформатора  $S$ , кВА;
- число фаз трансформатора  $m$ ;
- частота питающей сети  $f$ , Гц;
- номинальные линейные напряжения обмоток высшего и низшего напряжений  $U_{1\text{ном}}$  и  $U_{2\text{ном}}$ ;

- число ступеней и пределы регулирования напряжения;
- маркировка клемм, схема и группа соединений обмоток трехфазного трансформатора;
- способ охлаждения трансформатора;
- режим нагрузки – продолжительный или кратковременный. При кратковременном режиме должны быть указаны его параметры – продолжительность работы и интервалов и отдаваемая трансформатором мощность (или ток);
- характер установки – внутренняя или наружная;
- напряжение короткого замыкания в процентах от первичного номинального  $U_{кз\%}$  ;
- потери короткого замыкания  $P_k$ , Вт;
- потери холостого хода  $P_x$ , Вт;
- ток холостого хода трансформатора в процентах от первичного номинального  $i_{хх\%}$  .

Могут быть поставлены также некоторые дополнительные условия, например определенная марка электротехнической стали магнитопровода трехфазного трансформатора, выполнение первичных и вторичных обмоток трансформатора из медного или алюминиевого провода и др.

## **1.2. Задание к индивидуальной работе «Трехфазный трансформатор»**

1. В соответствии с заданным вариантом из таблицы 1.3.1.[Л.10] выбрать трехфазный трансформатор и выписать его номинальные данные.

2. По заданным номинальным линейным напряжениям первичной и вторичной обмоток рассчитать коэффициент трансформации трансформатора.

3. Рассчитать номинальные токи первичной и вторичной обмоток трансформатора.

4. Определить параметры холостого хода схемы замещения трансформатора.

5. Определить параметры короткого замыкания схемы замещения трансформатора.

6. По параметрам холостого хода и короткого замыкания построить Г-образную схему замещения трансформатора.



7. Рассчитать и построить внешнюю характеристику трехфазного трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  при активно-индуктивной нагрузке ( $\cos \varphi_2 = 0,8$ ).

8. Рассчитать и построить зависимость коэффициента полезного действия трехфазного двухобмоточного трансформатора от коэффициента нагрузки  $\eta(\beta)$ .

9. В заключении дать развернутые пояснения по следующим вопросам:

– пояснить назначение трансформаторов. Дать классификацию трансформаторов;

– описать устройство трехфазного трансформатора, назвать основные элементы конструкции трансформатора;

– описать принцип действия и области применения трансформатора;

– пояснить, как зависит коэффициент трансформации трехфазного трансформатора от способа соединения фаз и маркировки обмоток высокого и низкого напряжения;

– пояснить, из каких соображений определяются параметры холостого хода и короткого замыкания трансформатора;

– раскрыть физический смысл параметров Г-образной и Т-образной схем замещения трансформатора;

– объяснить вид внешней характеристики трансформатора. Указать причины уменьшения напряжения на вторичной обмотке с ростом нагрузки трансформатора;

– объяснить вид зависимости коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки. Охарактеризовать виды потерь в трансформаторе.

### **1.3. Технические данные силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов**

Стандарты устанавливают основные параметры и технические требования к масляным трехфазным двух- и трехобмоточным трансформаторам общего назначения полной мощностью от 2,5 до 400 МВА, имеющим регулирование напряжения под нагрузкой (РПН), имеющим переключение без возбуждения (ПБВ) и не имеющим ответвлений для переключения.

Основные технические данные силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов приведены в таблице 1.3.1.

*Таблица 1.3.1. Технические данные силовых трехфазных  
двухобмоточных трансформаторов*

№ П/П	Схема соед.	$S_{НОМ}$ , кВА	$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ	$U_{кз\%}$ , %	$P_K$ , Вт	$P_X$ , Вт	$i_{1XX\%}$ , %
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
01.	Y/Y <sub>0</sub>	10	6,3	0,4	5,0	335	105	10,0
02.	Y/Δ	20	6,3	0,23	5,0	600	180	9,0
03.	Y/Y <sub>0</sub>	25	10,0	0,4	4,5	600	105	3,2
04.	Y/Δ	25	6,0	0,23	4,5	600	125	3,0
05.	Y/Δ	25	10,0	0,23	4,7	690	125	3,0
06.	Y/Δ	25	6,0	0,4	4,5	600	125	3,0
07.	Y/Y <sub>0</sub>	30	10,0	0,4	5,0	850	300	9,0
08.	Y/Y <sub>0</sub>	40	10,0	0,4	4,5	880	150	3,0
09.	Y/Δ	40	10,0	0,23	4,5	880	180	3,0
10.	Y/Y <sub>0</sub>	40	6,0	0,4	4,7	1000	180	3,0
11.	Y/Y <sub>0</sub>	50	10,0	0,4	5,0	1325	440	8,0
12.	Y/Δ	63	6,0	0,23	4,5	1280	260	2,8
13.	Y/Δ	63	10,0	0,23	4,7	1470	260	2,8
14.	Y/Y <sub>0</sub>	63	20,0	0,69	5,0	1280	245	2,8
15.	Y/Δ	75	10,0	0,23	5,0	1875	590	7,5
16.	Y/Δ	100	10,0	0,4	4,5	1970	310	2,6
17.	Y/Y <sub>0</sub>	100	35,0	0,69	6,5	1970	390	2,6
18.	Y/Δ	160	6,0	0,23	4,5	2650	540	2,4

Продолжение таблицы 1.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
19.	Y/Y <sub>0</sub>	160	10,0	0,4	4,5	3100	540	2,4
20.	Y/Y <sub>0</sub>	160	35,0	0,69	6,5	2650	560	2,4
21.	Y/Δ	180	10,0	0,525	5,0	4100	1200	7,0
22.	Y/Y <sub>0</sub>	240	10,0	0,525	5,0	5100	1600	7,0
23.	Y/Δ	250	6,0	0,23	4,5	3700	780	2,3
24.	Y/Y <sub>0</sub>	250	10,0	0,4	4,5	3700	660	2,3
25.	Y/Y <sub>0</sub>	250	35,0	0,525	6,5	3700	820	2,3
26.	Y/Δ	320	35,0	10,5	6,5	6200	2300	7,5
27.	Y/Y <sub>0</sub>	400	10,0	0,525	4,5	5500	920	2,1
28.	Y/Y <sub>0</sub>	400	35,0	0,69	6,5	5500	1150	2,1
29.	Y/Y <sub>0</sub>	630	10,0	0,525	5,5	7600	1420	2,0
30.	Y/Y <sub>0</sub>	630	35,0	0,69	6,5	7600	1700	2,0
31.	Y/Y <sub>0</sub>	1000	10,0	3,15	5,5	11600	2450	1,4
32.	Y/Y <sub>0</sub>	1000	35,0	6,3	6,5	11600	2750	1,5
33.	Y/Y <sub>0</sub>	1600	10,0	3,15	5,5	16500	3300	1,3
34.	Y/Y <sub>0</sub>	1600	35,0	6,3	6,5	16500	3650	1,4
35.	Y/Y <sub>0</sub>	2500	10,0	3,15	5,5	23500	4600	1,0
36.	Y/Y <sub>0</sub>	2500	35,0	6,3	6,5	23500	5100	1,1
37.	Y/Y <sub>0</sub>	4000	10,0	3,15	6,5	33500	6400	0,9
38.	Y/Y <sub>0</sub>	4000	35,0	6,3	7,5	33500	6700	1,0
39.	Y/Y <sub>0</sub>	6300	10,0	3,15	6,5	46500	9000	0,8
40.	Y/Y <sub>0</sub>	6300	35,0	6,3	7,5	46500	9400	0,9
41.	Y/Y <sub>0</sub>	10000	38,5	10,5	7,5	65000	14500	0,8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
42.	Y/Y <sub>0</sub>	16000	38,5	11,0	8,0	90000	21000	0,6
43.	Y/Y <sub>0</sub>	40000	38,5	11,0	8,5	165000	36000	0,4
44.	Y/Y <sub>0</sub>	80000	38,5	11,0	9,0	280000	60000	0,3

В таблице 1.3.1 указан способ соединения первичных и вторичных обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора: Y/Y<sub>0</sub> – «звезда – звезда с нулевым проводом»; Y/Δ – «звезда – треугольник». Причем в числителе дроби указывается способ соединения обмоток высшего напряжения, а в знаменателе – обмоток низшего напряжения трансформатора.

#### 1.4. Пример расчета

Из таблицы 1.3.1 выбираем трехфазный трансформатор со следующими исходными данными:

- номинальная полная мощность трехфазного трансформатора  $S_{\text{НОМ}} = 10$  кВА;
- номинальное линейное напряжение первичной обмотки трансформатора  $U_{1\text{НОМ}} = 6,3$  кВ;
- номинальное линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_{2\text{НОМ}} = 0,4$  кВ;
- напряжение короткого замыкания трансформатора, выраженное в процентах  $U_{\text{кз}\%} = 5,0$  %;
- ток холостого хода первичной обмотки, выраженный в процентах  $i_{\text{хх}\%} = 10$  %;
- потери короткого замыкания трехфазного трансформатора  $P_{\text{к}} = 335$  Вт;
- потери холостого хода трехфазного трансформатора  $P_{\text{х}} = 105$  Вт;
- способ соединения первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора – по схеме «звезда – звезда с нулевым проводом» (Y/Y<sub>0</sub>).

Коэффициент трансформации трансформатора определим из следующего соотношения

$$K_{12} \approx \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} =$$

$$= \frac{6,3 \times 10^3}{0,4 \times 10^3} = 15,75.$$

Номинальный фазный ток первичной обмотки трехфазного трансформатора

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \times 10^3}{\sqrt{3} \times U_{1\text{НОМ}}} =$$

$$= \frac{10 \times 10^3}{1,73 \times 6300} = 0,918 \text{ А.}$$

Номинальный фазный ток вторичной обмотки трехфазного трансформатора

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \times 10^3}{\sqrt{3} \times U_{2\text{НОМ}}} =$$

$$= \frac{10 \times 10^3}{1,73 \times 400} = 14,451 \text{ А.}$$

При соединении первичных и вторичных обмоток трехфазного трансформатора по схеме «звезда – звезда с нулевым проводом» (Y/Y<sub>0</sub>) линейные токи равны фазным, а номинальные фазные напряжения определяются соотношениями

$$U_{1\text{ф}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{1,73} = 3641,62 \text{ В,}$$

$$U_{2\text{ф}} = \frac{U_{2\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{1,73} = 231,21 \text{ В.}$$

Ток холостого хода первичной обмотки равен

$$I_{1\text{ХХ}} = i_{1\text{ХХ}\%} \times I_{1\text{НОМ}} =$$

$$= 0,10 \times 0,918 = 0,0918 \text{ А.}$$

Напряжение короткого замыкания

$$U_{\text{кз}} = U_{\text{кз}\%} \times U_{1\text{ф}} =$$

$$= 0,05 \times 3641,62 = 182,08 \text{ В.}$$

Параметры холостого хода трехфазного трансформатора могут быть получены из следующих формул:

– полное сопротивление холостого хода

$$z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{1xx}} = \frac{3641,62}{0,0918} = 36669,06 \text{ Ом};$$

– активное сопротивление холостого хода

$$R_0 = \frac{P_x}{3I_{1xx}^2} = \frac{105}{3 \times 0,0918^2} = 4151,8 \text{ Ом};$$

– реактивное сопротивление холостого хода

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2} = \\ = \sqrt{36669,06^2 - 4151,8^2} = 36500 \text{ Ом}.$$

Параметры короткого замыкания трехфазного трансформатора определяются из следующих соотношений:

– полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_{кз}}{I_{1ном}} = \frac{182,08}{0,918} = 198,34 \text{ Ом};$$

– активное сопротивление короткого замыкания

$$R_k = \frac{P_k}{3I_{1ном}^2} = \frac{335}{3 \times 0,918^2} = 132,51 \text{ Ом};$$

– реактивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - R_k^2} = \\ = \sqrt{198,34^2 - 132,51^2} = 147 \text{ Ом}.$$

Коэффициент трансформации трансформатора определяется как отношение номинальных линейных напряжений первичной и вторичной обмоток

$$K_{12} = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{6300}{400} = 15,75.$$

Приведенные к виткам первичной обмотки параметры вторичной обмотки трансформатора

$$R_2' \approx R_1 = \frac{1}{2} R_k = \frac{132,15}{2} = 66,255 \text{ Ом},$$

$$x_2' \approx x_1 = \frac{1}{2} x_k = \frac{147}{2} = 73,6 \text{ Ом}.$$

Тогда неприведенные параметры первичной и вторичной обмоток трансформатора имеют следующие значения

$$R_1 = 66,255 \text{ Ом};$$

$$x_1 = 73,6 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{R_2'}{K_{12}^2} = \frac{66,255}{15,75^2} = 0,267 \text{ Ом};$$

$$x_2 = \frac{x_2'}{K_{12}^2} = \frac{73,6}{15,75^2} = 0,297 \text{ Ом}.$$

T-образная схема замещения трансформатора представлена на рисунке 1.4.1.

В схеме замещения параметры  $R_1$  и  $R_2'$  указывают на электрические потери в первичной и вторичной обмотках трансформатора; параметр  $R_0$  – на электрические потери в магнитопроводе трансформатора; параметры  $x_1, x_2'$  характеризуют поля рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора; параметр  $x_0$  – основной рабочий магнитный поток.

Определим коэффициенты мощности трехфазного двухобмоточного трансформатора при работе его в режимах холостого хода и короткого замыкания

$$\cos \varphi_0 = \frac{R_0}{z_0} = \frac{4151,8}{36669,06} = 0,113,$$

$$\cos \varphi_K = \frac{R_K}{z_K} = \frac{132,51}{198,34} = 0,668.$$

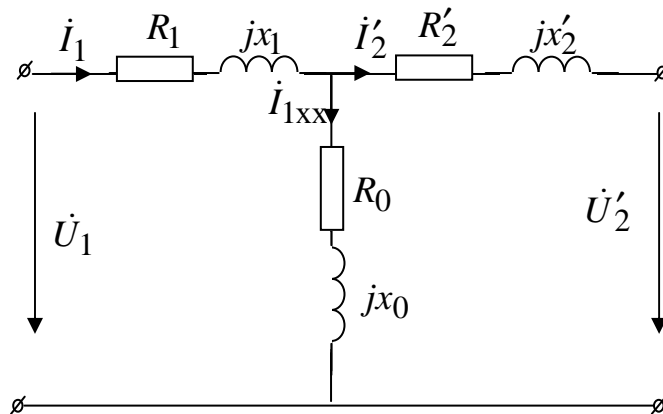


Рис. 1.4.1

T-образная схема замещения трансформатора

Построим внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$ , где  $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}}$  – коэффициент нагрузки. Для этого рассчитаем изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора при активно-индуктивном характере нагрузки с коэффициентом мощности равном  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

$$\begin{aligned}\Delta U_{2\%} &= \beta(U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2), \\ U_{\text{ка}} &= U_{\text{кз}\%} \cos \varphi_{\text{к}} = 5,0 \times 0,668 = 3,34, \\ U_{\text{кр}} &= U_{\text{кз}\%} \sin \varphi_{\text{к}} = 5,0 \times 0,744 = 3,72. \\ \Delta U_{2\%} &= \beta(U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2) = \\ &= \beta(3,34 \times 0,8 + 3,72 \times 0,6) = 4,904\beta.\end{aligned}$$

Тогда зависимость вторичного напряжения трансформатора от коэффициента нагрузки имеет вид

$$U_2 = U_{2\text{х}} \left(1 - \frac{4,904\beta}{100}\right).$$

Результаты расчета внешней характеристики трехфазного двухобмоточного трансформатора представлены в таблице 1.4.1 и на графике (рисунок 1.4.2).

Таблица 1.4.1 Внешняя характеристика трехфазного трансформатора

$\beta$	$\frac{I_2}{I_{2\text{Н}}}$	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
$\Delta U$	%	0	1,23	2,45	3,68	4,904	6,13
$U_2$	В	420,6	415,4	410,3	405,1	400	394,8

Номинальное изменение напряжения на вторичной обмотке трехфазного трансформатора составляет  $\Delta U_{2\text{НОМ}} = 20,6\text{В}$  или выраженное в процентах

$$\begin{aligned}\Delta U_{2\text{НОМ}} &= \frac{U_{2\text{х}} - U_{2\text{НОМ}}}{U_{2\text{х}}} \times 100\% = \\ &= \frac{420,6 - 400}{420,6} \times 100\% = 4,9\%.\end{aligned}$$



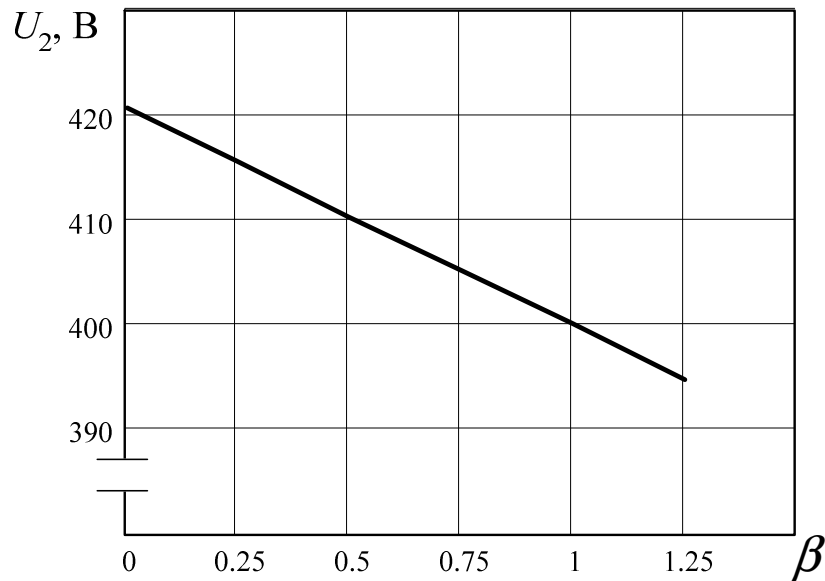


Рис. 1.4.2  
Внешняя характеристика трансформатора

Рассчитаем и построим зависимость коэффициента полезного действия трехфазного двухобмоточного трансформатора от коэффициента нагрузки  $\eta(\beta)$ :

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{\text{к}} + P_{\text{х}}} =$$

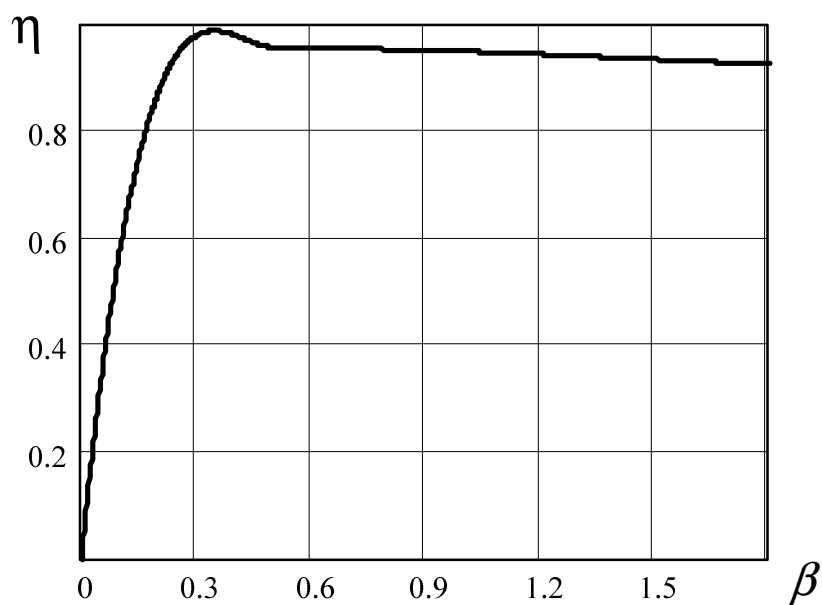
$$= \frac{0,8 \times 10^4 \times \beta}{0,8 \times 10^4 \times \beta + 335 \times \beta^2 + 105}.$$

Определим, при каком значении коэффициента нагрузки  $\beta$  коэффициент полезного действия достигает максимального значения. Максимального значения коэффициент полезного действия трехфазного трансформатора достигнет при коэффициенте нагрузки равном  $\beta = \sqrt{\frac{P_{\text{х}}}{P_{\text{к}}}} = 0,561$ .

Таблица 1.4.2 Зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки

$\beta$	0	0.25	0.50	0.561	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75
$\eta$	0	0.941	0.955	0.955	0.953	0.948	0.941	0.933	0.925

Вид зависимости коэффициента полезного действия трехфазного трансформатора от коэффициента нагрузки  $\eta(\beta)$  представлен на рисунке 1.4.3.



*Рис. 1.4.3*

*Зависимость коэффициента полезного действия трансформатора от коэффициента нагрузки*

## 2. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 2.1. Общие сведения

Электрические машины постоянного тока используются в промышленности в основном в качестве электродвигателя или генератора малой и средней мощности.

Основными частями электродвигателя постоянного тока являются: ярмо (индуктор), главные и дополнительные полюса с обмотками; сердечник якоря с обмоткой; щеточно-коллекторное устройство, подшипниковые щиты.

Электрический двигатель постоянного тока преобразует подводимую к нему электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию вращения.

В зависимости от схемы электрического соединения его обмотки возбуждения относительно обмотки якоря различают следующие способы возбуждения магнитного потока: независимое, последовательное, параллельное и смешанное.

При работе электрической машины постоянного тока в режиме электродвигателя под действием напряжения, подводимого к якорю, в его обмотке появляется ток  $I_a$ . В результате взаимодействия этого тока с магнитным потоком, созданным обмоткой возбуждения электродвигателя, возникает электромагнитный вращающий момент

$$M = C_0 \Phi I_a,$$

где  $C_0 = \frac{pN}{2\pi a}$  – постоянный коэффициент.

Здесь  $p$  – число пар полюсов электрической машины;

$N$  – число эффективных проводников обмотки якоря;

$a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

При вращении якоря в проводниках его обмотки под действием магнитного потока возбуждения будет индуцироваться электродвижущая сила  $E_a$ , направление которой противоположно направлению тока  $I_a$ , поэтому ее называют противо-ЭДС. Величина электродвижущей силы зависит от частоты вращения якоря  $\Omega$  и магнитного потока возбуждения  $\Phi$

$$E_a = C_0 \Phi \Omega.$$

Приложенное к зажимам обмотки якоря электродвигателя напряжение  $U_a$  уравнивается противо-ЭДС  $E_a$  и падением напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря

$$U_a = E_a + I_a R_a.$$

Тогда ток обмотки якоря электродвигателя определяется следующим выражением

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a}.$$

При пуске электродвигателя в ход в первый момент времени после подключения его к сети постоянного тока якорь остается неподвижным и противо-ЭДС равна нулю. Поэтому при прямом пуске электродвигателя пусковой ток его обмотки якоря будет зависеть только от напряжения сети и сопротивления обмотки якоря

$$I_{aп} = \frac{U_a}{R_a}.$$

Он может превышать номинальное значение тока якоря в  $10 \div 30$  раз. Для уменьшения пускового тока в цепь обмотки якоря вводят добавочное пусковое сопротивление  $R_{п}$  и тогда

$$I_{aп} = \frac{U_a}{R_a + R_{п}}.$$

По мере разгона противо-ЭДС нарастает, и пусковое сопротивление выводится из цепи якоря. В установившемся режиме электромагнитный вращающий момент, развиваемый электродвигателем, уравнивается моментом сопротивления на валу

$$M = M_c.$$

Под механической характеристикой электродвигателя постоянного тока понимают зависимость установившейся частоты вращения от электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем  $\Omega = f(M)$ . Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока называется естественной, если она снята при номинальном напряжении сети  $U_a$ , номинальном потоке возбуждения  $\Phi$  и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря  $R_d$ . Все остальные механические характеристики электродвигателя – искусственные.

В общем случае механическая характеристика электродвигателя постоянного тока имеет вид

$$\Omega = \frac{U_a}{C_0 \Phi} - \frac{(R_a + R_{дп} + R_d)}{C_0^2 \Phi^2} M,$$

где  $R_a + R_{дп}$  – суммарное электрическое сопротивление обмотки якоря, включая последовательную обмотку добавочных полюсов с сопротивлением  $R_{дп}$ .

В электродвигателях постоянного тока независимого и параллельного возбуждения различают следующие способы регулирования частоты вращения якоря:

- якорное регулирование частоты вращения изменением напряжения питающей сети ( $U_a = \text{var.}$ );
- полюсное регулирование частоты вращения изменением магнитного потока полюсов путем введения добавочного сопротивления в обмотку возбуждения ( $\Phi = \text{var.}$ );
- реостатное регулирование частоты вращения введением добавочного сопротивления в цепь якоря ( $R_d = \text{var.}$ ).

К номинальным данным электрической машины постоянного тока относятся следующие параметры:

- номинальная мощность  $P_{ном}$  (для электродвигателя – полезная механическая мощность на валу);
- номинальный ток цепи обмотки якоря  $I_{аном}$ ;
- номинальное напряжение на главных зажимах электрической машины  $U_{аном}$ ;
- номинальная частота вращения якоря  $n_{ном}$  (об./мин.);
- номинальный коэффициент полезного действия машины  $\eta_{ном}$ .

## **2.2. Задание к индивидуальной работе по теме «Двигатель постоянного тока независимого возбуждения»**

1. В соответствии с предложенным вариантом задания из таблицы 2.3.1 выбрать электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения серии 2П.

2. Определить ток обмотки якоря  $I_{аном}$ , потребляемый электродвигателем из сети при номинальной нагрузке.

3. Определить номинальный электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателя.

4. Рассчитать пусковой электромагнитный момент электродвигателя при пусковом токе  $I_{ап} = 2I_{аном}$  (без учета реакции якоря) и соответствующее сопротивление пускового реостата.

5. Рассчитать и построить естественную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения  $\Omega = f(M)$ .

6. Рассчитать и построить семейство искусственных механических характеристик электродвигателя при якорном регулировании частоты вращения при  $\frac{U_a}{U_{аном}}$  равном 0,33; 0,67; 1,00 от номинального.

7. Рассчитать и построить искусственную механическую характеристику электродвигателя  $\Omega = f(M)$  при введении в цепь якоря добавочного сопротивления равного  $R_d = 9(R_a + R_{дп})$ . При этом считать, что электромагнитный момент на валу электродвигателя остался неизменным и равным номинальному.

8. Считая характеристику холостого хода электродвигателя линейной, рассчитать и построить искусственную механическую характеристику  $\Omega = f(M)$  при введении в цепь обмотки возбуждения добавочного сопротивления  $R_{вд} = 0,3R_{в}$ .

9. Рассчитать и построить семейство механических характеристик при реостатном пуске электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения в диапазоне изменения момента  $M = (1,2 \div 2,0)M_{ном}$ . Определить скорости переключения, число ступеней пускового реостата и сопротивления его секций.

10. Подобрать по каталогу (смотри приложение 2) соответствующее электродвигателю пусковое сопротивление.

11. Нарисовать схему включения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Объяснить назначение добавочных сопротивлений в контурах машины.

12. Заключение сформулировать в виде пояснений по следующим вопросам:

– назвать основные элементы конструкции электрической машины постоянного тока;

– объяснить устройство щеточно-коллекторного узла, назначение коллектора и щеток в электродвигателе постоянного тока;

– охарактеризовать естественную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения, указать причины уменьшения частоты вращения с ростом нагрузки;

– пояснить, каким образом осуществляется якорное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока независимого

возбуждения. Обосновать достоинства и недостатки данного способа регулирования;

– как реализуется реостатное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения. Дать характеристику реостатному регулированию частоты вращения, указав на его достоинства и недостатки;

– как реализуется полюсное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения; его достоинства и недостатки;

– назвать способы пуска электродвигателя постоянного тока;

– описать процесс реостатного пуска электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения;

– пояснить по каким параметрам выбирается пусковой реостат;

– объяснить назначение добавочных сопротивлений в контурах электродвигателя постоянного тока.

### 2.3. Технические данные двигателей постоянного тока независимого возбуждения серии 2П с высотами осей вращения 112 ÷ 315

В таблице 2.3.1 приведены основные технические данные электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения средней мощности с высотами оси вращения 112 ÷ 315 мм.

Таблица 2.3.1. Технические данные электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения

№	Типоразмер двигателя	$P_{\text{ном}}$ кВт	$U$ , В	$n$ , $\frac{\text{об.}}{\text{мин.}}$	$\eta$ , %	Сопротивления обмоток при 15 <sup>0</sup> С, Ом		
						$R_a$	$R_{\text{дп}}$	$R_B$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.	<b>2ПН112МУХЛ4</b>	3,6	110	3150	78,5	0,084	0,089	33,6
02.	<b>2ПН112ЛУХЛ4</b>	5,6	110	3350	79,5	0,46	0,051	25,3
03.	<b>2ПН132МУХЛ4</b>	4,0	220	1500	79,0	0,564	0,336	134
04.	<b>2ПН132МУХЛ4</b>	7,0	220	2240	83,0	0,226	0,166	111

Продолжение таблицы 2.3.1

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
05.	<b>2ПН132МУХЛ4</b>	10,5	220	3000	84,0	0,140	0,094	111
06.	<b>2ПН132ЛУХЛ4</b>	5,5	220	1500	80,5	0,322	0,270	101
07.	<b>2ПН132ЛУХЛ4</b>	8,5	220	2200	84,0	0,167	0,124	89
08.	<b>2ПН132ЛУХЛ4</b>	14,0	220	3150	86,5	0,322	0,270	76
09.	<b>2ПБ132МУХЛ4</b>	3,7	110	2200	79,5	0,104	0,059	54,5
10.	<b>2ПБ132МУХЛ4</b>	4,5	110	3150	81,0	0,046	0,029	54,5
11.	<b>2ПБ132ЛУХЛ4</b>	3,2	110	1600	82,0	0,120	0,089	50
12.	<b>2ПБ132ЛУХЛ4</b>	4,5	220	2200	84,0	0,269	0,220	189
13.	<b>2ПБ132ЛУХЛ4</b>	5,3	220	3000	85,5	0,167	0,124	216
14.	<b>2ПО132ЛУХЛ4</b>	6,7	220	3000	86,0	0,120	0,089	138
15.	<b>2ПФ132МУХЛ4</b>	7,5	220	3000	85,0	0,140	0,094	111
16.	<b>2ПФ132ЛУХЛ4</b>	11,0	220	3000	85,5	0,080	0,066	76
17.	<b>2ПН160МУХЛ4</b>	13,0	220	2120	85,5	0,081	0,056	61,5
18.	<b>2ПН160МУХЛ4</b>	18,0	220	3150	87,0	0,037	0,024	53,1
19.	<b>2ПН160ЛУХЛ4</b>	11,0	220	1500	85,5	0,096	0,073	65,3
20.	<b>2ПН160ЛУХЛ4</b>	16,0	440	2360	87,5	0,71	0,131	13,4
21.	<b>2ПН160ЛУХЛ4</b>	24,0	220	3150	88,0	0,024	0,017	49,4
22.	<b>2ПБ160МУХЛ4</b>	4,2	220	1500	84,5	0,326	0,208	177
23.	<b>2ПБ160МУХЛ4</b>	6,0	220	2120	86,5	0,145	0,101	177
24.	<b>2ПБ160ЛУХЛ4</b>	8,1	220	3350	86,5	0,044	0,031	181
25.	<b>2ПБ160ЛУХЛ4</b>	7,5	220	2240	88,0	0,096	0,073	181
26.	<b>2ПО160МУХЛ4</b>	9,5	220	3000	87,5	0,081	0,056	148
27.	<b>2ПБ180МУХЛ4</b>	3,4	220	800	81,0	0,486	0,296	150



Продолжение таблицы 2.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
28.	<b>2ПБ180МУХЛ4</b>	12,0	220	3350	87,5	0,038	0,025	197
29.	<b>2ПБ180ЛУХЛ4</b>	5,6	440	1000	84,5	0,990	0,644	131
30.	<b>2ПО180МУХЛ4</b>	4,5	220	750	79,5	0,486	0,292	114
31.	<b>2ПО180МУХЛ4</b>	14,0	220	2120	89,0	0,058	0,037	98
32.	<b>2ПО180МУХЛ4</b>	17,0	220	3000	89,0	0,038	0,025	132
33.	<b>2ПО180ЛУХЛ4</b>	5,2	220	800	81,5	0,260	0,183	72,5
34.	<b>2ПО180ЛУХЛ4</b>	7,5	220	1000	84,0	0,168	0,110	72,5
35.	<b>2ПО180ЛУХЛ4</b>	16,0	440	2120	89,5	0,168	0,110	72,5
36.	<b>2ПО180ЛУХЛ4</b>	20,0	220	3000	90,0	0,025	0,018	98,5
37.	<b>2ПФ180МУХЛ4</b>	12,0	220	1060	82,0	0,150	0,092	49,2
38.	<b>2ПФ180МУХЛ4</b>	26,0	220	3150	89,0	0,022	0,015	49,2
39.	<b>2ПФ180ЛУХЛ4</b>	18,5	220	1500	87,0	0,065	0,044	46,7
40.	<b>2ПФ180ЛУХЛ4</b>	25,0	440	2200	89,5	0,136	0,084	46,0
41.	<b>2ПФ180ЛУХЛ4</b>	32,0	440	3150	90,5	0,065	0,044	46,7
42.	<b>2ПН200МУХЛ4</b>	8,5	220	800	82,0	0,188	0,116	61,6
43.	<b>2ПН200МУХЛ4</b>	13,0	220	1120	85,0	0,106	0,061	61,6
44.	<b>2ПН200МУХЛ4</b>	36,0	220	2200	88,5	0,026	0,016	46,0
45.	<b>2ПН200МУХЛ4</b>	60,0	440	3150	90,5	0,047	0,029	35,0
46.	<b>2ПН200ЛУХЛ4</b>	16,0	220	1000	86,0	0,083	0,053	55,0
47.	<b>2ПН200ЛУХЛ4</b>	53,0	440	2360	90,5	0,055	0,037	31,7
48.	<b>2ПБ200ЛУХЛ4</b>	6,0	220	800	84,5	0,220	0,150	137
49.	<b>2ПБ200ЛУХЛ4</b>	11,0	440	1500	89,0	0,286	0,168	137
50.	<b>2ПФ200МУХЛ4</b>	22,0	220	1600	87,5	0,047	0,029	46

Продолжение таблицы 2.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
51.	<b>2ПФ200МУХЛ4</b>	30,0	440	2200	90,0	0,106	0,061	46
52.	<b>2ПФ200МУХЛ4</b>	40,0	440	3000	90,5	0,071	0,041	96
53.	<b>2ПФ200ЛУХЛ4</b>	42,0	440	2360	90,5	0,055	0,037	31,7
54.	<b>2ПФ200ЛУХЛ4</b>	55,0	440	3150	91,0	0,031	0,020	31,7
55.	<b>2ПО200МУХЛ4</b>	6,0	220	750	83,5	0,294	0,100	96,0
56.	<b>2ПО200МУХЛ4</b>	9,0	220	1060	86,0	0,143	0,073	96,0
57.	<b>2ПО200МУХЛ4</b>	14,0	220	1500	88,0	0,071	0,042	96,0
58.	<b>2ПО200МУХЛ4</b>	20,0	220	2360	89,5	0,026	0,016	74,0
59.	<b>2ПО200ЛУХЛ4</b>	11,0	220	1000	86,5	0,125	0,080	102
60.	<b>2ПО200ЛУХЛ4</b>	17,0	220	1500	89,0	0,055	0,037	102
61.	<b>2ПН225МУХЛ4</b>	7,5	220	1500	77,0	0,350	0,101	82,43
62.	<b>2ПН225МУХЛ4</b>	11,0	220	600	79,5	0,202	0,068	62,25
63.	<b>2ПН225МУХЛ4</b>	22,0	220	1000	82,0	0,086	0,043	62,25
64.	<b>2ПН225ЛУХЛ4</b>	30,0	440	1060	84,5	0,196	0,070	38,5
65.	<b>2ПН250МУХЛ4</b>	15,0	220	530	80,0	0,142	0,078	37,9
66.	<b>2ПН250МУХЛ4</b>	18,0	220	630	80,5	0,110	0,054	37,9
67.	<b>2ПН250МУХЛ4</b>	22,0	440	850	81,0	0,235	0,096	28,7
68.	<b>2ПН250МУХЛ4</b>	37,0	440	1060	85,0	0,152	0,078	28,7
69.	<b>2ПН250МУХЛ4</b>	50,0	440	1500	87,0	0,110	0,054	29,8
70.	<b>2ПН250МУХЛ4</b>	55,0	440	1700	87,0	0,059	0,026	20,2
71.	<b>2ПН250ЛУХЛ4</b>	22,0	340	630	82,0	0,158	0,093	33,4
72.	<b>2ПН250ЛУХЛ4</b>	28,0	440	750	83,0	0,260	0,110	33,4
73.	<b>2ПН250ЛУХЛ4</b>	45,0	220	1000	85,5	0,030	0,016	25,1

Продолжение таблицы 2.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
74.	<b>2ПН250ЛУХЛ4</b>	71,0	440	1500	88,5	0,065	0,031	31,2
75.	<b>2ПФ250ЛУХЛ4</b>	22,0	220	500	78,0	0,122	0,064	33,4
76.	<b>2ПФ250ЛУХЛ4</b>	26,5	440	600	81,5	0,380	0,195	34,7
77.	<b>2ПФ250ЛУХЛ4</b>	28,0	220	600	82,2	0,082	0,047	33,4
78.	<b>2ПФ250ЛУХЛ4</b>	30,0	220	750	84,3	0,050	0,031	33,4
79.	<b>2ПФ250ЛУХЛ4</b>	37,0	340	750	83,2	0,122	0,064	25,1
80.	<b>2ПФ250ЛУХЛ4</b>	45,0	340	1180	86,0	0,065	0,031	33,4
81.	<b>2ПН280МУХЛ4</b>	30,0	440	600	84,5	0,185	0,082	30,0
82.	<b>2ПН280МУХЛ4</b>	110	440	1500	89,5	0,034	0,015	30,0
83.	<b>2ПН280ЛУХЛ4</b>	37,0	440	600	86,0	0,147	0,069	26,6
84.	<b>2ПН280ЛУХЛ4</b>	132	440	1500	90,6	0,025	0,012	25,2
85.	<b>2ПФ280МУХЛ4</b>	75,0	220	1000	88,5	0,016	0,008	22,8
86.	<b>2ПФ280МУХЛ4</b>	110	220	1500	89,0	0,008	0,004	22,8
87.	<b>2ПФ280ЛУХЛ4</b>	55	220	750	87,5	0,025	0,012	25,2
88.	<b>2ПФ280ЛУХЛ4</b>	85	440	1000	88,7	0,050	0,025	19,7
89.	<b>2ПН315МУХЛ4</b>	100	440	1000	88,0	0,040	0,024	25,6
90.	<b>2ПН315МУХЛ4</b>	110	220	1000	89,0	0,008	0,005	18,8
91.	<b>2ПН315МУХЛ4</b>	160	220	1500	90,0	0,004	0,003	25,6
92.	<b>2ПН315ЛУХЛ4</b>	45	440	500	86,9	0,128	0,065	21,0
93.	<b>2ПН315ЛУХЛ4</b>	55	440	630	88,0	0,074	0,032	14,8
94.	<b>2ПН315ЛУХЛ4</b>	118	440	1000	89,0	0,032	0,016	21,0
95.	<b>2ПН315ЛУХЛ4</b>	132	440	1060	90,0	0,006	0,004	21,1
96.	<b>2ПН315ЛУХЛ4</b>	200	220	1500	91,0	0,003	0,002	21,0

Продолжение таблицы 2.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
97.	<b>2ПФ315МУХЛ4</b>	55	220	600	87,0	0,029	0,004	34,0
98.	<b>2ПФ315МУХЛ4</b>	160	440	1900	90,0	0,012	0,007	25,6
99.	<b>2ПФ315ЛУХЛ4</b>	90	220	750	88,0	0,013	0,008	21,0
00.	<b>2ПФ315ЛУХЛ4</b>	220	220	1500	91,0	0,003	0,002	21,0

Для электродвигателей постоянного тока независимого возбуждения установлена следующая структура обозначения типоразмера:

<b>2П</b>		<b>Н</b>		<b>112</b>		<b>М</b>		<b>УХЛ</b>		<b>4</b>
↓		↓		↓		↓		↓		↓
1		2		3		4		5		6

1 – серия электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения –2П;

2 – конструктивное исполнение электродвигателя постоянного тока: «Н» – самовентилирующиеся электродвигатели; «Б» – электродвигатели с естественным охлаждением; «О» – с наружным обдувом электродвигателя от постороннего вентилятора; «Ф» – с независимой вентиляцией электродвигателя от постороннего вентилятора;

3 – высота оси вращения в миллиметрах. Государственными стандартами установлен следующий ряд высот оси вращения: 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315 мм;

4 – условная длина сердечника якоря: «М» – первая длина, «L» – вторая длина;

5 – климатическое исполнение, «У» – электродвигатели, предназначенные для эксплуатации в районах с умеренным климатом; «ХЛ» – электродвигатели, предназначенные для эксплуатации в районах с холодным климатом;

6 – число полюсов электродвигателя.

## 2.4. Пример расчета

В соответствии с заданным преподавателем варианта из таблицы 2.3.1. выбираем электродвигатель постоянного тока независимого воз-

буждения типа 2ПН112МУХЛ4 со следующими номинальными данными:

– номинальная механическая мощность на валу электрического двигателя  $P_{\text{НОМ}} = 3,6$  кВт;

– номинальное напряжение питающей сети постоянного тока  $U_{\text{аНОМ}} = 110$  В;

– номинальная частота вращения якоря электродвигателя  $n_{\text{НОМ}} = 3150$  об./мин.;

– номинальный коэффициент полезного действия электродвигателя  $\eta_{\text{НОМ}} = 78,5$  %;

– электрическое сопротивление обмотки якоря при температуре окружающей среды  $15^\circ\text{C}$   $R_a = 0,084$  Ом;

– электрическое сопротивление обмотки добавочных полюсов  $R_{\text{дп}} = 0,089$  Ом;

– электрическое сопротивление обмотки возбуждения электродвигателя  $R_{\text{в}} = 33,6$  Ом.

Ток, потребляемый обмоткой якоря электродвигателя постоянного тока из сети,

$$\begin{aligned} I_{\text{аНОМ}} &= \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}} U_{\text{аНОМ}}} = \\ &= \frac{3,6 \times 10^3}{0,785 \times 110} = 41,69 \text{ А.} \end{aligned}$$

Номинальный электромагнитный вращающий момент, развиваемый электродвигателем,

$$\begin{aligned} M_{\text{НОМ}} &= \frac{P_{\text{НОМ}} \times 30}{\pi n_{\text{НОМ}}} = \\ &= \frac{3,6 \times 10^3 \times 30}{3,14 \times 3150} = 10,92 \text{ Нм.} \end{aligned}$$

Для электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения электромагнитный момент пропорционален току якорной обмотки. Поэтому электромагнитный пусковой момент при токе  $I_{\text{ап}} = 2I_{\text{аНОМ}}$  будет равен

$$M_{\text{п}} = 2M_{\text{НОМ}} = 2 \times 10,92 = 21,84 \text{ Нм.}$$

Соответствующее сопротивление пускового реостата определится из формулы

$$I_{a\Pi} = \frac{U_{a\text{НОМ}}}{R_a + R_{\text{дп}} + R_{\Pi}} = 2I_{a\text{НОМ}},$$

откуда

$$\begin{aligned} R_{\Pi} &= \frac{U_{a\text{НОМ}}}{2I_{a\text{НОМ}}} - R_a - R_{\text{дп}} = \\ &= \frac{110}{2 \times 41,69} - 0,084 - 0,089 = 1,15 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Уравнение естественной механической характеристики электродвигателя имеет следующий вид

$$\Omega = \frac{U_a}{C_0\Phi} - \frac{(R_a + R_{\text{дп}})}{C_0^2\Phi^2} M.$$

Произведение  $C_0\Phi$  определим из уравнения равновесия напряжений якорной цепи

$$U_a = E_a + I_a(R_a + R_{\text{дп}}).$$

Подставляя выражение для электродвижущей силы якоря  $E_a = C_0\Phi\Omega$ , получим

$$\begin{aligned} C_0\Phi &= \frac{U_{a\text{НОМ}} - (R_a + R_{\text{дп}})I_{a\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \\ &= \frac{110 - (0,084 + 0,089) \times 41,69}{329,7} = 0,312, \end{aligned}$$

где

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30} =$$

$$= \frac{3,14 \times 3150}{30} = 329,7 \text{ рад./сек.}$$

Тогда уравнение естественной механической характеристики электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения приобретает следующий вид

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{U_a}{C_0\Phi} - \frac{(R_a + R_{\text{дп}})}{C_0^2\Phi^2} M = \\ &= 352,6 - 1,778M. \end{aligned}$$

Естественная механическая характеристика электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рисунке 2.4.1.

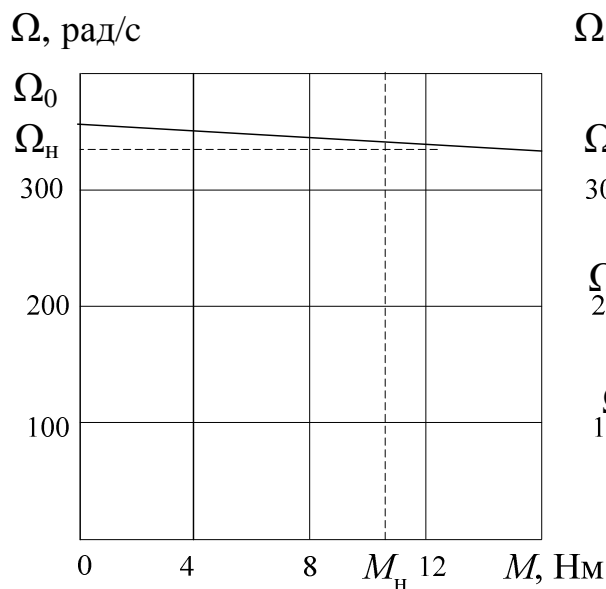


Рис. 2.4.1

*Естественная механическая характеристика ДПТ*

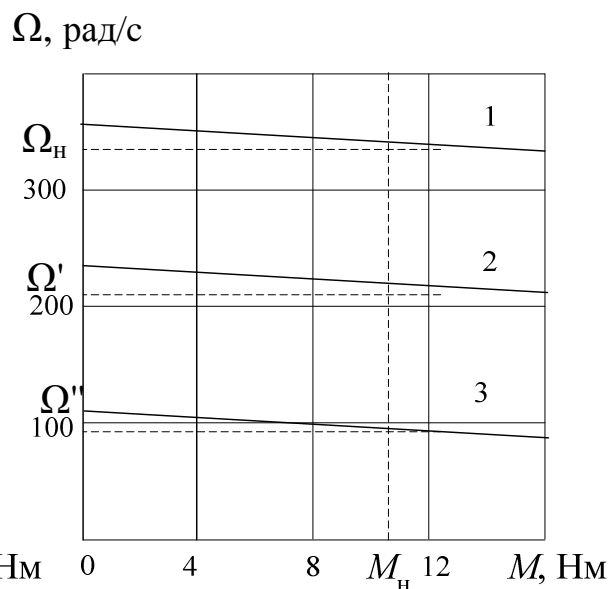


Рис. 2.4.2

*Механические характеристики при якорном регулировании*

При якорном регулировании электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения наклон механической характеристики не изменится, а частота вращения холостого хода будет пропорциональна напряжению, приложенному к якорной обмотке электрической машины.

Таблица 2.4.1. Механические характеристики электродвигателя постоянного тока при якорном регулировании

$U_a$	$\frac{U_a}{U_{a\text{ном}}}$	$1,00U_{a\text{н}}$	$0,67U_{a\text{н}}$	$0,33U_{a\text{н}}$
$\Omega_0$	рад./сек.	352,8	236,4	116,4
$\Omega_{\text{ном}}$	рад./сек.	333,4	217,0	97,0

Семейство искусственных механических характеристик электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения при якорном регулировании представлено на рисунке 2.4.2, где кривая 1 – естественная механическая характеристика для номинального напряжения сети  $U_a = U_{аном}$ ; 2 –  $U_a = 0,67U_{аном}$ ; 3 –  $U_a = 0,33U_{аном}$ .

При введении добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря частота вращения холостого хода электродвигателя постоянного тока не изменится, а жесткость механической характеристики существенно уменьшится. Рассчитаем искусственную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения для реостатного регулирования при добавочном сопротивлении в цепи якоря равном  $R_d = 9(R_a + R_{дп})$

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{U_a}{C_0\Phi} - \frac{(R_a + R_{дп} + R_d)}{C_0^2\Phi^2} M = \\ &= \frac{110}{0,312} - \frac{[0,084 + 0,089 + 9(0,084 + 0,089)]}{0,312^2} M = \\ &= 352,6 - 17,78M. \end{aligned}$$

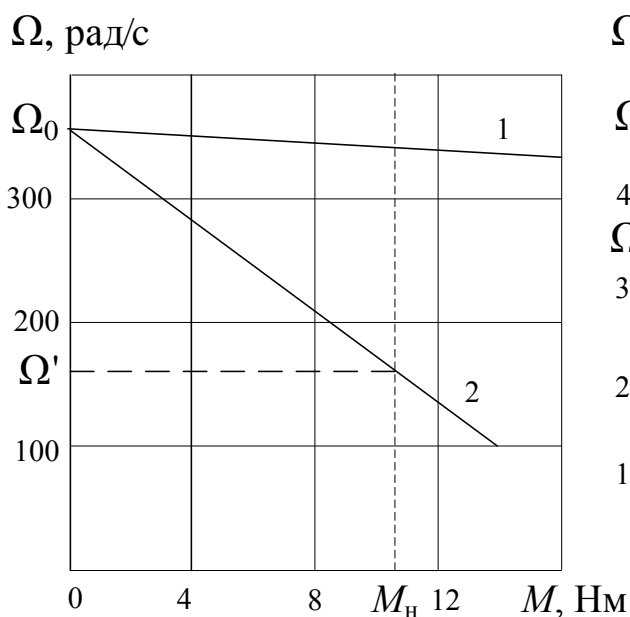


Рис. 2.4.3

Семейство механических характеристик ДПТ при реостатном регулировании

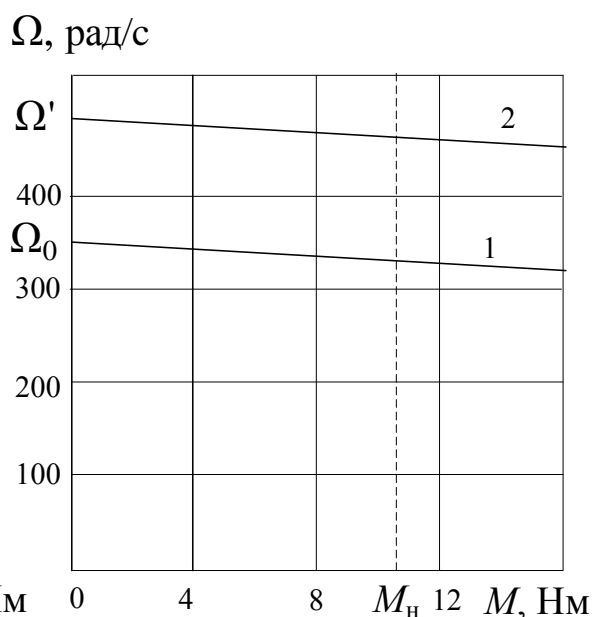


Рис. 2.4.4

Семейство механических характеристик ДПТ при полюсном регулировании



Семейство механических характеристик электродвигателя постоянного тока при реостатном регулировании его частоты вращения приведены на рисунке 2.4.3, где кривая 1 – естественная механическая характеристика двигателя; 2 – механическая характеристика при введении добавочного сопротивления  $R_d = 9(R_a + R_{дп})$ .

При введении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения уменьшается ток возбуждения и, следовательно, магнитный поток обмотки возбуждения машины. При ненасыщенной магнитной системе электродвигателя изменение магнитного потока возбуждения пропорционально изменению тока возбуждения. То есть при введении в цепь обмотки возбуждения добавочного сопротивления  $R_{вд} = 0,3R_{в}$  ток и магнитный поток возбуждения уменьшатся в 0,77 раза, соответственно

$$\begin{aligned}\Omega &= \frac{U_a}{0,77C_0\Phi} - \frac{(R_a + R_{дп})}{0,77^2 C_0^2 \Phi^2} M = \\ &= \frac{110}{0,77 \times 0,312} - \frac{(0,084 + 0,089)}{(0,77 \times 0,312)^2} M = \\ &= 445,3 - 2,836M.\end{aligned}$$

Семейство механических характеристик электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения для полюсного регулирования представлено на рисунке 2.4.4, где кривая 1 – естественная механическая характеристика двигателя при  $\Phi = \Phi_{ном}$ ; 2 – механическая характеристика при введении добавочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения ( $\Phi = 0,77\Phi_{ном}$ ).

Построим механические характеристики электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения при реостатном пуске. Процесс реостатного пуска заключается в том, что при достижении определенного значения развиваемого электродвигателем электромагнитного момента часть секций пускового сопротивления шунтируется. При полностью шунтированном пусковом реостате электродвигатель начинает работать на естественной механической характеристике и выходит на номинальный режим.

Пределы изменения момента при пуске электродвигателя определяются по следующим соображениям. Значение максимального момента при номинальном потоке электродвигателя обычно принимается по условиям коммутации равным  $2 \div 2,5$ . Что касается минимального момента, то его нужно принять, по крайней мере, на  $10 \div 20\%$  больше момента сопротивления механизма. Для построения реостатных характе-

ристик принимаем, что момент при пуске изменяется в пределах от  $2M_{\text{НОМ}}$  до  $1,2M_{\text{НОМ}}$ .

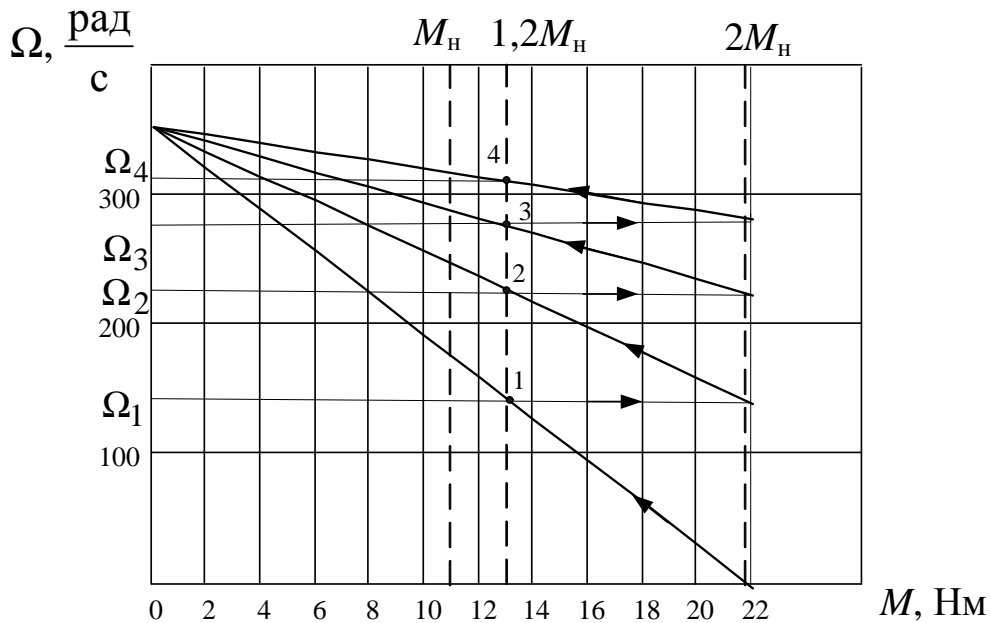


Рис. 2.4.5

Диаграмма пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Графически определяем скорости переключения секций пускового реостата при электромагнитном моменте на валу электродвигателя равном  $1,2M_{\text{НОМ}}$  (точки 1, 2, 3, 4 на рисунке 2.4.5):

$$\Omega_1 = 140 \text{ рад./сек.};$$

$$\Omega_2 = 225 \text{ рад./сек.};$$

$$\Omega_3 = 275 \text{ рад./сек.};$$

$$\Omega_4 = 310 \text{ рад./сек.}$$

По скорости переключения определим добавочные сопротивления для всех реостатных механических характеристик электродвигателя из формулы

$$\Omega = \frac{U_a}{C_0 \Phi} - \frac{(R_a + R_{\text{дп}} + R_{\text{д}})}{C_0^2 \Phi^2} M.$$

Для момента  $M = 1,2M_{\text{НОМ}}$  получаем

$$R_{\text{д}} = 2,437 - \frac{\Omega}{135,09}.$$

Заносим полученные результаты расчета в таблицу 2.4.2.

Таблица 2.4.2. Сопротивление секций пускового реостата

$\Omega$	рад./сек.	310	275	225	140
$R_d$	Ом	0,142	0,401	0,771	1,401

Таким образом, выбираем секционированный пусковой реостат, состоящий из четырех секций со следующими величинами сопротивлений секций:

$$R_{d1} = 1,401 - 0,771 = 0,630 \text{ Ом};$$

$$R_{d2} = 0,771 - 0,401 = 0,370 \text{ Ом};$$

$$R_{d3} = 0,401 - 0,142 = 0,259 \text{ Ом};$$

$$R_{d4} = 0,142 \text{ Ом}.$$

Из приложения 2 выбираем пусковой реостат III габарита типа РЗП-3 со следующими параметрами:

- допустимая мощность электродвигателя – 5,0 ÷ 7,0 кВт;
- номинальное допустимое напряжение – 110 В;
- предельный допустимый ток реостата – 120 А;
- число ступеней пускового реостата – 8;
- число элементов сопротивлений пускового реостата – 8;
- вес пускового реостата – 21 кг.

Пусковые реостаты типа РЗП предназначены для управления электродвигателями постоянного тока с параллельным или смешанным возбуждением мощностью до 19 кВт при напряжении питающей сети 110 В и мощностью до 42 кВт при напряжении питающей сети 220 или 440 В. Пусковые реостаты осуществляют пуск электродвигателя постоянного тока путем ступенчатого изменения сопротивления в цепи обмотки якоря.

Они состоят из проволочных или ленточных резистивных элементов типов СН, СНл и ЦФ. Вместе с коммутирующим устройством они расположены в металлическом корпусе с естественным воздушным охлаждением.

Пусковыми реостатами можно производить только пуск и остановку электродвигателя. Недопустима их работа в длительном режиме. Они допускают два пуска электродвигателя подряд с паузой после каждого пуска, вдвое большей, чем время пуска. На частые пуски реостаты не рассчитаны.

Схема включения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения представлена на рисунке 2.4.6. Здесь:  $M$  – обмотка якоря электродвигателя постоянного тока;  $OB$  – независимая обмотка возбуждения;  $R_{ВД}$  – добавочное сопротивление в цепи обмотки возбуждения, предназначенное для полюсного управления электродвигателем;  $R_{Д}$  – добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря для реостатного регулирования частоты вращения;  $R_{Д1}, \dots, R_{Д4}$  – секции пускового реостата;  $K_1, \dots, K_4$  – коммутаторы.

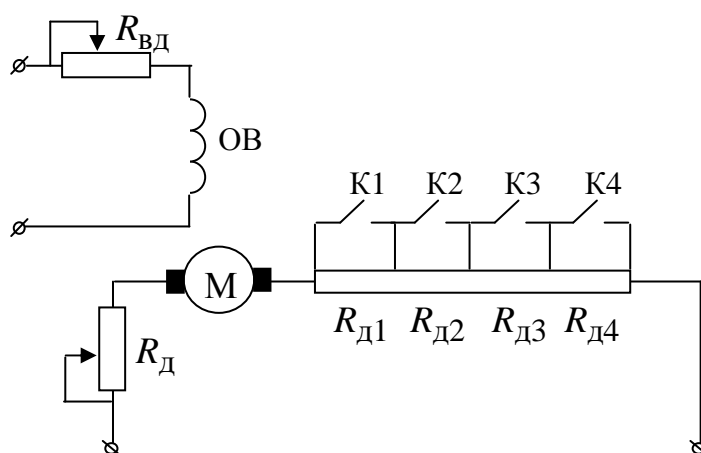


Рис. 2.4.6

Схема включения электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения

### 2.5. Задание к индивидуальной работе по теме «Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения»

1. В соответствии с предложенным вариантом задания из таблицы 2.6.1 выбрать электродвигатель постоянного тока последовательного возбуждения.
2. Определить номинальный электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателя.
3. Полагая, что магнитная система электродвигателя ненасыщенна, рассчитать и построить его естественную механическую характеристику  $\Omega = f(M)$ .
4. Рассчитать и построить семейство искусственных механических характеристик электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения при реостатном регулировании частоты вращения для до-

добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря равном  $R_{д1} = R_{\Sigma}$ ;  $R_{д2} = 2R_{\Sigma}$ ;  $R_{д3} = 3R_{\Sigma}$ . При этом считать, что напряжение на зажимах обмотки якоря электродвигателя остается постоянным и равным номинальному.

5. Рассчитать и построить искусственную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения при уменьшении магнитного потока возбуждения в два раза путем шунтирования обмотки возбуждения добавочным сопротивлением  $R_{дв}$ . Как и в пункте 3 считать магнитную систему электродвигателя ненасыщенной.

6. Нарисовать электрическую схему подключения к сети электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Объяснить назначение добавочных сопротивлений в контурах электрической машины.

7. Сформулировать заключение в виде пояснений по следующим вопросам:

- назвать основные элементы конструкции электрической машины постоянного тока;

- объяснить устройство щеточно-коллекторного узла, назначение коллектора и щеток в электродвигателе постоянного тока;

- дать определение механической характеристики электродвигателя. Пояснить, что понимают под естественной и искусственными механическими характеристиками электродвигателя;

- объяснить вид естественной механической характеристики электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Указать на ее достоинства;

- перечислить способы регулирования частоты вращения электродвигателя постоянного тока;

- пояснить каким образом осуществляется реостатное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Обосновать достоинства и недостатки данного способа регулирования;

- как реализуется полюсное регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения, его достоинства и недостатки;

- в чем отличие эксплуатационных характеристик электрических двигателей постоянного тока параллельного (независимого) и последовательного возбуждения.

## 2.6. Технические данные тяговых электродвигателей постоянного тока

В таблице 2.6.1 представлены основные технические данные тяговых электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

*Таблица 2.6.1. Технические данные тяговых электродвигателей  
постоянного тока*

№ п/п	Типо- размер двигателя	Режим работы	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$U_{\text{аном}}$ , В	$n_{\text{ном}}$ , об/мин	Сопротивление обмо- ток, Ом		
						$R_a$	$R_{\text{ГП}}$	$R_{\text{ДП}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.	<b>ЭД-1,8</b>	ПВ=40%	1,8	185	700	1,2	0,615	0,29
02.	<b>ЭД-1,8</b>	ПВ=40%	1,8	160	520	1,2	0,615	0,29
03.	<b>ЭДР-5</b>	часовой	5	80	1500	0,024	0,0248	-
04.	<b>ДРТ-10</b>	часовой	10	105	1500	0,045	0,045	0,0161
05.	<b>ЭДР-10,2</b>	часовой	10,2	250	500	0,167	0,063	0,229
06.	<b>ЭДР-11,2</b>	часовой	11,2	120	585	0,043	0,0408	0,0157
07.	<b>ДРТ-12</b>	часовой	12	250	500	0,052	0,061	0,0230
08.	<b>ДПТР-12</b>	часовой	12	130	615	0,042	0,044	0,016
09.	<b>ДК- 800БМ</b>	часовой	12,2	250	480	6,193	0,204	-
10.	<b>ДРТ-13</b>	часовой	13	130	615	0,042	0,053	0,015
11.	<b>ЭДР-15,6</b>	часовой	15,6	160	515	0,05	0,0437	0,0207
12.	<b>ДПТР-19</b>	часовой	19	190	670	0,063	0,054	0,025
13.	<b>НБ-431А</b>	продолж.	21	3000	440	22,0	12,0	6,0
14.	<b>ДРТ-23,5</b>	часовой	23,5	185	900	0,065	0,058	0,029
15.	<b>ЭДР-25</b>	часовой	25	250	900	0,05	0,0437	0,0207

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16.	<b>ЭТ-31</b>	часовой	31	250	1050	0,102	0,098	0,050
17.	<b>ЭТ-46</b>	часовой	46	250	1320	0,114	0,105	0,061
18.	<b>ЭД-139У2</b>	продолж.	132	550	1750	0,031	0,029	0,0175
19.	<b>НБ-406</b>	продолж.	470	1500	765	0,0473	0,0442	0,0237
20.	<b>НБ-406</b>	часовой	525	1500	735	0,0473	0,0442	0,0237
21.	<b>ТЛ-2К1</b>	продолж.	575	1500	830	0,0317	0,025	0,0356
22.	<b>ТЛ-2К1</b>	часовой	670	1500	790	0,0317	0,025	0,0356
23.	<b>НБ-412К</b>	продолж.	675	1450	925	0,031	0,0238	0,032
24.	<b>НБ-412К</b>	часовой	800	1450	880	0,031	0,0238	0,032

Здесь:  $R_a$  – электрическое сопротивление обмотки якоря электродвигателя;  $R_{гп}$  – электрическое сопротивление катушек главных полюсов, включая переходный контакт «щетка – коллектор»;  $R_{дп}$  – электрическое сопротивление катушек добавочных полюсов.

Тяговые электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения – это, как правило, электродвигатели специализированного назначения, применяемые для работы в электроприводах прокатных станов, металлургических, крановых, экскаваторных, рудничных механизмов, на железнодорожном и городском электротранспорте в условиях повышенной влажности (до 97%), высоких температур окружающей среды (в диапазоне  $-50^{\circ} \div +40^{\circ}$ ), сильной запыленности воздуха (до  $200 \div 300 \text{ мг/м}^3$ ) и существенных механических вибраций (уровень вибрации в горизонтальном направлении может достигать до 3g). Электродвигатели могут работать в продолжительном, часовом и повторно-кратковременном режиме с продолжительностью включения ПВ=40%. Нагрузка на тяговый электродвигатель может кратковременно превышать номинальную на 50 ÷ 70%. Тяговые электродвигатели надежно работают при повышении напряжения питания на 20 ÷ 30% и в режиме динамического рекуперативного торможения – на 27% сверх номинального напряжения электродвигателя.

Электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения допускают регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Максимальная частота вращения якоря примерно в три раза может превышать номинальную. Тяговые электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения обладают высокими динамическими показателями (малые моменты инерции вращающихся частей и механические постоянные времени).

Применяются следующие условные обозначения в типоразмере тяговых электродвигателей постоянного тока: «Р» – рудничный электродвигатель постоянного тока; «Т» – тяговый электродвигатель постоянного тока; «П» – электродвигатель постоянного тока; «К» – коллекторный электродвигатель постоянного тока; в ряде серий электродвигателей последующие за буквами цифры указывают мощность электродвигателей, кВт, в часовом режиме; в конце обозначения – исполнение и категория размещения.

## 2.7. Пример расчета

В соответствии с предложенным преподавателем вариантом задания из таблицы 2.6.1 выбираем тяговый электродвигатель постоянного тока последовательного возбуждения со следующими номинальными данными:

– номинальная механическая мощность на валу электрического двигателя  $P_{\text{НОМ}} = 23,55$  кВт,

– номинальное напряжение питающей сети постоянного тока, прикладываемое к зажимам обмотки якоря электродвигателя  $U_{\text{аНОМ}} = 220$  В,

– номинальная частота вращения якоря электродвигателя  $n_{\text{НОМ}} = 900$  об/мин,

– суммарное электрическое сопротивление последовательной цепи обмотки якоря и полюсов  $R_{\Sigma} = R_a + R_{\text{ГП}} + R_{\text{ДП}} = 0,174$  Ом,

где  $R_a$  – электрическое сопротивление обмотки якоря,  $R_{\text{ГП}}$  – электрическое сопротивление катушек главных полюсов,  $R_{\text{ДП}}$  – электрическое сопротивление катушек добавочных полюсов.

Номинальная частота вращения якоря заданного электродвигателя в рад./сек.

$$\Omega = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{3,14 \times 900}{30} = 94,2 \text{ рад./сек.}$$



Номинальный электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателя

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\Omega_{\text{НОМ}}} = \frac{23,55 \times 10^3}{94,2} = 250 \text{ Нм.}$$

В общем виде уравнение механической характеристики электродвигателя постоянного тока

$$\Omega = \frac{U_{\text{аНОМ}}}{C\Phi} - \frac{(R_a + R_{\text{ГП}} + R_{\text{ДП}})}{C^2\Phi^2} M.$$

Электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем постоянного тока

$$M = C\Phi I.$$

Для электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения ток обмотки якоря и магнитный поток возбуждения при ненасыщенной магнитной системе могут быть связаны следующим соотношением

$$I = K\Phi.$$

Тогда выражение для электромагнитного момента приобретает следующий вид

$$M = C\Phi I = CK\Phi^2,$$

или отсюда величина магнитного потока возбуждения

$$\Phi = \sqrt{\frac{M}{CK}}.$$

Подставляя выражение для магнитного потока возбуждения в выражение для механической характеристики электродвигателя постоянного тока, имеем

$$\Omega = \frac{U_{\text{аНОМ}}}{\sqrt{M} \times \sqrt{\frac{C}{K}}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{Д}})}{\frac{C}{K}}.$$

Для упрощения выражения введем промежуточный коэффициент  $A = \frac{C}{K}$ , тогда

$$\Omega = \frac{U_{\text{аНОМ}}}{\sqrt{M} \times \sqrt{A}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{Д}})}{A}.$$

Обозначив как  $X = \sqrt{A}$ , получаем

$$\Omega = \frac{U_{\text{аНОМ}}}{X\sqrt{M}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{Д}})}{X^2}.$$

Разрешим линейное квадратное уравнение относительно искомой величины  $X$

$$X^2 - \frac{U_{\text{аном}}}{\Omega\sqrt{M}} X + \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{д}})}{\Omega} = 0.$$

Решения квадратного уравнения имеют следующий вид

$$X_{1,2} = \frac{U_{\text{аном}}}{2\Omega\sqrt{M}} \pm \sqrt{\frac{U_{\text{аном}}^2}{4\Omega^2 M} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{д}})}{\Omega}}.$$

Численное значение корней квадратного уравнения определим из условия номинального режима работы электродвигателя ( $U_{\text{аном}}, M_{\text{ном}}, \Omega_{\text{ном}}$ )

$$\begin{aligned} X_{1,2} &= \frac{U_{\text{аном}}}{2\Omega_{\text{ном}}\sqrt{M_{\text{ном}}}} \pm \sqrt{\frac{U_{\text{аном}}^2}{4\Omega_{\text{ном}}^2 M_{\text{ном}}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{д}})}{\Omega_{\text{ном}}}} = \\ &= \frac{220}{2 \times 94,2 \times \sqrt{250}} \pm \sqrt{\frac{220^2}{4 \times 94,2^2 \times 250} - \frac{0,174}{94,2}} = \\ &= 0,07386 \pm 0,06005. \end{aligned}$$

Таким образом, при решении получаем два корня квадратного уравнения

$$X_1 = 0,1339,$$

$$X_2 = 0,0138.$$

Механическая характеристика электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения для обоих корней выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{U_{\text{аном}}}{0,1339\sqrt{M}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{д}})}{0,1339^2} \text{ и} \\ \Omega &= \frac{U_{\text{аном}}}{0,0138\sqrt{M}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{д}})}{0,0138^2}. \end{aligned}$$

Определим пусковой электромагнитный момент электродвигателя (при частоте вращения  $\Omega = 0$ ) по обеим характеристикам. Получаем по первой механической характеристике пусковой момент  $M'_{\text{п}} = 28643$  Нм, по второй –  $M''_{\text{п}} = 303$  Нм. Из физических соображений выбираем первую механическую характеристику, так как электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения должны обладать большим пусковым моментом и, следовательно, большой перегрузочной способностью.

Таким образом, окончательно естественная механическая характеристика электродвигателя постоянного тока запишется следующим выражением

$$\Omega = \frac{U_{\text{аном}}}{0,1339\sqrt{M}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_{\text{д}})}{0,1339^2}.$$

Рассчитаем естественную механическую характеристику электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Результаты расчета представлены в таблице 2.7.1. Здесь же приведем результаты расчета реостатных механических характеристик электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения для добавочных сопротивлений в цепи обмотки якоря равных  $R_{\text{д1}} = R_{\Sigma}$ ;  $R_{\text{д2}} = 2R_{\Sigma}$ ;  $R_{\text{д3}} = 3R_{\Sigma}$ . При этом полагаем, что в процессе изменения добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря напряжение на зажимах якорной обмотки электродвигателя остается неизменным и равным номинальному  $U_{\text{аном}}$ .

Естественная характеристика и семейство искусственных механических характеристик электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения при реостатном регулировании частоты вращения для добавочного сопротивления  $R_{\text{д}}$  равного 0; 0,174; 0,348; 0,522 Ом приведено на рисунке 2.7.1.

*Таблица 2.7.1. Семейство реостатных характеристик электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения*

$M$	Нм	100	225	250	324	400	625	900	Примечание
$\Omega$	рад/с	154,6	99,8	94,2	81,9	72,5	55,9	45,2	$R_{\text{д}} = 0$
$\Omega$	рад/с	144,9	90,1	84,5	71,9	63,3	46,3	35,4	$R_{\text{д}} = 0,174$
$\Omega$	рад/с	135,2	80,4	74,8	62,2	53,6	36,6	25,7	$R_{\text{д}} = 0,348$
$\Omega$	рад/с	125,5	70,7	65,1	52,5	43,3	26,9	16,0	$R_{\text{д}} = 0,522$

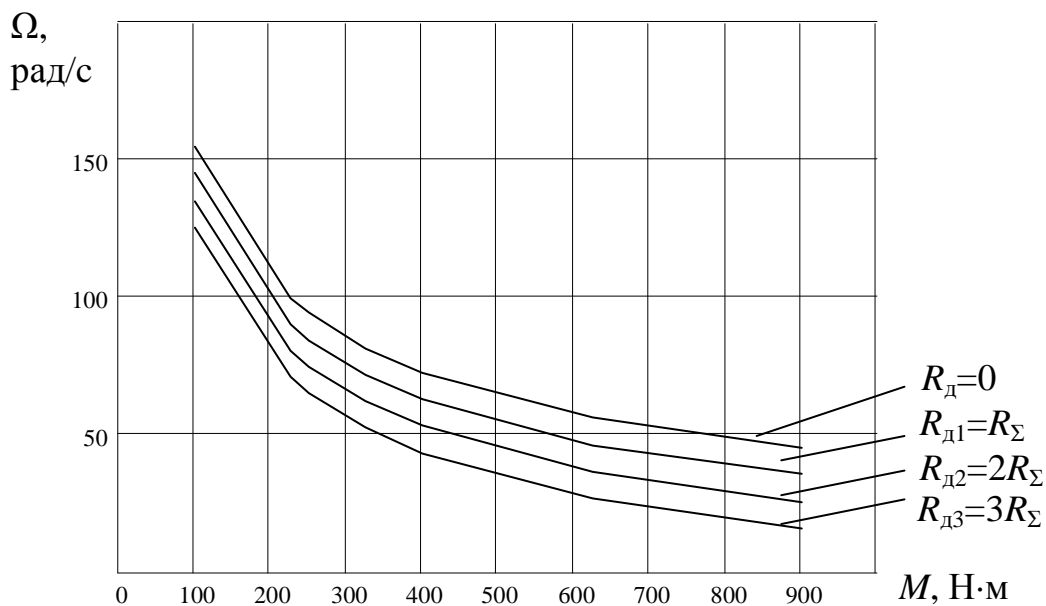


Рис. 2.7.1  
Семейство механических характеристик  
двигателя постоянного тока последовательного возбуждения  
при реостатном регулировании

Так как в электродвигателе постоянного тока последовательного возбуждения один и тот же ток протекает по обмотке якоря и по обмотке возбуждения, электромагнитный момент определяется квадратом магнитного потока возбуждения, и, следовательно, при уменьшении магнитного потока возбуждения в два раза коэффициент  $X$  в выражении для механической характеристики уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз. Тогда выражение механической характеристики электродвигателя приобретет вид

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{U_{\text{аном}} \times \sqrt{2}}{0,1339\sqrt{M}} - \frac{R_{\Sigma} \times (\sqrt{2})^2}{0,1339^2} = \\ &= \frac{220}{0,09496\sqrt{M}} - \frac{0,174}{0,00897}. \end{aligned}$$

Естественная механическая характеристика электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения ( $\Phi = \Phi$ ) и его искусственная характеристика при магнитном потоке возбуждения равном  $\Phi' = 0,5\Phi$  приведены ниже в таблице 2.7.2 и рисунке 2.7.2.

Таблица 2.7.2. Семейство механических характеристик  
 электродвигателя постоянного тока  
 последовательного возбуждения  
 при полюсном регулировании

$M$	Нм	100	250	400	900	Примечание
$\Omega$	рад/с	154,6	94,2	72,5	45,2	$\Phi = \Phi$
$\Omega$	рад/с	212,3	127,2	96,5	57,8	$\Phi' = 0,5\Phi$

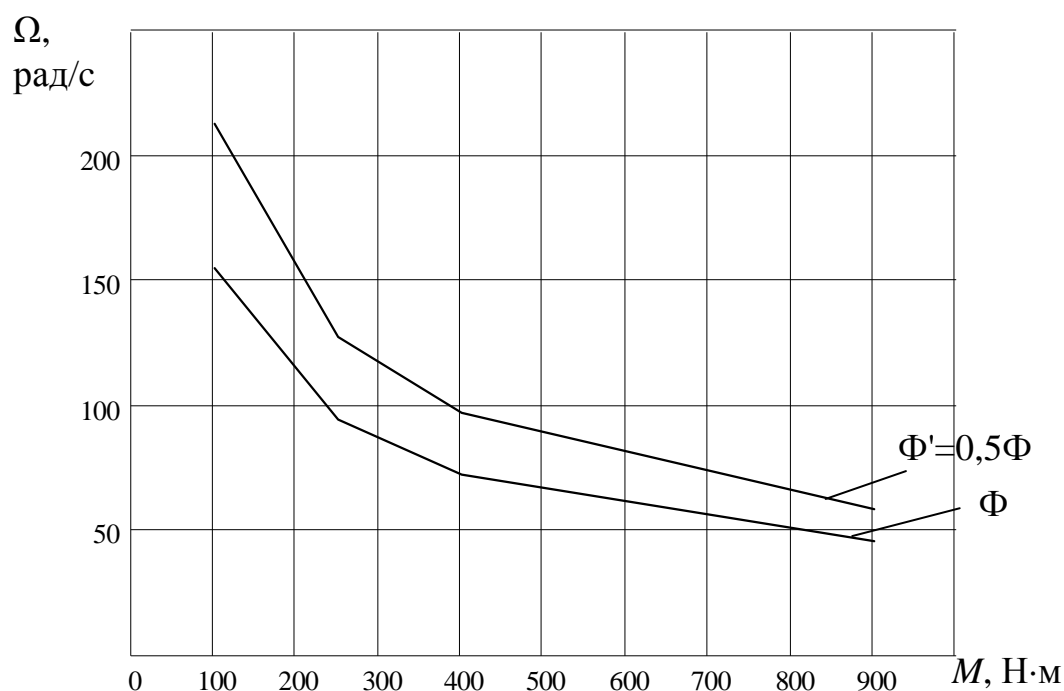


Рис. 2.7.2  
 Семейство механических характеристик  
 электродвигателя постоянного тока последовательного  
 возбуждения при полюсном регулировании

Электрическая схема включения электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения в сеть представлена на рисунке 2.7.3. Здесь:  $M$  – обмотка якоря электродвигателя постоянного тока;  $OB$  – последовательная обмотка возбуждения;  $R_d$  – добавочное электрическое сопротивление в цепи обмотки якоря для реостатного регулирования частоты вращения;  $R_{дв}$  – добавочное электрическое сопро-

тивление для полюсного регулирования частоты вращения, шунтирующее обмотку возбуждения.

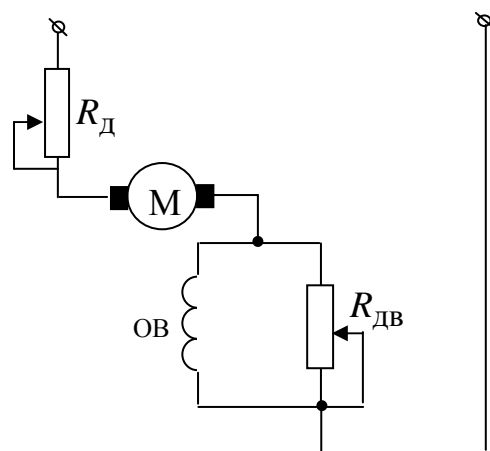


Рис.2.7.3

*Схема включения электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения*

### 3. ЭЛЕКТРОПРИВОД

#### 3.1. Общие сведения

Электроприводом называют электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

Простейший электропривод состоит из электродвигателя, питаемого непосредственно от сети постоянного или переменного тока, передаточного устройства и электрических аппаратов и приборов управления и защиты.

Параметрами электропривода являются частота вращения, нагрузка, диапазон регулирования, жесткость механической характеристики и электрическая постоянная времени, понятия о которых можно получить в [Л. 9, с. 7].

Длительность работы приводимого в движение механизма и ее характер определяют рабочий режим электродвигателя. В соответствии с ГОСТ 183-74 установлено восемь номинальных режимов работы электрических двигателей, которые условно обозначают **S1-S8**. Режимы работы **S1-S3** принято считать основными.

Номинальные данные электродвигателей в этих режимах включаются в паспортные данные и каталоги. Режимы **S4-S8** уточняют основные.

**S1. Режим продолжительной нагрузки.** Характеризуется достаточно длительной работой при постоянной нагрузке.

**S2. Режим кратковременной нагрузки.** Характеризующей величиной является продолжительность кратковременной работы. Установлены стандартные продолжительности кратковременной работы: 10, 30, 60, 90 мин.

**S3. Режим повторно-кратковременной нагрузки.** Состоит из периодов работы и отключенного неподвижного состояния. Для режима **S3** характеризующей величиной является продолжительность включения

$$ПВ = \frac{\sum t_p}{\sum t_p + \sum t_{\Pi}} 100\% = \frac{\sum t_p}{t_{\text{ц}}} 100\% ,$$

где  $\sum t_p$  – время работы электропривода;  $\sum t_{\Pi}$  – время отключенного состояния (время паузы);

$t_{\text{ц}}$  – продолжительность цикла работы электропривода.

Нормируемые значения относительной продолжительности включения: 15, 25, 40, 60%. Продолжительность одного цикла, если нет других указаний, принимается не превышающей 10 минут.

**S4. Режим повторно-кратковременной нагрузки, включая пуск.**

**S5. Режим повторно-кратковременной нагрузки, включая электрическое торможение.**

**S6. Режим продолжительной работы электропривода при переменной нагрузке.**

**S7. Режим продолжительной нагрузки, включая электрическое торможение.**

**S8. Режим работы при периодическом изменении частоты вращения и нагрузки.**

### 3.2. Расчет и выбор мощности электродвигателя

Обеспечение надежности электроприводов зависит от правильного выбора мощности и конструкции электродвигателя, соответствующей условиям окружающей среды. Расчетную мощность электродвигателя определяют по графику статической нагрузки  $P(t)$  или  $M(t)$ . По полученной мощности  $P_{\text{расч}}$  для известных рода тока, напряжения питающей сети, частоты вращения, климатических условий и конструктивного исполнения по каталогу выбирают электродвигатель с номинальной мощностью  $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}$ .

**Продолжительный режим с неизменной нагрузкой (S1).** При такой нагрузке на валу номинальная мощность электродвигателя принимается равной  $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{расч}}$ .

**Продолжительный режим при переменной нагрузке (S6).** Определение расчетной мощности электродвигателя для режима S6 можно выполнить методом эквивалентных величин. По графику нагрузочной диаграммы  $M(t)$  или  $P(t)$  рассчитывается эквивалентный момент или мощность:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_{11}^2 t_1 + M_{22}^2 t_2 + \dots + M_{nn}^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}},$$
$$P_{\text{расч}} = M_{\text{расч}} \Omega.$$

Угловая частота вращения ротора  $\Omega$  определяется в предварительных расчетах выражением



$$\Omega \cong \Omega_c = \frac{\pi n_c}{30},$$

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Выбранный электродвигатель необходимо проверить по перегрузочной способности и пусковому моменту

$$M_{\text{max}}^{\text{дв}} = m_{\text{к}} M_{\text{ном}} \geq M_{\text{max}}^{\text{нагр}},$$

$$M_{\text{п}}^{\text{дв}} = m_{\text{п}} M_{\text{ном}} \geq M_1^{\text{нагр}},$$

где

$$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}},$$

$$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}} -$$

из каталога для выбранного типоразмера электродвигателя.

У трехфазных асинхронных электродвигателей электромагнитный момент пропорционален квадрату напряжения  $U_1$  в фазе обмотки статора, поэтому при проверке на перегрузочную способность и по пусковому моменту необходимо учесть возможное допустимое понижение напряжения. Стандартами на трехфазные асинхронные электродвигатели допускаются отклонения напряжения сети от номинального значения  $-5\% \div +10\%$ . Поэтому для этих типов электродвигателей должно выполняться следующее условие

$$(0,95)^2 M_{\text{max}}^{\text{дв}} \geq M_{\text{max}}^{\text{нагр}},$$

$$(0,95)^2 M_{\text{п}}^{\text{дв}} \geq M_1^{\text{нагр}}.$$

Если максимальный момент или  $M_1$  нагрузки окажутся больше, чем может развить выбранный электродвигатель, то выбирают электродвигатель большей мощности.

**Повторно-кратковременный режим (S3).** Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения ПВ%. По нагрузочной диаграмме определяют действительное значение ПВ%. Время цикла не должно превышать десять минут, в противном случае электродвигатель должен выбираться как для продолжительного режима. Выбор номинальной мощности электродвигателя выполняют по методу эквивалентных величин. Рассчитанные значения эквивалентных величин  $M_{\text{экв}}$  и  $P_{\text{экв}}$  приводят к мощности при стандартной продолжительности включения  $\text{ПВ}_{\text{ном}}\%$ .

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{НОМ}}}} \quad \text{или}$$

$$P_{\text{расч}} = M_{\text{экв}} \Omega_c \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{НОМ}}}},$$

При этом эквивалентная мощность  $P_{\text{экв}}$  и эквивалентный момент  $M_{\text{экв}}$  рассчитываются только для времени работы

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum P_n^2 t_{pn}}{\sum t_p}};$$

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum M_n^2 t_{pn}}{\sum t_p}},$$

где  $t_{pn}$  – время работы в  $n$ -ом режиме,

$P_n$ ,  $M_n$  – мощность и момент в  $n$ -ом режиме.

Если для привода производственного механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме, устанавливается электродвигатель, предназначенный для продолжительной работы, то при расчете эквивалентного момента  $M_{\text{экв}}$  и эквивалентной мощности  $P_{\text{экв}}$  надо учитывать и время пауз

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum M_n^2 t_n}{\sum t_p + \sum t_{\text{п}}}},$$

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum P_n^2 t_n}{\sum t_p + \sum t_{\text{п}}}}.$$

### 3.3. Выбор предохранителя

Предохранители предназначены для защиты электрических цепей от больших токов при перегрузках и при коротких замыканиях. Наибольшее распространение получили предохранители с плавкой вставкой. По конструктивному исполнению различают пробочные, патронные, трубчатые и пластинчатые предохранители. Сила тока, на которую рассчитана плавкая вставка, указывается на ее корпусе. Оговаривается также максимально допустимое напряжение, при котором может использоваться предохранитель.

При выборе плавкой вставки для защиты электродвигателя необходимо учитывать пусковой ток:

$$I_{\text{ном}} \geq \frac{I_{\text{п}}}{\alpha},$$

где  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток плавкой вставки, при котором вставка длительно работает, не нагреваясь выше допустимой температуры;

$I_{\text{п}}$  – пусковой линейный ток электродвигателя;

$\alpha = 2,5$ , если длительность пуска не превышает 10 с.;

$\alpha = 1,8$ , если время пуска больше 10 с.

При выборе типа предохранителя для защиты асинхронного электродвигателя принять  $\alpha = 2,5$ .

При защите асинхронного электродвигателя устанавливаются предохранители только в линейных проводах, установка предохранителя в нейтральном проводе запрещается.

Параметры некоторых типов предохранителей приведены в приложении 1.

### **3.4. Основные сведения об электродвигателях серии 4А**

Трехфазные асинхронные электродвигатели серии 4А были разработаны в 1969-1972 г.г.

Серия трехфазных асинхронных электродвигателей на напряжение до 1000В в зависимости от рабочих свойств и условий работы электродвигателей включает в себя основное исполнение и модификации: электродвигатели с повышенным пусковым моментом; электродвигатели с повышенным скольжением; многоскоростные электродвигатели; электродвигатели с фазным ротором; электродвигатели со встроенным электромагнитным тормозом; маломощные электродвигатели, а также специализированные исполнения по условиям окружающей среды и узкоспециализированные электродвигатели для привода определенных устройств.

Трехфазные асинхронные электродвигатели предназначены для работы от сети переменного напряжения частоты 50 Гц. Они изготавливаются на следующие номинальные напряжения (основное исполнение). (Смотри таблицу 3.4.1).

Таблица 3.4.1. Номинальные напряжения трехфазных асинхронных электродвигателей

НОМИНАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, В	220, 380	220,380,660	220/380 380/660	380/660
Мощность, кВт	0,06 ÷ 0,37	0,55 ÷ 11,0	15,0 ÷ 110	132 ÷ 400

Трехфазные асинхронные электродвигатели могут нормально эксплуатироваться при отклонениях напряжения питающей сети от номинального значения в пределах  $-5\% \div +10\%$  и отклонениях частоты на  $\pm 2\%$  от номинального значения.

Серия имеет 17 высот оси вращения от 50 до 355 мм. В серии электродвигателей 4А предусмотрены три исполнения по степени защиты (ГОСТ 17494-72):

**IP44** для электродвигателей с высотами оси вращения 50 ÷ 355 мм (закрытое исполнение);

**IP23** для электродвигателей с высотами оси вращения 160 ÷ 355 мм (защищенное исполнение);

**IP54** для электродвигателей специализированных исполнений (пылезащищенное исполнение).

Сердечники статора и ротора собраны из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Обмотки статоров выполняются изолированным проводом, на роторе электродвигатели имеют литую короткозамкнутую обмотку из алюминия марки А7 или А5 (ГОСТ 11069-74).

Дополнительные сведения о геометрии активной части, обмоточных данных, подшипниках, габаритных и установочных размерах можно получить из справочников [Л. 3,4].

Для трехфазных асинхронных электродвигателей установлена следующая структура обозначения типоразмера:

<b>4А</b>	<b>Н</b>	<b>-</b>	<b>355</b>	<b>М</b>	<b>-</b>	<b>12</b>	<b>У</b>	<b>3</b>
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	2	3	4	5	6	7	8	9

где 1 – название серии трехфазных асинхронных электродвигателей общепромышленного применения;

2 – исполнение электродвигателя по способу защиты («Н» – исполнение **IP23**, отсутствие буквы обозначает степень защиты **IP44**);

3 – исполнение электродвигателя по материалу станины и щитов («А» – станина и щиты алюминиевые, «Х» – станина алюминиевая, щиты чугунные или наоборот, отсутствие буквы означает, что станина и щиты чугунные или стальные);

4 – высота оси вращения (2 или 3 цифры);

5 – условная длина станины: буквы «S» – короткая (short), «M» – средняя (middle), «L» – длинная (long);

6 – длина сердечника статора («А» – меньшая, «В» – большая, отсутствие данного знака означает одну длину в установленном типоразмере);

7 – число полюсов: 2, 4, 6, 8, 10, 12;

8 – климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69 («У» – для умеренного климата);

9 – категория размещения по ГОСТ 15150-69 (3 – соответствует работе электродвигателя в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий эксплуатации).

С характеристиками климатического исполнения электрических машин, категориями размещения оборудования, нормами климатических факторов внешней среды можно ознакомиться по справочнику [Л.9, с.179-183].

Основные технические показатели трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором приведены в приложении 3 для основного исполнения со степенью защиты **IP44** и в приложении 4 со степенью защиты **IP23**. В приложении 5 включены технические данные электродвигателей с повышенным скольжением, механические и пусковые характеристики этих электродвигателей представлены в приложении 6.

Электродвигатели с повышенным скольжением предназначены для привода механизмов с пульсирующей нагрузкой (например, компрессоров, прессов), а также механизмов, работающих в повторно-кратковременном (**S3**) и перемежающемся (**S6**) режимах. Возможно использование этих электродвигателей в режимах (**S2**) и (**S4**). Электродвигатели изготавливаются со степенью защиты **IP44**, в обозначении типоразмера имеют дополнительно букву «С» после обозначения серии, например 4AC200L6У3.

В таблицы включены значения: номинальной мощности  $P_{2\text{ном}}$ ; коэффициент полезного действия и коэффициент мощности  $\cos\varphi$  при нагрузке от 25 до 125% номинальной для двигателей основного исполне-

ния, для электродвигателей с повышенным скольжением коэффициент полезного действия и  $\cos\varphi$  соответствующие мощностям  $P_{2\text{НОМ}}$  при ПВ = 40% или  $P_2$  при ПВ не равном 40%.

Показатели механической характеристики представлены коэффициентами:

$$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{НОМ}}}, \quad m_{\text{т}} = \frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{НОМ}}}, \quad m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}},$$

где  $M_{\text{НОМ}} = \frac{30P_{2\text{НОМ}}}{\pi(1-s_{\text{НОМ}})n_{\text{с}}}$  – номинальный электромагнитный вращающий момент при скольжении  $s = s_{\text{НОМ}}$ ;

$M_{\text{п}}$  – начальный пусковой электромагнитный вращающий момент при скольжении  $s = 1$ ;

$M_{\text{min}}$  – минимальный электромагнитный вращающий момент при скольжении  $s = 0,7$ ;

$M_{\text{max}}$  – максимальный электромагнитный вращающий момент при скольжении  $s = s_{\text{к}}$

Отношение начального пускового тока к номинальному оценено коэффициентом  $i_{\text{п}} = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{НОМ}}}$ .

Технические данные электродвигателей, модификаций и других специализированных исполнений, не вошедшие в данную работу, можно получить в справочниках [Л. 3,10].

### 3.5. Задание к индивидуальной работе по теме “Электропривод”

1. Построить график статической нагрузочной диаграммы производственного механизма за цикл работы по данным таблицы 3.6.1. Определить режим работы электропривода.

2. Рассчитать эквивалентную мощность или момент приводимого в движение механизма за цикл работы.

3. С учетом частоты вращения приводного механизма выбрать типоразмер трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором серии 4А [Л. 3,4,7] или серии АИР [Л. 4,8]. Степень защиты электродвигателя установить самостоятельно.

4. Рассчитать электромагнитные моменты: номинальный, пусковой и максимальный (критический). Проверить выбранный электродвигатель на перегрузочную способность и пусковой момент с учетом возможного понижения напряжения сети на 5 %.

5. Построить механические характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя  $n(M)$  и  $M(s)$ .

6. Рассчитать линейный ток питающей сети при номинальной нагрузке и при пуске электродвигателя в ход.

7. Выбрать предохранители [Л. 5, с.140; Л.7, с.573] для защиты электродвигателя от токов, возникающих при больших перегрузках и при коротких замыканиях. Данные по некоторым типам предохранителей приведены в приложении 1.

8. Определить реактивную мощность электродвигателя при номинальной нагрузке.

9. Рассчитать энергию, потребляемую электродвигателем из сети за цикл работы

$$W = \sum \frac{P_{2i}}{\eta_i \cos \varphi_i} t_i,$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots$  – номер режима в цикле работы.

10. Составить электрическую схему управления трехфазным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Степень сложности электрической схемы задается преподавателем.

11. Описать принцип работы составленной схемы управления. Пояснить назначение аппаратов управления и защиты. (Типовая схема пуска и реверса трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 3.5.1.)

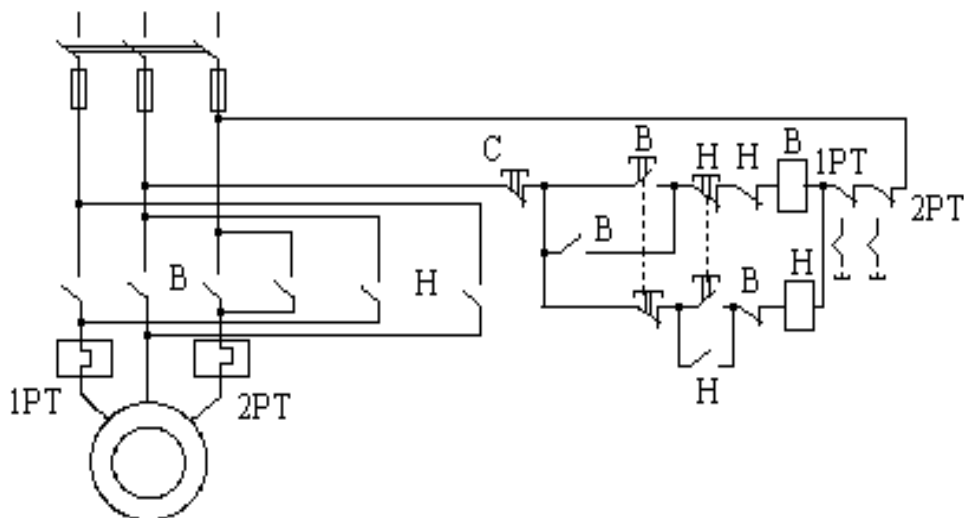


Рис. 3.5.1.

Схема автоматического управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с помощью магнитного пускателя.

Здесь: «В» и «Н» – контакторы, условно названные «Вперед» и «Назад» с соответствующими блок-контактами в цепи управления; кнопочная станция, состоящая из трех кнопок («В», «Н», «С»); «1РТ» и «2РТ» – тепловые реле.

12. Сформулировать заключение в виде пояснений по следующим вопросам:

- охарактеризовать режимы работы электропривода. Дать понятие статической нагрузочной диаграммы;
- пояснить методику выбора электродвигателя для обеспечения работоспособности электропривода;
- по каким критериям проверяется работоспособность выбранного электродвигателя;
- пояснить вид механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя;
- чем определяется выбор типа предохранителя;
- дать пояснения по предназначению аппаратов управления и защиты в схеме управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

### 3.6. Варианты заданий для выбора мощности трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

В таблице 3.6.1. приведены варианты статических нагрузочных диаграмм работы электропривода.

Таблица 3.6.1. Варианты заданий по теме «Электропривод»

№	$n_c$ ,	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	минуты						киловатты (кВт)					
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
01	1000	1,2	2,0	2,0	1,0	0,8	3,0	10	15	0	20	10	0
02	1500	2,0	0,5	2,0	1,0	2,5	2,0	8	5	0	25	10	0
03	3000	0,6	1,0	1,4	4,5	0,8	0,6	4	15	10	15	25	14



Продолжение таблицы 3.6.1

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
04	1500	0,3	2,5	1,0	0,4	1,5	1,5	15	4	30	15	10	4
05	750	0,7	0,3	1,5	0,4	1,2	2,0	35	70	87	10	40	70
06	1500	1,0	2,0	1,2	1,5	2,0	2,3	10	30	0	15	25	0
07	600	1,1	0,3	1,5	2,0	1,0	1,6	23	50	36	42	80	10
08	750	1,0	1,5	2,5	1,5	1,5	2,0	10	6	0	15	20	0
09	600	1,5	4,0	2,5	3,5	3,0	1,5	80	115	47	75	60	80
10	3000	2,0	1,0	5,0	1,0	1,5	0,8	12	8	20	10	8	6
11	1500	0,5	1,0	1,5	1,3	2,0	1,7	20	30	10	25	45	34
12	1000	0,6	1,1	1,6	1,4	1,9	1,8	20	35	18	30	53	40
13	750	0,7	1,2	1,7	1,5	1,8	1,9	6	20	13	15	30	18
14	1000	0,8	1,3	1,8	1,6	1,7	2,0	30	55	0	15	20	0
15	1000	0,9	1,4	1,9	1,7	1,6	2,5	18	36	0	24	34	0
16	750	1,0	1,5	2,0	1,8	1,5	1,3	15	4	0	15	42	10
17	1500	0,7	0,3	1,5	4,0	2,0	1,4	4	8	5	0	12	15
18	1000	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	2,5	18	30	0	25	10	0
19	750	3,0	1,5	2,5	1,0	4,0	2,5	10	25	50	8	4	15
20	1000	1,0	1,5	2,0	2,0	1,0	3,0	20	36	50	30	18	60
21	1500	2,0	2,4	0,8	1,8	3,0	1,0	22	36	8	12	40	20
22	3000	4,5	3,0	5,0	6,0	10	4,0	30	60	8	15	40	6
23	1500	0,6	1,0	2,0	3,0	1,5	1,5	30	50	0	60	10	0
24	1000	4,5	1,5	1,0	5,0	2,0	4,0	20	16	45	25	10	55
25	1000	1,3	1,4	2,0	1,5	1,2	2,0	20	30	0	16	8	0

Продолжение таблицы 3.6.1

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
26	1500	0,5	1,0	3,0	1,0	0,7	3,0	15	25	0	30	5	0
27	750	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	3,0	25	40	30	16	10	0
28	3000	4,0	3,0	5,0	6,0	4,5	2,0	18	40	50	20	30	10
29	1000	0,3	1,5	2,5	1,0	0,4	2,5	14	25	30	0	8	10
30	1500	1,0	0,8	2,0	1,5	0,7	3,0	25	10	35	8	5	0
31	600	3,0	4,0	1,0	1,0	1,5	2,0	28	40	26	65	70	32
32	750	1,5	1,5	2,0	2,0	1,0	1,0	25	10	35	8	5	0
33	1000	2,5	1,0	5,0	5,0	1,0	4,0	16	25	50	8	4	30
34	1500	1,3	1,3	2,0	2,0	1,0	1,5	15	28	20	34	14	25
35	3000	2,5	5,0	2,0	3,4	2,0	1,0	28	51	22	64	30	8
36	1500	1,0	1,0	2,0	2,0	1,5	1,5	4	3,5	0	8	6	0
37	1000	1,0	2,0	2,0	1,5	1,5	2,0	8	6	10	6	5	0
38	1500	3,0	3,0	2,5	2,5	5,0	5,0	19	25	75	80	60	10
39	1000	0,5	1,0	1,3	3,0	1,2	3,0	12	20	30	0	19	28
40	1500	0,7	1,2	2,0	1,5	2,0	1,5	18	30	0	25	10	0
41	750	5,0	5,0	3,0	8,0	8,0	10	20	35	50	26	14	30
42	600	8,0	8,0	6,0	6,0	5,0	3,0	25	16	67	83	45	8
43	3000	3,0	5,0	5,0	7,0	7,0	2,0	24	40	54	37	28	6
44	1500	1,5	1,5	2,0	2,0	1,2	1,7	25	30	43	0	34	50
45	750	2,0	2,0	1,0	1,0	2,5	1,0	6	5	0	8	6	0
46	1500	1,5	2,0	3,0	4,0	3,0	3,0	16	8	12	40	20	27
47	1000	2,5	1,5	2,0	2,0	1,0	1,0	15	23	40	0	20	31
48	1000	2,0	1,5	1,0	3,5	3,5	2,0	71	108	125	85	154	63

Продолжение таблицы 3.6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
49	1500	0,5	2,5	2,5	1,5	1,0	2,0	5	23	38	43	0	20
50	3000	8,0	8,0	6,0	6,0	4,0	4,0	100	82	254	158	43	15
	$n_c$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	минуты						ньютонометры (Нм)					
51	1000	1,2	2,0	2,0	2,0	1,0	0,8	100	155	0	210	95	0
52	1500	2,0	0,5	2,0	1,0	2,5	2,0	56	35	0	175	70	0
53	3000	0,6	1,0	1,4	4,5	0,8	0,6	12	45	30	45	75	42
54	1500	0,3	2,5	1,0	0,4	1,5	1,5	105	28	210	105	70	28
55	750	0,7	0,3	1,5	0,4	1,2	2,0	444	890	1105	127	508	890
56	1500	1,0	2,0	1,2	1,5	2,0	2,3	70	210	0	105	175	0
57	600	1,1	0,3	1,5	2,0	1,0	1,6	370	800	576	670	1280	160
58	1000	0,6	1,0	1,5	1,3	2,0	1,0	120	235	150	85	115	50
59	3000	0,5	1,1	1,6	1,4	1,8	2,0	80	135	100	75	54	30
60	750	0,7	1,2	1,7	1,5	1,0	1,8	75	144	95	135	62	25
61	1500	0,9	1,4	1,9	1,6	2,0	1,3	25	50	15	40	64	33
62	1500	1,0	1,5	1,5	1,7	0,7	2,5	42	78	25	65	40	0
63	1000	1,8	1,2	1,6	1,0	3,0	1,3	105	187	230	124	0	80
64	3000	0,8	1,0	1,7	3,0	1,5	1,1	40	75	104	0	65	58
65	1500	0,8	1,3	1,8	1,6	2,0	1,5	25	40	15	35	50	18
66	1000	0,9	1,2	1,6	2,5	1,8	1,0	30	75	21	0	45	63
67	750	0,7	1,3	1,8	3,0	1,2	1,0	71	135	64	0	80	55
68	1500	0,5	1,0	2,0	1,5	1,3	2,0	20	35	0	10	30	0

Продолжение таблицы 3.6.1

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
69	3000	0,7	1,2	1,7	1,5	2,0	1,9	23	45	15	35	64	30
70	1000	1,6	0,9	1,9	2,5	1,2	1,0	60	82	31	0	70	45
71	750	1,2	1,1	0,8	1,3	3,0	1,0	65	105	152	87	0	70
72	1500	1,0	1,2	2,0	1,3	1,5	2,0	105	183	0	71	54	0
73	3000	0,8	1,0	1,7	1,9	1,5	2,0	40	75	25	65	58	14
74	1000	2,2	1,0	1,7	0,9	1,2	2,5	42	84	70	48	94	58
75	1500	0,5	1,0	2,5	1,9	1,3	2,0	59	105	0	83	77	0
76	750	0,6	2,0	1,1	1,5	1,8	2,2	83	127	110	150	94	45
77	3000	1,0	1,5	2,5	0,8	1,2	3,0	14	36	0	22	18	0
78	1000	0,7	1,1	0,5	1,5	1,3	4,0	27	35	18	54	14	0
79	1500	0,5	1,8	2,0	1,7	1,5	2,5	97	225	180	131	164	46
80	750	0,6	1,9	2,0	1,0	2,5	0,9	64	148	274	200	150	55
81	3000	0,7	1,3	1,0	1,5	1,8	2,0	105	156	230	305	210	84
82	1000	0,4	1,1	1,0	4,0	1,5	2,0	147	410	215	0	182	115
83	1500	0,8	1,1	2,1	1,5	1,8	2,5	121	185	0	157	240	0
84	750	0,9	1,5	2,4	1,1	0,5	3,0	97	178	0	115	210	0
85	3000	0,8	1,6	2,5	1,0	0,6	3,2	7	15	0	15	4,3	0
86	1000	0,5	1,0	2,0	1,5	0,9	1,8	230	475	630	540	420	195
87	1500	1,2	2,4	0,8	1,5	2,0	1,4	190	320	450	380	240	97
88	750	0,8	1,8	3,0	2,2	1,0	1,2	5	10	13	17	22	6
89	600	1,0	0,8	2,2	1,3	1,8	2,4	375	494	660	520	415	207
90	3000	1,0	0,7	3,0	1,8	1,5	2,0	10	18	0	12	3,8	0
91	1000	0,6	1,0	1,5	1,3	2,0	1,2	21	36	18	25	15	7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
92	1500	0,8	1,8	3,0	2,2	1,0	1,2	57	85	0	74	58	30
93	750	0,7	1,2	2,0	1,0	1,3	3,0	12	25	0	20	32	0
94	600	0,9	1,5	2,0	1,5	1,0	2,5	417	620	550	700	592	475
95	3000	1,1	0,8	2,1	3,5	1,8	0,6	17	33	20	0	23	10
96	1000	1,0	1,5	1,5	1,7	3,0	0,7	25	60	12	54	0	35
97	1500	0,9	1,2	1,6	1,8	2,0	0,8	30	75	22	68	54	18
98	750	0,8	1,0	1,7	1,9	0,6	1,5	43	75	28	62	50	36
99	3000	0,7	0,8	1,8	2,0	1,5	2,0	45	87	32	74	67	40
00	1000	0,6	0,9	1,9	1,2	2,0	0,7	54	73	48	66	46	24

В таблице 3.6.1 приведены варианты статических нагрузочных диаграмм. Здесь:  $t_1 \div t_6$  – интервалы времени приложения механической нагрузки  $P_1(M_1) \div P_6(M_6)$  к электродвигателю;  $n_c$  – рабочая частота вращения электропривода.

### 3.7. Примеры решения задач

**Пример 3.7.1.** Определить мощность и выбрать типоразмер трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором и синхронной частотой вращения магнитного поля  $n_c$  для привода производственного механизма, статическая нагрузочная диаграмма которого представлена значениями  $M(t)$  в таблице 3.7.1. Проверить выбранный электродвигатель на перегрузочную способность; определить линейный ток, потребляемый электродвигателем из сети, потребляемую реактивную мощность и активную энергию за цикл работы. Линейное напряжение сети, к которой подключается трехфазный асинхронный электродвигатель –  $U_{л}=380$  В. (Способ соединения обмоток статора принять «звездой»).

Таблица 3.7.1. Статическая нагрузочная диаграмма производственного механизма

$n_c$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
об/мин	мин	мин	мин	мин	мин	Нм	Нм	Нм	Нм	Нм
1500	0,8	3,0	2,5	1,5	1,2	28	30	40	65	50

**Решение.** При определении мощности электродвигателя для длительной работы с переменной нагрузкой (режим **S6**) можно воспользоваться методом эквивалентного момента

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4 + M_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}} =$$

$$= \sqrt{\frac{28^2 \times 0,8 + 30^2 \times 3 + 40^2 \times 2,5 + 65^2 \times 1,5 + 50^2 \times 1,2}{0,8 + 3 + 2,5 + 1,5 + 1,2}} = 43,03 \text{ Нм.}$$

Тогда расчетная мощность электродвигателя

$$P_{\text{экв}} = \frac{M_{\text{экв}} \pi n_c}{30 \times 10^3} =$$

$$= \frac{43,03 \times 3,14 \times 1500}{30 \times 10^3} = 6,76 \text{ кВт.}$$

Из каталога [Л. 3] выбирается трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А132S4У3 мощностью на валу  $P_{\text{ном}} = 7,5$  кВт, удовлетворяющий условию  $P_{\text{ном}} \geq P_{\text{экв}}$ , со следующими параметрами: номинальная механическая мощность на валу  $P_{2\text{ном}} = 7,5$  кВт; кратность пускового электромагнитного момента  $m_{\text{п}} = 2,2$ ; кратность максимального электромагнитного момента  $m_{\text{к}} = 3$ ; номинальное скольжение  $s_{\text{ном}} = 2,9$ ; критическое скольжение  $s_{\text{к}} = 19,5$ ; кратность пускового тока  $i_{\text{п}} = 7,5$ ; номинальный коэффициент мощности  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ ; номинальный коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{ном}} = 87,5\%$ .

Используя каталожные данные на выбранный электродвигатель, рассчитаем электромагнитные моменты двигателя: номинальный, максимальный и пусковой:

– номинальный электромагнитный момент

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{\Omega} = \frac{P_{2\text{НОМ}} \times 30}{\pi n} =$$

$$= \frac{7,5 \times 10^3 \times 30}{\pi \times 1456,5} = 49,17 \text{ Нм},$$

где  $n$  – частота вращения ротора асинхронного электродвигателя может быть определена следующим образом:

$$n = (1 - s_{\text{НОМ}})n_c = (1 - s_{\text{НОМ}}) \frac{60 f_1}{p} =$$

$$= (1 - 0,029) \frac{60 \times 50}{2} = 1456,5 \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

$p = 2$  – число пар полюсов.

– максимальный электромагнитный момент

$$M_{\text{max}} = m_K M_{\text{НОМ}} = 3 \times 49,17 = 147,5 \text{ Нм}.$$

– пусковой электромагнитный момент

$$M_{\text{II}} = m_{\text{II}} M_{\text{НОМ}} = 2,2 \times 49,17 = 108,24 \text{ Нм}.$$

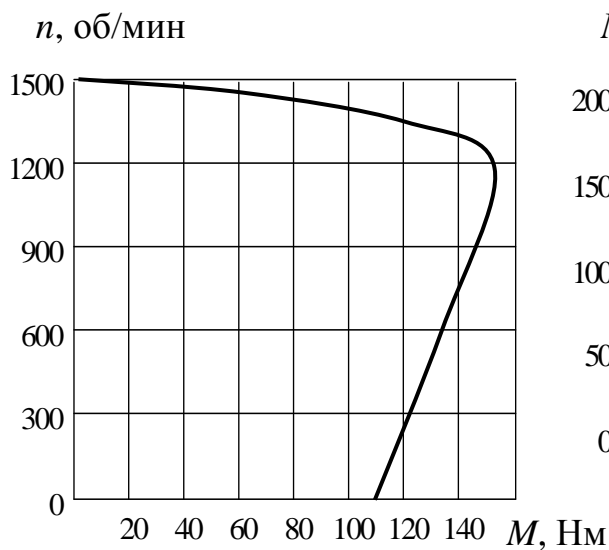


Рис. 3.7.1

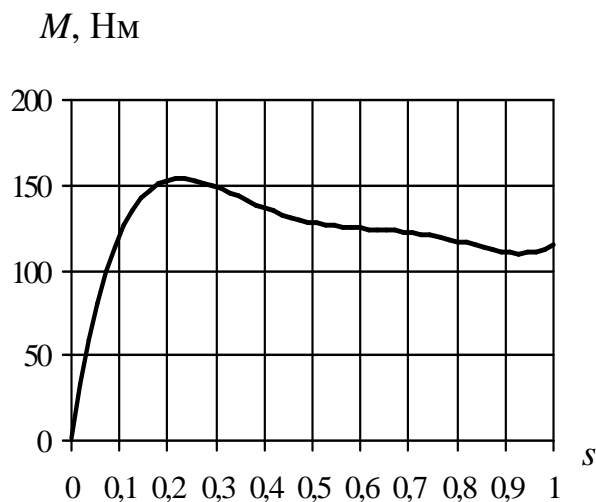


Рис. 3.7.2

*Естественные механические характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя*

Подставляя в формулу Клосса ряд текущих значений скольжения, получим данные для построения естественной механической характеристики в осях  $n(M)$  или  $M(s)$  трехфазного асинхронного электродвигателя

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} = \frac{2m_K M_{НОМ}}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

Результаты расчета естественной механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя приведены в таблице 3.7.2.

Таблица 3.7.2. Естественная механическая характеристика электродвигателя

$s$	-	0	0,003	0,012	0,029	0,09	0,195	1,0
$n$	об/мин	1500	1496,5	1482	1456,5	1365	1207,5	0
$M$	Нм	0	5,23	20,84	49,17	122,4	147,5	108,24

Графики механических характеристик представлены на рисунке 3.7.1 и рисунке 3.7.2.

Выбранный электродвигатель проверяется по перегрузочной способности и пусковому моменту. При этом должно выполняться следующее условие

$$(0,95)^2 M_{max}^{дв} \geq M_{max}^{нагр}$$

$$\text{и } (0,95)^2 M_{п}^{дв} \geq M_1^{нагр}.$$

$$(0,95)^2 \times 147,5 > 65$$

$$\text{и } (0,95)^2 \times 108,17 > 28,$$

$$133 > 65 \text{ и } 97,6 > 28.$$

Исходя из того, что обмотки статора двигателя соединены звездой (Y) и линейное напряжение сети  $U_{л} = 380$  В из формулы потребляемой мощности

$$P_{1НОМ} = \sqrt{3} U_{НОМЛ} I_{л} \cos \varphi_{НОМ} \eta_{НОМ}$$

определяется линейный ток

$$I_{л} = \frac{P_{2НОМ}}{\sqrt{3} U_{НОМЛ} \cos \varphi_{НОМ} \eta_{НОМ}} =$$



$$= \frac{7,5 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,86 \times 0,875} = 15,14 \text{ А.}$$

Потребляемая из сети электродвигателем реактивная мощность определяется по формуле

$$Q_{1\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{НОМ}} = 8,571 \times 0,593 = 5,086 \text{ кВАр,}$$

где  $\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos \varphi_{\text{НОМ}} = 30^\circ$ .

Активная энергия, потребляемая электродвигателем из сети переменного тока за цикл работы, равна

$$W = \sum_{k=1}^{k=5} P_{1k} t_k,$$

где  $P_{1k}$  – мощность потребляемая электродвигателем из сети при  $k$ -той нагрузке  $P_{1k} = \frac{P_{2k}}{\eta_k}$ ;

$P_{2k}$  – механическая мощность, снимаемая с вала электродвигателя

$$P_{2k} = \frac{M_k n_k \pi}{30},$$

$n_k$  – частота вращения вала электродвигателя, которую следует определить по механической характеристике  $M(n)$  (рис. 3.7.2) для каждого заданного статической нагрузочной диаграммой момента  $M_k$ .

Коэффициент полезного действия –  $\eta_k$ , соответствующий работе электродвигателя при  $k$ -той нагрузке, возьмем из графика  $\eta(P_2)$  (рис. 3.7.3), который построим по каталожным данным, приведенным в таблице 3.7.3.

*Таблица 3.7.3. Зависимость коэффициента полезного действия трехфазного асинхронного электродвигателя от нагрузки*

	КПД, % при $\frac{P_2}{P_{2\text{НОМ}}}$ , %				
$\frac{P_2}{P_{2\text{НОМ}}}$ , %	25	50	75	100	125
КПД, %	77,5	86,0	87,5	87,5	86,0
$P_2$ , кВт	1,9	3,8	5,6	7,5	9,4

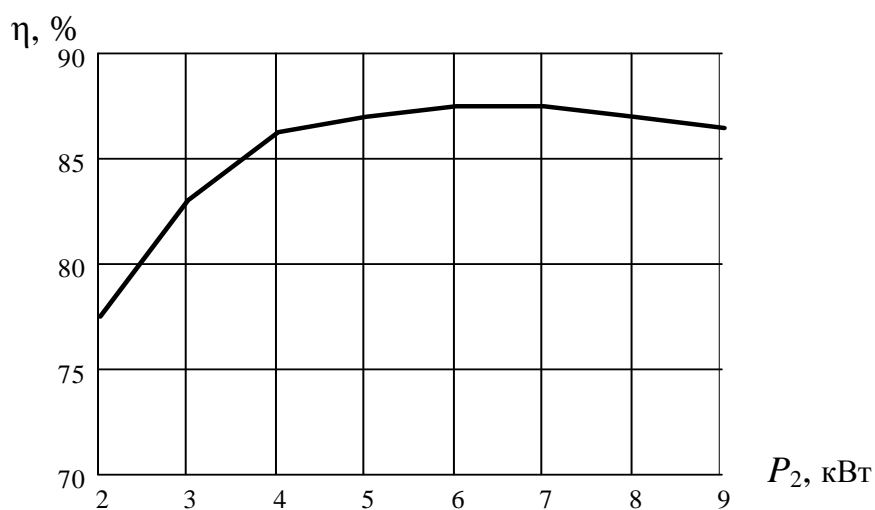


Рис. 3.7.3

*Зависимость коэффициента полезного действия трехфазного асинхронного двигателя от нагрузки*

Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 3.7.4.

*Таблица 3.7.4. Зависимость коэффициента полезного действия двигателя при различных нагрузках*

Номер режима	$M_k$ , Нм	$n_k$ , об./мин.	$P_{2k}$ , кВт	$\eta_k$ , %	$P_{1k}$ , кВт
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
01.	28	1475	4,323	86,5	5,000
02.	30	1470	4,616	86,8	5,320
03.	40	1460	6,113	87,2	7,000
04.	65	1430	9,730	86,3	11,270
05.	50	1450	7,600	87,5	8,700

Активная энергия, потребляемая электродвигателем из сети переменного тока за цикл работы:

$$W = \sum_{k=1}^{k=5} P_{1k} t_k =$$

$$= 5000 \times 48 + 5320 \times 180 + 7000 \times 150 + 11270 \times 90 + 8730 \times 72 = 39101 \text{ Дж.}$$

**Пример 3.7.2.** Определить мощность электродвигателя, необходимую для привода производственного механизма. Выбрать трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором по каталогу. График изменения момента механизма, приведенного к валу электродвигателя, представлен в таблице 3.7.5. Частота вращения вала  $\Omega = 314$  рад/с.

Таблица 3.7.5. Нагрузочная диаграмма производственного механизма

$n_2$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
об/мин	мин	мин	мин	мин	мин	Нм	Нм	Нм	Нм	Нм
3000	0,8	1,8	2,0	2,2	3,2	5	10	3	7	0

**Решение.** В поставленной задаче электродвигатель надо выбрать для работы в повторно-кратковременном режиме (режим **S3**). Суммарное время работы за один цикл составляет

$$\sum t_{\text{раб}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 =$$

$$= 0,8 + 1,8 + 2,0 + 2,2 = 6,8 \text{ мин.}$$

Продолжительность включения

$$\text{ПВ}\% = \frac{\sum t_{\text{раб}}}{\sum t_{\text{раб}} + t_5} 100\% =$$

$$= \frac{6,8}{6,8 + 3,2} 100\% = 68\%$$

Так как предполагается выбрать асинхронный электродвигатель из серии электродвигателей повторно-кратковременного режима с  $\text{ПВ}_{\text{НОМ}}\% = 60\%$ , то эквивалентную мощность за цикл работы определим без учета времени остановки (паузы)

$$P_{\text{ЭКВ}} = \Omega M_{\text{ЭКВ}} = \Omega \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4}{\sum t_{\text{раб}}}} =$$

$$\begin{aligned}
&= 314 \sqrt{\frac{5^2 \times 0,8 + 10^2 \times 1,8 + 3^2 \times 2 + 7^2 \times 2,2}{6,8}} = \\
&= 314 \sqrt{\frac{325,8}{6,8}} = 2,173 \text{ кВт.}
\end{aligned}$$

Приведем полученную мощность к стандартной продолжительности включения  $PВ_{\text{НОМ}} \% = 60\%$

$$\begin{aligned}
P_{\text{расч}} &= P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ\%_{\text{НОМ}}}} = \\
&= 2,0724 \sqrt{\frac{68}{60}} = 2,313 \text{ кВт.}
\end{aligned}$$

По каталогу трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором выбираем электродвигатель типа 4АС90L2У3 для работы с ПВ  $\% = 60\%$  номинальной мощностью  $P_{\text{НОМ}} = 3,2 \text{ кВт}$ .

**Пример 3.7.3.** Выбрать предохранитель для защиты трехфазного асинхронного электродвигателя от токов короткого замыкания и перегрузок для следующих исходных данных: номинальное линейное напряжение  $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$ ; номинальный линейный ток электродвигателя  $I_{\text{НОМ}} = 355 \text{ А}$ ; кратность пускового тока асинхронного электродвигателя  $\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{НОМ}}} = 6$ .

**Решение.** Плавкая вставка не должна перегорать при пуске электродвигателя. Так как в задании не оговорены условия пуска (легкие, тяжелые), то принимаем нормальные условия пуска, для которых

$$I_{\text{вст}} \geq \frac{I_{\text{п}}}{2,5} = \frac{6 \times 355}{2,5} = 852 \text{ А,}$$

где коэффициент  $\alpha = 2,5$  характеризует условия пуска электродвигателя.

По каталогу выбираем предохранитель типа ПР-2-1000 с номинальными данными  $U_{\text{НОМ}} = 500 \text{ В}$ ,  $I_{\text{НОМ}} = 1000 \text{ А}$  и номинальным током плавкой вставки  $I = 850 \text{ А}$ .

## 4. СИНХРОННЫЙ ТУРБОГЕНЕРАТОР

### 4.1. Общие сведения

Синхронной называется электрическая машина, частота вращения которой связана постоянным соотношением с частотой сети переменного тока, в которую эта машина включена.

Синхронная машина состоит из двух частей: статора (неподвижная часть) и ротора (вращающаяся часть). На роторе машины расположена обмотка возбуждения, к которой через контактные кольца и щетки подводится постоянное напряжение от постороннего источника или возбuditеля. В качестве возбuditеля, как правило, используются генераторы постоянного тока. Обмотка возбуждения служит для создания основного магнитного поля в машине. В пазах сердечника статора синхронной машины расположена трехфазная обмотка переменного тока, которая также называется обмоткой якоря. Она может быть соединена либо в звезду, либо – в треугольник.

Как и все электрические машины, синхронные машины обратимы: они могут эксплуатироваться как в двигательном, так и в генераторном режиме.

Особенностью синхронной машины, работающей в энергетической системе, является возможность регулирования ее коэффициента мощности по величине и характеру.

Режим работы синхронной машины определяется взаимодействием магнитных полей, создаваемых токами в обмотках статора и ротора. Синхронная машина переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающий (генераторный) или тормозной (двигательный) момент. При отсутствии момента на валу синхронной машины она работает в режиме холостого хода.

Синхронные машины в основном применяются в качестве преобразователей механической энергии вращения в трехфазную электрическую. В настоящее время основными источниками электроэнергии остаются синхронные турбо- и гидрогенераторы на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях (ТЭС, АЭС, ГЭС).

Трехфазные синхронные генераторы – самые мощные электрические машины. Единичная мощность синхронных генераторов, устанавливаемых на гидроэлектростанциях, достигла 640 МВт, а на тепловых электростанциях –  $800 \div 1200$  МВт.

Синхронные двигатели также являются самыми мощными среди всех электродвигателей. Так, единичная мощность синхронных двигателей для крупных насосов, компрессоров достигает нескольких десятков МВт.

Синхронные машины применяются в качестве двигателей, особенно в крупных установках, не требующих регулирования частоты вращения.

Для улучшения коэффициента мощности крупных электроустановок на электрических подстанциях устанавливают специальные синхронные двигатели, работающие в режиме холостого хода с опережающим по фазе током. Их называют компенсаторами реактивной мощности. Мощность крупных синхронных компенсаторов составляет 50, 100, 160 МВт.

В зависимости от типа приводной турбины синхронные генераторы подразделяются по конструкции на турбогенераторы и гидрогенераторы. Синхронные турбогенераторы – это высокоскоростные машины с числом пар полюсов  $p = 1 \div 2$ , а гидрогенераторы – относительно тихоходные с большим числом пар полюсов.

Мощность, подводимая к валу турбогенератора, может быть определена по его коэффициенту полезного действия и его номинальной электрической мощности

$$P_{\text{мех.}} = \frac{P_{\text{ном.}}}{\eta_{\text{ном.}}}$$

Механический момент, развиваемый приводной турбиной, определяется следующим выражением:

$$M_{\text{мех.}} = \frac{P_{\text{мех.}}}{\Omega},$$

где  $\Omega = \frac{\pi n}{30}$ , (рад./сек.).

Уравнение электрического состояния якорной обмотки синхронного генератора определяется по формуле

$$\dot{U}_{\text{ном}} = \dot{E}_0 - jx_d \dot{I}_{\text{ном}},$$

где  $\dot{E}_0$  – электродвижущая сила, наводимая в обмотке статора полем возбуждения;

$x_d$  – синхронное индуктивное сопротивление генератора.

Схема замещения фазы синхронного турбогенератора показана на рисунке 4.1.1.

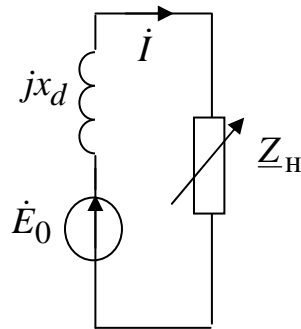


Рис.4.1.1.

Схема замещения синхронного турбогенератора

Векторная диаграмма фазы синхронного турбогенератора представлена на рисунке 4.1.2.

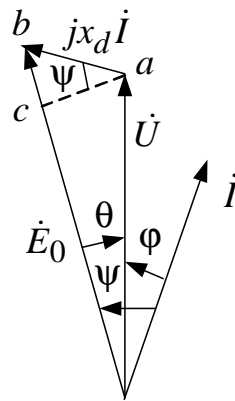


Рис. 4.1.2.

Векторная диаграмма синхронного турбогенератора

Число пар полюсов синхронного турбогенератора при стандартной частоте электродвижущей силы  $f = 50$  Гц рассчитывается по следующей формуле

$$p = \frac{60f}{n}.$$

Электромагнитный момент, создаваемый на валу синхронным турбогенератором

$$M = \frac{mU_{\text{ном}}E_0}{\Omega x_d} \sin \theta.$$

Зависимость  $M = f(\theta)$  называется угловой характеристикой синхронной машины.

При работе синхронного турбогенератора параллельно с мощной сетью появляется возможность регулирования генерируемой реактивной мощности. Такую возможность отражает  $U$  – образная характеристика синхронного турбогенератора  $I = f(I_B)$ , снимаемая при номинальном напряжении питающей сети  $U_{\text{НОМ}}$  и постоянном моменте на валу турбогенератора  $M = \text{const}$ ,

где  $I$  – ток обмотки статора;

$I_B$  – ток обмотки возбуждения.

К исходным данным синхронной машины относятся следующие величины:

- тип синхронного турбогенератора;
- номинальная частота вращения ротора синхронного турбогенератора  $n_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальная полная мощность синхронного турбогенератора  $S_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальная активная мощность синхронного турбогенератора  $P_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальное линейное напряжение обмотки статора турбогенератора  $U_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальный коэффициент мощности синхронного турбогенератора  $\cos \varphi_{\text{НОМ}}$ ;
- номинальный ток статора  $I_{\text{НОМ}}$ ;
- способ соединения обмоток статора;
- номинальный коэффициент полезного действия синхронного турбогенератора  $\eta_{\text{НОМ}}$ ;
- синхронное индуктивное сопротивление  $x_d$  в относительных единицах.

#### **4.2. Задание к индивидуальной работе по теме «Синхронный турбогенератор»**

1. В соответствии с вариантом задания выбрать из таблицы 4.3.1 [Л.12] синхронный турбогенератор и выписать его номинальные данные.

2. Рассчитать механическую мощность и момент, развиваемый приводной турбиной.



3. Определить число пар полюсов синхронного турбогенератора, полагая, что он вырабатывает электродвижущую силу промышленной частоты  $f = 50$  Гц.

4. Считая, что характеристика холостого хода синхронного турбогенератора линейна, рассчитать и построить семейство угловых характеристик  $M = f(\theta)$  при различных токах возбуждения.

5. Построить семейство векторных диаграмм синхронного турбогенератора при постоянном номинальном моменте приводной турбины и различных токах возбуждения.

6. На основании векторных диаграмм построить в относительных единицах  $U$ -образную характеристику синхронного турбогенератора  $I = f(I_B)$ . Проанализировать возможности регулирования реактивной мощности синхронного турбогенератора, работающего параллельно с мощной сетью.

7. В заключении сформулировать ответы на следующие поставленные вопросы:

– назвать основные узлы синхронной машины. Описать устройство синхронной машины, пояснить в каких условиях используются синхронные машины с явновыраженными полюсами на роторе и в каких – с неявновыраженными полюсами;

– изложить принцип работы синхронной машины, работающей в режиме генератора и в режиме двигателя;

– каким соотношением связана частота вращения синхронного турбогенератора и число полюсов при выработке им электродвижущей силы стандартной частоты;

– пояснить вид угловой характеристики синхронного турбогенератора. Показать каким образом осуществляется регулирование активной мощности, отдаваемой генератором в сеть;

– что характеризует предел статической устойчивости синхронного турбогенератора при работе его параллельно с мощной сетью;

– пояснить вид  $U$ -образной характеристики синхронного турбогенератора. Показать, как осуществляется регулирование реактивной мощности, отдаваемой генератором в сеть.

### **4.3. Технические данные синхронных турбогенераторов**

Основные технические данные современных отечественных синхронных турбогенераторов приведены в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1. Технические данные синхронных турбогенераторов

№ П/ П	Тип турбогенератора	$n_{\text{НОМ}}$ , об./мин.	$S_{\text{НОМ}}$ , МВА	$P_{\text{НОМ}}$ , МВт	$U_{\text{ЛНОМ}}$ , кВ	$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{НОМ}}$ , кА	$x_d^*$ , о.е.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
01.	<b>Т-6-2У3</b>	3000	7,5	6,0	6,3	0,8	0,68	1,651
02.	<b>Т-6-2У3</b>	3000	7,5	6,0	10,5	0,8	0,412	1,71
03.	<b>Т-12-2У3</b>	3000	15	12	6,3	0,8	1,376	1,85
04.	<b>Т-12-2У3</b>	3000	15	12	10,5	0,8	0,825	2,07
05.	<b>Т-20-2У3</b>	3000	25	20	6,3	0,8	2,295	2,07
06.	<b>Т-20-2У3</b>	3000	25	20	10,5	0,8	1,375	2,07
07.	<b>ТВС-32-2У3</b>	3000	40	32	6,3	0,8	3,67	2,46
08.	<b>ТВС-32-2У3</b>	3000	40	32	10,5	0,8	2,2	2,65
09.	<b>ТВС-32-Т3</b>	3000	31,25	25	10,5	0,8	1,718	2,21
10.	<b>ТВФ-63-2У3</b>	3000	78,75	63	10,5	0,8	4,33	1,51
11.	<b>ТВФ-63-2У3</b>	3000	78,75	63	6,3	0,8	7,21	1,92
12.	<b>ТВФ-63-2У3</b>	3000	78,75	63	10,5	0,8	4,33	1,20
13.	<b>ТВФ-110-2У3</b>	3000	137,5	110	10,5	0,8	7,56	2,04
14.	<b>ТВФ-120-2У3</b>	3000	125	100	10,5	0,8	6,875	1,907
15.	<b>ТВВ-160-2У3</b>	3000	188	160	18	0,85	5,67	1,713
16.	<b>ТВВ-220-У3</b>	3000	258,3	220	15,75	0,85	8,625	1,88
17.	<b>ТВВ-220-АУ3</b>	3000	235,3	200	15,75	0,85	8,625	2,106
18.	<b>ТГВ-200-2У3</b>	3000	235,3	200	15,75	0,85	8,625	1,84

Продолжение таблицы 4.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
19.	<b>ТГВ-200-2Д</b>	3000	235,3	200	18	0,85	7,55	1,896
20.	<b>ТГВ-200-МТ</b>	3000	241,3	210	15,75	0,85	9,06	2,00
21.	<b>ТГВ-200-МУ3</b>	3000	247	210	15,75	0,85	9,06	2,00
22.	<b>ТВВ-320-ЕУ3</b>	3000	375	320	20	0,85	10,9	1,698
23.	<b>ТГВ-300-2У3</b>	3000	353	300	20	0,85	10,2	2,195
24.	<b>ТВМ-300-У3</b>	3000	353	300	20	0,85	10,19	2,11
25.	<b>ТВВ-500-ЕУ3</b>	3000	588	500	20	0,85	17	2,56
26.	<b>ТГВ-500-2У3</b>	3000	588	500	20	0,85	17	2,413
27.	<b>ТГВ-500-4У3</b>	1500	588	500	20	0,85	17	2,158
28.	<b>ТВМ-500-У3</b>	3000	588,2	500	36,75	0,85	9,24	2,158
29.	<b>ТГВ-800-2У3</b>	3000	941	800	24	0,85	22,65	2,482
30.	<b>ТВВ-800-ЕУ3</b>	3000	888,9	800	24	0,9	21,4	2,33
31.	<b>ТЗВ-800-2У3</b>	3000	941	800	24	0,85	22,65	2,33
32.	<b>ТВВ-1000-4У3</b>	1500	1111	1000	24	0,9	26,73	2,41
33.	<b>ТВВ-1000-2У3</b>	3000	1111	1000	24	0,9	26,73	2,82
34.	<b>ТВВ-1200-2У3</b>	3000	1330	1200	24	0,9	30,1	2,418

В типоразмере синхронного турбогенератора введены следующие обозначения: «Т» или «ТГ» – синхронный турбогенератор; «В» – водяное охлаждение; «ВВ» или «В» – водородно-водяное охлаждение обмоток; «ВФ» – водородное форсированное охлаждение; «ВМ» – водомасляное охлаждение; «ЗВ» – трижды водяное охлаждение (ротор, статор, сердечник); «С» – синхронный турбогенератор специального исполнения. Число после первого дефиса – номинальная активная мощность синхронного турбогенератора, МВт; число после второго дефиса – количество полюсов машины; «Е» – принадлежность синхронного турбогенератора к единой унифицированной серии; «М» – модификация; бу-

квы «У» или «Т» – климатическое исполнение синхронного турбогенератора («У» – для работы синхронного турбогенератора в районах с умеренным климатом; «Т» – с тропическим климатом); цифра 3 – для работы турбогенератора в закрытых помещениях с естественной вентиляцией.

Буквой «В» обозначено водородное охлаждение; «М» – масляное охлаждение; «Н» – непосредственное охлаждение; «К» – косвенное охлаждение; «Возд.» – воздушное охлаждение; «Водой» – водяное охлаждение.

#### 4.4. Пример расчета

В соответствии с заданным вариантом из таблицы 4.3.1 выбираем следующий турбогенератор:

- тип синхронного турбогенератора: Т-6-2У3;
- номинальная синхронная частота вращения ротора турбогенератора  $n_{\text{НОМ}}=3000$  об./мин.;
- номинальная полная мощность синхронного турбогенератора  $S_{\text{НОМ}}=7,5$  МВА;
- номинальная активная мощность синхронного турбогенератора  $P_{\text{НОМ}}=6$  МВт;
- номинальное линейное напряжение обмотки статора турбогенератора  $U_{\text{НОМ}}=6,3$  кВ;
- номинальный коэффициент мощности (нагрузка – активно-индуктивная)  $\cos \varphi_{\text{НОМ}}=0,8$ ;
- номинальный ток обмотки статора  $I_{\text{НОМ}}=0,68$  кА;
- номинальный коэффициент полезного действия синхронного турбогенератора  $\eta_{\text{НОМ}}=0,976$ ;
- синхронное индуктивное сопротивление в относительных единицах  $x_d^*=1,651$  о.е.

Механическая мощность, подводимая к валу турбогенератора, определяется следующим выражением

$$P_{\text{мех.}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\eta_{\text{НОМ}}} = \frac{6 \times 10^6}{0,976} = 6,148 \times 10^6 \text{ Вт.}$$

Тогда момент, развиваемый турбиной,

$$M_{\text{мех.}} = \frac{P_{\text{мех.}}}{\Omega} =$$

$$= \frac{6,148 \times 10^6}{314} = 1,958 \times 10^4 \text{ Нм},$$

где  $\Omega$  – синхронная частота вращения ротора синхронного турбогенератора, выраженная в рад./сек.

$$\Omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \times 3000}{30} = 314 \text{ рад./сек.}$$

При стандартной частоте напряжения сети равной  $f = 50$  Гц число пар полюсов синхронного турбогенератора при заданной частоте вращения ротора определится по следующей формуле

$$p = \frac{60f}{n_{\text{НОМ}}} = \frac{60 \times 50}{3000} = 1.$$

Абсолютное значение синхронного индуктивного сопротивления определим через базовое сопротивление турбогенератора и синхронное индуктивное сопротивление в относительных единицах

$$x_d = x_d^* \times Z_{\text{б}} =$$

$$= 1,651 \times 5,355 = 8,842 \text{ Ом},$$

где базовое сопротивление

$$Z_{\text{б}} = \frac{U_{\text{фНОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} =$$

$$= \frac{6,3 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0,68 \times 10^3} = 5,355 \text{ Ом}.$$

По второму закону Кирхгофа из уравнения равновесия напряжений статорного контура определим электродвижущую силу синхронного турбогенератора, наводимую в статорной обмотке обмоткой возбуждения,

$$\dot{U}_{\text{НОМ}} = \dot{E}_0 - jx_d \dot{I}_{\text{НОМ}},$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_{\text{НОМ}} + jx_d \dot{I}_{\text{НОМ}}.$$

В расчетах принимаем начальную фазу номинального фазного напряжения  $\Psi_u = 90^0$ . Тогда электродвижущая сила, наводимая в обмотке статора синхронного турбогенератора, определится следующим образом

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_{\text{НОМ}} + jx_d \dot{I}_{\text{НОМ}} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{6,3 \times 10^3}{\sqrt{3}} e^{j90^\circ} + 8,842 e^{j90^\circ} \times 0,68 \times 10^3 e^{j(90^\circ - \varphi_{\text{НОМ}})} = \\
&= 8690 e^{j114^\circ} \text{ В},
\end{aligned}$$

где  $\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos 0,8 = 36,5^\circ$ .

Угловая характеристика синхронного турбогенератора  $M(\theta)$  записывается следующим выражением

$$\begin{aligned}
M &= \frac{3U_{\text{фНОМ}} E_0}{\Omega x_d} \sin \theta = \\
&= \frac{3 \times 3,642 \times 10^3 \times 8,960 \times 10^3}{314 \times 8,842} \sin \theta = \\
&= 34,15 \times 10^3 \sin \theta.
\end{aligned}$$

Максимальный электромагнитный момент, характеризующий предел статической устойчивости синхронного генератора, выражается амплитудным значением угловой характеристики

$$\begin{aligned}
M_{\text{max}} &= \frac{3U_{\text{фНОМ}} E_0}{\Omega x_d} = \\
&= 34,15 \times 10^3 \text{ Нм}.
\end{aligned}$$

Номинальный момент при номинальном угле нагрузки

$$\theta_{\text{НОМ}} = \Psi_{E_0} - \Psi_{U_{\text{НОМ}}} = 114^\circ - 90^\circ = 24^\circ$$

определяется следующим числом

$$\begin{aligned}
M_{\text{НОМ}} &= M_{\text{max}} \sin \theta_{\text{НОМ}} = \\
&= 34,15 \times 10^3 \sin 24^\circ = 13,89 \times 10^3 \text{ Нм}.
\end{aligned}$$

В предположении, что в ненасыщенном режиме характеристика холостого хода синхронного турбогенератора линейна ( $E_0 = kI_B$ ), построим семейство угловых характеристик для различных токов возбуждения при постоянном номинальном моменте на валу.

Угловые характеристики синхронного турбогенератора при различных токах возбуждения приведены в таблице 4.4.1 и на рисунке 4.4.1.

Таблица 4.4.1. Угловые характеристики синхронного турбогенератора при различных токах возбуждения

$\theta$	град.	$I_B^* = \frac{I_B}{I_{BНОМ}}$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
$M \times 10^3$	НМ	$I_B^{*'} = 1,0$	0	17,08	29,57	34,15	29,57	17,08	0
		$I_B^{*''} = 0,54$	0	9,22	15,97	18,44	15,97	9,22	0
		$I_B^{*'''} = 0,43$	0	7,34	12,72	14,68	12,72	7,34	0

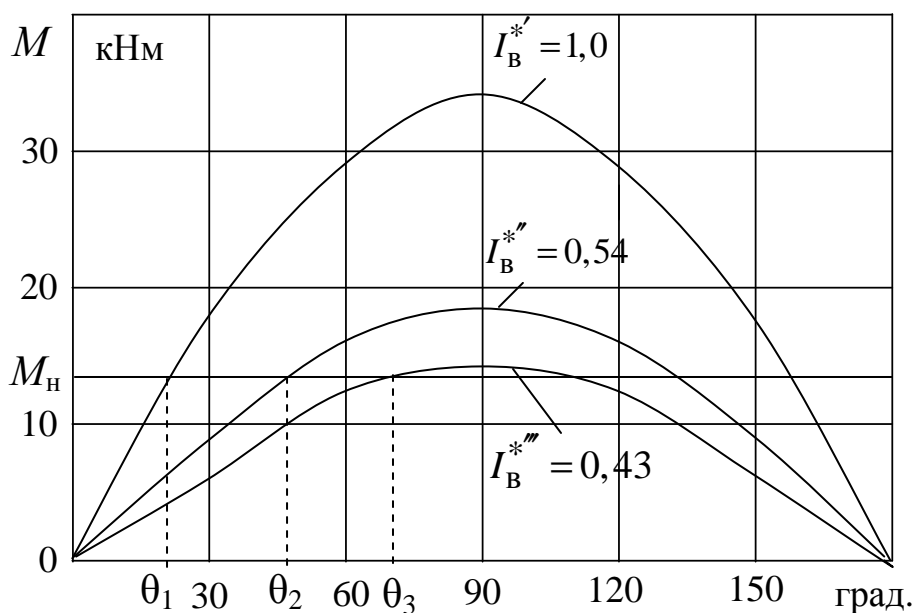


Рис. 4.4.1  
Угловые характеристики синхронного турбогенератора

Регулирование реактивной мощности синхронного турбогенератора при работе его параллельно с мощной сетью путем изменения тока обмотки возбуждения при постоянном моменте на валу турбогенератора осуществляется по следующим условиям:

$$I \cos \varphi = \text{const};$$

$$E_0 \sin \theta = \text{const}.$$

Построим на комплексной плоскости семейство векторных диаграмм синхронного турбогенератора, соответствующих этим условиям. (Семейство векторных диаграмм синхронного турбогенератора при различных токах возбуждения и постоянном моменте на валу представлено на рисунке 4.4.2.).

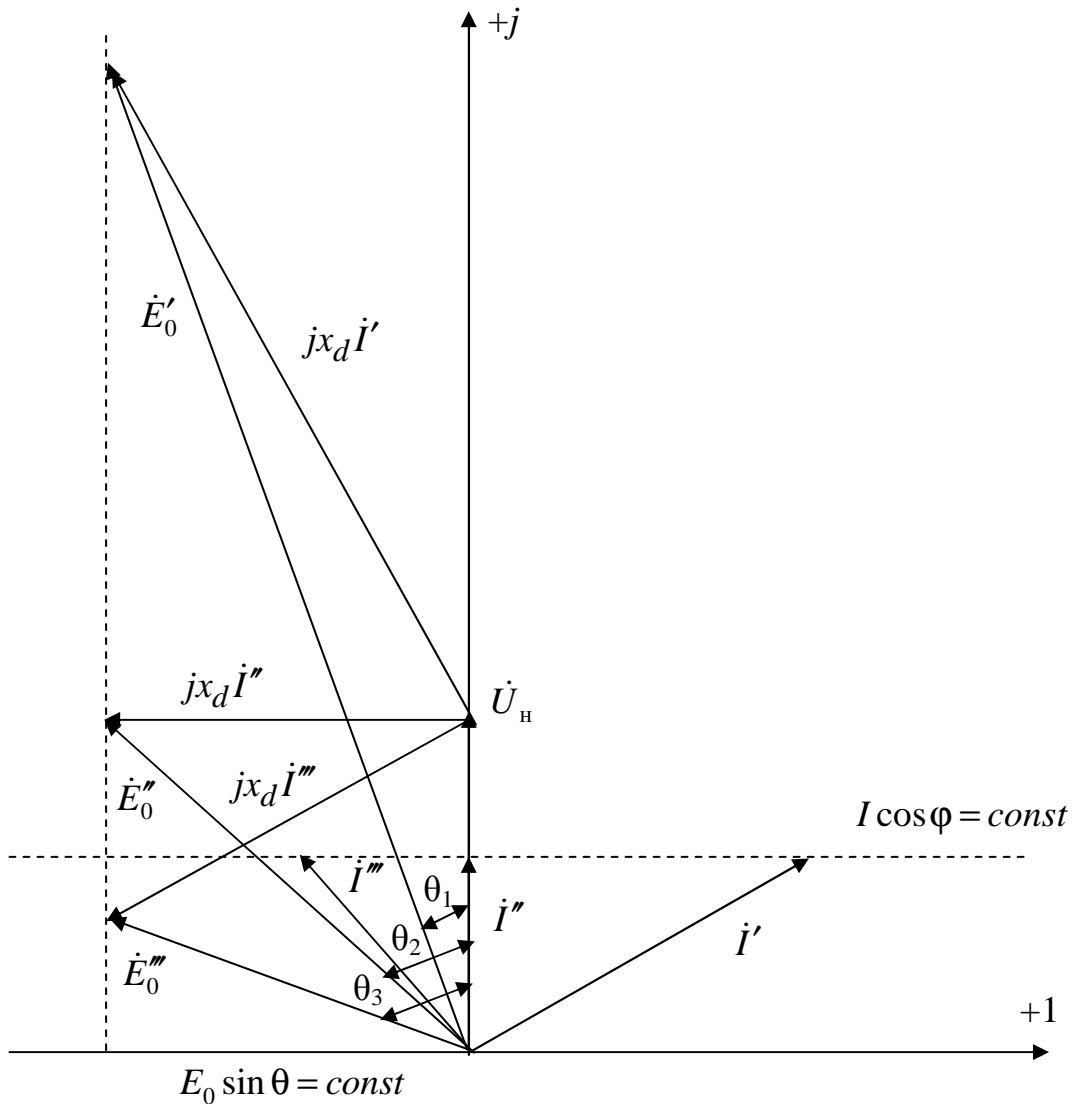


Рис. 4.4.2

Семейство векторных диаграмм синхронного турбогенератора при различных токах возбуждения

Принимая ток обмотки статора  $I'$  и ток обмотки возбуждения  $I'_B$  за единицу, построим на основании векторных диаграмм  $U$ -образную характеристику синхронного турбогенератора. Вид  $U$ -образной характеристики представлен на рисунке 4.4.3.



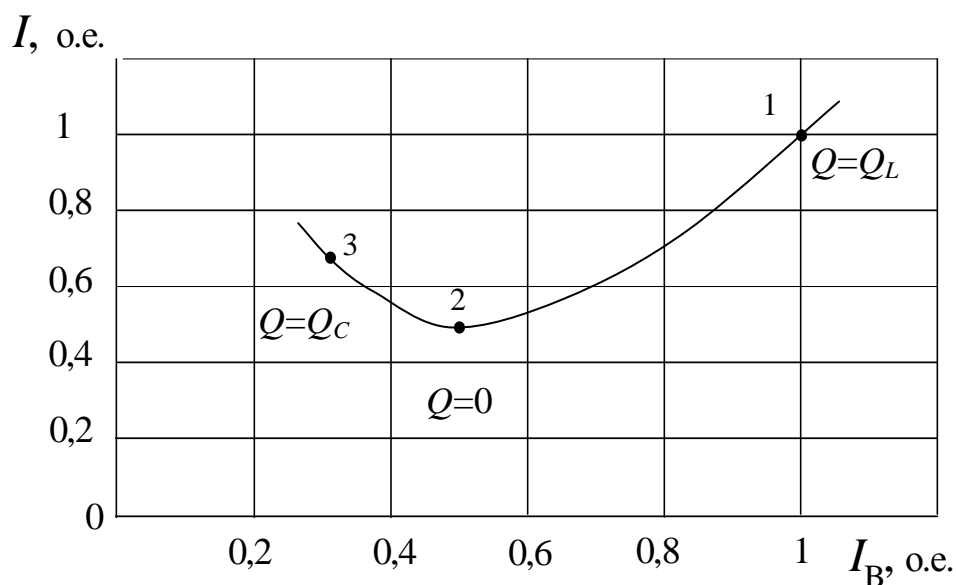


Рис. 4.4.3  
*U-образная характеристика синхронного турбогенератора*

На  $U$  - образной характеристике минимум указывает на коэффициент мощности равный единице. В этом режиме синхронный турбогенератор отдает в сеть только активную мощность ( $\varphi = 0^\circ$ ). Левая ветвь характеристики соответствует выработке синхронным генератором активно-емкостной мощности ( $\varphi < 0^\circ$ ), правая ветвь – активно-индуктивной ( $\varphi > 0^\circ$ ).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. – М.: Энергия, 1981. – 376 с.
2. Рекус Г. Г., Белоусов А. И. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А. Э. Кравчик, М. М., Шлафф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 503 с.
4. Справочник по электромашинам: В двух томах, т. 1 / под ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова.– М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
5. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В двух томах, т. 2: Электрооборудование / под общей ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 592 с.
6. Электротехнический справочник: В трех томах, т. 1 / под общей ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 488 с.
7. Электротехнический справочник: В трех томах, т. 2 / под общей ред. В. Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 711с.
8. Унифицированная серия асинхронных двигателей. Интерэлектро / под ред. В. И. Радиана. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 414 с.
9. Справочник по автоматизированному электроприводу/ под. ред. В. А. Елисеева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616с.
10. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
11. Читечян В. И. Электрические машины: Сборник задач. – М.: Высшая школа. 1988. – 231 с.
12. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
13. Лукутин А.В., Шандарова Е.Б. Электротехника и электроника: Учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2010. – 198 с. (74847888)
14. Аристова Л. И., Лукутин А. В. Сборник задач по электротехнике: Учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2010. – 107 с.

Параметры предохранителей типа ПР-2, 500 В

Тип предохра- нителя	Номинальный ток, А		Предельный ток отключения (кА) при напряжении		
	Предо- храните- ля	Плавкой вставки	220, В	380, В	500, В
1	2	3	4	5	6
<b>ПР-2-15</b>	15	6,10,15		8,000	7,000
<b>ПР-2-60</b>	60	15,20,25,35,45,60		4,500	3,500
<b>ПР-2-100</b>	100	60,80,100			
<b>ПР-2-200</b>	200	100,125,160,200		11,000	10,000
<b>ПР-2-350</b>	350	200,225,260,300,350		13,000	11,000
<b>ПР-2-600</b>	600	350,430,500,600		23,000	
<b>ПР-2-1000</b>	1000	600,700,850,1000		20,000	20,000
<b>ПП-21</b>	16	1,2,5,6,10,16	1,200	0,8 ÷ 8,0	7,000
	63	25,40,63	5,500	1,8 ÷ 4,5	3,500
	100,160,250	100,160,250	14,000	6,0 ÷ 11,0	10,000

Продолжение приложения 1

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>ПРС</b>	6 25	1,2,4,6 4,6,10,16,20,25		2,0 60,0	
<b>ПП</b>	63 630	25,40,50,63 250,400,630		3,2 ÷ 30 42,50,60	
<b>ПП -31</b>	630 1000	200,250,320,400,500 500,630,800,1000			

Технические данные пусковых реостатов РП и РЗП

Габариты реостата	Тип реостата	Мощность электродвигателя $P_{НОМ}$ , кВт			Предельный ток, А	Число ступеней	Число элементов сопротивлений	Вес, кг
		$U_H = 110$ В	$U_H = 220$ В	$U_H = 440$ В				
I	<b>РП-2511</b>	0,52÷2,5	0,52÷3,7	1,0÷3,7	30	4	2	5,5
II	<b>РЗП-2</b>	-	-	5,6				
		3,0÷3,7	4,2÷7,0	-	40	7	6	12
III	<b>РЗП-3</b>	5,0÷7,0	8,5÷10,5	-	120	8	8	21
III	<b>РЗП-3А</b>	8,5÷10,5	13,5÷15,0	13,5	120	8	16	27
IV	<b>РЗП-4</b>	13,5÷15,0	-	-	200	12	6	52
IV	<b>РЗП-4А</b>	15,0÷19,0	19,5÷21,0	-	200	12	10	55
IV	<b>РЗП-4Б</b>	-	30,0÷42,0	20,5÷29,0	200	12	14	60
IV	<b>РЗП-4В</b>	-	42,0	42,0	200	12	18	65

Основные технические данные электродвигателей основного исполнения, степень защиты IP44

Типоразмер электродвигателя	$P_{2н}$ кВт	Энергетические показатели										Пусковые свойства					
		КПД, % при $\frac{P_2}{P_{2ном}}$ , %					$\cos \varphi$ при $\frac{P_2}{P_{2ном}}$ , %					Механические характеристики					$i_{п}$
		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	$m_{п}$	$m_m$	$m_K$	$S_{ном}$ %	$S_K$ %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>Синхронная частота вращения 3000 об./мин.</b>																	
<b>4AA50A2Y3</b>	0,09	42,0	55,5	60,0	60,0	57,5	0,30	0,49	0,61	0,70	0,75	2,0	1,8	2,2	8,6	50,0	3,5
<b>4AA50B2Y3</b>	0,12	48,5	60,0	63,5	63,0	58,0	0,31	0,50	0,62	0,70	0,75	2,0	1,8	2,2	9,7	51,0	3,5
<b>4AA56A2Y3</b>	0,18	51,0	63,0	66,0	66,0	63,0	0,34	0,54	0,66	0,76	0,81	2,0	1,5	2,2	8,0	46,0	4,0
<b>4AA56B2Y3</b>	0,25	57,0	67,5	69,0	68,0	64,0	0,35	0,57	0,70	0,77	0,81	2,0	1,5	2,2	7,5	51,0	4,0
<b>4AA63A2Y3</b>	0,37	63,0	71,0	72,0	70,0	65,0	0,45	0,69	0,80	0,86	0,89	2,0	1,5	2,2	8,3	50,5	4,5
<b>4AA63B2Y3</b>	0,55	69,0	75,0	75,0	73,0	68,0	0,47	0,69	0,80	0,86	0,88	2,0	1,5	2,2	8,5	54,5	4,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4A71A2Y3</b>	0,75	71,0	78,0	78,5	77,0	73,0	0,50	0,72	0,82	0,87	0,89	2,0	1,5	2,2	5,9	38,0	5,5
<b>4A71B2Y3</b>	1,10	76,0	79,5	79,5	77,5	73,0	0,50	0,73	0,82	0,87	0,89	2,0	1,5	2,2	6,3	39,0	5,5
<b>4A80A2Y3</b>	1,50	73,0	80,5	81,5	81,0	79,0	0,48	0,70	0,80	0,85	0,87	2,1	1,4	2,6	4,2	35,5	6,5
<b>4A80B2Y3</b>	2,20	77,0	83,0	83,5	83,0	81,0	0,51	0,73	0,83	0,87	0,89	2,1	1,4	2,6	4,3	38,0	6,5
<b>4A90L2Y3</b>	3,00	80,0	85,5	85,5	84,5	82,0	0,58	0,78	0,85	0,88	0,89	2,1	1,6	2,5	4,3	32,5	6,5
<b>4A100S2Y3</b>	4,00	80,0	86,0	88,0	86,5	85,0	0,60	0,80	0,86	0,89	0,90	2,0	1,6	2,5	3,3	28,0	7,5
<b>4A100L2Y3</b>	5,50	82,5	87,5	88,0	87,5	86,0	0,65	0,83	0,88	0,91	0,91	2,0	1,6	2,5	3,4	29,0	7,5
<b>4A112M2Y3</b>	7,50	78,0	85,5	87,5	87,5	86,5	0,56	0,74	0,83	0,88	0,89	2,0	1,8	2,8	2,5	17,0	7,5
<b>4A132M2Y3</b>	11,5	80,0	87,0	88,0	88,0	87,0	0,65	0,82	0,87	0,90	0,90	1,7	1,5	2,8	2,3	19,0	7,5
<b>4A160S2Y3</b>	15,0	80,0	86,5	88,0	88,0	87,0	0,68	0,84	0,89	0,91	0,91	1,4	1,0	2,2	2,1	12,0	7,0
<b>4A160M2Y3</b>	18,5	82,0	87,5	88,5	88,5	87,0	0,72	0,86	0,90	0,92	0,92	1,4	1,0	2,2	2,1	12,5	7,0
<b>4A180S2Y3</b>	22,0	79,0	86,0	88,5	88,5	88,0	0,65	0,82	0,88	0,91	0,92	1,4	1,1	2,5	1,9	12,5	7,5
<b>4A180M2Y3</b>	30,0	82,0	88,5	90,5	90,5	89,0	0,66	0,82	0,88	0,90	0,90	1,4	1,1	2,5	1,8	12,5	7,5
<b>4A200M2Y3</b>	37,0	81,0	87,5	90,0	90,0	89,5	0,67	0,82	0,87	0,89	0,89	1,4	1,0	2,5	1,9	11,5	7,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4A200L2Y3</b>	45,0	83,0	89,0	91,0	91,0	90,5	0,71	0,85	0,89	0,90	0,90	1,4	1,0	2,5	1,8	11,5	7,5
<b>4A225M2Y3</b>	55,0	82,5	89,5	91,0	91,0	90,5	0,78	0,89	0,91	0,92	0,92	1,4	1,2	2,5	1,8	11,0	7,5
<b>4A250S2Y3</b>	75,0	81,0	88,0	91,0	91,0	91,0	0,71	0,84	0,88	0,89	0,80	1,2	1,0	2,5	1,4	10,0	7,5
<b>4A250M2Y3</b>	90,0	84,0	90,0	92,0	92,0	91,5	0,71	0,84	0,89	0,90	0,90	1,2	1,0	2,5	1,4	10,0	7,5
<b>4A280S2Y3</b>	110	82,0	88,5	91,0	91,0	90,5	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	1,2	1,0	2,2	2,0	8,5	7,0
<b>4A280M2Y3</b>	132	84,0	89,5	91,5	91,5	91,0	0,83	0,87	0,88	0,89	0,88	1,2	1,0	2,2	2,0	8,5	7,0
<b>4A280S2Y3</b>	160	85,5	90,5	92,0	92,0	91,5	0,83	0,87	0,89	0,90	0,89	1,0	0,9	1,9	1,9	8,5	7,0
<b>4A315M2Y3</b>	200	87,0	91,5	92,5	92,5	92,0	0,83	0,88	0,89	0,90	0,89	1,0	0,9	1,9	1,9	9,0	7,0
<b>4A355S2Y3</b>	250	87,0	91,0	92,5	92,5	92,0	0,86	0,88	0,89	0,90	0,89	1,0	0,9	1,9	1,9	7,0	7,0
<b>Синхронная частота вращения 1500 об./мин.</b>																	
<b>4AA50A4Y3</b>	0,06	25,0	40,0	50,0	50,0	49,5	0,31	0,41	0,51	0,60	0,68	2,0	1,7	2,2	8,1	58,5	2,5
<b>4AA50B4Y3</b>	0,09	31,0	46,0	55,0	55,0	54,5	0,31	0,40	0,51	0,60	0,68	2,0	1,7	2,2	8,6	59,0	2,5
<b>4AA56A4Y3</b>	0,12	40,0	55,0	63,0	63,0	61,5	0,30	0,43	0,56	0,66	0,70	2,1	1,5	2,2	8,2	49,0	3,5
<b>4AA56B4Y3</b>	0,18	43,5	58,0	64,0	64,0	61,5	0,26	0,40	0,53	0,64	0,71	2,1	1,5	2,2	8,9	50,5	3,5



Продолжение приложения 3

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4AA63A4Y3</b>	0,25	49,0	63,0	68,0	68,0	65,5	0,26	0,41	0,54	0,65	0,72	2,0	1,5	2,2	8,0	48,0	4,0
<b>4AA63B4Y3</b>	0,37	51,5	64,5	68,0	68,0	64,0	0,29	0,45	0,58	0,69	0,75	2,0	1,5	2,2	9,0	48,0	4,0
<b>4A71A4Y3</b>	0,55	55,0	67,0	70,5	70,5	67,0	0,29	0,46	0,59	0,70	0,75	2,0	1,8	2,2	7,3	39,0	4,5
<b>4A71B4Y3</b>	0,75	58,5	70,0	73,0	72,0	68,5	0,33	0,50	0,64	0,73	0,79	2,0	1,8	2,2	7,5	40,0	4,5
<b>4A80A4Y3</b>	1,1	64,0	74,0	76,0	75,0	72,0	0,38	0,59	0,73	0,81	0,85	2,0	1,6	2,2	5,4	34,0	5,0
<b>4A90L4Y3</b>	2,2	74,0	81,0	81,5	80,0	76,5	0,42	0,64	0,76	0,83	0,85	2,1	1,6	2,4	5,1	33,0	6,0
<b>4A100S4Y3</b>	3,0	75,5	82,0	83,0	82,0	79,5	0,43	0,65	0,72	0,83	0,85	2,0	1,6	2,4	4,4	31,0	6,0
<b>4A100L4Y3</b>	4,0	79,5	84,5	85,0	84,0	81,5	0,46	0,68	0,79	0,84	0,85	2,0	1,6	2,4	4,6	31,5	6,0
<b>4A112M4Y3</b>	5,5	82,0	86,5	86,5	85,5	83,0	0,51	0,72	0,80	0,85	0,85	2,0	1,6	2,2	3,6	25,0	7,0
<b>4A132S4Y3</b>	7,5	77,5	86,0	87,5	87,5	86,0	0,53	0,71	0,83	0,86	0,87	2,2	1,7	3,0	2,9	19,5	7,0
<b>4A132M4Y3</b>	11,0	80,0	86,0	88,0	87,5	87,0	0,55	0,75	0,84	0,87	0,88	2,2	1,7	3,0	2,8	19,5	7,5
<b>4A160S4Y3</b>	15,0	86,0	89,5	89,5	88,5	86,5	0,63	0,81	0,87	0,88	0,88	1,4	1,0	2,3	2,3	16,0	7,0
<b>4A160M4Y3</b>	18,5	87,5	90,5	90,5	89,5	87,5	0,66	0,82	0,86	0,88	0,88	1,4	1,0	2,3	2,3	16,0	7,0
<b>4A180S4Y3</b>	22,0	85,5	89,5	90,0	90,0	87,0	0,65	0,82	0,87	0,90	0,89	1,4	1,0	2,3	2,0	14,0	6,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4A180M4Y3</b>	30,0	87,0	90,5	91,0	91,0	89,0	0,66	0,83	0,88	0,89	0,89	1,4	1,0	2,3	1,9	14,0	6,5
<b>4A200M4Y3</b>	37,0	87,0	90,5	91,0	91,0	90,5	0,67	0,84	0,89	0,90	0,90	1,4	1,0	2,5	1,7	10,0	7,0
<b>4A200L4Y3</b>	45,0	88,5	92,0	92,5	92,0	91,0	0,69	0,85	0,89	0,90	0,90	1,4	1,0	2,5	1,6	10,0	7,0
<b>4A225M4Y3</b>	55,0	88,5	92,0	92,5	92,5	91,5	0,68	0,84	0,89	0,90	0,90	1,3	1,0	2,5	1,4	10,0	7,0
<b>4A250S4Y3</b>	75,0	88,5	92,0	93,0	93,0	92,5	0,69	0,84	0,88	0,90	0,90	1,2	1,0	2,3	1,2	9,5	7,0
<b>4A250M4Y3</b>	90,0	89,0	92,5	93,0	93,0	92,0	0,73	0,87	0,90	0,91	0,90	1,2	1,0	2,3	1,3	9,5	7,0
<b>4A280S4Y3</b>	110	89,5	92,5	93,0	92,5	91,0	0,82	0,90	0,91	0,90	0,87	1,2	1,0	2,0	2,3	8,5	6,0
<b>4A280M4Y3</b>	132	90,0	93,0	93,5	93,0	91,5	0,81	0,90	0,91	0,90	0,87	1,3	1,0	2,0	2,3	6,5	6,0
<b>4A315S4Y3</b>	160	91,0	93,5	94,0	93,5	92,5	0,81	0,90	0,91	0,91	0,88	1,3	0,9	2,2	1,4	6,5	6,5
<b>4A315M4Y3</b>	200	91,5	94,0	94,5	94,0	93,0	0,82	0,90	0,92	0,92	0,89	1,3	0,9	2,2	1,3	5,0	6,5
<b>4A355S4Y3</b>	250	91,5	94,0	94,5	94,5	93,5	0,82	0,90	0,92	0,92	0,89	1,2	0,9	2,0	1,0	4,0	7,0
<b>4A355M4Y3</b>	315	92,5	94,5	95,0	94,5	93,5	0,85	0,92	0,92	0,92	0,89	1,2	0,9	2,0	1,0	4,0	7,0
<b>Синхронная частота вращения 1000 об./мин.</b>																	
<b>4AA63A6Y3</b>	0,18	34,5	49,5	56,0	56,0	52,0	0,25	0,38	0,51	0,62	0,71	2,2	1,5	2,2	11,5	55,5	3,0

Продолжение приложения 3

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4AA63B6Y3</b>	0,25	39,5	54,0	59,0	59,0	55,0	0,24	0,38	0,51	0,62	0,70	2,2	1,5	2,2	10,8	62,5	3,0
<b>4AA71A6Y3</b>	0,37	45,5	59,5	64,5	64,5	61,0	0,30	0,45	0,58	0,69	0,76	2,0	1,8	2,2	9,2	49,0	4,0
<b>4AA71B6Y3</b>	0,55	52,5	65,5	68,5	67,5	62,5	0,30	0,47	0,60	0,71	0,77	2,0	1,8	2,2	10,0	49,0	4,0
<b>4A80A6Y3</b>	0,75	56,0	68,0	69,5	69,0	63,5	0,33	0,51	0,65	0,74	0,79	2,0	1,6	2,2	8,4	37,0	4,0
<b>4A80B6Y3</b>	1,1	53,0	73,5	75,0	74,0	69,0	0,33	0,52	0,65	0,74	0,78	2,0	1,6	2,2	8,0	38,0	4,0
<b>4A90L6Y3</b>	1,5	65,5	75,0	76,0	75,0	71,0	0,33	0,53	0,66	0,74	0,77	2,0	1,7	2,2	6,4	31,0	4,5
<b>4A100L6Y3</b>	2,2	74,0	81,5	82,0	81,0	78,0	0,32	0,53	0,66	0,73	0,76	2,0	1,6	2,2	5,1	25,5	5,0
<b>4A112MA6 Y3</b>	3,0	73,0	81,0	82,0	81,0	78,5	0,33	0,56	0,69	0,76	0,79	2,0	1,8	2,5	4,7	37,0	6,0
<b>4A112MB6 Y3</b>	4,0	77,0	82,5	83,0	82,0	79,5	0,40	0,62	0,74	0,81	0,83	2,0	1,8	2,5	5,1	38,0	6,0
<b>4A132S6Y3</b>	5,5	71,0	81,0	84,0	85,0	83,0	0,33	0,56	0,69	0,80	0,84	2,0	1,8	2,5	3,3	36,0	6,0
<b>4A132M6Y3</b>	7,5	76,0	84,0	85,0	85,5	84,0	0,40	0,62	0,74	0,81	0,84	2,0	1,8	2,5	3,2	26,0	6,0
<b>4A160S6Y3</b>	11,5	83,5	87,5	87,5	86,0	83,5	0,54	0,75	0,83	0,86	0,87	1,2	1,0	2,0	2,7	15,0	6,0
<b>4A160M6Y3</b>	15,5	85,0	88,5	88,5	87,5	85,0	0,55	0,76	0,84	0,87	0,87	1,2	1,0	2,0	2,6	14,0	6,0
<b>4A180M6Y3</b>	18,5	85,0	89,0	89,0	88,0	86,0	0,54	0,76	0,84	0,87	0,87	1,2	1,0	2,0	2,4	13,5	6,0

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4A200M6Y3</b>	22,0	87,5	91,0	91,0	90,0	88,0	0,68	0,84	0,88	0,90	0,90	1,3	1,0	2,4	2,3	13,5	6,5
<b>4A200L6Y3</b>	30,0	88,0	91,0	91,0	90,5	89,0	0,64	0,82	0,88	0,90	0,90	1,3	1,0	2,4	2,1	13,5	6,5
<b>4A225M6Y3</b>	37,0	87,5	91,0	91,5	91,0	89,5	0,63	0,81	0,87	0,89	0,89	1,2	1,0	2,3	1,8	11,5	6,5
<b>4A250S6Y3</b>	45,0	87,5	91,0	91,5	91,5	90,5	0,64	0,82	0,87	0,89	0,89	1,2	1,0	2,1	1,4	9,0	6,5
<b>4A250M6Y3</b>	55,0	88,0	91,0	91,5	91,5	90,5	0,60	0,80	0,86	0,89	0,89	1,2	1,0	2,1	1,3	9,5	6,5
<b>4A280S6Y3</b>	75,0	90,0	92,5	92,5	92,0	90,0	0,70	0,85	0,88	0,89	0,88	1,2	1,0	2,2	2,0	8,3	7,0
<b>4A280M6Y3</b>	90,0	90,0	93,0	93,0	92,5	91,0	0,67	0,83	0,87	0,89	0,88	1,2	1,0	2,2	1,8	8,3	7,0
<b>4A315S6Y3</b>	110	91,0	93,0	93,5	93,0	92,0	0,68	0,84	0,88	0,90	0,89	1,0	0,9	2,2	1,8	8,2	7,0
<b>4A315M6Y3</b>	132	91,5	93,5	94,0	93,5	92,5	0,68	0,84	0,88	0,90	0,89	1,4	0,9	2,2	1,7	8,2	7,0
<b>4A355S6Y3</b>	160	91,5	93,5	94,0	93,5	92,5	0,73	0,86	0,89	0,90	0,89	1,4	0,9	2,2	1,4	6,5	7,0
<b>4A355M6Y3</b>	200	92,0	94,0	94,0	94,0	93,0	0,72	0,86	0,89	0,90	0,89	1,4	0,9	2,2	1,3	6,4	7,0
<b>Синхронная частота вращения 750 об./мин.</b>																	
<b>4A71B8Y3</b>	0,25	36,5	51,5	56,5	56,0	45,0	0,29	0,42	0,55	0,65	0,75	1,6	1,4	1,7	12,7	45,0	3,0
<b>4A80A8Y3</b>	0,37	42,5	57,0	61,5	61,5	56,5	0,28	0,42	0,55	0,65	0,72	1,6	1,2	1,7	8,9	33,0	3,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4A80B8Y3</b>	0,56	46,0	60,0	64,5	64,0	59,0	0,28	0,42	0,55	0,65	0,71	1,6	1,2	1,7	9,0	34,0	3,5
<b>4A90LA8Y3</b>	0,75	49,0	63,0	68,0	68,0	65,5	0,26	0,40	0,52	0,62	0,68	1,6	1,4	1,9	6,0	27,0	3,5
<b>4A90LB8Y3</b>	1,1	55,0	67,5	70,5	70,0	66,0	0,30	0,46	0,59	0,68	0,73	1,6	1,4	1,9	7,0	27,0	3,5
<b>4A100L8Y3</b>	1,5	62,0	73,0	75,0	74,0	70,0	0,26	0,44	0,57	0,65	0,69	1,6	1,3	1,9	7,0	27,0	4,0
<b>4A112MA8Y3</b>	2,2	64,0	74,5	76,5	76,5	74,0	0,30	0,48	0,62	0,71	0,76	1,9	1,5	2,2	6,0	23,0	5,0
<b>4A112MB8Y3</b>	3,0	69,5	78,0	79,5	79,5	76,5	0,33	0,52	0,66	0,74	0,78	1,9	1,5	2,2	5,8	35,0	5,0
<b>4A132S8Y3</b>	4,0	71,0	80,0	83,0	83,0	81,0	0,27	0,46	0,59	0,70	0,73	1,9	1,7	2,6	6,1	36,0	5,5
<b>4A132M8Y3</b>	5,5	74,5	82,0	83,5	83,0	80,5	0,32	0,52	0,65	0,74	0,76	1,9	1,7	2,6	4,1	25,0	5,5
<b>4A160S8Y3</b>	7,5	79,5	86,0	86,5	86,0	84,0	0,35	0,57	0,69	0,75	0,77	1,4	1,0	2,2	2,5	14,5	6,0
<b>4A160M8Y3</b>	11,0	81,0	87,0	87,5	87,0	85,0	0,35	0,57	0,69	0,75	0,77	1,4	1,0	2,2	2,5	15,0	6,0
<b>4A180M8Y3</b>	15,0	82,5	87,5	88,0	87,0	84,5	0,46	0,68	0,78	0,82	0,83	1,2	1,0	2,0	2,6	13,0	5,5
<b>4A200M8Y3</b>	18,5	85,5	89,5	89,5	88,5	86,5	0,50	0,71	0,80	0,84	0,84	1,2	1,1	2,2	2,3	13,0	5,5
<b>4A200L8Y3</b>	22,0	87,5	90,0	90,0	88,5	88,5	0,54	0,75	0,82	0,84	0,84	1,2	1,1	2,0	2,7	13,0	5,5
<b>4A225M8Y3</b>	30,0	85,0	90,0	90,5	90,5	88,5	0,44	0,66	0,76	0,81	0,82	1,3	1,2	2,1	1,8	11,5	6,0

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4A250S8Y3</b>	37,0	86,5	90,5	90,0	90,0	88,5	0,50	0,72	0,80	0,83	0,83	1,2	1,0	2,0	1,6	9,0	6,0
<b>4A250M8Y3</b>	45,0	87,0	90,5	91,0	91,0	90,0	0,49	0,71	0,80	0,84	0,84	1,2	1,0	2,0	1,4	9,0	6,0
<b>4A280S8Y3</b>	55,0	90,0	92,5	92,5	92,0	90,0	0,57	0,76	0,81	0,84	0,82	1,2	1,0	2,0	2,2	8,0	5,5
<b>4A280M8Y3</b>	75,0	90,5	93,0	93,0	92,5	91,0	0,58	0,77	0,82	0,85	0,84	1,2	1,0	2,0	2,2	8,5	5,5
<b>4A315S8Y3</b>	90,0	93,0	93,5	93,5	93,0	91,5	0,57	0,76	0,82	0,85	0,84	1,2	0,9	2,3	1,5	7,0	6,5
<b>4A315M8Y3</b>	110	91,0	93,0	93,5	93,0	92,0	0,56	0,75	0,82	0,85	0,84	1,2	0,9	2,3	1,5	7,5	6,5
<b>4A355S8Y3</b>	132	91,5	94,0	94,0	93,5	86,0	0,60	0,78	0,83	0,85	0,84	1,2	0,9	2,2	1,3	5,5	6,5
<b>4A355M8Y3</b>	160	92,0	94,0	94,0	93,5	92,0	0,61	0,79	0,83	0,85	0,83	1,2	0,9	2,2	1,3	5,5	6,5
<b>Синхронная частота вращения 600 об./мин.</b>																	
<b>4A250S10Y 3</b>	30,0	84,5	88,5	88,5	88,0	86,0	0,43	0,66	0,76	0,81	0,82	1,2	1,0	1,9	1,9	10,5	6,0
<b>4A280S10Y 3</b>	37,0	86,5	90,5	91,0	91,0	89,5	0,44	0,65	0,73	0,78	0,77	1,0	1,0	1,8	1,7	8,5	6,0
<b>4A280M10Y 3</b>	45,0	87,0	92,0	92,0	91,5	89,5	0,47	0,68	0,74	0,78	0,77	1,0	1,0	1,8	1,7	7,5	6,0
<b>4A315S10Y 3</b>	55,0	88,5	92,0	92,0	92,0	91,0	0,49	0,69	0,76	0,79	0,79	1,0	0,9	1,8	1,8	10,0	6,0

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4A315M10Y 3</b>	75,0	89,5	92,5	92,5	92,0	90,5	0,52	0,71	0,78	0,80	0,80	1,0	0,9	1,8	1,6	8,5	6,0
<b>4A355S10Y 3</b>	90,0	91,0	93,0	93,0	92,5	90,5	0,60	0,77	0,81	0,83	0,80	1,0	0,9	1,8	1,6	5,5	6,0
<b>4A355M10Y 3</b>	110	91,0	93,5	93,5	93,5	91,5	0,56	0,74	0,80	0,83	0,81	1,0	0,9	1,8	1,6	6,5	6,0
<b>Синхронная частота вращения 500 об./мин.</b>																	
<b>4A315S12Y 3</b>	45,0	87,5	91,0	91,0	90,00	89,0	0,43	0,64	0,72	0,75	0,75	1,0	0,9	1,8	2,5	10,5	6,0
<b>4A315M12Y 3</b>	55,0	88,0	91,0	91,5	91,0	89,5	0,42	0,63	0,71	0,75	0,75	1,0	0,9	1,8	2,3	10,0	6,0
<b>4A355S12Y 3</b>	75,0	88,0	91,5	91,5	91,5	90,5	0,41	0,62	0,71	0,76	0,75	1,0	0,9	1,8	1,5	6,5	6,0
<b>4A355M12Y 3</b>	90,0	88,0	91,5	92,0	92,0	91,0	0,40	0,61	0,71	0,76	0,76	1,0	0,9	1,8	1,3	6,0	6,0

Основные технические данные электродвигателей основного исполнения, степень защиты IP23

Типоразмер электродви- гателя	$P_{2НОМ}$ кВт	Энергетические показатели										Пусковые свойства					
		КПД% при $P_2/P_{2НОМ}$ , %					$\cos \varphi$ при $P_2/P_{2НОМ}$ , %					Механические характеристики					$i_{П}$
		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	$m_{П}$	$m_m$	$m_K$	$S_{НОМ}$ ,%	$S_K$ %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>Синхронная частота вращения 3000 об./мин.</b>																	
<b>4АН160S2У3</b>	22,0	87,5	90,0	89,5	88,0	85,0	0,68	0,83	0,87	0,88	0,87	1,3	1,0	2,2	2,8	12,5	7,0
<b>4АН160M2У3</b>	30,0	90,0	92,0	91,5	90,0	87,0	0,77	0,88	0,90	0,91	0,90	1,3	1,0	2,2	2,9	12,5	7,0
<b>4АН180S2У3</b>	37,0	87,0	90,5	91,0	91,0	90,0	0,59	0,78	0,87	0,91	0,91	1,2	1,0	2,2	1,8	12,5	7,0
<b>4АН180M2У3</b>	45,0	88,5	91,5	91,5	91,0	89,5	0,66	0,83	0,88	0,91	0,91	1,3	1,0	2,2	1,9	12,5	7,0
<b>4АН200M2У3</b>	55,0	87,5	91,0	91,0	91,0	90,0	0,68	0,84	0,88	0,90	0,90	1,3	1,0	2,5	2,0	11,5	7,0
<b>4АН200L2У3</b>	75,0	89,5	92,0	92,5	92,0	91,0	0,72	0,85	0,89	0,90	0,89	1,3	1,0	2,5	2,0	11,5	7,0
<b>4АН225M2У3</b>	90,0	89,5	92,0	92,5	92,0	91,0	0,67	0,83	0,87	0,88	0,88	1,2	1,0	2,2	1,9	11,0	7,0



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>4АН250S2У3</b>	110	90,0	92,5	93,0	93,0	92,0	0,67	0,81	0,85	0,86	0,85	1,2	1,0	2,2	1,6	10,0	7,0
<b>4АН250M2У3</b>	132	91,5	93,0	93,5	93,0	92,0	0,76	0,86	0,87	0,88	0,87	1,2	1,0	2,2	1,9	10,0	7,0
<b>4АН280S2У3</b>	160	93,0	94,5	94,5	94,0	92,0	0,86	0,88	0,89	0,90	0,87	1,2	1,0	2,2	1,4	6,5	6,5
<b>4АН280M2У3</b>	200	94,5	95,5	95,0	94,5	92,5	0,85	0,88	0,89	0,90	0,86	1,2	1,0	2,2	1,4	6,3	6,5
<b>4АН315M2У3</b>	250	94,0	95,0	95,0	94,5	93,0	0,89	0,93	0,92	0,91	0,85	1,0	0,9	1,9	1,2	5,4	6,5
<b>4АН355S2У3</b>	315	93,0	94,5	94,5	94,5	93,0	0,86	0,92	0,92	0,92	0,89	1,0	0,9	1,9	1,0	5,3	6,5
<b>4АН355M2У3</b>	400	94,5	95,5	95,5	95,0	93,5	0,89	0,93	0,93	0,92	0,88	1,0	0,9	1,9	1,0	5,3	6,5
<b>Синхронная частота вращения 1500 об./мин.</b>																	
<b>4АН160S4У3</b>	18,5	88,5	91,0	90,5	88,5	86,5	0,64	0,81	0,86	0,87	0,86	1,3	1,0	2,1	3,2	14,5	6,5
<b>4АН160M4У3</b>	22,0	89,0	92,0	91,5	90,0	88,0	0,66	0,82	0,87	0,88	0,87	1,3	1,0	2,1	2,9	14,5	6,5
<b>4АН180S4У3</b>	30,0	88,0	90,5	90,5	90,0	87,5	0,57	0,73	0,81	0,84	0,82	1,2	1,0	2,2	2,3	14,0	6,5
<b>4АН180M4У3</b>	37,0	89,0	91,5	91,5	90,5	88,5	0,65	0,82	0,87	0,89	0,88	1,2	1,0	2,2	2,1	14,0	6,5
<b>4АН200M4У3</b>	45,0	89,5	92,0	92,0	91,0	89,5	0,65	0,83	0,87	0,89	0,89	1,3	1,0	2,5	1,8	11,5	6,5
<b>4АН200L4У3</b>	55,0	90,0	92,5	92,5	92,0	90,5	0,67	0,83	0,88	0,89	0,88	1,3	1,0	2,5	1,7	11,5	6,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4АН225М4У3</b>	75,0	91,5	93,0	93,0	92,5	91,0	0,68	0,84	0,88	0,89	0,88	1,2	1,0	2,2	1,6	10,0	6,5
<b>4АН250S4У3</b>	90,0	91,0	93,5	94,0	93,5	92,5	0,67	0,83	0,87	0,89	0,89	1,2	1,0	2,2	1,4	9,5	6,5
<b>4АН250М4У3</b>	110	91,5	93,5	94,0	93,5	92,5	0,67	0,83	0,87	0,89	0,88	1,2	1,0	2,2	1,5	9,5	6,5
<b>4АН280S4У3</b>	132	93,0	94,0	94,0	93,0	91,0	0,79	0,88	0,89	0,89	0,85	1,2	1,0	2,0	2,0	7,2	6,0
<b>4АН280М4У3</b>	160	93,0	94,5	94,0	93,5	92,0	0,79	0,89	0,90	0,90	0,87	1,2	1,0	2,0	2,0	7,0	6,0
<b>4АН315S4У3</b>	200	93,5	94,5	94,5	94,0	92,5	0,79	0,89	0,91	0,91	0,88	1,2	0,9	2,0	1,8	6,0	6,5
<b>4АН315М4У3</b>	250	94,0	95,0	94,5	94,0	92,0	0,84	0,91	0,92	0,91	0,86	1,2	0,9	2,0	1,8	6,0	6,5
<b>4АН355S4У3</b>	315	94,0	95,5	95,5	94,5	93,0	0,82	0,91	0,91	0,91	0,87	1,2	0,9	2,0	1,2	5,3	6,5
<b>4АН355М4У3</b>	400	94,5	95,5	95,0	94,5	93,0	0,83	0,91	0,91	0,91	0,87	1,2	0,9	2,0	1,2	5,2	6,5
<b>Синхронная частота вращения 1000 об./мин.</b>																	
<b>4АН180S6У3</b>	18,5	83,5	88,0	88,0	87,0	85,0	0,47	0,72	0,81	0,85	0,85	1,2	1,0	2,0	2,5	13,5	6,0
<b>4АН180М6У3</b>	22,0	86,0	89,5	89,5	88,5	86,5	0,56	0,77	0,84	0,87	0,87	1,2	1,0	2,0	2,4	13,5	6,0
<b>4АН200М6У3</b>	30,0	88,5	91,0	91,0	90,0	88,0	0,69	0,80	0,83	0,88	0,88	1,3	1,0	2,1	2,3	13,5	6,0
<b>4АН200L6У3</b>	37,0	87,5	91,0	91,0	90,5	89,0	0,58	0,78	0,85	0,88	0,88	1,3	1,0	2,1	1,9	13,5	6,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4АН225М6У3</b>	45,0	89,5	92,0	92,0	91,0	89,0	0,62	0,80	0,85	0,87	0,86	1,2	1,0	2,0	2,0	11,5	6,5
<b>4АН250S6У3</b>	55,0	88,5	92,5	93,0	92,5	91,5	0,57	0,77	0,84	0,87	0,87	1,2	1,0	2,0	1,3	9,5	6,5
<b>4АН250М6У3</b>	75,0	90,0	93,0	93,0	93,0	92,0	0,57	0,78	0,84	0,87	0,87	1,2	1,0	2,0	1,2	9,5	7,0
<b>4АН280S6У3</b>	90,0	92,5	94,0	93,5	92,5	90,5	0,70	0,85	0,88	0,89	0,87	1,2	1,0	2,0	2,2	8,4	6,0
<b>4АН280М6У3</b>	110	93,0	94,0	93,5	92,5	90,5	0,70	0,85	0,88	0,89	0,87	1,2	1,0	2,0	2,2	8,4	6,0
<b>4АН315S6У3</b>	132	93,5	94,5	94,0	93,0	91,0	0,75	0,87	0,89	0,89	0,85	1,2	0,9	1,9	1,8	6,7	6,0
<b>4АН315М6У3</b>	160	94,0	95,0	94,5	93,5	91,5	0,75	0,87	0,89	0,89	0,85	1,2	0,9	1,9	1,8	6,5	6,0
<b>4АН355S6У3</b>	200	94,0	95,0	95,0	94,0	92,0	0,76	0,88	0,90	0,90	0,87	1,2	0,9	1,9	1,6	6,2	6,5
<b>4АН355М6У3</b>	250	94,0	95,0	94,5	94,0	92,5	0,76	0,88	0,90	0,90	0,87	1,2	0,9	2,0	1,6	6,2	6,5
<b>Синхронная частота вращения 750 об./мин.</b>																	
<b>4АН180S8У3</b>	15,0	82,0	86,5	87,0	86,0	83,5	0,44	0,66	0,76	0,80	0,81	1,2	1,0	1,9	2,6	13,0	5,5
<b>4АН180М8У3</b>	18,5	84,5	88,5	88,5	87,5	85,0	0,47	0,69	0,77	0,80	0,80	1,2	1,0	1,9	2,7	13,0	5,5
<b>4АН200М8У3</b>	22,0	88,0	91,0	90,5	89,0	86,0	0,54	0,75	0,82	0,84	0,83	1,3	1,0	2,0	2,6	13,0	18
<b>4АН200L8У3</b>	30,0	87,0	90,5	90,5	89,5	87,5	0,49	0,71	0,79	0,82	0,82	1,3	1,0	2,0	2,3	13,0	5,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>4АН225М8У3</b>	37,0	87,5	91,0	91,0	90,0	88,0	0,48	0,70	0,78	0,81	0,81	1,2	1,0	1,9	2,0	11,5	5,5
<b>4АН250S8У3</b>	45,0	88,0	91,5	91,5	91,0	89,5	0,47	0,68	0,77	0,81	0,80	1,2	1,0	1,9	1,5	9,0	5,5
<b>4АН250М8У3</b>	55,0	89,5	92,5	92,5	92,0	90,5	0,49	0,70	0,78	0,81	0,81	1,2	1,0	1,9	1,6	9,0	6,0
<b>4АН280S8У3</b>	75,0	91,5	93,5	93,0	92,0	90,0	0,58	0,77	0,83	0,85	0,82	1,2	1,0	1,9	2,5	8,3	5,5
<b>4АН280М8У3</b>	90,0	93,0	94,0	93,5	92,5	90,0	0,62	0,80	0,84	0,86	0,83	1,2	1,0	1,9	2,5	8,3	5,5
<b>4АН315S8У3</b>	110	92,5	94,0	94,0	93,0	91,0	0,64	0,81	0,85	0,86	0,83	1,2	0,9	1,9	2,0	6,3	5,5
<b>4АН315М8У3</b>	132	93,0	94,5	94,0	93,0	91,0	0,65	0,81	0,85	0,86	0,82	1,2	0,9	1,9	2,0	6,3	5,5
<b>4АН355S8У3</b>	160	94,0	95,0	94,5	93,5	91,5	0,67	0,83	0,86	0,86	0,82	1,1	0,9	1,9	1,8	5,6	5,5
<b>4АН355М8У3</b>	200	94,5	95,5	95,0	94,0	92,0	0,70	0,84	0,86	0,86	0,81	1,1	0,9	1,9	1,8	5,5	5,5
<b>Синхронная частота вращения 600 об./мин.</b>																	
<b>4АН280S10У 3</b>	45,0	88,5	91,0	90,5	90,0	88,0	0,50	0,70	0,77	0,81	0,79	1,0	1,0	1,8	2,8	10,6	5,0
<b>4АН280М10У 3</b>	55,0	88,5	91,0	91,0	90,5	88,5	0,50	0,70	0,77	0,81	0,79	1,0	1,0	1,8	2,8	11,1	5,0
<b>4АН315S10У 3</b>	75,0	91,0	92,5	92,0	91,0	88,5	0,59	0,76	0,81	0,82	0,78	1,0	0,9	1,8	2,2	7,8	5,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>4АН315М10У 3</b>	90,0	91,0	93,0	92,5	91,5	89,5	0,59	0,76	0,80	0,82	0,79	1,0	0,9	1,8	2,2	7,7	5,5
<b>4АН355S10У 3</b>	110	91,5	93,0	92,5	92,0	90,5	0,57	0,75	0,82	0,83	0,81	1,0	0,9	1,8	1,8	6,7	5,5
<b>4АН355М10У 3</b>	132	92,0	93,5	93,0	92,5	91,0	0,59	0,77	0,82	0,83	0,81	1,0	0,9	1,8	1,8	6,7	5,5
<b>Синхронная частота вращения 500 об./мин.</b>																	
<b>4АН315S12У 3</b>	55,0	91,0	93,0	92,0	90,5	86,0	0,53	0,72	0,77	0,78	0,71	1,0	0,9	1,8	2,5	7,6	5,5
<b>4АН315М12У 3</b>	75,0	89,5	91,5	91,5	91,0	89,0	0,46	0,67	0,74	0,78	0,76	1,0	0,9	1,8	2,5	7,6	5,5
<b>4АН355S12У 3</b>	90,0	80,0	87,5	90,0	91,5	92,0	0,16	0,32	0,44	0,77	0,61	1,0	0,9	1,8	2,2	6,4	5,5
<b>4АН355М12У 3</b>	110	80,0	87,5	90,5	92,0	92,0	0,15	0,30	0,43	0,77	0,59	1,0	0,9	1,8	2,2	6,5	5,5

Основные технические данные электродвигателей с повышенным скольжением при различной продолжительности включения

Типоразмер электродви- гателя	ПВ=15%			ПВ=25%			ПВ=40%			ПВ=60%			ПВ=100%		
	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$P_2$ , кВт	$\eta$ , %	$\cos \varphi$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Синхронная частота вращения 3000 об./мин.</b>															
<b>4AC71A2Y3C</b>	1,2	71,0	0,89	1,06	71,5	0,88	1,0	72,0	0,87	0,95	72,5	0,86	0,85	73,0	0,84
<b>4AC71B2Y3C</b>	1,5	71,0	0,86	1,3	71,5	0,85	1,2	72,0	0,83	1,1	72,5	0,82	0,90	73,0	0,79
<b>4AC80A2Y3C</b>	2,4	72,0	0,89	1,9	75,0	0,87	1,9	75,0	0,87	1,7	75,5	0,86	1,5	76,0	0,85
<b>4AC90L2Y3C</b>	4,6	77,0	0,88	4,0	79,0	0,87	3,5	80,0	0,86	3,2	80,5	0,85	2,7	81,0	0,83
<b>4AC100S2Y3C</b>	6,0	80,5	0,88	5,0	81,5	0,86	4,8	82,0	0,86	4,2	82,5	0,85	3,6	83,0	0,84
<b>4AC100L2Y3C</b>	8,4	80,5	0,88	7,0	81,5	0,87	6,3	82,0	0,86	5,8	82,0	0,85	5,3	82,5	0,84
<b>4AC112M2Y3C</b>	11,0	81,5	0,87	9,5	83,0	0,86	8,0	84,0	0,84	7,1	84,5	0,83	6,0	85,0	0,81
<b>4AC132M2Y3C</b>	17,0	81,5	0,90	14,0	83,0	0,90	11,0	84,0	0,89	11,0	84,5	0,88	10,0	85,0	0,87

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Синхронная частота вращения 1500 об./мин.</b>															
<b>4AC71A4Y3</b>	0,80	61,0	0,80	0,65	67,0	0,76	0,60	68,0	0,73	0,60	68,0	0,73	0,60	68,0	0,73
<b>4AC71B4Y3</b>	1,1	63,5	0,80	0,90	68,0	0,71	0,80	68,5	0,75	0,80	68,5	0,75	0,70	69,0	0,74
<b>4AC80A4Y3</b>	1,6	66,0	0,85	1,3	68,5	0,82	1,3	68,5	0,82	1,1	70,0	0,80	0,95	70,5	0,79
<b>4AC80B4Y3</b>	2,1	69,0	0,85	1,9	69,5	0,83	1,7	70,0	0,82	1,5	70,5	0,80	1,3	71,0	0,79
<b>4AC90L4Y3</b>	3,1	71,0	0,86	2,4	76,0	0,82	2,4	76,0	0,82	2,2	76,5	0,80	1,9	77,0	0,78
<b>4AC100S4Y3</b>	5,0	74,0	0,89	3,7	76,0	0,84	3,2	76,5	0,82	2,8	77,0	0,80	2,3	77,5	0,78
<b>4AC100L4Y3</b>	6,0	75,0	0,86	5,0	77,0	0,84	4,25	78,0	0,82	3,8	79,0	0,80	3,3	80,0	0,78
<b>4AC112M4Y3</b>	8,0	76,0	0,86	6,7	77,5	0,85	5,6	79,0	0,83	5,0	80,0	0,81	4,2	81,0	0,78
<b>4AC132S4Y3</b>	11,8	79,0	0,87	9,5	82,0	0,86	8,5	82,5	0,85	7,5	83,5	0,83	7,1	84,0	0,81
<b>4AC132M4Y3</b>	16,0	81,0	0,87	14,0	83,0	0,86	11,8	84,0	0,85	10,5	84,5	0,83	9,0	85,0	0,81
<b>4AC160S4Y3</b>	22,0	81,5	0,86	19,0	83,5	0,86	17,0	84,5	0,86	15,0	85,5	0,85	13,0	86,0	0,84
<b>4AC160M4Y3</b>	25,0	85,0	0,87	23,0	86,0	0,87	20,0	87,0	0,87	18,5	87,5	0,87	17,0	88,0	0,86
<b>4AC180S4Y3</b>	26,5	83,5	0,93	24,0	84,5	0,93	21,0	86,0	0,92	20,0	86,5	0,92	19,0	87,0	0,92
<b>4AC180M4Y3</b>	32,0	86,0	0,92	30,0	87,0	0,92	26,5	88,5	0,91	25,0	89,0	0,91	24,0	89,5	0,91

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
<b>4AC200M4Y3</b>	42,0	85,5	0,93	35,0	87,0	0,93	31,5	87,5	0,92	28,0	88,0	0,92	26,0	88,0	0,92
<b>4AC200L4Y3</b>	50,0	87,5	0,94	47,0	88,0	0,94	40,0	89,0	0,93	37,0	89,5	0,93	35,0	90,0	0,93
<b>4AC225M4Y3</b>	63,0	85,5	0,93	55,0	87,0	0,93	50,0	87,5	0,92	45,0	88,0	0,92	40,0	88,5	0,92
<b>4AC250S4Y3</b>	75,0	85,5	0,93	63,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,92	53,0	88,0	0,92	50,0	88,0	0,92
<b>4AC250M4Y3</b>	80,0	85,0	0,94	71,0	86,5	0,94	63,0	87,0	0,93	60,0	87,0	0,93	56,0	87,5	0,93
<b>Синхронная частота вращения 1000 об./мин.</b>															
<b>4AC71A6Y3</b>	0,45	60,5	0,71	0,40	62,5	0,70	0,40	62,5	0,70	0,40	62,5	0,70	0,40	62,5	0,70
<b>4AC71B6Y3</b>	0,80	57,5	0,70	0,65	65,0	0,70	0,63	65,0	0,70	0,65	65,0	0,70	0,50	63,5	0,62
<b>4AC80A6Y3</b>	1,0	59,5	0,76	0,90	61,0	0,72	0,80	61,0	0,68	0,70	61,0	0,74	0,50	60,0	0,54
<b>4AC80B6Y3</b>	1,5	63,0	0,80	1,3	65,5	0,75	1,2	66,5	0,73	1,1	67,5	0,71	0,80	69,0	0,61
<b>4AC90L6Y3</b>	2,2	68,0	0,78	1,8	70,0	0,74	1,7	71,0	0,72	1,3	71,5	0,65	1,1	72,0	0,60
<b>4AC100L6Y3</b>	3,6	73,0	0,79	2,9	74,5	0,78	2,6	75,0	0,76	2,2	76,0	0,72	1,8	76,5	0,67
<b>4AC112MA6Y3</b>	4,5	69,0	0,85	3,8	71,0	0,81	3,2	72,0	0,74	2,8	73,0	0,72	2,5	73,5	0,68
<b>4AC112MB6Y3</b>	5,6	69,5	0,86	5,0	72,5	0,83	4,2	75,0	0,79	3,8	76,5	0,78	3,2	77,5	0,73
<b>4AC132S6Y3</b>	8,5	75,0	0,85	7,5	77,5	0,84	6,3	79,0	0,80	6,0	80,0	0,79	4,5	81,0	0,72
<b>4AC132M6Y3</b>	11,0	75,5	0,86	10,0	77,5	0,84	8,5	80,0	0,80	7,5	80,5	0,78	6,3	81,0	0,74



<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
<b>4AC160S6Y3</b>	16,0	77,5	0,87	14,0	80,0	0,86	12,0	82,5	0,85	11,0	83,5	0,84	10,0	84,0	0,83
<b>4AC160M6Y3</b>	21,0	79,0	0,87	19,0	81,5	0,86	16,0	84,0	0,85	15,0	84,5	0,84	13,0	85,5	0,83
<b>4AC180M6Y3</b>	22,0	81,5	0,90	20,0	83,0	0,90	19,0	84,5	0,90	17,0	85,0	0,89	16,0	85,5	0,89
<b>4AC200M6Y3</b>	28,0	80,0	0,92	25,0	82,0	0,92	22,0	83,5	0,92	20,0	84,5	0,92	18,0	85,5	0,91
<b>4AC200L6Y3</b>	40,0	85,5	0,92	33,5	83,5	0,92	28,0	85,5	0,91	25,0	86,0	0,92	23,0	86,5	0,91
<b>4AC250S6Y3</b>	56,6	85,0	0,90	45,0	88,0	0,90	40,0	89,0	0,90	36,0	89,5	0,90	33,5	90,0	0,89
<b>4AC250M6Y3</b>	60,0	85,0	0,90	53,0	88,0	0,89	45,0	86,5	0,88	40,0	89,0	0,86	36,0	89,5	0,84
<b>Синхронная частота вращения 750 об./мин.</b>															
<b>4AC71B8Y3</b>	0,35	49,0	0,68	0,30	50,0	0,61	0,30	50,0	0,61	0,30	50,0	0,61	0,20	49,0	0,51
<b>4AC80A8Y3</b>	0,55	50,0	0,70	0,50	52,0	0,65	0,45	53,5	0,61	0,45	53,5	0,61	0,35	52,0	0,54
<b>4AC80B8Y3</b>	0,70	57,0	0,68	0,60	58,0	0,63	0,60	58,0	0,63	0,50	58,5	0,58	0,40	58,0	0,54
<b>4AC90LA8Y3</b>	1,1	59,0	0,70	0,90	61,0	0,65	0,90	61,0	0,65	0,80	62,0	0,61	0,70	60,0	0,56
<b>4AC90LB8Y3</b>	1,4	63,5	0,64	1,2	65,0	0,64	1,2	65,0	0,64	1,0	66,0	0,59	0,80	65,0	0,52
<b>4AC100L8Y3</b>	1,9	65,5	0,68	1,6	69,0	0,63	1,6	69,0	0,63	1,5	68,0	0,59	1,2	67,0	0,52
<b>4AC112MA8Y3</b>	3,0	61,0	0,76	2,6	65,5	0,71	2,2	68,0	0,65	1,9	70,0	0,60	1,5	70,0	0,53
<b>4AC112MB8Y3</b>	4,2	66,0	0,77	3,6	70,5	0,73	3,2	72,0	0,70	2,5	74,5	0,62	1,9	74,5	0,54

Продолжение приложения 5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
<b>4AC132S8Y3</b>	6,0	71,0	0,77	5,0	74,5	0,72	4,5	76,0	0,70	3,6	77,5	0,65	2,6	77,5	0,54
<b>4AC132M8Y3</b>	8,5	72,0	0,78	7,1	75,0	0,74	6,0	77,0	0,70	5,0	78,0	0,64	3,6	78,0	0,54
<b>4AC160S8Y3</b>	11,0	77,0	0,82	10,0	79,5	0,81	9,0	81,5	0,80	8,0	83,0	0,79	7,0	84,0	0,77
<b>4AC160M8Y3</b>	16,0	77,0	0,80	14,0	81,0	0,80	12,5	82,5	0,79	11,0	83,5	0,77	10,0	84,0	0,75
<b>4AC180M8Y3</b>	19,0	79,0	0,83	17,0	81,5	0,83	15,0	83,5	0,83	14,0	84,0	0,82	13,0	84,5	0,81
<b>4AC200M8Y3</b>	26,5	77,0	0,85	24,0	79,5	0,85	20,0	83,5	0,85	19,0	83,5	0,84	16,0	84,0	0,84
<b>4AC225M8Y3</b>	33,5	80,0	0,86	30,0	81,0	0,86	26,5	83,0	0,85	24,0	83,5	0,83	22,0	84,0	0,83
<b>4AC250S8Y3</b>	45,0	82,0	0,86	45,0	83,5	0,86	36,0	85,0	0,85	30,0	86,5	0,84	26,5	87,0	0,83

Приложение 6

Пусковые свойства электродвигателей с повышенным скольжением

Типоразмер электродвигате- ля	Механическая характеристика					
	$m_{\Pi}$	$m_m$	$m_K$	$s_{НОМ.},$ %	$s_K,$ %	$i_{\Pi}$
1	2	3	4	5	6	7
<b>Синхронная частота вращения 3000 об./мин.</b>						
<b>4AC71A2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,9	38,4	5,5
<b>4AC71B2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,0	39,2	5,5
<b>4AC80A2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	4,9	35,8	6,5
<b>4AC80B2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	4,5	37,0	6,5
<b>4AC90L2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	4,4	33,6	6,5
<b>4AC100S2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	3,6	28,5	7,5
<b>4AC100L2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	3,1	30,2	7,5
<b>4AC100L2Y3</b>	2,0	1,6	2,2	3,1	30,2	7,5
<b>4AC112M2Y3</b>	2,0	1,6	2,4	3,7	31,4	7,5
<b>4AC132M2Y3</b>	2,0	1,6	2,4	4,8	47,9	7,5
<b>Синхронная частота вращения 1500 об./мин.</b>						
<b>4AC71A4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	8,2	39,6	4,5
<b>4AC71B4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	8,7	40,1	4,5
<b>4AC80A4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,6	33,8	5,0
<b>4AC80B4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,5	35,0	5,0
<b>4AC90L4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,8	33,1	6,0
<b>4AC100S4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	4,2	32,7	6,0
<b>4AC100L4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	4,1	32,0	6,0
<b>4AC112M4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,6	45,3	7,0
<b>4AC132S4Y3</b>	2,6	1,6	2,8	6,9	49,4	7,0

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>4AC132M4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	6,1	50,3	7,0
<b>4AC160S4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	6,1	45,0	7,0
<b>4AC160M4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,3	41,7	7,0
<b>4AC180S4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,7	37,9	7,0
<b>4AC180M4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	4,4	39,8	7,0
<b>4AC200M4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,7	46,6	7,0
<b>4AC200L4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,8	47,5	7,0
<b>4AC225M4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	5,8	47,2	7,0
<b>4AC250S4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	6,3	62,2	7,0
<b>4AC250M4Y3</b>	2,0	1,6	2,2	6,4	64,9	7,0
<b>Синхронная частота вращения 1000 об./мин.</b>						
<b>4AC71A6Y3</b>	2,0	1,6	2,1	10,4	48,6	4,0
<b>4AC71B6Y3</b>	2,0	1,6	2,1	10,2	49,6	4,0
<b>4AC80A6Y3</b>	2,0	1,6	2,1	7,0	38,3	4,0
<b>4AC80B6Y3</b>	2,0	1,6	2,1	7,8	38,4	4,0
<b>4AC90L6Y3</b>	1,9	1,6	2,1	6,2	32,9	6,0
<b>4AC100L6Y3</b>	1,9	1,6	2,1	5,3	32,0	6,0
<b>AC112MA6Y3</b>	1,9	1,6	2,1	7,3	68,2	6,5
<b>4AC112MB6Y3</b>	1,9	1,6	2,1	8,5	66,3	6,5
<b>4AC132S6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	6,4	47,0	6,5
<b>4AC132M6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	5,8	48,0	6,5
<b>4AC160S6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	7,7	59,2	6,5
<b>4AC160M6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	7,8	54,6	6,5
<b>4AC180M6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	7,6	44,4	6,5
<b>4AC200M6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	7,3	43,9	6,5

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>4AC200L6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	6,2	45,0	6,5
<b>4AC225M6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	6,9	53,1	6,5
<b>4AC250S6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	5,4	46,2	6,5
<b>4AC250M6Y3</b>	1,9	1,5	2,1	3,8	47,6	6,5
<b>Синхронная частота вращения 750 об./мин.</b>						
<b>4AC71B8Y3</b>	1,9	1,6	2,0	10,0	46,3	3,5
<b>4AC80A8Y3</b>	1,9	1,6	2,0	7,4	34,2	3,5
<b>4AC80B8Y3</b>	1,9	1,6	2,0	8,3	34,6	3,5
<b>4AC90LA8Y3</b>	1,8	1,6	2,0	6,7	32,0	3,5
<b>4AC90LB8Y3</b>	1,8	1,6	2,0	6,5	32,0	3,5
<b>4AC100L8Y3</b>	1,8	1,6	2,0	5,4	32,0	5,5
<b>4AC112MA8Y3</b>	1,8	1,6	2,0	9,5	62,3	6,0
<b>4AC112MB8Y3</b>	1,8	1,6	2,0	11,0	62,1	6,0
<b>4AC132S8Y3</b>	1,8	1,6	2,0	8,1	46,0	6,0
<b>4AC132M8Y3</b>	1,8	1,6	2,0	7,4	46,5	6,0
<b>4AC160S8Y3</b>	1,8	1,5	2,0	9,6	42,7	6,0
<b>4AC160M8Y3</b>	1,8	1,5	2,0	9,0	44,3	6,0
<b>4AC180M8Y3</b>	1,8	1,5	2,0	7,8	40,6	6,0
<b>4AC200M8Y3</b>	1,8	1,5	2,0	8,4	40,6	6,0
<b>4AC225M8Y3</b>	1,8	1,5	2,0	7,2	51,5	6,0
<b>4AC250S8Y3</b>	1,8	1,5	2,0	6,7	44,4	6,0

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ТРЕХФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР	3
1.1. Общие сведения	3
1.2. Задание к индивидуальной работе «Трехфазный трансформатор»	8
1.3. Технические данные силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов	9
1.4. Пример расчета	12
2. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА	19
2.1. Общие сведения	19
2.2. Задание к индивидуальной работе по теме «Двигатель постоянного тока независимого возбуждения»	21
2.3. Технические данные двигателей постоянного тока независимого возбуждения серии 2П с высотами осей вращения 112-315	23
2.4. Пример расчета	28
2.5. Задание к индивидуальной работе по теме «Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения»	36
2.6. Технические данные тяговых электродвигателей постоянного тока	38
2.7. Пример расчета	40
3. ЭЛЕКТРОПРИВОД	47
3.1. Общие сведения	47
3.2. Расчет и выбор мощности двигателя	48
3.3. Выбор предохранителя	50
3.4. Основные сведения об электродвигателях серии 4А	51
3.5. Задание к индивидуальной работе по теме «Электропривод»	54
3.6. Варианты заданий для выбора мощности трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	56
3.7. Примеры решения задач	61
4. СИНХРОННЫЙ ТУРБОГЕНЕРАТОР	69

4.1. Общие сведения	69
4.2. Задание к индивидуальной работе по теме «Синхронный турбогенератор»	72
4.3. Технические данные синхронных турбогенераторов	73
4.4. Пример расчета	76
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</b>	82
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	83
<i>Приложение 1. Параметры предохранителей типа ПР-2,500 В</i>	83
<i>Приложение 2. Технические данные пусковых реостатов РП и РЗП</i>	85
<i>Приложение 3. Основные технические данные электродвигателей основного исполнения, степень защиты IP44</i>	86
<i>Приложение 4. Основные технические данные электродвигателей основного исполнения, степень защиты IP23</i>	96
<i>Приложение 5. Основные технические данные электродвигателей с повышенным скольжением при различной продолжительности включения</i>	102
<i>Приложение 6. Пусковые свойства электродвигателей с повышенным скольжением</i>	107

Учебное издание

ЛУКУТИН Алексей Владимирович,  
ШАНДАРОВА Елена Борисовна

## РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Учебное пособие

**Издано в авторской редакции**

Научный редактор *кандидат технических наук,*  
*доцент А. В. Лукутин*  
Дизайн обложки *И.О. Фамилия*


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати      Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л.      Уч.-изд. л.  
Заказ      Тираж      экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru