

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Физика и электротехника»**

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

## **ПРАКТИКУМ**

**по дисциплине «Электрические машины»  
для студентов специальностей  
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
заочной формы обучения**

**Гомель 2020**

УДК 621.313.3(075.8)  
ББК 31.261.6я73  
Э45

*Рекомендовано научно-методическим советом  
заочного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 5 от 13.06.2019 г.)*

Составители: *К. М. Медведев, Я. О. Шабловский*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *В. В. Брель*

Э45 **Электрические** машины переменного тока : практикум по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» заоч. формы обучения / сост.: К. М. Медведев, Я. О. Шабловский. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 39 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит примеры расчёта и индивидуальные задания по вычислению параметров и построению характеристик трансформаторов, асинхронных электродвигателей и синхронных генераторов. Позволит студентам закрепить основные теоретические знания по электрическим машинам переменного тока.

Для студентов специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» заочной формы обучения.

**УДК 621.313.3(075.8)**  
**ББК 31.261.6я73**

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Практикум содержит примеры расчёта однофазных и трёхфазных трансформаторов, асинхронных электродвигателей и синхронных электрогенераторов.

С целью закрепления материала по соответствующим темам студентам предлагаются индивидуальные задания, в процессе выполнения которых они получают навыки по выбору и расчёту параметров машин переменного тока, расчёту и построению основных характеристик трансформаторов, асинхронных двигателей и синхронных генераторов. Исходные данные, необходимые для выполнения индивидуальных заданий, приведены в приложении.

Предполагается, что студент перед выполнением индивидуальных заданий изучит теоретическую часть по соответствующей теме, используя лекционный материал и другую учебную литературу.

Выполнение индивидуальных заданий предполагает самостоятельную работу студента под руководством преподавателя.

# 1 ТРАНСФОРМАТОРЫ

## 1.1 Расчёт однофазного трансформатора

### 1.1.1 Пример расчёта

#### *Задание*

К электрической сети напряжением  $U_{\text{сети}} = 220$  В необходимо подключить через понижающий однофазный трансформатор 50 светодиодных ламп ( $n_{\text{л}} = 50$ ) мощностью  $P_{\text{л}} = 10$  Вт каждая. Номинальное напряжение ламп  $U_{\text{л.ном}} = 24$  В, коэффициент мощности ламп  $\cos \varphi_{\text{л}} = 1$ .

#### *Необходимо:*

- по таблице П.1 подобрать подходящий трансформатор;
- определить коэффициент трансформации и коэффициент нагрузки;
- рассчитать рабочие и номинальные токи обмоток трансформатора;
- определить ток холостого хода и напряжение короткого замыкания трансформатора.

Потерями мощности в трансформаторе можно пренебречь.

#### *Решение*

1. Активная мощность, отдаваемая трансформатором нагрузке:

$$P_2 = P_{\text{л}} n_{\text{л}} = 10 \cdot 50 = 500 \text{ Вт.}$$

2. Полная мощность нагрузки:

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_{\text{л}}} = \frac{500}{1} = 500 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

3. Номинальная мощность трансформатора не должна быть меньше полной мощности нагрузки:

$$S_{\text{т.ном}} \geq S_2,$$

то есть

$$S_{\text{Т.НОМ}} \geq 500 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

4. Номинальное первичное напряжение трансформатора должно соответствовать напряжению электрической сети:

$$U_{\text{НОМ1}} = U_{\text{сети}} = 220 \text{ В}.$$

Номинальное вторичное напряжение трансформатора должно соответствовать напряжению нагрузки (в данном случае это лампы накаливания):

$$U_{\text{НОМ2}} = U_{\text{л.НОМ}} = 24 \text{ В}.$$

5. По таблице П.1 выбираем трансформатор ОСМ1-0,63, который имеет следующие технические данные:

- номинальная мощность:  $S_{\text{Т.НОМ}} = 0,63 \text{ кВ} \cdot \text{А} = 630 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;
- номинальное первичное напряжение:  $U_{\text{НОМ1}} = 220 \text{ В}$ ;
- номинальное вторичное напряжение:  $U_{\text{НОМ2}} = 24 \text{ В}$ ;
- ток холостого хода:  $I_{\text{х, \%}} = 19,0 \%$ ;
- напряжение короткого замыкания:  $U_{\text{к, \%}} = 4,0\%$ ;
- номинальный КПД:  $\eta_{\text{НОМ}} = 93,5\%$ .

6. Коэффициент трансформации трансформатора можно определить по выражению:

$$K_{\text{Т}} = \frac{U_{\text{НОМ1}}}{U_{\text{НОМ2}}} = \frac{220}{24} = 9,17.$$

7. Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{\text{НОМ1}} = \frac{S_{\text{Т.НОМ}}}{U_{\text{НОМ1}}} = \frac{630}{220} = 2,86 \text{ А}.$$

Номинальный ток вторичной обмотки:

$$I_{\text{НОМ2}} = \frac{S_{\text{Т.НОМ}}}{U_{\text{НОМ2}}} = \frac{630}{24} = 26,2 \text{ А.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки можно также найти через номинальный ток первичной обмотки и коэффициент трансформации:

$$I_{\text{НОМ2}} = I_{\text{НОМ1}} K_{\text{T}} = 2,86 \cdot 9,17 = 26,2 \text{ А.}$$

**8.** Коэффициент нагрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{S_2}{S_{\text{Т.НОМ}}} = \frac{500}{630} = 0,79.$$

**9.** Рабочие токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке

- в первичной обмотке

$$I_1 = I_{\text{НОМ1}} \beta = 2,86 \cdot 0,79 = 2,26 \text{ А};$$

- во вторичной обмотке

$$I_2 = I_{\text{НОМ2}} K_{\text{НГ}} = 26,2 \cdot 0,79 = 20,7 \text{ А.}$$

**10.** Ток холостого хода,  $A$ , и напряжение короткого замыкания,  $B$ , можно рассчитать по соответствующим параметрам трансформатора в %:

$$I_{\text{x}} = \frac{I_{\text{x, \%}} I_{\text{НОМ1}}}{100} = \frac{19,0 \cdot 2,86}{100} = 0,54 \text{ А};$$

$$U_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к, \%}} U_{\text{НОМ1}}}{100} = \frac{4,0 \cdot 220}{100} = 8,8 \text{ В.}$$

## 1.1.2 Задание для самостоятельной работы

По аналогии с примером (п. 1.1.1) выполнить расчёт параметров однофазного трансформатора для заданного преподавателем по таблице П.2 варианта задания.

Перед выполнением задания необходимо изучить соответствующие разделы лекционного материала курса “Электрические машины”.

## 1.2 Расчёт трёхфазного трансформатора

### 1.2.1 Пример расчёта

#### *Задание*

Дан трёхфазный силовой понижающий трансформатор ТМГ-630/10, имеющий следующие технические характеристики:

- номинальная мощность:  $S_{Т.НОМ} = 630 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  ;
- номинальное первичное напряжение:  $U_{НОМ1} = 10 \text{ кВ}$ ;
- номинальное вторичное напряжение:  $U_{НОМ2} = 0,4 \text{ кВ}$ ;
- ток холостого хода в %:  $I_{х,\%} = 0,7 \%$ ;
- напряжение короткого замыкания в %:  $U_{к,\%} = 5,5\%$ ;
- потери мощности холостого хода:  $\Delta P_x = 1,0 \text{ кВт}$ ;
- потери мощности короткого замыкания:  $\Delta P_k = 7,6 \text{ кВт}$ ;
- номинальный коэффициент мощности нагрузки:  $\cos \varphi_{НОМ2} = 0,82$  ;
- схема и группа соединения обмоток:  $\Delta / Y_H - 11$ .

#### *Необходимо:*

- определить коэффициент трансформации;
- изобразить Т-образную схему замещения трансформатора, рассчитать её параметры;
- рассчитать и построить зависимость КПД трансформатора от коэффициента нагрузки  $\eta = f(\beta)$  при номинальном коэффициенте мощности нагрузки  $\cos_{НОМ\varphi_2}$ , определить максимальный КПД;
- рассчитать и построить зависимость относительного изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки от характера нагрузки (угла нагрузки  $\varphi_2$ )  $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$  при коэффициенте загрузки  $\beta = 1$ .

### Решение

1. Коэффициент трансформации трансформатора:

$$K_T = \frac{U_{\text{НОМ1}}}{U_{\text{НОМ2}}} = \frac{10}{0,4} = 25,0.$$

2. Изобразим T-образную схему замещения трансформатора (рисунок 1.1).

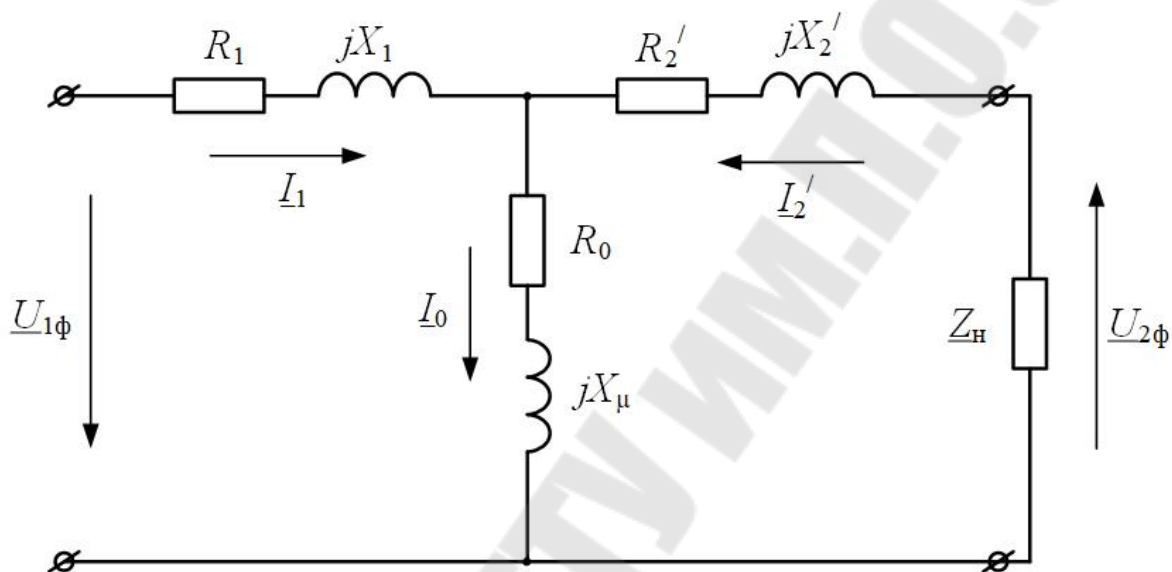


Рисунок 1.1 – T-образная схема замещения трансформатора

Рассчитаем параметры схемы замещения трансформатора.

Номинальное фазное напряжение первичной обмотки при схеме соединения «треугольник»:

$$U_{\text{НОМ1}\phi} = U_{\text{НОМ1}} = 10 \text{ кВ.}$$

Номинальный фазный ток первичной обмотки:

$$I_{\text{НОМ1}\phi} = \frac{S_{\text{T,НОМ}}}{3U_{\text{НОМ1}\phi}} = \frac{630}{3 \cdot 10} = 21 \text{ А.}$$

Номинальный линейный ток первичной обмотки (ток питающей сети):

$$I_{\text{НОМ1}} = \sqrt{3} I_{\text{НОМ1}\phi} = \sqrt{3} \cdot 21 = 36,4 \text{ А.}$$



Активное сопротивление короткого замыкания трансформатора (суммарное активное сопротивление двух обмоток):

$$R_k = \frac{\Delta P_k}{3I_{\text{ном1}\phi}^2} \cdot 10^3 = \frac{7,6}{3 \cdot 21^2} \cdot 10^3 = 5,74 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_k = \frac{U_{k,\%} U_{\text{ном1}\phi}}{100 I_{\text{ном1}\phi}} \cdot 10^3 = \frac{5,5 \cdot 10}{100 \cdot 21} \cdot 10^3 = 26,2 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания трансформатора (суммарное реактивное сопротивление двух обмоток):

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{26,2^2 - 5,74^2} = 25,56 \text{ Ом.}$$

Активные сопротивления обмоток:

$$R_1 = R_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{5,74}{2} = 2,87 \text{ Ом.}$$

Реактивные сопротивления обмоток:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_k}{2} = \frac{25,56}{2} = 12,78 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление цепи намагничивания трансформатора:

$$Z_\mu = \frac{100 U_{\text{ном1}\phi}}{I_{x,\%} I_{\text{ном1}\phi}} \cdot 10^3 = \frac{100 \cdot 10}{0,7 \cdot 21} \cdot 10^3 = 68027,2 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление цепи намагничивания:

$$R_0 = \frac{\Delta P_x}{3(I_{x,\%} I_{\text{ном1}\phi})^2} \cdot 10^7 = \frac{1,0}{3 \cdot (0,7 \cdot 21)^2} \cdot 10^7 = 15425,7 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление цепи намагничивания:

$$X_{\mu} = \sqrt{Z_{\mu}^2 - R_{\mu}^2} = \sqrt{68027,2^2 - 15425,7^2} = 66255,2 \text{ Ом.}$$

3. КПД трансформатора в %-х рассчитывается по выражению:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{Т.НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ2}}}{\beta S_{\text{Т.НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ2}} + \Delta P_{\text{х}} + \beta^2 \Delta P_{\text{к}}} \cdot 100.$$

Для построения зависимости  $\eta = f(\beta)$  зададимся несколькими значениями коэффициента загрузки  $\beta$  в диапазоне от 0 до 1,25, рассчитаем соответствующие значения КПД и занесём результаты в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Расчёт зависимости  $\eta = f(\beta)$

$\beta$ , о.е	0	0,01	0,03	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,2
$\eta$ , %	0	83,77	93,9	97,96	98,87	98,89	98,66	98,36	98,11

По результатам расчётов построим зависимость  $\eta = f(\beta)$  (рисунок 1.2).

Максимальным КПД трансформатора будет при таком его оптимальном коэффициенте загрузки  $\beta_{\text{опт}}$ , при котором потери холостого хода равны нагрузочным потерям, то есть

$$\Delta P_{\text{х}} = \beta_{\text{опт}}^2 \Delta P_{\text{к}},$$

$$\text{откуда } \beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{х}}}{\Delta P_{\text{к}}}} = \sqrt{\frac{1,0}{7,6}} = 0,36.$$

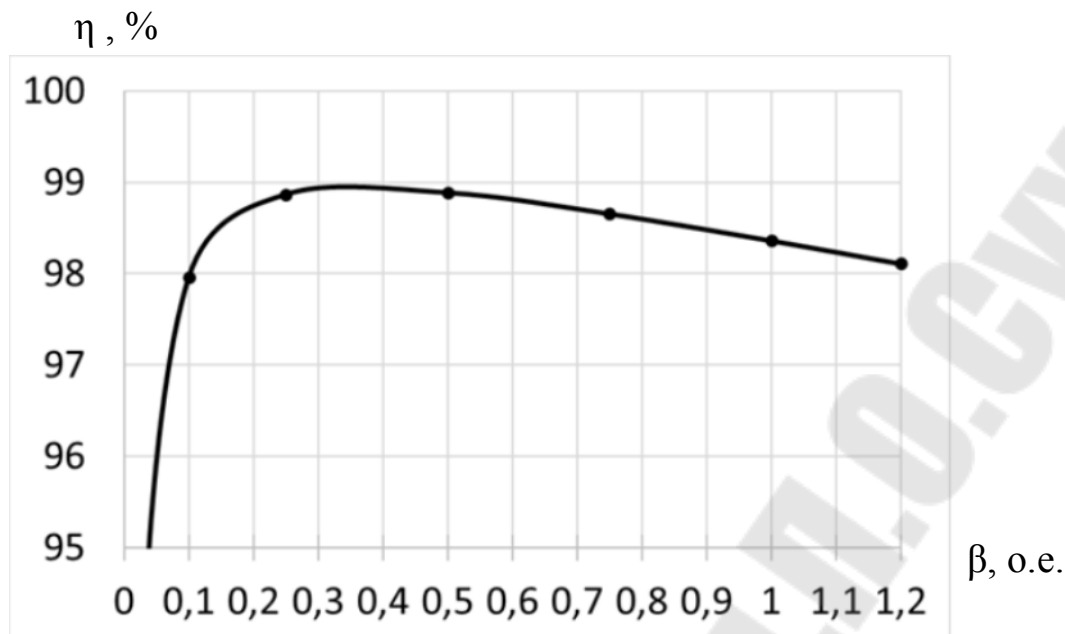


Рисунок 1.2 – Зависимость КПД трансформатора от коэффициента загрузки

Определить максимальный КПД трансформатора  $\eta_{\max}$  можно по рисунку 1.2 или по выражению:

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= \frac{\beta_{\text{опт}} S_{\text{т.ном}} \cos \varphi_{\text{ном2}}}{\beta_{\text{опт}} S_{\text{т.ном}} \cos \varphi_{\text{ном2}} + \Delta P_{\text{х}} + \beta_{\text{опт}}^2 \Delta P_{\text{к}}} \cdot 100 = \\ &= \frac{0,36 \cdot 630 \cdot 0,82}{0,36 \cdot 630 \cdot 0,82 + 1,0 + 0,36^2 \cdot 7,6} \cdot 100 = 98,94\%. \end{aligned}$$

4. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания:

$$U_{\text{ка, \%}} = \frac{I_{\text{ном1ф}} R_{\text{к}}}{U_{\text{ном1ф}} \cdot 10^3} \cdot 100 = \frac{21 \cdot 5,74}{10 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,21\%;$$

$$U_{\text{кр, \%}} = \sqrt{U_{\text{к, \%}}^2 - U_{\text{ка, \%}}^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,21^2} = 5,37\%.$$

Относительное в %-х изменение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора при  $\beta = 1$  определяется по формуле

$$\Delta U_{\%} = U_{\text{ка, \%}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр, \%}} \sin \varphi_2.$$

По данному выражению рассчитаем зависимость  $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$ . Угол  $\varphi_2$  зададим в диапазоне от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  (таблица 1.2). Отрицательные значения угла  $\varphi$  говорят об активно-ёмкостном характере нагрузки (при  $\varphi_2 = -90^\circ$  нагрузка чисто ёмкостная), при положительных значениях угла  $\varphi_2$  нагрузка активно-индуктивная (при  $\varphi_2 = 90^\circ$  – чисто индуктивная). При  $\varphi_2 = 0^\circ$  нагрузка носит чисто активный характер.

Таблица 1.2 – Расчёт зависимости  $\Delta U_{\%} = f(\varphi)$

$\varphi_2, ^\circ$	-90	-60	-30	0	30	60	90
$\cos \varphi_2$	0	0,5	0,866	1,0	0,866	0,5	0
$\sin \varphi_2$	-1,0	-0,866	-0,5	0	0,5	0,866	1,0
$\Delta U_{\%}, \%$	-5,37	-4,05	-1,64	1,21	3,73	5,26	5,37

По результатам расчёта (таблица 1.2) построим зависимость  $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$  (рисунок 1.3).

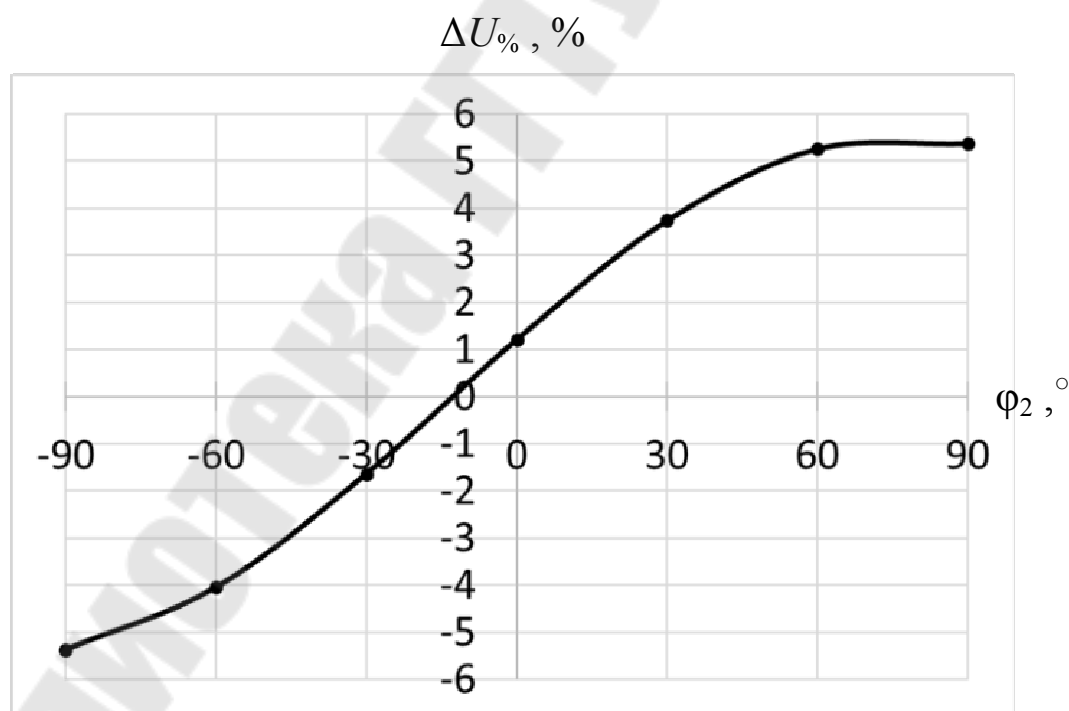


Рисунок 1.3 – Зависимость  $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$

### **1.2.2 Задание для самостоятельной работы**

По аналогии с примером (п. 1.2.1) рассчитать трёхфазный трансформатор, предложенный преподавателем из таблицы П.3 в качестве варианта задания.

Перед выполнением задания необходимо изучить соответствующие разделы лекционного материала курса «Электрические машины».

## 2 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 2.1 Расчёт трёхфазного асинхронного электродвигателя

#### 2.1.1 Пример расчёта № 1

##### *Задание*

К электрической сети переменного тока напряжением  $U_{\text{сети}} = 380$  В подключён трёхфазный асинхронный двигатель АИР160S4, имеющий следующие характеристики:

- номинальная активная мощность:  $P_{\text{ном}} = 15$  кВт;
- номинальное линейное напряжение:  $U_{\text{ном.л}} = 380$  В;
- синхронная частота вращения:  $n_1 = 1500$  об/мин;
- номинальное скольжение:  $s_{\text{ном}} = 0,033$ ;
- номинальный КПД:  $\eta_{\text{ном}} = 0,89$ ;
- номинальный коэффициент мощности:  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$ ;
- кратность максимального момента:  $m_{\text{м}} = 2,3$ ;
- кратность пускового момента:  $m_{\text{п}} = 2,2$ ;
- кратность пускового тока:  $i_{\text{п}} = 7,5$ ;
- схема соединения обмоток статора:  $\Delta$  («треугольник»).

##### *Необходимо:*

- рассчитать число пар полюсов двигателя  $p$ ;
- определить номинальную частоту вращения  $n_{\text{ном}}$ ;
- найти номинальный фазный ток двигателя (обмотки статора)  $I_{\text{ном}}$ ;
- рассчитать номинальный момент на валу  $M_{\text{ном}}$ ;
- рассчитать критическое скольжение  $s_{\text{к}}$ ;
- рассчитать максимальный момент  $M_{\text{м}}$ ;
- рассчитать пусковой момент:  $M_{\text{п}}$ ;
- определить пусковой ток  $I_{\text{п}}$ ;
- указать параметры для трёх характерных точек механической характеристики двигателя.

### Решение

1. Число пар полюсов обмотки статора асинхронного двигателя:

$$p = \frac{60 \cdot f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2,$$

где  $f_1 = 50$  Гц – частота питающей сети переменного тока.

2. Номинальная частота вращения ротора:

$$n_{\text{ном}} = n_1 (1 - s_{\text{ном}}) = 1500 \cdot (1 - 0,033) = 1450 \text{ об/мин.}$$

3. При схеме соединения обмоток статора в «треугольник» напряжение, прикладываемое к обмоткам фаз двигателя, равно номинальному линейному напряжению  $U_{\text{ном.л}}$ , поэтому номинальный фазный ток двигателя:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{3 U_{\text{ном.л}} \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} \cdot 10^3 = \frac{15}{3 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,85} \cdot 10^3 = 17,4 \text{ А.}$$

4. Угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1450}{30} = 151,8 \text{ рад/сек.}$$

Номинальный момент, развиваемый двигателем:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} \cdot 10^3 = \frac{15}{151,8} \cdot 10^3 = 98,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Критическое скольжение:

$$s_{\text{к}} = s_{\text{ном}} \left( m_{\text{м}} + \sqrt{m_{\text{м}}^2 - 1} \right) = 0,033 \cdot \left( 2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,14.$$

6. Максимальный момент двигателя:

$$M_{\text{м}} = m_{\text{м}} M_{\text{ном}} = 2,3 \cdot 98,8 = 227,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

7. Пусковой момент двигателя:

$$M_{\text{п}} = m_{\text{п}} M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 98,8 = 217,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

8. Пусковой ток двигателя:

$$I_{\text{п}} = i_{\text{п}} I_{\text{ном}} = 7,5 \cdot 17,4 = 130,5 \text{ А}.$$

9. Механическая характеристика асинхронной машины – это зависимость момента от скольжения  $M = f(s)$ .

Тремя характерными точками механической характеристики асинхронного двигателя, отражающими особенности работы машины в соответствующих режимах, являются:

- номинальный режим:  $M_{\text{ном}}, s_{\text{ном}}$ ;
- критический режим:  $M_{\text{к}}, s_{\text{к}}$ ;
- пусковой режим:  $M_{\text{п}}, s = 1,0$ .

Для данного двигателя все перечисленные параметры рассчитаны ранее и собраны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения параметров асинхронного двигателя для характерных режимов работы

Параметр	Режим работы двигателя		
	номинальный	максимальный (критический)	пусковой
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	98,8	227,2	217,4
$s, \text{о.е.}$	0,033	0,14	1,0

По данным таблицы 2.1 можно качественно изобразить механическую характеристику асинхронного двигателя и отметить на ней характерные точки для данного двигателя (рисунок 2.1).



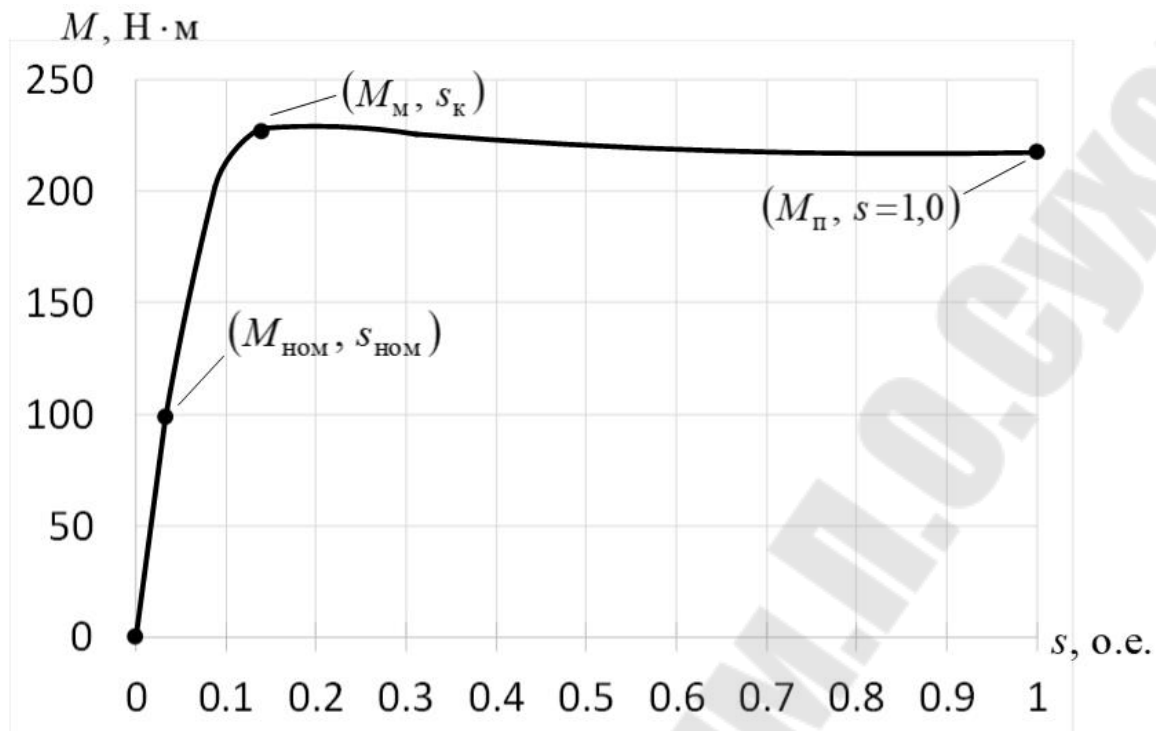


Рисунок 2.1 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

### 2.1.2 Задание для самостоятельной работы № 1

По аналогии с примером расчёта № 1 (п. 2.1.1) рассчитать трёхфазный асинхронный двигатель, предложенный преподавателем из таблицы П.4.

Перед выполнением задания необходимо изучить соответствующие разделы лекционного материала курса «Электрические машины».

### 2.1.3 Пример расчёта № 2

#### Задание

Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие технические характеристики:

- номинальная мощность:  $P_{\text{НОМ}} = 30$  кВт;
- номинальное линейное напряжение:  $U_{\text{НОМ.Л}} = 380$  В;
- число пар полюсов:  $p = 1$ ;
- номинальная частота вращения:  $n_{\text{НОМ}} = 2950$  об/мин;
- номинальный КПД:  $\eta_{\text{НОМ}} = 0,914$ ;

- номинальный коэффициент мощности:  $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,9$ ;
- схема соединения обмоток статора: Y («звезда»);
- относительные значения сопротивлений схемы замещения:
  - активное сопротивление статора  $R_1^* = 0,09$ ;
  - реактивное сопротивление статора  $X_1^* = 0,12$ ;
  - приведённое активное сопротивление ротора  $R_2^{*/'} = 0,04$ ;
  - приведённое реактивное сопротивление ротора  $X_2^{*/'} = 0,15$ ;
  - активное сопротивление намагничивания  $R_0^* = 0,17$ ;
  - реактивное сопротивление намагничивания  $X_\mu^* = 2,8$ .

**Необходимо:**

- изобразить упрощённую Г-образную схему замещения асинхронного двигателя и рассчитать её параметры;
- рассчитать максимальный момент  $M_M$  и критическое скольжение  $s_k$ ;
- рассчитать и построить механическую характеристику двигателя.

**Решение**

1. Упрощённая Г-образная схема замещения асинхронного двигателя показана на рисунке 2.2.

Номинальное линейное напряжение двигателя  $U_{\text{НОМ.Л}} = 380$  В, следовательно номинальное фазное напряжение  $U_{\text{НОМ.Ф}} = 220$  В.

Номинальный фазный ток двигателя:

$$I_{\text{НОМ.Ф}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{3 U_{\text{НОМ.Ф}} \eta_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}}} \cdot 10^3 = \frac{30}{3 \cdot 220 \cdot 0,914 \cdot 0,9} \cdot 10^3 = 55,3 \text{ А.}$$

Базисное сопротивление:

$$Z_{\text{б}} = \frac{U_{\text{НОМ.Ф}}}{I_{\text{НОМ.Ф}}} = \frac{220}{55,3} = 3,98 \text{ Ом.}$$

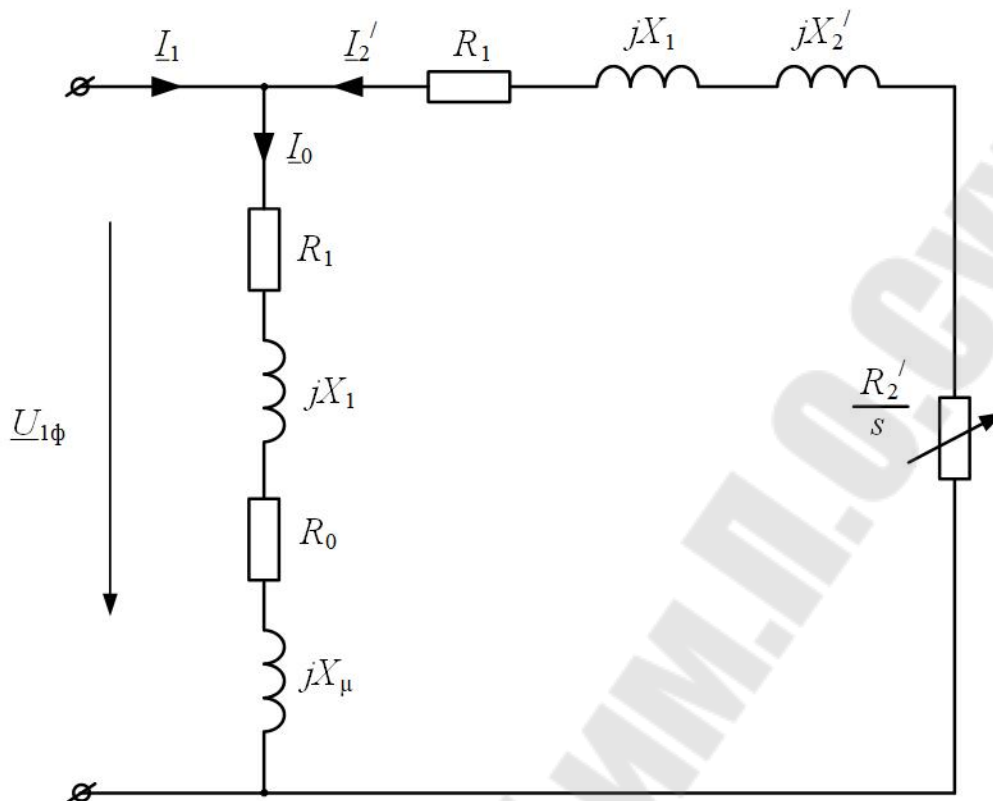


Рисунок 2.2 – Упрощённая Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Рассчитаем параметры схемы замещения в Ом:

$$R_1 = R_1^* Z_6 = 0,09 \cdot 3,98 = 0,358 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_1^* Z_6 = 0,12 \cdot 3,98 = 0,478 \text{ Ом};$$

$$R_2' = R_2'^* Z_6 = 0,04 \cdot 3,98 = 0,159 \text{ Ом};$$

$$X_2' = X_2'^* Z_6 = 0,15 \cdot 3,98 = 0,597 \text{ Ом};$$

$$R_0 = R_0^* Z_6 = 0,17 \cdot 3,98 = 0,677 \text{ Ом};$$

$$X_\mu = X_\mu^* Z_6 = 2,8 \cdot 3,98 = 11,14 \text{ Ом}.$$

2. Синхронная частота вращения двигателя (частота вращающегося магнитного поля):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин},$$

где  $f_1 = 50$  Гц – частота питающей сети.

Угловая синхронная частота вращения двигателя:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с.}$$

Критическое скольжение двигателя:

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{0,159}{\sqrt{0,358^2 + (0,478 + 0,597)^2}} = 0,14.$$

Максимальный момент двигателя:

$$\begin{aligned} M_M &= \frac{3U_{\text{ном.ф}}^2}{2\omega_1 \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot (0,358 + \sqrt{0,358^2 + (0,478 + 0,597)^2})} = 155,1 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

**3.** Механическую характеристику двигателя будем рассчитывать по упрощённой формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_M}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}}.$$

Расчёт выполним для различных значений скольжения  $s$  в диапазоне от 0 до 1, включая точку  $s_k$ . Например, для  $s = 0,01$ :

$$M = \frac{2M_M}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}} = \frac{2 \cdot 155,1}{\frac{0,14 + 0,02}{0,02} + \frac{0,02}{0,14}} = 43,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Результаты расчёта для других значений скольжения  $s$  представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчёта механической характеристики асинхронного двигателя

$s$ , о.е.	0	0,02	0,06	0,09	0,14	0,2	0,4	0,6	1,0
$M$ , Н·м	0	43,4	112,3	141,1	155,1	145,7	96,7	68,6	42,6

По данным таблицы 2.2 строим механическую характеристику асинхронного двигателя (рисунок 2.3).

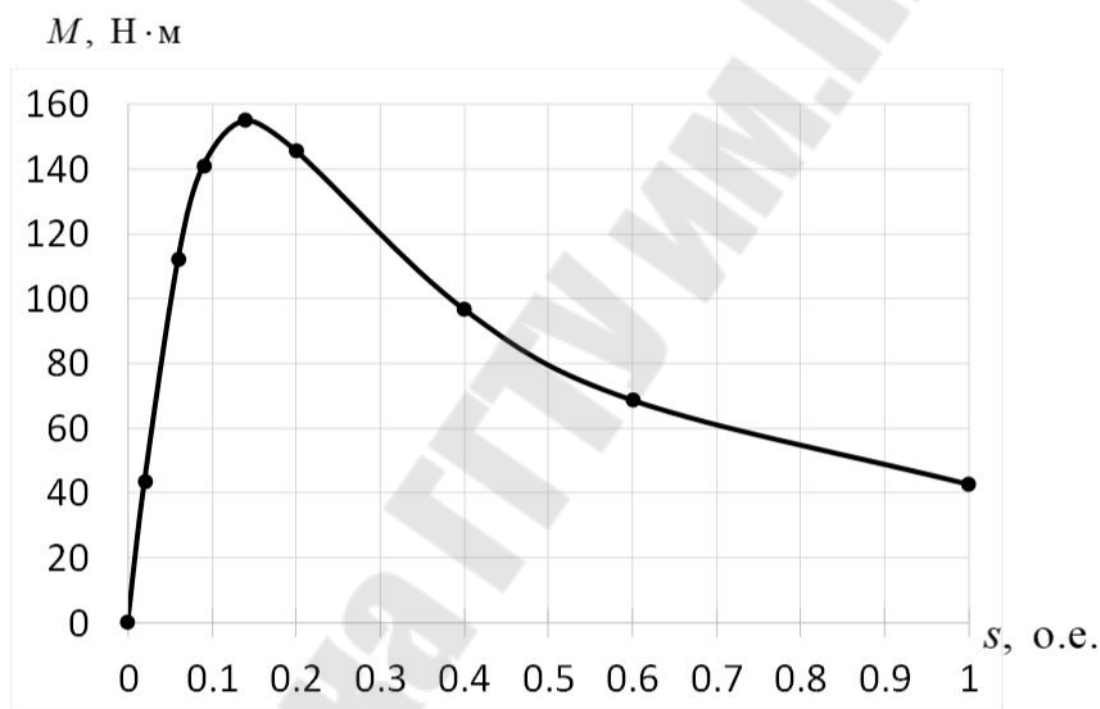


Рисунок 2.2 – Механическая характеристика асинхронного двигателя

#### 2.1.4 Задание для самостоятельной работы № 2

По аналогии с примером расчёта № 2 (п. 2.1.3) рассчитать трёхфазный асинхронный двигатель, предложенный преподавателем из таблицы П.5 в качестве варианта задания.

Перед выполнением задания необходимо изучить соответствующие разделы лекционного материала курса «Электрические машины».

## 3 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 3.1 Расчёт трёхфазного синхронного генератора

#### 3.1.1 Пример расчёта

##### *Задание*

Задан трёхфазный синхронный турбогенератор Т-12-2У3, имеющий следующие технические характеристики:

- номинальная полная мощность:  $S_{Г.НОМ} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;
- номинальная активная мощность:  $P_{Г.НОМ} = 12 \text{ МВт}$ ;
- номинальное линейное напряжение:  $U_{НОМ.Л} = 10,5 \text{ кВ}$ ;
- номинальный ток статора:  $I_{НОМ} = 825 \text{ А}$ ;
- номинальная частота вращения:  $n_{НОМ} = 3000 \text{ об/мин}$ ;
- номинальный коэффициент мощности:  $\cos \varphi_{НОМ} = 0,8$ ;
- номинальный КПД генератора:  $\eta_{НОМ} = 0,98$ ;
- синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси:  $X_d^* = 2,07 \text{ о.е.}$

##### *Необходимо:*

- рассчитать механическую мощность и момент на валу генератора;
- рассчитать и построить угловые характеристики  $M_{Г} = f(\Theta)$  генератора при различных значениях тока возбуждения  $I_{В}$ ;
- построить векторные диаграммы генератора при постоянном номинальном моменте  $M_{Г.НОМ}$  на валу генератора и различных значениях тока возбуждения  $I_{В}$ ;
- рассчитать и построить  $U$ -образную характеристику синхронного генератора.

##### *Решение*

1. Механическая мощность, подводимая к валу генератора от турбины:

$$P_{\text{мех}} = \frac{P_{Г.НОМ}}{\eta_{НОМ}} = \frac{12}{0,98} = 12,24 \text{ МВт.}$$

Синхронная угловая частота вращения генератора:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{\pi n_{\text{НОМ}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 3000}{30} = 314 \text{ рад/сек.}$$

Номинальный механический момент на валу генератора (момент, развиваемый турбиной):

$$M_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{12,24}{314} \cdot 10^6 = 38981 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Число пар полюсов генератора (при частоте сети  $f = 50$  Гц):

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

**2. Фазное номинальное напряжение генератора:**

$$U_{\text{НОМ.}\phi} = \frac{U_{\text{НОМ.л}}}{\sqrt{3}} = \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 6,06 \text{ кВ.}$$

Базисное сопротивление генератора:

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{\text{НОМ.}\phi}}{I_{\text{НОМ}}} = \frac{6,06}{825} \cdot 10^3 = 7,35 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление генератора в Ом:

$$X_d = X_d^* Z_{\sigma} = 2,07 \cdot 7,35 = 15,21 \text{ Ом.}$$

По второму закону Кирхгофа запишем выражение для ЭДС генератора в номинальном режиме работы в комплексной форме:

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_{\text{НОМ.}\phi} + j \underline{I}_{\text{НОМ}} X_d.$$

Для удобства построения векторных диаграмм примем начальную фазу номинального фазного напряжения генератора  $\psi_u = 90^\circ$ . Тогда:

$$\begin{aligned} \underline{E}_0 &= \underline{U}_{\text{ном.ф}} + j \underline{I}_{\text{ном}} X_d = U_{\text{ном.ф}} e^{j\psi_u} + I_{\text{ном}} e^{j(\psi_u - \varphi_{\text{ном}})} X_d e^{j90^\circ} = \\ &= 6,06 \cdot 10^3 \cdot e^{j90^\circ} + 825 \cdot e^{j(90^\circ - 36,9^\circ)} \cdot 15,21 \cdot e^{j90^\circ} = 16896,8 \cdot e^{j126,4^\circ} \text{ В} = \\ &= E_0 \cdot e^{j\psi_E} = 16,9 \cdot e^{j126,4^\circ} \text{ кВ}, \end{aligned}$$

где  $\varphi_{\text{ном}} = \arccos 0,8 = 36,9^\circ$ .

Угловая характеристика  $M_\Gamma = f(\Theta)$  синхронного генератора вычисляются и строятся по выражению

$$M_\Gamma = \frac{3U_{\text{ном.ф}} E_0}{\omega_{\text{ном}} X_d} \cdot \sin \Theta = \frac{3 \cdot 6,06 \cdot 10^3 \cdot 16,9 \cdot 10^3}{314 \cdot 15,21} \cdot \sin \Theta = 64331,2 \cdot \sin \Theta,$$

где  $\Theta$  – угол между векторами  $\underline{E}_0$  и  $\underline{U}$ .

Из данного выражения видно, что максимальный момент генератора соответствует углу  $\Theta = 90^\circ$  и равен:

$$M_{\Gamma, \text{max}} = 64331,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Угол  $\Theta_{\text{ном}}$  при номинальной нагрузке генератора:

$$\Theta_{\text{ном}} = \psi_E - \psi_u = 126,4^\circ - 90^\circ = 36,4^\circ.$$

Тогда номинальный момент генератора при  $\Theta_{\text{ном}}$ :

$$M_{\Gamma, \text{ном}} = 64331,2 \cdot \sin \Theta_{\text{ном}} = 64331,2 \cdot \sin 36,4^\circ = 38175,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для построения угловых характеристик генератора примем, что в ненасыщенном режиме характеристика холостого хода линейна, тогда ЭДС генератора прямо пропорциональна току возбуждения, то есть  $E_0 = k I_v$  ( $k$  – коэффициент пропорциональности). Тогда можно



считать, что при изменении тока  $I_B$  в некоторое число раз, в тоже число раз изменится и  $E_0$ .

Примем номинальный режим работы генератора за исходный, тогда относительные значения ЭДС и токов возбуждения для трёх различных режимов будут равны:

- номинальный (исходный) режим:

$$I_B^{*/'} = E_0^{*/'} = 1,0;$$

$$E_0^{*'} = E_0 = 16,9 \text{ кВ};$$

- ток  $I_B$  уменьшили на 40%:

$$I_B^{*''} = 0,6 \cdot I_B^{*'} = E_0^{*''} = 0,6;$$

$$E_0^{*''} = 0,6 \cdot E_0 = 10,14 \text{ кВ};$$

- ток  $I_B$  уменьшили на 80%:

$$I_B^{*'''} = 0,2 \cdot I_B^{*'} = E_0^{*'''} = 0,2;$$

$$E_0^{*'''} = 0,2 \cdot E_0 = 3,38 \text{ кВ}.$$

Выполним расчёт угловых характеристик по выражению для  $M_r$  при различных значениях ЭДС ( $E_0^{*'}$ ,  $E_0^{*''}$  и  $E_0^{*'''}$ ), результаты занесём в таблицу 3.1. Значения углов  $\Theta$  будем задавать в диапазоне от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .

Таблица 3.1 – Результаты расчёта угловых характеристик

$I_B^*$ , о.е.	Момент генератора $M_r$ , Н · м, при угле $\Theta$ :						
	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$
$I_B^{*'} = 1,0$	0	32150,8	55695,4	64331,2	55746,6	32239,5	0
$I_B^{*''} = 0,6$	0	19290,5	33417,2	38598,7	33447,9	19343,7	0
$I_B^{*'''} = 0,2$	0	6430,2	11139,1	12866,2	11149,3	6447,9	0

Рассчитанные угловые характеристики показаны на рисунке 3.1.

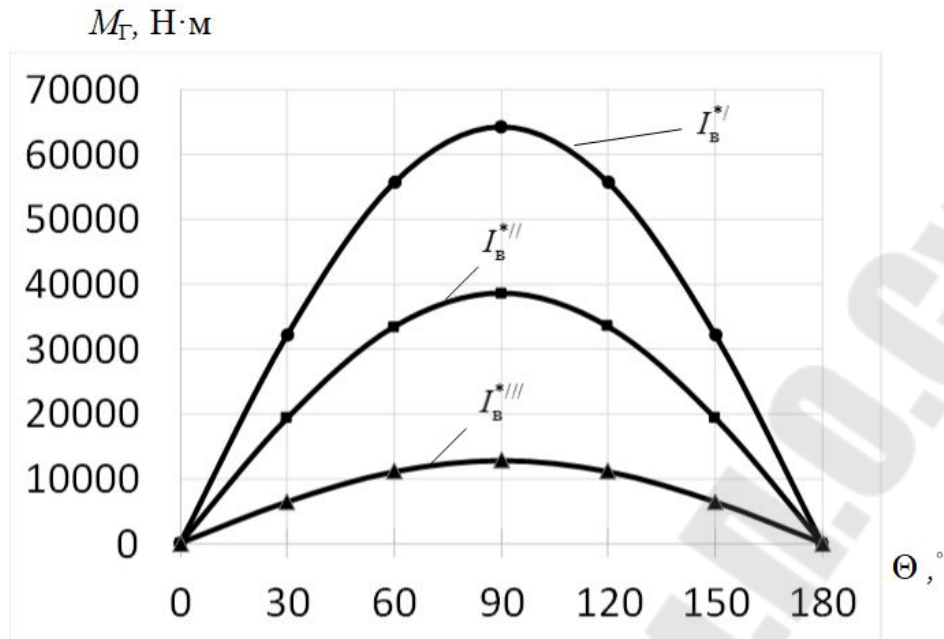


Рисунок 3.1 – Угловые характеристики синхронного генератора

3. Основное назначение синхронного генератора – вырабатывать активную мощность и выдавать её в энергосистему. Кроме того, синхронный генератор можно использовать как устройство регулирования реактивной мощности – он может её генерировать или потреблять в зависимости от значения тока возбуждения  $I_B$ .

Рассчитаем и построим векторные диаграммы синхронного генератора для различных режимов реактивной мощности исходя из условий постоянства вырабатываемой им активной мощности и момента на валу:

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

$$E_0 \sin \Theta = \text{const},$$

где  $I$  – ток генератора, протекающий в обмотке статора;

$\varphi$  – угол между векторами  $\underline{I}$  и  $\underline{U}$ ;

$\Theta$  – угол между векторами  $\underline{E}_0$  и  $\underline{U}$ .

Рассчитаем значения этих постоянных величин для номинального режима работы генератора:

$$M_{Г.НОМ} = \frac{3U_{НОМ.ф}}{\omega_{НОМ}X_d} E_0 \sin\Theta_{НОМ} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_0 \sin\Theta_{НОМ} = \frac{M_{Г.НОМ} \omega_{НОМ} X_d}{3U_{НОМ.ф}} = \frac{381753 \cdot 314 \cdot 15,21}{3 \cdot 6,06 \cdot 10^3} = 10028,7 \text{ В} = 10,03 \text{ кВ.}$$

$$I_{НОМ} \cos\varphi_{НОМ} = 825 \cdot 0,8 = 660 \text{ А.}$$

Зададимся адекватными масштабами по напряжению  $m_u$  и  $m_i$  по току, ориентируясь на значения рассчитанных выше  $E_0 \sin\Theta_{НОМ}$  и  $I_{НОМ} \cos\varphi_{НОМ}$ :

$$m_u = 1000 \text{ В/см};$$

$$m_i = 150 \text{ А/см.}$$

На комплексной плоскости (рисунок 3.2) штриховыми линиями отметим ограничения  $E_0 \sin\Theta_{НОМ}$  (вертикальная линия) и  $I_{НОМ} \cos\varphi_{НОМ}$  (горизонтальная линия), рассчитав эти расстояния предварительно в см в соответствующем масштабе:

$$E_0 \sin\Theta_{НОМ} = \frac{10028,7}{m_u} = \frac{10028,7}{1000} = 10,02 \text{ см};$$

$$I_{НОМ} \cos\varphi_{НОМ} = \frac{660}{m_i} = \frac{660}{150} = 4,4 \text{ см.}$$

Для построения векторных диаграмм выберем три режима генератора:

1) режим выдачи реактивной мощности ( $\varphi > 0^\circ$ , активно-индуктивная нагрузка), соответствующий номинальному току генератора  $I' = I_{НОМ}$  при  $\cos\varphi_{НОМ}$ ;

2) режим чисто активной нагрузки генератора ( $\varphi = 0^\circ$ ) соответствующий току генератора  $I''$ ;

3) режим потребления реактивной мощности ( $\varphi < 0^\circ$ , активно-ёмкостная нагрузка), соответствующий току генератора  $I'''$ .

Строить векторные диаграммы будем в соответствии с рассмотренным ранее выражением баланса напряжений генератора, вычисляя длины векторов согласно принятым ранее масштабам:

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_{\text{ном.ф}} + jX_d \underline{I}.$$

Алгоритм построения следующий:

- 1) строим вектор фазного напряжения  $\underline{U}_{\text{ном.ф}}$  совпадающим с осью  $+j$ , так как ранее было принято, что  $\psi_u = 90^\circ$ ;
- 2) строим отстающий от напряжения  $\underline{U}_{\text{ном.ф}}$  вектор тока  $\underline{I}' = \underline{I}_{\text{ном}}$  (здесь и далее все вектора токов должны упираться в горизонтальную штриховую линию ограничения);
- 3) под опережающим ток  $\underline{I}'$  углом  $90^\circ$  из конца вектора  $\underline{U}_{\text{ном.ф}}$  строим вектор падения напряжения в генераторе  $jX_d \underline{I}'$  (здесь и далее все вектора ЭДС и напряжений должны упираться в вертикальную штриховую линию ограничения);
- 4) строим вектор ЭДС  $\underline{E}'_0$ , соединяя начало координат с концом вектора  $jX_d \underline{I}'$ ; отмечаем получившийся угол  $\Theta'$ ;
- 5) строим совпадающий с напряжением  $\underline{U}_{\text{ном.ф}}$  вектор тока  $\underline{I}''$ , дальнейшие построения повторяем аналогично предыдущему режиму;
- 6) строим опережающий напряжение  $\underline{U}_{\text{ном.ф}}$  вектор тока  $\underline{I}'''$ , выбрав его длину таким образом, чтобы получившийся в итоге угол  $\Theta'''$  не превысил значение  $90^\circ$ ; дальнейшие построения повторяем аналогично предыдущим режимам.

Построенные векторные диаграммы представлены на рисунке 3.2.

**4.** По результатам построения векторных диаграмм рассчитаем и построим  $U$ -образную характеристику синхронного генератора, то есть зависимость относительного значения тока статора  $I^*$  от относительного значения тока возбуждения  $I_B^*$ . При расчёте будем учитывать принятую ранее зависимость  $E_0 = k I_B$ .

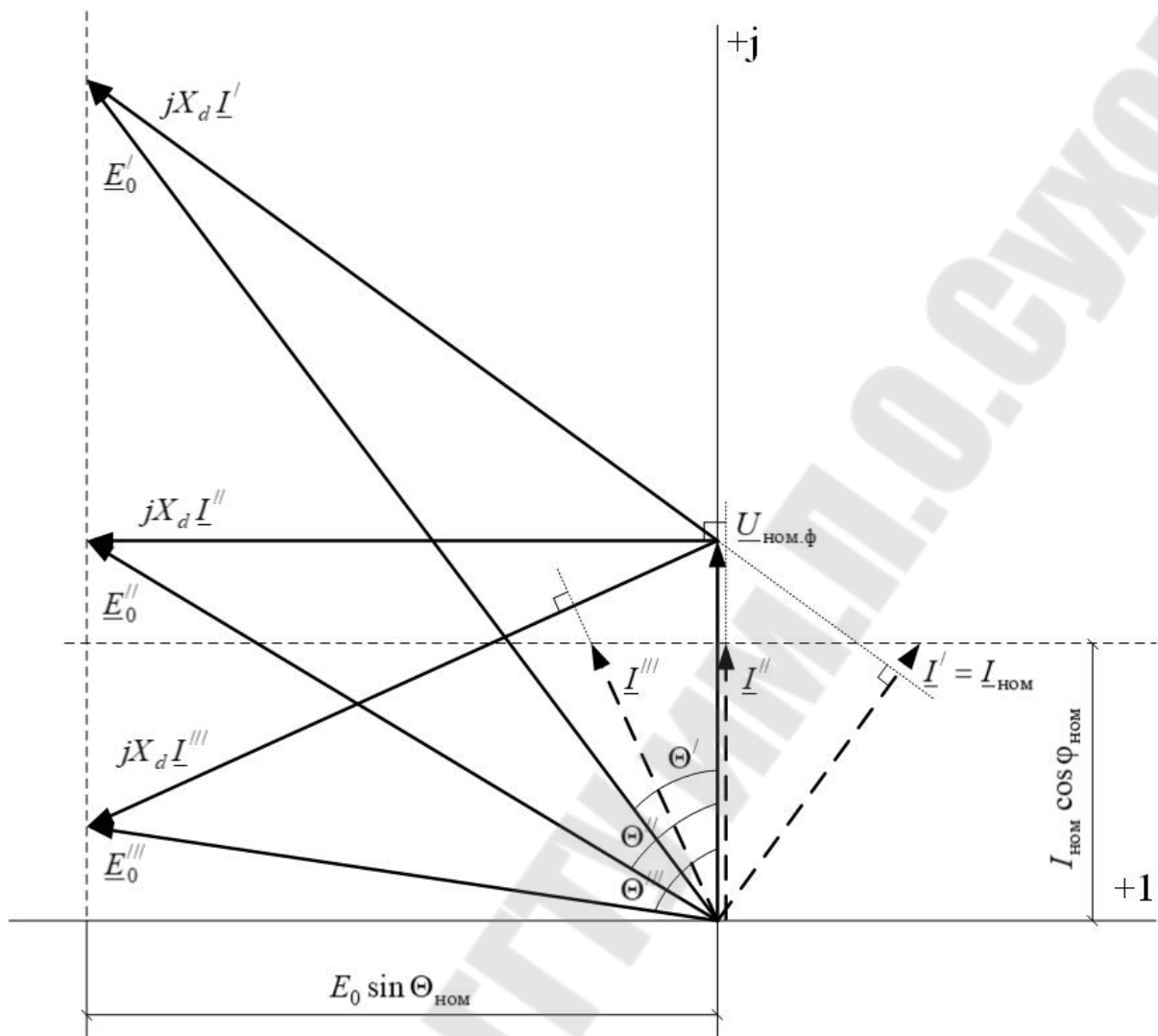


Рисунок 3.2 – Векторные диаграммы синхронного генератора для трёх режимов нагрузки

В качестве исходного примем режим активно-индуктивной нагрузки генератора, при котором в статоре протекает ток  $I'$  и генератор вырабатывает ЭДС  $E_0'$ . В этом режиме относительные значения тока статора и тока возбуждения примем равными:

$$I^{*'} = I_{\text{в}}^{*'} = 1,0.$$

Измерим линейкой на векторной диаграмме длины векторов токов статора и ЭДС генератора  $I'$ ,  $I''$ ,  $I'''$  и  $E_0'$ ,  $E_0''$ ,  $E_0'''$  соответственно, пересчитаем измеренные значения к именованным единицам через масштабы  $m_i$  и  $m_u$ , результаты занесём в таблицу 3.2).

Таблица 3.2 – Построение U-образной характеристики синхронного генератора

$I^{I,II,III}$ , А	825,0	660,0	729,3
$E_0^{I,II,III}$ , В	16900	11749	10176
$I^{*I,II,III}$ , о.е.	1,0	0,8	0,884
$I_B^{*I,II,III}$ , о.е.	1,0	0,695	0,602

Тогда относительные значения токов для режимов активной и активно-ёмкостной нагрузок будут рассчитываться по выражениям:

$$I^{*II} = \frac{I^{II}}{I^I} = \frac{660,0}{825,0} = 0,8 \text{ о.е.}; \quad I^{*III} = \frac{I^{III}}{I^I} = \frac{729,3}{825,0} = 0,884 \text{ о.е.};$$

$$I_B^{*II} = \frac{E_0^{II}}{E_0^I} = \frac{11749}{16900} = 0,695 \text{ о.е.}; \quad I_B^{*III} = \frac{E_0^{III}}{E_0^I} = \frac{10176}{16900} = 0,602 \text{ о.е.}$$

Результаты расчётов занесём в таблицу 3.2.

Упорядочив данные таблицы 3.2 в порядке возрастания  $I_B^*$ , построим зависимость  $I^* = f(I_B^*)$  (рисунок 3.3).

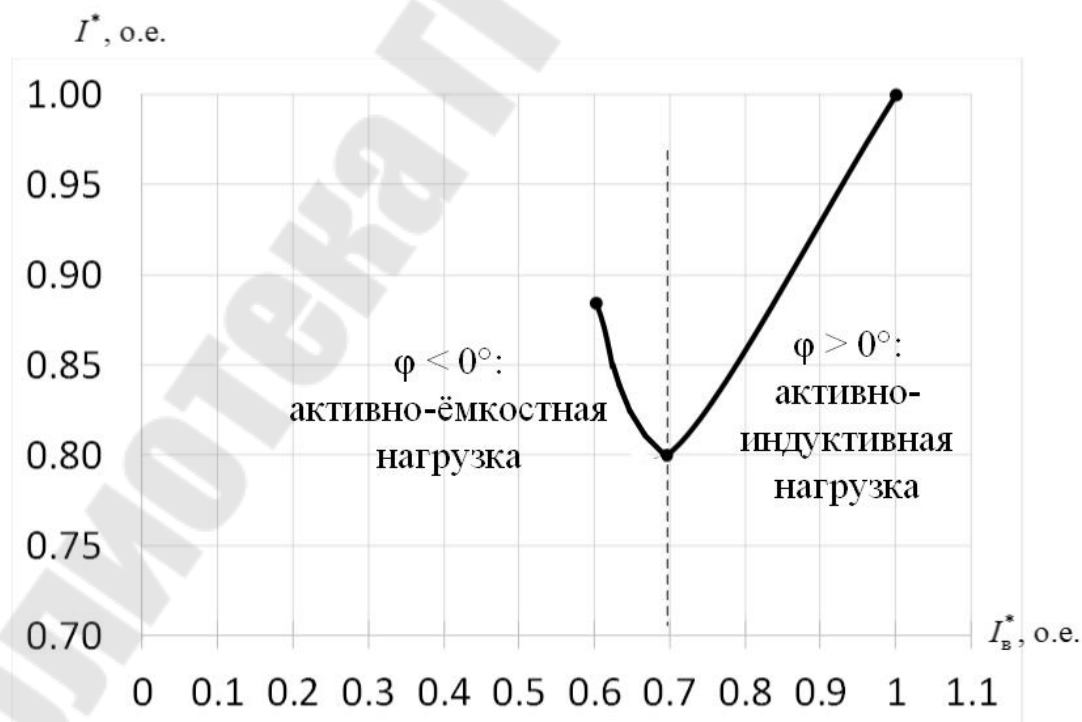


Рисунок 3.3 – U-образная характеристика синхронного генератора

### **3.1.2 Задание для самостоятельной работы**

По аналогии с примером расчёта (п. 3.1.1) рассчитать трёхфазный синхронный генератор, предложенный преподавателем из таблицы П.6 в качестве варианта задания.

Перед выполнением задания необходимо изучить соответствующие разделы лекционного материала курса «Электрические машины».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Усольцев, А. А. Электрические машины : учеб. пособие / А. А. Усольцев. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 416 с.
2. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / И. П. Копылов [и др.] ; под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
3. Копылов, И. П. Электрические машины : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 3-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2002. – 607 с.
4. Токарев, Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие для вузов / Б. Ф. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
5. Вольдек, А. И. Электрические машины : учеб. для вузов / А. И. Вольдек. – М. : Энергия, 1978. – 832 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

*Таблица П.1* – Основные технические характеристики однофазных двухобмоточных трансформаторов серии ОСМ1

Тип	Номинальная мощность $S_{Т.НОМ}$ , кВ·А	Номинальное первичное напряжение $U_{НОМ1}$ , кВ	Номинальное вторичное напряжение $U_{НОМ2}$ , кВ	Ток холостого хода $I_x$ , %	Напряжение короткого замыкания $U_K$ , %	КПД, %
ОСМ1-0,063	0,063	220; 380; 660	12; 14; 24;	24,0	13,0	83,0
ОСМ1-0,1	0,1		29; 36; 42; 56;	24,0	9,0	87,0
ОСМ1-0,16	0,16		110; 130; 220; 260	23,0	7,0	88,2
ОСМ1-0,25	0,25		24; 29; 36; 42;	22,0	5,5	90,2
ОСМ1-0,4	0,4		56; 110; 130; 220; 260	20,0	4,5	93,2
ОСМ1-0,63	0,63		24; 36; 42; 110; 220	19,0	4,0	93,5
ОСМ1-1,0	1,0		36; 42; 110; 220	18,0	3,5	94,2
ОСМ1-1,6	1,6		220; 380	24; 36; 42;	13,0	3,5
ОСМ1-2,5	2,5	110; 220		12,0	3,0	96,0
ОСМ1-4,0	4,0	110; 220		13,0	3,0	96,5

Таблица П.2 – Варианты заданий к расчёту однофазных трансформаторов

№ вар.	Напряжение сети, $U_{\text{сети}}$ , В	Параметры электроприёмников				
		вид	мощность $P$ , Вт	номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ , В	$\cos \varphi$	количество
1	220	светодиодная лампа	10	24	1,0	120
2	380	электронагреватель	250	42	0,98	5
3	380	газоразрядная лампа	80	110	0,85	20
4	220	электродвигатель	300	220	0,87	8
5	380	светодиодная лампа	6	36	0,97	150
6	380	электронагреватель	500	220	1,0	3
7	220	газоразрядная лампа	120	42	0,86	4
8	380	электродвигатель	350	110	0,91	6
9	380	светодиодная лампа	20	220	0,99	70
10	220	электронагреватель	450	36	1,0	2
11	380	газоразрядная лампа	250	110	0,9	5
12	380	электродвигатель	1000	220	0,78	2
13	220	светодиодная лампа	15	24	0,96	30
14	380	электронагреватель	640	220	1,0	4
15	660	газоразрядная лампа	80	42	0,88	8
16	220	электродвигатель	150	42	0,89	2
17	380	светодиодная лампа	10	24	0,95	100
18	380	электронагреватель	700	220	1,0	5
19	220	газоразрядная лампа	127	42	0,75	3
20	380	электродвигатель	250	220	0,82	7
21	660	светодиодная лампа	25	42	0,97	30
22	220	электронагреватель	1200	110	1,0	1
23	380	газоразрядная лампа	40	36	0,79	15
24	380	электродвигатель	600	42	0,86	2
25	220	электронагреватель	1500	220	1,0	2
26	380	газоразрядная лампа	80	110	0,74	18
27	380	электродвигатель	300	110	0,9	4

Таблица П.3 – Основные технические характеристики трёхфазных двухобмоточных трансформаторов серии ТМГ

Тип	$S_{T,НОМ}$ , кВ·А	Номинальные напряжения обмоток, кВ		Схема обмоток	$\Delta P_x$ , кВт	$\Delta P_k$ , кВт	$I_x$ ,%, %	$U_k$ ,%, %
		$U_{НОМ1}$	$U_{НОМ2}$					
ТМГ-25	25	6; 10	0,4	Y/Y <sub>H</sub> -0	105	0,6	2,2	4,5
				$\Delta/Y_H-11$		0,69		4,7
				Y/Z <sub>H</sub> -11				4,7
ТМГ-40	40			Y/Y <sub>H</sub> -0	135	0,86	1,8	4,5
				$\Delta/Y_H-11$		0,96		4,7
				Y/Z <sub>H</sub> -11				4,7
ТМГ-63	63			Y/Y <sub>H</sub> -0	190	1,27	1,5	4,5
				$\Delta/Y_H-11$		1,47		4,7
				Y/Z <sub>H</sub> -11				4,7
ТМГ-100	100			Y/Y <sub>H</sub> -0	280	1,97	1,4	4,5
				$\Delta/Y_H-11$		2,27		4,7
				Y/Z <sub>H</sub> -11				4,7
ТМГ-160	160			Y/Y <sub>H</sub> -0	390	2,65	1,1	4,5
				$\Delta/Y_H-11$		3,1		4,7
				Y/Z <sub>H</sub> -11				4,7
ТМГ-250	250	Y/Y <sub>H</sub> -0	520	3,7	0,9	4,5		
		$\Delta/Y_H-11$		4,2		4,7		
		Y/Z <sub>H</sub> -11				4,7		
ТМГ-400	400	Y/Y <sub>H</sub> -0	710	5,4	0,8	4,5		
		$\Delta/Y_H-11$		4,5				
ТМГ-630	630	Y/Y <sub>H</sub> -0	1000	7,6	0,7	5,5		
		$\Delta/Y_H-11$		5,5				
ТМГ-1000	1000	Y/Y <sub>H</sub> -0	1400	10,6	0,6	5,5		
		$\Delta/Y_H-11$		5,5				
ТМГ-1250	1250	Y/Y <sub>H</sub> -0	1650	13,5	0,5	6,0		
		$\Delta/Y_H-11$		6,0				
ТМГ-1600	1600	Y/Y <sub>H</sub> -0	1950	16,0	0,5	6,0		
		$\Delta/Y_H-11$		6,0				

Таблица П.4 – Основные технические характеристики некоторых асинхронных двигателей типа АИР

Тип	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$U_{\text{ном.л}}$ , В	$n_1$ , об/мин	$s_{\text{ном}}$ , о.е.	$\eta_{\text{ном}}$ , о.е.	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$m_M$ , о.е.	$m_{II}$ , о.е.	$i_{II}$ , о.е.	Схе- ма
АИР80В2	2,2	380	3000	0,048	0,81	0,85	2,3	2,2	7,0	$\Delta$
АИР100S2	4,0	380	3000	0,05	0,87	0,88	2,4	2,0	7,5	$\Delta$
АИР112М4	5,5	660	1500	0,04	0,85	0,84	2,6	2,2	6,0	Y
АИР160S6	11,0	380	1000	0,03	0,875	0,78	2,1	2,0	6,5	$\Delta$
АИР160S8	7,5	660	750	0,04	0,85	0,73	2,0	1,9	6,0	Y
АИР160М6	15,0	380	1000	0,03	0,89	0,81	2,1	2,0	7,0	$\Delta$
АИР180М6	18,5	660	1000	0,02	0,9	0,81	2,1	2,1	7,0	Y
АИР180S2	22,0	380	3000	0,02	0,9	0,9	2,3	2,0	7,5	$\Delta$
АИР180М4	30,0	660	1500	0,02	0,914	0,86	2,3	2,2	7,2	Y
АИР200М2	37,0	380	3000	0,017	0,915	0,88	2,3	2,0	7,5	$\Delta$
АИР200L2	45,0	660	3000	0,013	0,92	0,88	2,3	2,0	7,5	Y
АИР225М4	55,0	380	1500	0,013	0,93	0,87	2,3	2,2	7,2	$\Delta$
АИР280S6	75,0	380	1000	0,015	0,945	0,86	2,0	2,0	6,5	$\Delta$
АИР250М2	90,0	660	3000	0,0083	0,93	0,91	2,3	2,0	7,5	Y
АИР280S4	110,0	380	1500	0,013	0,953	0,87	2,2	1,8	7,2	$\Delta$
АИР315М6	132,0	660	1000	0,015	0,94	0,9	2,0	2,0	6,7	Y
АИР355S6	160,0	380	1000	0,015	0,945	0,88	2,0	1,9	6,7	$\Delta$
АИР315М2	200,0	380	3000	0,0083	0,95	0,94	2,2	1,8	7,2	$\Delta$

Таблица П.5 – Варианты заданий к расчёту асинхронных электродвигателей

№ вар.	$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	$n_{\text{НОМ}}$ , об/мин	$\eta_{\text{НОМ}}$ , %	$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	$X_{\mu}^*$ , о.е.	$R_0^*$ , о.е.	$R_1^*$ , о.е.	$X_1^*$ , о.е.	$R_2^{*/}$ , о.е.	$X_2^{*/}$ , о.е.	$U_{\text{НОМ.Л}}$ , кВ	$p$
1	1,1	2940	77,5	0,87	2,8	0,17	0,13	0,054	0,069	0,084	0,38	1
2	1,5	2940	79,5	0,88	2,5	0,18	0,084	0,051	0,049	0,081	0,38	1
3	2,2	2950	80,2	0,89	2,7	0,17	0,076	0,05	0,049	0,087	0,38	1
4	3,0	2960	83,3	0,89	3,4	0,16	0,072	0,057	0,037	0,1	0,38	1
5	4,0	2970	85,0	0,9	3,4	0,19	0,054	0,055	0,036	0,099	0,38	1
6	5,5	2940	87,6	0,91	3,8	0,16	0,05	0,054	0,036	0,11	0,38	1
7	1,1	1460	75,0	0,81	1,7	0,17	0,12	0,078	0,068	0,12	0,38	2
8	1,5	1450	77,0	0,83	1,9	0,18	0,12	0,078	0,06	0,12	0,38	2
9	2,2	1470	80,0	0,83	2,1	0,17	0,098	0,076	0,06	0,13	0,38	2
10	3,0	1450	82,0	0,83	2,2	0,16	0,078	0,076	0,053	0,13	0,38	2
11	4,0	1460	84,0	0,84	2,4	0,19	0,057	0,079	0,053	0,14	0,38	2
12	1,1	970	74,0	0,74	1,6	0,17	0,12	0,11	0,11	0,19	0,38	3
13	1,5	960	75,0	0,74	1,8	0,18	0,11	0,11	0,088	0,21	0,38	3
14	2,2	980	81,0	0,73	1,9	0,17	0,09	0,11	0,067	0,21	0,38	3
15	3,0	970	81,0	0,76	1,9	0,16	0,085	0,074	0,063	0,1	0,38	3
16	4,0	960	82,0	0,81	2,0	0,19	0,077	0,073	0,062	0,11	0,38	3
17	5,5	980	85,0	0,8	1,9	0,16	0,067	0,072	0,041	0,11	0,38	3
18	1,5	2940	80,0	0,91	3,4	0,19	0,084	0,054	0,037	0,12	0,38	1
19	2,2	2940	82,0	0,81	3,4	0,16	0,076	0,078	0,036	0,12	0,38	1
20	3,0	2950	84,0	0,83	3,8	0,17	0,072	0,078	0,036	0,13	0,38	1
21	4,0	2960	74,0	0,83	1,7	0,18	0,054	0,076	0,068	0,13	0,38	1
22	1,1	2970	75,0	0,83	1,9	0,17	0,05	0,076	0,06	0,14	0,38	1
23	1,5	2940	81,0	0,84	2,1	0,16	0,12	0,079	0,06	0,19	0,38	1
24	2,2	1450	81,0	0,74	2,2	0,19	0,12	0,11	0,053	0,21	0,38	2
25	3,0	1470	82,0	0,74	2,4	0,17	0,098	0,11	0,053	0,21	0,38	2
26	4,0	1450	85,0	0,83	1,6	0,18	0,078	0,11	0,11	0,1	0,38	2
27	5,5	1460	85,0	0,82	1,8	0,17	0,057	0,074	0,088	0,11	0,38	2

Примечание: для всех вариантов схема соединения обмотки статора – «звезда»

Таблица П.6 – Основные технические характеристики некоторых синхронных генераторов

Тип	$n_{\text{НОМ}}$ , об/мин	$S_{\text{Г.НОМ}}$ , МВ□А	$P_{\text{Г.НОМ}}$ , МВт	$U_{\text{НОМ.Л}}$ , кВ	$\cos \varphi_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{НОМ}}$ , А	$\eta_{\text{НОМ}}$ , о.е.	$X_d^*$ , о.е.
Г-6-2У3	3000	7,5	6,0	6,3	0,8	680	0,976	1,651
Г-12-2У3	3000	15,0	12,0	6,3	0,8	1376	0,976	1,85
Г-20-2У3	3000	25,0	20,0	10,5	0,8	1375	0,976	2,07
ТВС-32-2У3	3000	40,0	32,0	10,5	0,8	2200	0,983	2,65
ТВФ-63-2У3	3000	78,75	63,0	6,3	0,8	7210	0,984	1,92
ТВФ-110-2ЕУ3	3000	137,5	110,0	10,5	0,8	7560	0,984	2,04
ТВФ-120-2У3	3000	125,0	100,0	10,5	0,8	6875	0,984	1,907
ТВВ-160-2ЕУ3	3000	188,0	160,0	18,0	0,85	5670	0,985	1,713
ТГВ-200-2У3	3000	235,3	200,0	15,75	0,85	8625	0,986	1,84
ТГВ-300-2У3	3000	353,0	300,0	20,0	0,85	10200	0,987	2,195
ТВВ-320-ЕУ3	3000	375,0	320,0	20,0	0,85	10900	0,987	1,698
ТВВ-500-ЕУ3	3000	588,0	500,0	20,0	0,85	17000	0,987	2,56
ТВВ-800-ЕУ3	3000	888,9	800,0	24,0	0,9	21400	0,9875	2,33
ТВВ-1000-2У3	3000	1111,0	1000,0	24,0	0,9	26730	0,9875	2,82
ТВВ-1200-ЕУ3	3000	1330,0	1200,0	24,0	0,9	30100	0,988	2,418

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Трансформаторы.....	4
1.1 Расчёт однофазного трансформатора.....	4
1.1.1 Пример расчёта.....	4
1.1.2 Задание для самостоятельной работы.....	7
1.2 Расчёт трёхфазного трансформатора.....	7
1.2.1 Пример расчёта.....	7
1.2.2 Задание для самостоятельной работы.....	13
2. Асинхронные машины.....	14
2.1 Расчёт трёхфазного асинхронного электродвигателя.....	14
2.1.1 Пример расчёта №1.....	14
2.1.2 Задание для самостоятельной работы №1.....	17
2.1.3 Пример расчёта №2.....	17
2.1.4 Задание для самостоятельной работы №2.....	21
3. Синхронные машины.....	22
3.1 Расчёт трёхфазного синхронного генератора.....	22
3.1.1 Пример расчёта.....	22
3.1.2 Задание для самостоятельной работы.....	31
Список литературы.....	32
Приложение.....	33

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**Практикум  
по дисциплине «Электрические машины»  
для студентов специальностей  
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»  
и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
заочной формы обучения**

**Составители: Медведев Константин Михайлович  
Шабловский Ярослав Олегович**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 22.10 .20.

Рег. № 63Е.  
<http://www.gstu.by>