

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

**Методические указания для выполнения практических работ**

**Ташкент 2022**

«Электрические машины»: Методические указания для выполнения практических работ. Сост.: Якубова Д. К. Ташкент. ТашГТУ. 2022. 40 с.

В методических указаниях приводится методика изучения практических работ по предмету «Электрические машины».

Методические указания включают в себя задачи по расчету: трансформаторов, асинхронных трехфазных двигателей, синхронных машин переменного тока и машин постоянного тока. В связи с этим предусмотрены работы по всем основным разделам курса.

Методические указания предназначены для студентов бакалавриатуры направления обучения **5310700** – Электротехника, электромеханика, электротехнологии (в электромашиностроении)

*Печатается по решению научно – методического совета  
Ташкентского государственного технического университета*

### **Рецензенты:**

Бердиев У.Т. - заведующий кафедрой «Электротранспорт» Ташкентского государственного транспортного университета, доктор технических наук, профессор;

М.М. Туляганов - Ташкентский государственный технический университет, кафедра электромеханики и электротехнологии, кандидат технических наук, доцент.

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания составлены в соответствии с программой, но могут быть использованы и для других электротехнических дисциплин, содержащих раздел «Электрические машины».

«Электрические машины» базируется на знании учебных дисциплин и прежде всего математики, физики электротехники и электроники.

Цель практических работ – осмыслить и закрепить материал лекций, а также получить первые навыки технических расчетов на примерах решения конкретных задач.

Предлагаемые методические указания содержат примеры решения задач, составленные в помощь студентам, изучающим вопросы расчета параметров однофазных и трёхфазных трансформаторов, электрических машин, синхронных машин, машин постоянного и переменного тока. Главная задача методических указаний заключается в том, чтобы ознакомить студентов с основными приемами по использованию теоретических положений, и научить пользоваться данными, которые могут быть получены в условиях практической работы.

В связи с этим предусмотрены работы по всем основным разделам курса.

В данное методическое указание входит 15 практических работ, в каждой работе даются краткие методические указания, и их следует строго выполнять.

В результате выполнения практических работ студент должен:

*уметь:*

- определять электроэнергетические параметры трансформаторов и электрических машин ;

*знать:*

- технические параметры, характеристики и особенности различных видов электрических машин.



Напряжение $U_{1ном}$ , кВ	35	6	6	6	6	35	35	6	6
Напряжение $U_{2ном}$ , кВ	-	0.4	0.5	0.5	0.4	-	3.15	0.4	0.4
Коэффициент трансформации $k$	5.56	-	-	-	-	5.55	-	-	-

Решение варианта с трансформатором ТМ-1000/35.

1. Напряжение на выводах обмотки НН

$$U_{2ном} = U_{1ном}/k = 35/5,56 = 6,3 \text{ кВ.}$$

2. Число витков в фазной обмотке НН

$$w_2 = w_1/k = 1600/5,56 = 288 \text{ витков.}$$

3. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{max} = U_{2ном}/(\sqrt{3} * 4,44fw_2) = 6300/(1,73 * 4,44 * 50 * 288) = 0,057 \text{ Вб.}$$

4. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$$Q_{cm} = \Phi_{max}/(B_{max}k_c) = 0,057/(1,5 * 0,95) = 0,04 \text{ м}^2.$$

**Задача 1.3.** Однофазный двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью  $S_{ном}$  и номинальным током во вторичной цепи  $I_{2ном}$  при номинальном вторичном напряжении  $U_{2ном}$  имеет коэффициент трансформации  $k$ , при числе витков в обмотках  $w_1$  и  $w_2$ . Максимальное значение магнитной индукции в стержне  $B_{max}$ , а площадь поперечного сечения этого стержня  $Q_{cm}$ ; ЭДС одного витка  $E_{ВТК}$ , частота переменного тока в сети  $f = 50$  Гц. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 1.2. Требуется определить не указанные в этой таблице значения параметров для каждого варианта.

Таблица 1.2

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
$S_{ном}$ , кВ-А		120	—	240	600
$U_{2ном}$ , В	400	630	--	880	660
Число витков $w_1$		1800	--	—	—
Число витков $w_2$	--	—	169	128	140
$k$	15		12	23,4	9,55
$E_{ВТК}$ , В	5		6	—	—
$Q_{cm}$ , м <sup>2</sup>	-	0,018		0,022	—
$B_{max}$ , Тл	1,5	М	1,5		1,55
$I_{2ном}$ , А	172	...	140	—	—

Решение варианта 1.

1. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{max} = E_{втк} / (4,44fw) = 5 / (4,44 * 50 * 1) = 0,0225 \text{ Вб.}$$

2. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$$Q_{ст} = \Phi_{max} / (B_{max}k_c) = 0,0225 / (1,5 * 0,95) = 0,0158 \text{ м}^2.$$

3. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = \frac{U_{2ном}}{4,44f\Phi_{max}} = \frac{400}{4,44 * 50 * 0,0225} = 80 \text{ витков.}$$

4. Число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{w_2}{k} = 80 * 15 = 1200 \text{ витков.}$$

5. Полная номинальная мощность трансформатора

$$S_{ном} = U_{2ном}I_{2ном} = 400 * 172 = 68,8 \text{ кВ} * \text{А.}$$

**Задача 1.4.** Однофазный трансформатор включен в сеть с частотой тока 50 Гц. Номинальное вторичное напряжение  $U_{2ном}$ , а коэффициент трансформации  $k$  (табл. 1.3). Определить число витков в обмотках  $w_1$  и  $w_2$ , если в стержне магнитопровода трансформатора сечением  $Q_{ст}$  максимальное значение магнитной индукции  $B_{max}$ . Коэффициент заполнения стержня сталью  $k_c = 0,95$ .

Таблица 1.3.

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{2ном}, \text{В}$	230	400	680	230	230	400	400	680	230	2.30
$k$	15	10	12	8	10	6	8	12	14	8
$Q_{ст}, \text{м}^2$	0,049	0,08	0,12	0,18	0,065	0,08	0,12	0,076	0,06	0,085
$B_{max}, \text{Тл}$	1,3	1,6	1,8	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,5	1,2

Решение варианта 1.

Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{max} = B_{max}Q_{ст}k_c = 1,3 * 0,049 * 0,95 = 0,00 \text{ Вб.}$$

Число витков во вторичной обмотке трансформатора

$$w_2 = U_{2ном} / (4,44f\Phi_{max}) = 230 / (4,44 * 50 * 0,06) = 17 \text{ витков.}$$

Количество витков в первичной обмотке

$$w_1 = w_2 / k = 17 * 15 = 255 \text{ витков.}$$

## Задача № 2.

Технические данные трехфазных трансформаторов серии ТМ приведены в табл. 1.5; номинальная мощность  $S_{ном}$ , номинальные первичное  $U_{1ном}$  и вторичное  $U_{2ном}$  напряжения, напряжение короткого замыкания  $u_k$ , мощность короткого замыкания  $P_{к.ном}$ , мощность холостого хода  $P_{0.ном}$ , ток холостого хода  $i_0$ . Определить необходимые параметры и построить треугольник короткого замыкания (обмотки соединены Y/Y; параметры приведены к рабочей температуре).

Таблица 1.5.

Тип трансформатора	$S_{ном}$ кВ * А	$U_{1ном}$ кВ	$U_{2ном}$ кВ	$u_k$ %	$P_{к.ном}$ кВт	$P_{0.ном}$ кВт	$i_0$ , %
ТМ-1000/10	1000	10	0,4	5,5	12,2	2,45	1-4
ТМ-1600/10	1600	10	0,4	5,5	18,0	3,3	1,3
ТМ-2500/10	2500	10	0,4	5,5	25,0	4,6	1,0
ТМ-4000/10	4000	10	0,4	5,5	33,5	6,4	0,9
ТМ-6300/10	6300	10	0,4	5,5	16,0	9,0	0,8
ТМ-630/10	630	10	0,4	5,5	7,6	1,56	2,0

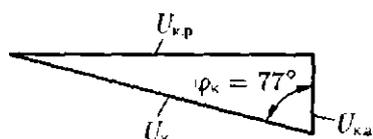


Рис. 1.6. Треугольник напряжений короткого замыкания

Решение варианта с трансформатором ТМ-630/10.

1. Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = 10^{-2} u_k U_{1ном} = 10^{-2} * 5,5 * 10 * 10^3 = 550 \text{ В.}$$

2. Ток короткого замыкания

$$I_{1к} = I_{1ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} U_{1ном}) = 630 * 10^3 / (1,73 * 10 * 10^3) = 36,4 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_{к.ном} / (\sqrt{3} U_{1к} I_{1к}) = 7600 / (1,73 * 550 * 36,4) = 0,22;$$

$$\cos \varphi_k = 77^\circ; \sin \varphi_k = 0,97;$$

4. Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = U_k / (\sqrt{3} I_{1ном}) = 550 / (\sqrt{3} * 36,4) = 8,7 \text{ Ом.}$$

5. Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cos \varphi_k = 8,7 - 0,22 = 1,9 \text{ Ом.}$$

6. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_k = z_k \sin \varphi_k = 8,7 - 0,97 = 8,44 \text{ Ом.}$$

7. Стороны треугольника напряжений короткого замыкания (рис. 1.6)

$$U_k = I_{1k} z_k = 36,4 * 8,7 = 317 \text{ В;}$$

$$u_{k,a} = I_{1k} r_k = 36,4 * 1,9 = 69 \text{ В;}$$

$$u_{k,p} = I_{1k} x_k = 36,4 * 8,44 = 307 \text{ В.}$$

8. Принимаем масштаб напряжения  $m_0 = 5 \text{ В/мм}$ , тогда длина векторов (сторон треугольника короткого замыкания):

$$U_k = 317/5 = 63 \text{ мм; } u_{k,a} = 69/5 = 14 \text{ мм; } u_{k,p} = 307/5 = 61 \text{ мм.}$$

### Задача № 3.

Трехфазный трансформатор имеет параметры, значения которых приведены в табл. 1.7: номинальная мощность  $S_{ном}$  и номинальные напряжения (линейные)  $U_{1ном}$  и  $U_{2ном}$ , напряжение короткого замыкания  $u_k$ , ток холостого хода  $i_0$ , потери холостого хода  $P_{0,ном}$ , потери короткого замыкания  $P_{к,ном}$ . Обмотки трансформатора соединены по схеме «звезда—звезда». Требуется определить:

Таблица 1.7.

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{ном}, \text{кВ} * \text{А}$	100	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
$U_{1ном}, \text{кВ}$	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
$U_{2ном}, \text{кВ}$	0,23	0,4	0,4	0,4	3,0	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23
$u_k, \%$	5,5	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5
$i_0, \%$	6,5	5,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,5
$P_{0,ном}, \text{кВт}$	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5
$P_{к,ном}, \text{кВт}$	2,0	3,6	5,8	9,0	13,5	10,0	9,0	8,2	6,0	4,0

параметры Т-образной схемы замещения, считая ее симметричной ( $r_1 = r_2'$  и  $x_1 = x_2'$ ), а также фактические значения сопротивлений Вторичной обмотки; величины КПД  $\eta$ , соответствующие значениям полной мощности трансформатора  $0,25S_{ном}$ ;  $0,5S_{ном}$ ;  $0,75S_{ном}$  и  $S_{ном}$  при коэффициентах мощности нагрузки  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (индуктивный Характер нагрузки) и  $\cos \varphi_2 = 1$ ; номинальное изменение напряжения  $\Delta U_{ном}$ . Построить графики  $\eta = f(\beta)$  и  $U_2 = f(\beta)$ .

Решение варианта 1.

1. Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = 10^{-2} u_k U_{1ном} = 10^{-2} * 5,5 * 500 = 27,5 В.$$

2. Ток короткого замыкания

$$I_{1к} = I_{1ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} U_{1ном}) = 100 * 10^3 / (\sqrt{3} * 0,5 * 10^3) = 115,6 А.$$

3. Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_k / (U_{1к} I_{1к}) = 2000 / (1,73 * 27,5 * 115,6) = 0,36; \quad \varphi_k = 69^\circ; \quad \sin \varphi_k = 0,93.$$

4. Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = U_{1к} / (\sqrt{3} I_{1к}) = 27,5 / (\sqrt{3} * 115,6) = 0,137 Ом.$$

5. Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cos \varphi_k = 0,137 * 0,36 = 0,05 Ом.$$

6. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_k = z_k \sin \varphi_k = 0,137 * 0,93 = 0,13 Ом.$$

7. Активные и индуктивные сопротивления Т-образной схемы замещения трансформатора (см. рис. 1.2)

$$r_1 = r_2' = 0,05 / 2 = 0,025 Ом;$$

$$x_1 = x_2' = 0,13 / 2 = 0,065 Ом.$$

8. Фактические (неприведенные) значения сопротивлений вторичной обмотки трансформатора

$$r_1 = r_2' / (U_1 / U_2)^2 = 0,0225 / (500 / 230)^2 = 0,005 Ом;$$

$$x_1 = x_2' / (U_1 / U_2)^2 = 0,065 / (500 / 230)^2 = 0,014 Ом.$$

9. Ток холостого хода

$$I_{0ном} = 10^{-2} i_0 I_{1ном} = 10^{-2} * 6,5 * 115,6 = 7,5 А.$$

10. Коэффициент мощности в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = P_{0.ном} / (\sqrt{3} I_0 U_{1ном}) = 650 / (1,73 * 7,5 * 500) = 0,10; \quad \sin \varphi_0 = 0,995.$$

11. Полное сопротивление ветви намагничивания Т-образной схемы замещения трансформатора

$$z_m = U_{1ном} / (\sqrt{3} I_{0,ном}) = 500 / (1,73 * 7,5) = 38,5 Ом.$$

12. Активное и индуктивное составляющие ветви намагничивания

$$r_m = z_m \cos \varphi_0 = 38,5 * 0,10 = 3,85 Ом;$$

$$x_m = z_m \sin \varphi_0 = 38,5 * 0,995 = 38,3 Ом.$$

13. Для расчета КПД воспользуемся выражением

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}};$$

Задавшись значениями коэффициента нагрузки:  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75$  и  $1,0$ , рассчитываем для каждого из них КПД сначала для коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 1$ , а затем для  $\cos\varphi_2 = 0,8$ .

14. Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД,

$$\beta = \sqrt{P_{0\text{ ном}}/P_{к.ном}} = \sqrt{0,65/2,0} = 0,57;$$

15. Максимальные значения КПД:

При  $\cos\varphi_2 = 1$

$$\eta_{max} = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + 2P_{0\text{ ном}}} = \frac{0,57 * 100 * 1}{0,57 * 100 * 1 + 2 * 0,65} = 0,978;$$

при  $\cos\varphi_2 = 0,8$

$$\eta_{max} = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + 2P_{0\text{ ном}}} = \frac{0,57 * 100 * 0,8}{0,57 * 100 * 0,8 + 2 * 0,65} = 0,972;$$

Результаты расчетов приведены ниже:

$\beta$ .....	0,25	0,50	0,75	1,0
$\eta$ (при $\cos\varphi_2 = 1$ .....)	0,969	0,977	0,976	0,974
$\eta$ (при $\cos\varphi_2 = 0,8$ ).....)	0,962	0,972	0,971	0,967

На рис. 1.8, а представлены графики  $\eta = f(\beta)$ .

Из анализа полученных результатов следует: КПД трансформатора при чисто активной нагрузке выше, чем при активно-индуктивной нагрузке во всем диапазоне значений  $\beta$ .

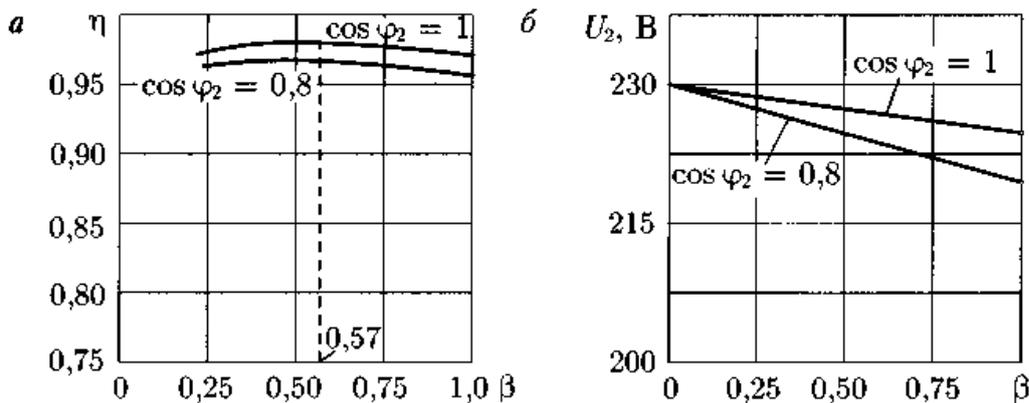


Рис. 1.8. Зависимости  $\eta \sim f(\beta)$  и  $U_2 = f(\beta)$  трансформатора

16. Для расчета номинального изменения напряжения воспользуемся выражением

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cos\varphi_2 + u_{к.р} \sin\varphi_2;$$

где

$$u_{к.а} = u_{к} \cos\varphi_{к} = 5,5 * 0,36 = 1,98 \%;$$

$$u_{к.р} = u_{к} \sin\varphi_{к} = 5,5 * 0,93 = 5,1 \%;$$

$$\text{При } \cos\varphi_2 = 0,8, \sin\varphi_2 = 0,6$$

$$\Delta U_{ном} = 1,98 * 0,8 + 5,1 * 0,6 = 4,64\%;$$

При  $\cos\varphi_2 = 1, \sin\varphi_2 = 0$

$$\Delta U_{ном} = 1,98 * 1 + 5,1 * 0 = 1.98 \%;$$

На рис. 1.8, б показаны внешние характеристики трансформатора.

#### Задача № 4.

В табл. 1.9 приведены технические данные трехфазных трансформаторов серии ТС-3 (трансформатор трехфазный сухой с заземленной первичной обмоткой). Используя эти данные, определить: коэффициент трансформации  $k$ , номинальные значения токов первичной  $I_{1ном}$  и вторичной  $I_{2ном}$  обмоток; ток холостого хода  $I_{0 ном}$ ; напряжение короткого замыкания  $U_{к.ном}$ ; сопротивление короткого замыкания  $Z_k$  и его активную  $r_k$  и индуктивную  $x_k$  составляющие; определить номинальное изменение напряжения при значениях коэффициента мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 1; 0,8$  (инд.) и  $0,8$  (емк.); номинальные и максимальные значения КПД трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 1$  и  $0,8$ .

Таблица 1.9

Тип трансформатора	$S_{ном}, \text{кВ}^*$ А	$U_{1ном},$ В	$U_{2ном},$ В	$P_0, \text{кВт}$	$P_{к ном},$ кВт	$u_k, \%$	$i_0 \%$
ТС3-160/6	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0
ТС3-160/10	160	10	0,4	0,7	2,7	5,5	4,0
ТС3-250/6	250	6	0,23	1,0	3,8	5,5	3,5
ТС3-250/10	250	10	0,4	1,0	3,8	5,5	3,5
ТС3-400/6	400	6	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0
ТС3-400/10	400	10	0,4	1,3	5,4	5,5	3,0
ТС3-630/6	630	6	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
ТС3-630/10	630	10	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
ТС3-1000/6	1000	6	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
ТС3-1000/10	1000	10	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
ТС3-1600/10	1600	10	0,4	4,2	16,0	5,5	1,5

Решение варианта с трансформатором ТС3-160/6.

1. Коэффициент трансформации

$$k = U_{1ном} / U_{2ном} = 6/0,23 = 26.$$

2.Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1НОМ} = S_{НОМ}/(\sqrt{3}U_{1НОМ}) = 160/(1,73 * 6) = 15,4 \text{ A.}$$

3.Номинальный ток вторичной обмотки

$$I_{2НОМ} = I_{1НОМ}k = 15,4 * 26 = 400 \text{ A.}$$

4.Ток холостого хода

$$I_0 = (i_0/100)/I_{1НОМ} = (4/100)15,4 = 0,6 \text{ A.}$$

5.Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = (u_k/100)U_{1НОМ} = (5,5/100)6000 = 330 \text{ B.}$$

6.Сопrotивление короткого замыкания

$$Z_k = U_{1к} /(\sqrt{3}I_{1к}) = 330/(1,73 * 15,4) = 12,4 \text{ Ом.}$$

7.Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos\varphi_k = P_k./(\sqrt{3}U_{1к}I_{1НОМ}) = 2700/(1,73 * 330 * 15,4) = 0,31; \sin\varphi_k = 0,95.$$

8.Активная и реактивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos\varphi_k = 12,4 * 0,31 = 3,8 \text{ Ом;}$$

$$x_k = Z_k \sin\varphi_k = 12,4 * 0,95 = 11,8 \text{ Ом.}$$

9.Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{к.а} = u_k \cos\varphi_k = 5,5 * 0,31 = 1,7\%;$$

$$u_{к.р} = u_k \sin\varphi_k = 5,5 * 0,95 = 5,2 \%.$$

10.Изменение вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке ( $\beta = 1$ ):

при коэффициенте мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 1, \sin\varphi_2 = 0$

$$\Delta U_{НОМ} = u_{к.а} \cos\varphi_2 + u_{к.р} \sin\varphi_2 = 1,7 * 1 + 0 = 1,7\%;$$

при коэффициенте мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (инд.),  $\sin\varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{НОМ} = u_{к.а} \cos\varphi_2 + u_{к.р} \sin\varphi_2 = 1,7 * 0,8 + 5,2 * 0,6 = 4,48\%;$$

при коэффициенте мощности нагрузки  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (емк.),  $\sin\varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{НОМ} = u_{к.а} \cos\varphi_2 + u_{к.р} \sin\varphi_2 = 1,7 * 0,8 + 5,2 * (-0,6) = -1,8 \%.$$

Результаты расчета изменения вторичного напряжения трансформатора  $\Delta U_{НОМ}$  при номинальной нагрузке ( $\beta = 1$ ):

$\cos\varphi_2$ .....	1,0	0,8 (инд.)	0,8 (емк.)
$\Delta U_{НОМ}, \%$ .....	1,7	4,48	-1,8
$\Delta U_{НОМ}, \text{B}$ .....	3,9	10,3	-4,14
$U_2 = U_{2НОМ} - \Delta U_{НОМ}, \text{B}$ ... ..	226	220	234

Внешние характеристики трансформатора представлены на рис. 1.9.

11. КПД трансформатора при номинальной нагрузке ( $\beta = 1$ ) и коэффициенте мощности  $\cos\varphi_2 = 1$

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta S_{ном} \cos\varphi_2 + P_{0 ном} + \beta^2 P_{к.ном}} = \frac{1 * 160 * 1}{1 * 160 * 1 + 0.7 + 1^2 * 2.7} = 0.98;$$

при номинальной нагрузке и коэффициенте мощности  $\cos\varphi_2 = 0,8$

$$\eta = \frac{1 * 160 * 0.8}{1 * 160 * 0.8 + 0.7 + 1^2 * 2.7} = 0.974$$

12. Максимальный КПД:

при  $\cos\varphi_2 = 1$

$$\eta_{max} = \frac{\beta' S_{ном} \cos\varphi_2}{\beta' S_{ном} \cos\varphi_2 + 2P_{0 ном}} = \frac{0.51 * 160 * 1}{0.51 * 160 * 1 + 2 * 0.7} = 0.983;$$

при  $\cos\varphi_2 = 0,8$

$$\eta_{max} = \frac{0.51 * 160 * 0,8}{0.51 * 160 * 0,8 + 2 * 0.7} = 0.979;$$

где коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{0 ном} / P_{к.ном}} = \sqrt{0.7 / 2.7} = 0,51.$$

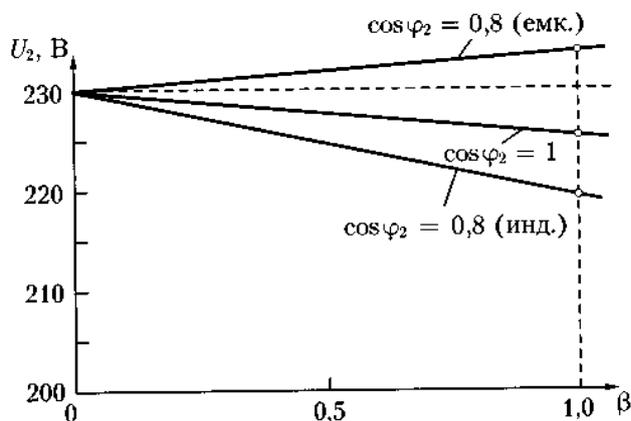


Рис 1.9. Внешние характеристики трансформатора

### Задача № 5.

Три трехфазных трансформатора номинальной мощностью  $S_{1ном}$ ,  $S_{2ном}$  и  $S_{3ном}$  и напряжением короткого замыкания  $u_{1к}$ ,  $u_{2к}$  и  $u_{3к}$  включены на параллельную работу (табл. 1.10). требуется определить:

1.нагрузку каждого трансформатора ( $S_1, S_2$  и  $S_3$ ) кВ \* А, если общая нагрузка параллельной группы равна сумме номинальных мощностей этих трансформаторов ( $S_{общ} = S_{1ном} + S_{2ном} + S_{3ном}$ );

2.степень использования каждого из трансформаторов по мощности ( $S/S_{ном}$ );

3.насколько следует уменьшить общую нагрузку трансформаторной группы  $S_{общ}$ , чтобы устранить перегрузку трансформаторов; как при этом будут использованы трансформаторы по мощности в % от их номинальной мощности?

*Решение* варианта 1.

В связи с тем, что для параллельного включения применены трансформаторы разной номинальной мощности, напряжения короткого замыкания этих трансформаторовнеодинаковы. Поэтому расчет распределения нагрузки между трансформаторами выполним по формуле

*Таблица 1.10.*

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
Трансформатор I					
Номинальная мощность $S_{номI}$ , кВ* А	5000	5600	3200	1800	560
Напряжение короткого замыкания $u_{1к}$ , %	5,3	5,3	4,3	4,4	4,0
ТрансформаторII					
Номинальная мощность $S_{номII}$ , кВ* А	3200	3200	4200	3200	420
Напряжение короткого замыкания $u_{2к}$ , %	5,5	5,5	4,3	4,0	4,2
Трансформатор III					
Номинальная мощность $S_{номIII}$ , кВ* А	1800	3200	5600	4200	200
Напряжение короткого замыкания $u_{3к}$ , %	5,7	5,5	4,0	3,8	4,5

$$S_1 = \frac{SS_{ном}}{u_{кx} \sum (S_{ном}/u_{кx})}$$

учитывающей неодинаковость напряжении короткого замыкания.

1.Общая нагрузка параллельной группы

$$S = S_{номI} + S_{номII} + S_{номIII} = 5000 + 3200 + 1800 \\ = 10\ 000 \text{ кВ} * \text{ А.}$$

2. Воспользуемся выражением

$$\sum (S_{ном}/u_{кк}) = 5000/5,3 + 3200/5,5 + 1800/5,7 = 1841.$$

3. Фактическая нагрузка каждого трансформатора

$$S_I = \frac{10000 * 5000}{5,3 * 1841} = 5124 \text{ кВ} * \text{А};$$

$$S_{II} = \frac{10000 * 3200}{5,5 * 1841} = 3160 \text{ кВ} * \text{А};$$

$$S_{III} = \frac{10000 * 1800}{5,7 * 1841} = 1715 \text{ кВ} * \text{А};$$

Анализируя полученный результат, можно сделать вывод:

Больше нагружается трансформатор с меньшим значением напряжения короткого замыкания (трансформатор I) и меньше - трансформаторы с большим значением напряжения короткого замыкания (трансформатор III). Перегруженным оказался трансформатор I: перегрузка составила

$$[(5100 - 5000)/5000] * 100 = 2\%.$$

Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то следует общую нагрузку уменьшить на 2 % и принять ее равной  $S' = 10\,000 * 0,98 = 9800$  кВ\* А, при этом суммарная мощность трансформаторов окажется недоиспользованной на 2 %.

### Задача № 6.

Однофазный понижающий автотрансформатор номинальной (проходной) мощностью  $S_{ном}$  при номинальном первичном напряжении  $U_1$  и номинальном вторичном напряжении  $U_2$  имеем число витков в обмотке  $w_1$ , из которых  $w_2$  витков являются общие для первичной и вторичной цепей (см. рис. 1.4); ЭДС, индуцируемая в одном витке обмотки трансформатора  $E_{витк.}$ . Требуется определить недостающие в табл. 1.11 значения параметров, а также Определить, во сколько раз масса и потери этого автотрансформатора меньше, чем у двухобмоточного трансформатора такой же мощности и напряжений; определить мощности автотрансформатора, Передаваемые из первичной во вторичную цепь электрическим и электромагнитным путями. При решении задачи током холостого хода пренебречь.

Решение варианта 1.

1. Число витков в обмотке автотрансформатора:

$$w_1 = U_1/E_{\text{втк}} = 220/0,85 = 259 \text{ витков.}$$

2. Вторичное напряжение:

$$U_2 = w_2 E_{\text{втк}} = 130 * 0,85 = 110 \text{ В.}$$

3. Коэффициент трансформации автотрансформатора:

$$kA = w_1/w_2 = 259/130 = 2,0.$$

4. Номинальный ток в первичной цепи:

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{1\text{ном}} = 15 * 10^3/220 = 68 \text{ А.}$$

Таблица 1.11.

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$ , кВ* А	15	4,0	6,0	16	8,0	3,0	5,0	2,8	9,0	12
$U_1$ , В	220	—	380	—	220	—	220	—	380	—
$U_2$ , В	—	110	—	220	—	127	—	140	—	220
$E_{\text{втк}}$ , В	0,85	0,75	1,73	0,90	0,90	0,85	1,0	0,85	1,0	1,022
$w_1$	—	—	—	—	—	250	250	270	400	400
$w_2$	130	130	250	240	130	—	—	—	—	—

5. Номинальный ток во вторичной цепи:

$$I_{2\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{2\text{ном}} = 15 * 10^3/110 = 136 \text{ А.}$$

6. Ток в общей части витков обмотки:

$$I_{1,2} = I_2 - I_1 = 136 - 68 = 68 \text{ А.}$$

7. Мощность, передаваемая из первичной во вторичную цепи электрическим путем (см. рис. 1.7):

$$S_9 = \frac{S_{\text{ном}}}{kA} = \frac{15}{2,0} = 7,5 \text{ кВ * А.}$$

Таким образом, электромагнитным путем передается лишь половина проходной мощности, а поэтому, по сравнению с двухобмоточным трансформатором номинальной мощностью 15 кВ \* А, рассматриваемый автотрансформатор изготовлен из активных материалов, масса которых в два раза меньше, а следовательно, и потери на нем также меньше в два раза.

**Задача 6.1.** В табл. 1.12 указаны значения следующих параметров понижающего автотрансформатора: номинальная (проходная) мощность  $S_{\text{ном}}$ , коэффициент трансформации  $kA$ , токи в первичной  $I_{1\text{ном}}$  и вторичной  $I_{2\text{ном}}$  цепях, ток в общей части витков  $I_{1,2}$ , напряжения первичное  $U_1$ , и вторичное  $U_2$ , мощности расчетная  $S_{\text{рас}}$  и передаваемая электрическим

путем  $S_{\vartheta}$ . Используя указанные в таблице значения параметров, определить недостающие значения параметров.

Решение варианта 1.

1. Первичное напряжение:

$$U_1 = S_{ном} / I_{1ном} = 2640 / 12 = 220 \text{ В.}$$

Таблица 1.12

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{ном}$ , кВ * А	2.64	—	—	2,2	—	3.5	—	3.5	—	2,8
$S_{\vartheta}$ , кВ * А	—	—	1,3	0,85	—	—	0,65	—	—	—
$S_{расч}$ , кВ* А	—	—	0,5	—	0,8	—	—	—	1,1	—
$U_1$ , В	—	220	380	—	—	380	—	380	—	—
$U_2$ , В	127	—	—	250	—	—	300	—	220	—
$I_{1ном}$	12	8	—	—	—	—	—	—	—	12,7
$I_{2ном}$	—	—	—	—	—	12	—	11	15	—
$I_{1,2ном}$	—	—	—	—	6	—	—	—	—	—
$kA$	—	1.35	—	—	1,25	—	1,30	—	—	1,80

### Задача № 7.

В табл. 3.2 приведены данные следующих параметров трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: основной магнитный поток  $\Phi$ , число последовательно соединенных витков в обмотке статора, номинальное скольжение  $s_{ном}$ , ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора при его неподвижном состоянии  $E_2$  и ЭДС ротора при его вращении с номинальным скольжением  $E_{2s}$  частота этой ЭДС  $f_2$  при частоте вращения ротора  $n_{ном}$ . Частота тока в питающей сети 50 Гц. Требуется определить значения параметров, не указанные в таблице в каждом из вариантов.

Таблица 3.2.

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Phi$ , Вб	0,028	0,032	0,048	—	0,025	—	—	0,028	0,028	—
$w_1$ , ВИТКОВ	18	—	24	16	—	24	18	—	36	18
$k_{об1}$	0,95	0,96	0,96	0,98	0,98	0,96	0,95	0,95	0,98	0,98
$s_{НОМ}$	0,04	—	0,05	0,04	—	0,05	—	—	—	—
$2p$	4	6	2	4	—	8	4	8	—	4
$E_{1\phi}$ , В	—	210	—	98	110	200	—	120	—	100
$E_2$ , В	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$E_{2s}$ , В	—	—	—	—	—	—	0,13	—	—	—
$f_2$ , Гц	—	—	—	—	—	—	2,5	3,2	—	2,5
$n_{НОМ}$ , об/мин	—	970	—	—	2920	—	—	—	1470	—

Решение варианта 1.

1. ЭДС обмотки статора

$$E_{1\phi} = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{об1} = 4,44 * 0,028 * 50 * 18 * 0,95 = 106 \text{ В.}$$

2. ЭДС обмотки ротора при номинальной частоте вращения

$$E_{2s} = 4,44\Phi f_1 s_{НОМ} w_2 k_{об2} = 4,44 * 0,028 * 50 * 0,04 * 0,5 * 1 = 0,12 \text{ В.}$$

3. ЭДС обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = E_{2s} / s_{НОМ} = 0,12 / 0,04 = 3 \text{ В.}$$

4. Частота ЭДС ротора при номинальном скольжении

$$f_2 = f_1 s_{НОМ} = 50 * 0,04 = 2 \text{ Гц.}$$

5. Частота вращения ротора номинальная

$$n_{НОМ} = n_1 (1 - s_{НОМ}) = 1500 (1 - 0,04) = 1440 \text{ об/мин,}$$

где синхронная частота вращения при частоте тока 50 Гц и  $2p = 4$ ,  $n_1 = 1500$  об/мин.

**Задача 3.2.** Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет данные, приведенные в табл. 3.3: максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$ , диаметр рачотки статора  $D_1$ , длина сердечника статора  $l_1$ , равная  $0,8 D_1$ , число полюсов в обмотках статора и ротора  $2p$ , число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора  $w_1$ , и ротора  $w_2$ , обмоточные коэффициенты для основной гармоники статора  $k_{об1}$  и ротора  $k_{об2}$  принять равными  $k_{об1} = k_{об2} = 0,93$ . Требуется определить фазные значения ЭДС в обмотке статора  $E_1$  и в обмотке фазного ротора при неподвижном его состоянии  $E_2$  и вращающемся со скольжением  $s$ , и частоту тока в неподвижном и вращающемся роторе. Частота тока в питающей сети  $f = 50$  Гц.

Таблица 3.3

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B_\delta$ , Тл	1,5	1,35	1,50	1,40	1,45	1,50	1,38	1,45	1,50	1,38
$D_1$ , мм	180	160	228	235	160	300	280	320	360	290
$l_1$ , мм	141	130	180	190	130	250	250	270	300	250
$2p$	4	4	4	6	4	4	6	4	8	6
$w_1$	48	18	24	32	48	36	32	36	12	24
$w_2$	8	4	6	10	16	12	16	18	8	12
$s$ , %	8	12	10	6	5	12	8	10	6	8

Решение варианта 1.

1. Полусное деление

$$\tau = \pi D_1 / 2p = 3,14 * 180 / 4 = 141 \text{ мм.}$$

2. Основной магнитный поток

$$\Phi = (2/\pi) B_\delta l_1 \tau = (2/\pi) * 1,5 * 0,8 * 180 * 10^{-3} * 141 * 10^{-3} \\ = 0,019 \text{ Вб.}$$

3. ЭДС фазной обмотки статора

$$E_1 = 4,44 \Phi f_1 w_1 k_{об1} = 4,44 * 50 * 0,019 * 48 * 0,93 = 188 \text{ В.}$$

4. ЭДС в обмотке неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 \Phi f_1 w_2 k_{об2} = 4,44 * 50 * 0,019 * 8 * 0,93 = 31 \text{ В.}$$

5. ЭДС во вращающемся роторе при скольжении 8 %

$$E_{2s} = E_2 s = 31 * 0,08 = 2,5 \text{ В.}$$

6. Частота тока в неподвижном роторе  $f_2 = f_1 = 50$  Гц. Частота тока во вращающемся роторе при скольжении 8 %

$$f_2 = f_1 s = 50 * 0,08 = 4 \text{ Гц.}$$

### Задача № 8.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А имеет технические данные, приведенные в табл. 3.4. Определить высоту оси вращения  $h$  число полюсов  $2p$ , скольжение при номинальной нагрузке  $s_{ном}$ , момент на валу  $M_{ном}$ , начальный пусковой  $M_{п}$  и максимальный  $M_{max}$  моменты, потребляемую двигателем из сети активную мощность  $P_{1ном}$ , суммарные потери при номинальной нагрузке  $\sum P$ , номинальный и пусковой токи  $I_{1ном}$  и  $I_{п}$  в питающей сети при соединении обмоток статора «звездой» и «треугольником».

*Решение* варианта с двигателем 4А100S2У3.

1. В обозначении типоразмера двигателя цифры, стоящие после обозначения серии 4А, указывают на высоту оси вращения, т. е.  $h = 100$  мм.

2. Следующая далее цифра указывает на число полюсов, т. е.  $2p = 2$ ; при частоте переменного тока 50 Гц этому числу полюсов соответствует синхронная частота вращения  $n_1 = 3000$  об/мин.

3. Скольжение при номинальной нагрузке определяется номинальной частотой вращения ротора двигателя

$$s_{ном} = (n_1 - n_{2ном})/n_1 = (3000 - 2880)/3000 = 0,04 \text{ или } 4\%.$$

4. Момент на валу двигателя (полезный момент двигателя) при номинальной нагрузке, т. е. при номинальной частоте вращения 2820 об/мин

$$M_2 = 9,55P_{ном}/n_{2ном} = 9,55 * 4000/2880 = 13,26 \text{ Н} * \text{ м}.$$

5. Начальный пусковой момент

$$M_{п} = M_{ном}(M_{п}/M_{ном}) = 13,26 * 2 = 26,52 \text{ Н} * \text{ м}.$$

*Таблица 3.4.*

Тип двигателя	$P_{ном}$ кВт	$n_{2ном}$ об/мин	$\eta_{ном}$ %	$\cos\varphi_1$	$\frac{I_{п}}{I_{ном}}$	$\frac{M_{п}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$U_1 \cdot В$
4А100S2У3	4,0	2880	86,5	0,89	7,5	2,0	2,5	220/380
4А160S2У3	15,0	2940	88,0	0,91	7,0	1,4	2,2	220/380
4А200М2У3	37,0	2945	90,0	0,89	7,5	1,4	2,5	380/660
4А112М4У3	5,5	1445	85,5	0,85	7,0	2,0	2,2	220/380
4А132М4УЭ	11,0	1460	87,5	0,87	7,5	2,2	3,0	220/380
4А180М4У3	30,0	1470	91,0	0,89	6,5	1,4	2,3	380/660

4A200M6УЗ	22,0	975	90,0	0,90	6,5	1,3	2.4	220/3 80
4A280M6УЗ	90,0	985	92,5	0,89	5,5	1,4	2,2	380/6 60
4A315M8УЭ	110	740	93,0	0,85	6,5	1,2	2,3	380/6 60
4A355M10УЭ	110	590	93,0	0,83	6,0	1,0	1,8	380/6 60

6. Максимальный (критический) момент двигателя определяют по его перегрузочной способности

$$M_{max} = M_{ном} (M_{max}/M_{ном}) = 13,26 * 2,5 = 33,15 \text{ Н} * \text{ м.}$$

7. Номинальный ток в фазной обмотке статора

$$I_{1ном} = P_{ном} / (m_1 U_1 \eta_{ном} \cos \varphi_{1ном}) = 4000 / (3 * 220 * 0,865 * 0,89) = 7,9 \text{ А.}$$

8. Потребляемая двигателем из сети активная мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1ном} = P_{ном} / \eta_{ном} = 4 / 0,865 = 4,6 \text{ кВт.}$$

9. Суммарные потери двигателя при номинальной нагрузке

$$\sum P = P_{1ном} - P_{ном} = 4,6 - 4,0 = 0,6 \text{ кВт.}$$

10. Линейный ток статора:

при соединении обмоток статора «звездой»

$$I_{1л\Upsilon} = I_1 = 7,9 \text{ А,}$$

при соединении обмоток статора «треугольником»

$$I_{1л\Delta} = 1,73 I_1 = 1,73 * 7,9 = 13,5 \text{ А.}$$

### Задача № 8.1.

В табл. 3.5 приведены значения следующих параметров трехфазного асинхронного двигателя: односторонний воздушный зазор между статором и ротором  $\delta$ , число полюсов  $2p$ , число пазов  $Z_1$ , максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре число витков в одной катушке обмотки статора  $w_k$  (все катушки фазной обмотки соединены последовательно), обмоточный коэффициент обмотки статора для основной гармоники  $k_{об1}$ , коэффициент магнитного насыщения  $k_\mu$ , коэффициент воздушного зазора  $k_b$ . Необходимо определить величину намагничивающего тока статора при заданном воздушном зазоре, а также определить», величину этого тока при увеличении и уменьшении воздушного зазора на 25 % относительно заданного; дать заключение о влиянии величины воздушного зазора на величину намагничивающего

тока; чем ограничивается применение в асинхронных двигателях слишком малых воздушных зазоров.

Таблица 3.5.

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta, \text{мм}$	0,6	0,4	0,8	0,5	0,7	0,3	0,4	0,7	0,5	0,6
$2p$	6	4	8	6	6	2	4	6	4	8
Число пазов $Z_1$	24	24	48	36	60	18	36	48	32	54
$B_\delta, \text{Тл}$	0,9	0,8	0,9	1,0	0,7	0,8	0,8	1,0	0,7	0,9
Число витков $w_k$	8	7	6	8	5	4	5	5	6	4
$k_{об1}$	0,91	0,95	0,92	0,94	0,96	0,92	0,92	0,94	0,93	0,92
$k_\mu$	1,37	1,35	1,38	1,40	1,35	1,40	1,34	1,37	1,35	1,38
$k_b$	1,30	1,35	1,36	1,38	1,34	1,37	1,35	1,36	1,34	1,38

Решение варианта 1.

1. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8 B_\delta \delta k_b * 10^3 = 0,8 * 0,9 * 0,6 * 1,3 * 10^3 = 562 \text{ А.}$$

2. МДС обмотки статора на пару полюсов в режиме холостого хода при номинальном подведенном напряжении

$$\sum F_{\text{ном}} = 2 F_\delta k_\mu = 2 * 562 * 1,37 = 1540 \text{ А.}$$

3. Число последовательно соединенных витков фазной обмотки статора

$$w_1 = Z_1 w_k / m_1 = 24 * 8 / 3 = 64 \text{ витка.}$$

4. Намагничивающий ток статора

$$I_{1\mu} = p \sum F_{\text{ном}} / (0,9 m_1 w_1 k_{об1}) = 3 * 1540 / (0,9 * 3 * 64 * 0,91) = 29,4 \text{ А.}$$

5. При изменении размера воздушного зазора, при постоянных значениях других параметров намагничивающий ток изменяется пропорционально зазору. Поэтому при увеличении зазора на 25% настолько же возрастает намагничивающий ток, что ведет к росту электрических потерь двигателя, величина которых пропорциональна квадрату тока в обмотках. Наоборот, при уменьшении воздушного зазора намагничивающий ток уменьшается, что способствует снижению потерь в двигателе, т.е. повышению его КПД. Таким образом, на первый взгляд создается впечатление, что зазор асинхронного двигателя должен быть минимальным. Однако такое мнение лишь отчасти справедливо, так как с

уменьшением зазора повышаются требования к точности обработки деталей и качеству подшипников. И то и другое ведет к повышению стоимости изготовления двигателя, а при чрезмерно малых зазорах технически невозможно обеспечить надежную работу двигателя из-за опасности задевания вращающегося ротора о неподвижный статор. Поэтому, в зависимости от размеров двигателя и предъявляемых к нему требований, принимают оптимальный размер зазора, принятый на основании опыта проектирования и эксплуатации асинхронных двигателей.

### Задача № 9.

Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой». Статический нагрузочный момент на валу двигателя  $M_c$ , полезная мощность двигателя  $P_{ном}$ , потребляемая из сети мощность  $P_{1ном}$ , КПД  $\eta_{ном}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ , величина тока в фазной обмотке статора  $I_{1ном}$ , число полюсов  $2p$ , скольжение  $s_{ном}$ . Некоторые из перечисленных параметров указаны в табл. 3.7. Требуется определить значения недостающих параметров.

Таблица 3.7.

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{ном}$ , кВт	—	12	—	15	22	—
$P_{1ном}$ , кВт	—	14,6	—	—	27,8	35
$\eta_{ном}$ , %	82	—	85	89	—	90
$\cos\varphi_1$	0,80	0,78	0,80	—	0,78	—
$I_{1ном}$ , А	—	—	18	30	—	62
$M_c$ , Н * м	180	—	105	—	145	—
$s_{ном}$ , %	4	3,5	—	3	—	3
$2p$	6	4	—	4	4	6

Решение варианта 1.

1. Номинальная частота вращения

$$n_{ном} = n_1(1 - s_{ном})/n_1 = 1000(1 - 0,04) = 960 \text{ об/мин.}$$

2. Полезная мощность двигателя

$$P_{ном} = 0,105M_cn_{ном} = 0,105 * 180 * 960 = 18\,144 \text{ Вт.}$$

3. Потребляемая двигателем мощность

$$P_{1ном} = P_{ном}/\eta_{ном} = 18\,144/0,82 = 22\,126 \text{ Вт.}$$

4. Потребляемый двигателем ток статора

$$I_{1\text{ном}} = P_{1\text{ном}} / (m_1 U_1 \cos\varphi_1) = 22\,126 / (3 * 220 * 0,8) = 41,9 \text{ А.}$$

**Задача 9.1.** Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов  $2p = 4$  включен в сеть напряжением 380 В, частотой 50 Гц при соединении обмотки статора «треугольником». В табл. 3.8 приведены параметры двигателя, соответствующие его номинальной нагрузке: мощность двигателя  $P_{\text{ном}}$ , КПД  $\eta_{\text{ном}}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ . При нагрузке  $P_2 = 0,85P_{\text{ном}}$  КПД двигателя имеет наибольшее значение  $\eta_{\text{max}} = 1,03\eta_{\text{ном}}$ . Необходимо определить все остальные виды потерь двигателя для режима номинальной нагрузки.

Таблица 3.8

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37
$\eta_{\text{ном}}, \%$	81,5	82	85	85,5	86	87,5	88	90	90,5	91
$s_{\text{ном}}, \%$	5,5	5,0	4,0	3,3	3,0	3,0	2,7	2,5	2,3	2,0
$\cos\varphi_1$	0,76	0,80	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,89	0,90	0,90

Решение варианта 1.

1. Наибольшее значение КПД

$$\eta_{\text{max}} = 1,03\eta_{\text{ном}} = 1,03 * 0,81 = 0,834\%.$$

2. Нагрузка двигателя при этом КПД

$$P_2 = 0,85P_{\text{ном}} = 0,85 * 3 = 2,55 \text{ кВт.}$$

3. Потребляемая мощность при  $\eta_{\text{max}}$

$$P_1 = P_2 / \eta_{\text{max}} = 2,55 / 0,834 = 3,06 \text{ кВт.}$$

4. Суммарные потери при  $\eta_{\text{max}}$

$$\sum P = P_1 - P_2 = 3,06 - 2,55 = 0,57 \text{ кВт.}$$

5. Постоянные потери двигателя

$$P_{\text{пост}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = 0,5 \sum P = 0,5 * 570 = 285 \text{ Вт.}$$

6. Потребляемая мощность в номинальном режиме

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 3,0 / 0,81 = 3,7 \text{ кВт.}$$

7. Суммарные потери в номинальном режиме

$$\sum P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 3,7 - 3,0 = 0,7 \text{ кВт} = 700 \text{ Вт.}$$

8. Переменные потери в номинальном режиме

$$P_{\text{пер}} = P_{\text{а}} + P_{\text{доп}} = \sum P_{\text{ном}} - P_{\text{пост}} = 700 - 285 = 415 \text{ Вт.}$$

9. Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55P_{\text{пост}}/n_1 = 9,55 * 285/1500 = 1,8 \text{ Н} * \text{м}.$$

10. Номинальная частота вращения

$$n_{\text{ном}} = n_1(1 - s_{\text{ном}}) = 1500 * (1 - 0,055) = 1417 \text{ об/мин}.$$

11. Полезный момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_2 = 9,55P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 * 3000/1417 = 20,2 \text{ Н} * \text{м}.$$

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = M_2 + M_0 = 20,2 + 1,8 = 22 \text{ Н} * \text{м}.$$

13. Номинальное значение электромагнитной мощности

$$P_{\text{эм}} = 0,105M_{\text{ном}}n_1 = 0,105 * 22 * 1500 = 3465 \text{ Вт}.$$

14. Электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\text{э2}} = s_{\text{ном}}P_{\text{эм}} = 0,055 * 3465 = 190 \text{ Вт}.$$

15. Добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,005P_{1\text{ном}} = 0,005 * 3700 = 18 \text{ Вт}.$$

16. Электрические потери в номинальном режиме

$$P_{\text{э}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{доб}} = 415 - 18 = 397 \text{ Вт},$$

17. Электрические потери в обмотке статора

$$P_{\text{э1}} = P_{\text{э}} - P_{\text{э2}} = 397 - 190 = 207 \text{ Вт}.$$

18. Проверка:

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{ном}} &= P_{\text{пост}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{доб}} = 285 + 207 + 190 + 18 = \\ &= 700 \text{ Вт (см. п. 7)}. \end{aligned}$$

### Задача № 10.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором работает от сети переменного тока напряжением  $U_{1л} = 380 \text{ В}$  частотой  $f_1 = 50 \text{ Гц}$ . При номинальной нагрузке ротор двигателя вращается с частотой  $n_{\text{ном}}$ ; перегрузочная способность двигателя  $\lambda_M$  а кратность пускового момента  $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$  (табл. 3.12). Рассчитать значения параметров и построить механическую характеристику двигателя в относительных единицах  $M_* = f(s)$ , если электромагнитная мощность в режиме номинальной нагрузки равна  $P_{\text{эм}}$ . Определить, при каком снижении напряжения относительно номинального двигатель утратит способность пуска с номинальным моментом на валу и при каком снижении напряжения он утратит перегрузочную способность.

Таблица 3.12

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{эм}, \text{кВт}$	7,5	15	11	4,0	15	1,1	30	3,0	7,5	37
$n_{ном}, \text{об/мин}$	1440	2940	960	1420	720	2920	580	1430	730	575
$\lambda_M$	2,2	1,9	2,0	2,2	2,0	1,9	1,8	2,2	1,7	1,8
$M_n/M_{ном}$	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	1,4	1,0	0,9	1,0
$2p$	4	2	6	4	8	2	10	4	8	10

Решение варианта 1.

Расчет ведем в относительных единицах по упрощенной формуле

$$M_* = 2 / [(s/s_{кр}) + (s_{кр}/s)],$$

где  $M_* = M/M_{max}$  — относительное значение электромагнитного момента.

1. Номинальное скольжение

$$s_{ном} = (n_1 - n_{ном})/n_1 = (1500 - 1440)/1500 = 0,04.$$

2. Критическое скольжение

$$s_{кр} = s_{ном} \left( \lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right) = 0,04(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,17.$$

3. Рассчитаем относительные значения момента при скольжениях:

$$s_{ном} = 0,04; s_{кр} = 0,17; s = 0,2; s = 0,5; s = 0,8.$$

Таблица 3.13

Параметр	Значения параметра					
	0,04	0,17	0,2	0,5	0,8	1,0
$s$	0,04	0,17	0,2	0,5	0,8	1,0
$M_*$	0,445	1,0	0,98	0,61	0,4	0,64
$M, \text{Н} * \text{м}$	47,7	105	103	64	42	66,8

Результаты расчета приведены в табл. 3.13. По полученным данным рассчитаны фактические значения момента и построена механическая характеристика  $M_* = f(s)$ , двигателя (рис. 3.8). В связи с тем, что приближенная формула относительного значения момента при больших скольжениях дает заметную ошибку, величину пускового момента, соответствующую скольжению  $s = 1,0$ , определим по номинальному значению момента

$$M_{ном} = 9,55P_{эм}/n_1 = 9,55 * 7500/1500 = 47,7 \text{ Н} * \text{м}.$$

Следовательно,

$$M_n = M_{ном} * 1,4 = 47,7 * 1,4 = 66,8 \text{ Н} * \text{м}.$$

Относительное значение пускового момента

$$M_{n*} = M_n/M_{max} = 66,8/105 = 0,63,$$

где максимальное значение момента

$$M_{max} = M_{ном}\lambda_M = 47,7 * 2,2 = 105 \text{ Н} * \text{м}.$$

4. Известно, что величина электромагнитного момента прямо пропорциональна  $U_1^2$ . Поэтому при кратности пускового момента  $M_n/M_{ном} = 1,4$  пусковой момент окажется равным номинальному, если напряжение питания уменьшится до значения

$$U'_{1л} = U_{1л}/\sqrt{1,4} = 380/1,18 = 322 \text{ В.}$$

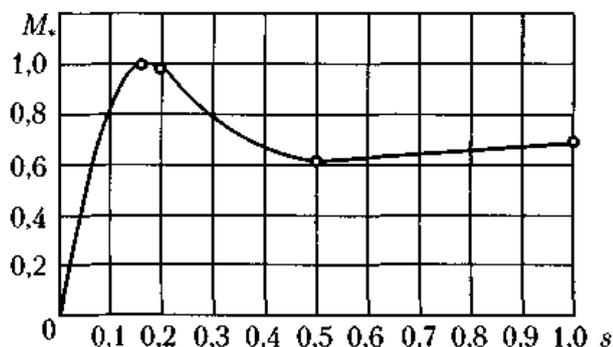


Рис.3.8. Механическая характеристика асинхронного двигателя

В итоге даже незначительное дальнейшее снижение напряжения приведет к тому, что при номинальном нагрузочном моменте на валу двигателя пуск не произойдет. Что же касается перегрузочной способности двигателя, то, учитывая, что  $\lambda_M = 2.2$ , она будет утрачена при уменьшении напряжения сети до величины

$$U_{1л} / \sqrt{2,2} = 380/1,48 = 257 \text{ В.}$$

### Задача № 11.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии А2, работающий от сети частотой 50 Гц напряжением 380 В при соединении обмотки статора «звездой», имеет номинальные параметры, приведенные в табл. 3.14: полезная мощность  $P_{ном}$ , частота вращения  $n_{ном}$ , КПД  $\eta_{ном}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_{1ном}$ ; кратность пускового тока  $I_n/I_{ном}$ , кратности пускового  $M_n/M_{ном}$ , и максимального  $M_{max}/M_{ном}$  моментов; активное сопротивление фазной обмотки статора при температуре  $20^\circ\text{C}$   $r_{1.20}$ . Требуется рассчитать параметры и построить механическую характеристику двигателя  $n_2=f(M)$ . Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания принять равным

$$\cos\varphi_k = 0,5\cos\varphi_{1ном}.$$

Решение варианта с двигателем А2-71 -4.

1. Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}}/\eta_{\text{НОМ}} = 22/0,9 = 24,4 \text{ кВт.}$$

2. Потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P_{1\text{НОМ}}}{3U_1 \cos\varphi_1} = \frac{24400}{3 * 220 * 0,88} = 42 \text{ А}$$

3. Пусковой ток двигателя

$$I_n = I_{\text{НОМ}} / \left(\frac{I_n}{I_{\text{НОМ}}}\right) = 42,7 = 294 \text{ А.}$$

4. Сопротивление короткого замыкания двигателя

$$Z_k = U_1/I_n = 220/294 = 0,75 \text{ Ом.}$$

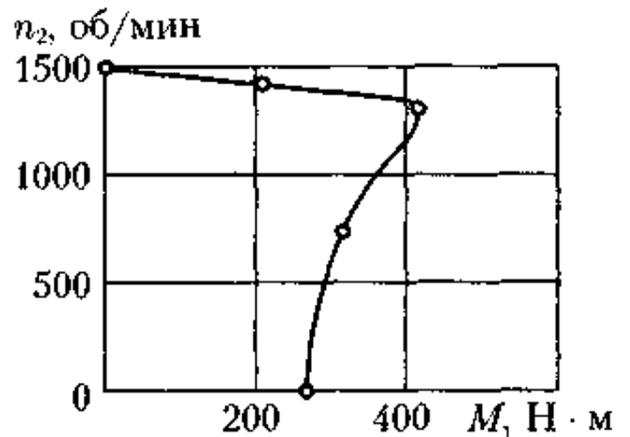


Рис.3.9. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Таблица 3.14

Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	$n_{\text{НОМ}}$ , об/мин	$\eta_{\text{НОМ}}$ , %	$\cos\varphi_{1\text{Н}}$	$I_n/I_{\text{НОМ}}$	$\frac{M_{\text{П}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$r_{1.20.0}$ м при 20 °С
A2-6I-2	17	2900	88,0	0,88	7	1,2	2,2	0,1900
A2-62-2	22	2900	89,0	0,88	7	1Д	2,2	0,1540
A2-71-2	30	2900	90,0	0,90	7	1,1	2,2	0,1170
A2-72-2	40	2900	90,5	0,90	7	1,0	2,2	0,0770
A2-81-2	55	2900	91,0	0,90	7	1,0	2,2	0,0540
A2-82-2	75	2900	92,0	0,90	7	1Л	2,2	0,0347
A2-91-2	100	2920	93,0	0,90	7	1,0	2,2	0,0209
A2-92-2	125	2920	94,0	0,90	7	1,0	2,2	0,0144
A2-61-4	13	1450	88,5	0,88	7	1,3	2,0	0,2700
A2-62-4	17	1450	89,5	0,88	7	1,3	2,0	0,1890
A2-71-4	22	1455	90,0	0,88	7	1,2	2,0	0,1700

5. Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos\varphi_k = 0,5 * 0,88 = 0,44; \sin\varphi_k = 0,895.$$

6. Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$x_k = Z_k \sin\varphi_k = 0,75 * 0,895 = 0,67 \text{ Ом};$$
$$r_k = Z_k \cos\varphi_k = 0,75 * 0,44 = 0,33 \text{ Ом.} \quad \text{Таблица 3.13}$$

7. Сопротивление фазной обмотки статора при рабочей температуре  
 $r_1 = r_{1.20} [1 + \alpha(\theta_{\text{раб}} - 20)] = 0,17 [1 + 0,004(75 - 20)] = 0,21 \text{ Ом}$ ,  
где  $\theta_{\text{раб}} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$  — рабочая температура;  $\alpha = 0,004$  — температурный коэффициент сопротивления меди.

8. Скольжение в режиме номинальной нагрузки

$$s_{\text{НОМ}} = (n_1 - n_{\text{НОМ}}) / n_{\text{НОМ}} = (1500 - 1455) / 1500 = 0,03.$$

9. Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора

$$r'_2 = r_k - r_1 = 0,33 - 0,21 = 0,12 \text{ Ом.}$$

10. Номинальное значение электромагнитного момента определяем по формуле

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f_1 s_{\text{НОМ}} [(r_1 + (r'_2 / s_{\text{НОМ}}))^2 + x_k^2]}$$
$$= \frac{3 * 220^2 * 0,12 * 2}{2 * 3,14 * 50 * 0,03 [(0,21 + (0,12 / 0,03))^2 + 0,67^2]} =$$
$$= 204 \text{ Н * м.}$$

11. Максимальный момент

$$M_{\text{max}} = 204 * 2 = 408 \text{ Н * м.}$$

12. Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = 204 * 1,2 = 245 \text{ Н * м.}$$

13. Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{НОМ}} [M_{\text{max}} / M_{\text{НОМ}} + \sqrt{(M_{\text{max}} / M_{\text{НОМ}})^2 - 1}] = 0,03 [2 + \sqrt{2^2 - 1}] = 0,11.$$

14. Момент при скольжении  $s = 0,5$

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s [(r_1 + (r_2'/s))^2 + (x_1 + x_2')^2]} = \frac{3 * 220^2 * 0,12 * 2}{2 * 3,14 * 50 * 0,5 \left[ \left( 0,21 + \left( \frac{0,12}{0,5} \right) \right)^2 + 0,69^2 \right]} = 341 \text{ Н * м.}$$

15. Рассчитав частоту вращения по формуле

$$n_2 = n_1(1 - s),$$

получаем результаты расчета параметров для построения механической характеристики двигателя:

Скольжение.....	0	0.03	0.11	0.5	1.0
Частота вращения, об/мин.....	1500	1455	1335	750	0
Момент, Н * м .....	0	204	110	311	245

16. По полученным данным строим механическую характеристику  $n_2 = f(M)$ , представленную на рис. 3.9.

### Задача №12.

В табл. 3.15 приведены технические данные трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором серии АК2. Требуется определить номинальное  $M_{ном}$  и максимальное  $M_{max}$  значения моментов, номинальное  $s_{ном}$ , и критическое  $s_{кр}$  скольжения, а также сопротивление резистора, который следует включить в цепь фазной обмотки ротора, чтобы начальный пусковой момент двигателя был равен максимальному; построить механическую характеристику для этого режима и по ней определить скольжение, соответствующее номинальному моменту  $M_{ном}$ . Напряжение сети 380 В, частота 50 Гц; обмотка статора соединена «звездой». Кратность пускового тока при прямом (безреостатном) включении двигателя в сеть  $I_n/I_{ном} = 7$ ; коэффициент мощности в режиме короткого замыкания принять равным

$$\cos\varphi_k = 0,5 \cos\varphi_{ном}.$$

*Решение* варианта с двигателем АК2-82-8.

Таблица 3.15.

Тип двигателя	$P_{\text{НОМ}}$ , кВт	$n_{\text{НОМ}}$ , об/мин	$\eta_{\text{НОМ}}$ , %	$\cos\varphi_{1\text{НОМ}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{НОМ}}}$	$r_{1.20}$ . Ом при 20 °С
АК2-81-4	40	1440	90,0	0,84	2,0	0,0725
АК2-82-4	55	1440	90,5	0,84	2,0	0,0390
АК2-91-4	75	1450	90,5	0,85	2,0	0,0326
АК2-92-4	100	1450	90,5	0,85	2,0	0,0210
АК2-81-6	30	960	89,0	0,84	1,8	0,0920
АК2-82-6	40	960	89,0	0,85	1,8	0,0605
АК2-91-6	55	960	89,0	0,86	1,8	0,0590
АК2-92-6	75	960	90,5	0,86	1,8	0,0350
АК2-81-8	22	720	87,5	0,79	1,7	0,1570
АК2-82-8	30	720	87,5	0,79	1,7	0,0935

1. Потребляемая двигателем мощность в номинальном режиме

$$P_{1\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}}/\eta_{\text{НОМ}} = 30/0,875 = 34,3 \text{ кВт.}$$

2. Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме,

$$I_{1\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}}/(3U_1 \cos\varphi_{\text{НОМ}}) = 34\,300/(3 * 220 * 0,79) = 66 \text{ А.}$$

3. Скольжение в номинальном режиме

$$s_{\text{НОМ}} = (750 - 720)/750 = 0,04.$$

4. Активное сопротивление фазы статора при рабочей температуре 75 °С

$$r_1 = r_{1.20}[1 + \alpha(75 - 20)] = 0,0935(1 + 0,004 * 55) = 0,0935 * 1,22 = 0,114 \text{ Ом.}$$

5. Пусковой ток при прямом (безреостатном) включении

$$I_n = I_{1\text{НОМ}}/\left(\frac{I_n}{I_{1\text{НОМ}}}\right) = 66 * 7 = 462 \text{ А.}$$

6. Сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = U_1/I_n = 220/462 = 0,48 \text{ Ом.}$$

7. Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos\varphi_k = 0,5 \cos\varphi_{1\text{НОМ}} = 0,5 * 0,79 = 0,395; \sin\varphi_k = 0,918.$$

8. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_k = Z_k \sin\varphi_k = 0,48 * 0,918 = 0,44 \text{ Ом.}$$

9. Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos\varphi_k = 0,48 * 0,395 = 0,19 \text{ Ом.}$$

10. Активное сопротивление фазы ротора, приведенное к фазе статора,

$$r'_2 = r_k - r_1 = 0,19 - 0,114 = 0,076 \text{ Ом.}$$

11. Активное сопротивление фазы ротора при скольжении  $s_{\text{НОМ}} = 0,04$

$$r'_2/s_{\text{НОМ}} = 0,076/0,04 = 1,9 \text{ Ом.}$$

12. Номинальное значение электромагнитного момента

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f_1 s_{\text{НОМ}} \left[ \left( r_1 + \left( \frac{r'_2}{s_{\text{НОМ}}} \right)^2 + x_K^2 \right) \right]}$$

$$= \frac{3 * 220^2 * 0,076 * 4}{2 * 3,14 * 50 * 0,04 [(0,114 + 1,9)^2 + 0,44^2]} = 720 \text{ Н * м.}$$

13. Максимальное значение момента

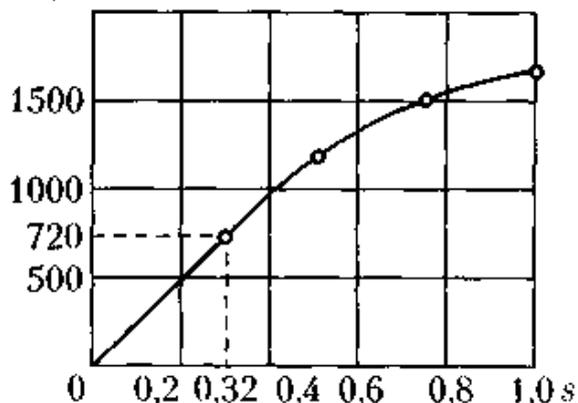
$$M_{\text{max}} = \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_K^2}]} = \frac{3 * 220^2 * 4}{4 * 3,14 * 50 [0,114 + \sqrt{0,114^2 + 0,44^2}]}$$

$$= 1640 \text{ Н * м.}$$

14. Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} \approx \pm r'_2/x_K = 0,076/0,44 = 0,17.$$

$M, \text{ Н * м}$



15. Сопротивление резистора  $r_{\text{доб}}$  при включении которого цепь ротора пусковой момент становится максимальным, должно быть таким, чтобы общее активное сопротивление фазы ротора было равносопротивлению  $x_K$ . Следовательно,

$$r_{\text{доб}} = x_K - r'_2 = 0,44 - 0,076 = 0,364 \text{ Ом.}$$

16. Для построения искусственной механической характеристики  $M = f(s)$  соответствующей приведенному значению сопротивления цепи ротора  $r_{\text{доб}} + r'_2 = 0,44 \text{ Ом}$ , рассчитаем значения моментов при скольжениях  $s = 0,5$  и  $s = 0,75$ .

Рис. 3.10. Искусственная механическая характеристика асинхронного двигателя  $M = f(s)$

Результаты расчета электромагнитного момента для ряда значений скольжения представлены ниже:

$s$ .....	0,5	0,75	1,0
$M, \text{ Н * м}$ .....	1381	1500	1640

Из построений на рис. 3.10 следует, что при номинальном моменте  $M_{\text{НОМ}} = 720 \text{ Н * м}$  скольжение составляет  $s = 0,32$ , что соответствует частоте вращения  $n_{\text{НОМ}} = 750(1 - 0,32) = 510 \text{ об/мин}$ .

### Задача № 13.

Параметры трехфазного синхронного генератора (табл. 4.1): номинальное (линейное) напряжение на выходе  $U_{1\text{НОМ}}$  при частоте тока 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой», номинальный ток статора  $I_{1\text{НОМ}}$ , КПД генератора при номинальной нагрузке  $\eta_{\text{НОМ}}$ , число полюсов  $2p$ , мощность на входе генератора  $P_{1\text{НОМ}}$ , полезная мощность на выходе генератора  $P_{\text{НОМ}}$ , суммарные потери в режиме номинальной нагрузки  $\sum P_{\text{НОМ}}$ , полная номинальная мощность на выходе  $S_{2\text{НОМ}}$ , коэффициент мощности нагрузки, подключенной к генератору  $\cos\varphi_{1\text{НОМ}}$  вращающий момент первичного двигателя при номинальной загрузке генератора  $M_{1\text{НОМ}}$ . Требуется определить параметры, значения которых в табл. 4.1 не указаны.

Таблица 4.1

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{НОМ}}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	330	—	270	470	—	600	780	450	700	500
$U_{1\text{НОМ}}, \text{кВ}$	6,3	3,2	0,4	—	0,7	3,2	63	0,4	—	3,2
$\eta_{\text{НОМ}}, \%$	92	—	—	91	90	93	—	—	93	92
$2p$	6	8	—	6	10	12	6	—	6	10
$P_{\text{НОМ}}, \text{кВт}$	—	—	206	—	—	—	667,4	369,5	—	—
$\sum P_{\text{НОМ}}, \text{кВт}$	—	27	18	—	—	—	—	—	—	—
$\cos\varphi_{1\text{НОМ}}$	0,9	—	0,85	0,9	—	0,92	—	0,9	0,92	0,85
$I_{1\text{НОМ}}, \text{А}$	—	72,2	—	43,1	190	—	—	—	64,2	—
$P_{1\text{НОМ}}, \text{кВт}$	—	340	—	—	190	—	717,6	—	—	—
$M_{1\text{НОМ}}, \text{Н}\cdot\text{М}$	—	—	—	—	—	—	—	7735	—	—

Решение варианта 1.

1. Полезная мощность на выходе генератора

$$P_{\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \cos\varphi_{1\text{НОМ}} = 330 * 0,9 = 297 \text{ кВт.}$$

2. Мощность на входе генератора

$$P_{1\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \eta_{\text{НОМ}} = 297 / 0,92 = 322,8 \text{ кВт.}$$

3. Суммарные потери

$$\sum P_{\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} - P_{\text{НОМ}} = 322,8 - 297 = 25,8 \text{ кВт.}$$

4. Ток статора в номинальном режиме

$$I_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / (\sqrt{3} U_{1\text{НОМ}}) = 330 / (1,73 * 6,3) = 30,2 \text{ А.}$$

Синхронная частота вращения при  $2p = 6$  и частоте тока  $f_1 = 50$  Гц:

$$n_1 = f_1 * 60 / p = 50 * 60 / 3 = 1000 \text{ об/мин.}$$

Момент приводного двигателя, необходимый для вращения ротора генератора с синхронной частотой вращения в режиме номинальной нагрузки,

$$M_{1\text{НОМ}} = 9,55 \cdot 10^3 P_{1\text{НОМ}} / n_1 = 9,55 * 10^3 * 322,8 / 1000 = 3083 \text{ Н * м.}$$

**Задача 13.1.** Технические данные трехфазных синхронных явно-полюсных генераторов приведены в табл. 4.2: основная ЭДС генератора (фазное значение)  $E_0$  номинальный ток нагрузки генератора (фазный)  $I_{1\text{НОМ}}$ , угол фазового сдвига  $\psi_1$  между векторами основной ЭДС  $\dot{E}_0$  и тока нагрузки  $\dot{I}_{1\text{НОМ}}$  (нагрузка активно-индуктивная), индуктивные сопротивления — рассеяния обмотки статора  $x_1$  реакции якоря по продольной оси  $x_{ad}$  реакции якоря по поперечной оси  $x_{aq}$ .

Требуется построить векторную диаграмму генератора, определить номинальное напряжение  $U_{1\text{НОМ}}$ ; номинальные значения полной  $S_{\text{НОМ}}$  и активной  $P_{\text{НОМ}}$  мощностей на выходе генератора и изменение напряжения при сбросе нагрузки  $\Delta U_{\text{НОМ}}$ . Частота тока 50 Гц; обмотки статора соединены «звездой», активным сопротивлением обмоток статора пренебречь.

Таблица 4.2

Параметр	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
$E_0, \text{ В}$	280	275	284	298	260	265	290
$I_{1\text{НОМ}}, \text{ А}$	54	90	108	120	36	28	140
$\psi_1, \text{ град}$	50	48	50	45	55	48	54
$x_1, \text{ Ом}$	0,52	0,15	0,12	0,08	0,44	0,48	0,07
$x_{ad}, \text{ Ом}$	1,0	1,32	1,24	1,18	1,65	1,82	1,05
$x_{aq}, \text{ Ом}$	0,74	0,55	0,48	0,32	1,15	1,22	0,90

Решение варианта 1.

1. Уравнение напряжений явнополюсного синхронного генератора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1}$$

2. ЭДС реакции якоря по продольной оси

$$\dot{E}_{1d} = -j I_{1\text{НОМ}} x_{ad} \sin \psi_1 = -j 54 * 1,0 * 0,766 = -j 41,4 \text{ В.}$$

3. ЭДС реакции якоря по поперечной оси

$$\dot{E}_{1q} = -j I_{1\text{НОМ}} x_{aq} \cos \psi_1 = -j 54 * 0,74 * 0,643 = -j 25,7 \text{ В.}$$

4. ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j I_{1\text{НОМ}} x_1 = -j 54 * 0,52 = -j 28 \text{ В.}$$

5. Векторную диаграмму напряжений строим в следующем порядке (рис. 4.2): из начала диаграммы (точка О) в произвольном направлении проводим вектор тока  $\dot{I}_{1\text{НОМ}}$ ; от этого вектора под углом  $\psi_1$ , в принятом масштабе напряжения  $m_v = 2 \text{ В/мм}$  проводим вектор основной ЭДС  $\dot{E}_0$ . Учитывая размагничивающее влияние реакции якоря при индуктивном характере нагрузки, из конца вектора ЭДС  $\dot{E}_0$  в обратном направлении проводим вектор ЭДС реакции якоря по продольной оси  $\dot{E}_{1d}$ . Далее из конца этого вектора под углом  $90^\circ$  к вектору основной ЭДС  $\dot{E}_0$  проводим вектор ЭДС реакции якоря по поперечной оси  $\dot{E}_{1q}$ , затем под углом  $90^\circ$  к вектору тока из конца вектора  $\dot{E}_{1q}$  проводим вектор ЭДС рассеяния  $\dot{E}_{\sigma 1}$ . Соединив начало диаграммы (точка О) с концом вектора  $\dot{E}_{\sigma 1}$ , получим вектор номинального напряжения на выходе генератора  $\dot{U}_{1\text{НОМ}}$ . Измерив его длину (115,5 мм) и умножив его на масштаб напряжения  $m_v = 2 \text{ В/мм}$ , определяем значение этого напряжения

$$U_{1\text{НОМ}} = 115,5 * 2 = 231 \text{ В.}$$

При соединении обмотки статора «звездой» линейное напряжение на выводах обмотки статора равно  $U_{1л} = 231 * 1,73 = 400 \text{ В}$ .

Измерив угол между векторами  $\dot{U}_{1\text{НОМ}}$  и  $\dot{I}_{1\text{НОМ}}$ , определяем фазовый сдвиг  $\varphi_{1\text{НОМ}} = 40^\circ$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_{1\text{НОМ}} = 0,766$  (инд.).

6. Полная номинальная мощность на выходе генератора

$$S_{\text{НОМ}} = 3U_{1\text{НОМ}} I_{1\text{НОМ}} = 3 * 231 * 54 * 10^{-3} = 37,4 \text{ кВт} * \text{А}$$

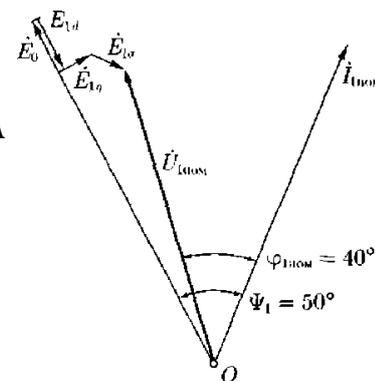
7. Активная мощность на выходе генератора

$$P_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_{1\text{НОМ}} = 37,4 * 0,766 = 28,6 \text{ кВт.}$$

8. Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \left[ \frac{E_0 - U_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \right] 100 = \left[ \frac{280 - 231}{231} \right] 100 = 21,2\%$$

т. е. при сбросе нагрузки от номинальной до режима холостого хода напряжение на выходе генератора увеличивается на 21,2 %.



### Задача № 14.

Трехфазный синхронный двигатель серии СДН2 имеет данные каталога: номинальная мощность  $P_{\text{НОМ}}$ , число полюсов  $2p$ , КПД кратности — пускового тока  $I_{\text{п}}/I_{\text{НОМ}}$ , пускового момента  $M_{\text{п}}/M_{\text{НОМ}}$ , максимального синхронного момента  $M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}}$ , асинхронного момента при скольжении  $s = 5\%$  (момент входа в синхронизм)  $M_{5\%}/M_{\text{НОМ}}$ ; соединение обмоток с татора «звездой». Значения перечисленных величин приведены в табл. 4.8.

Определить: частоту вращения, номинальный и пусковой токи к цепи статора, номинальный, максимальный синхронный, пусковой моменты и асинхронный момент входа в синхронизм (при  $s=5\%$ ). Напряжение питающей сети  $U_c = 10$  кВ при частоте 50 Гц, коэффициент мощности  $\cos\varphi_1 = 0,8$ .

Таблица 4.8

Тип двигателя	$P_{НОМ}, \text{кВт}$	$2p$	$\eta_{НОМ}, \%$	$M_{max} / M_{НОМ}$	$M_{5\%} / M_{НОМ}$	$M_{П} / M_{НОМ}$	$I_{П} / I_{НОМ}$
16-36-12	500	12	93,7	1,9	1,3	1,0	5,2
16-44-12	630	12	94,2	1,9	1,3	1,0	5,1
17-31-12	800	12	94,3	1,9	1,1	1,0	4,7
17-39-12	1000	12	94,9	1,8	1,0	1,0	4,5
17-49-12	1250	12	95,3	1,9	1,2	1,1	5,2
18-64-12	2500	12	96,2	1,3	1,4	1,2	6,5
16-36-10	630	10	94,4	1,8	1,4	0,75	5,0
16-14-10	800	10	94,9	1,8	1,3	0,75	5,0
17-44-10	1250	10	95,5	1,9	1,2	1,1	5,4
17-51-10	1600	10	95,9	1,8	1,2	1,0	5,2

Решение варианта СДН2-16-36-12.

1. Частота вращения

$$n_1 = 60f/p = 60 * 50/6 = 500 \text{ об/мин.}$$

2. Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1НОМ} = P_{НОМ} / \eta_{НОМ} = 500 / 0,937 = 534 \text{ кВт.}$$

3. Ток в цепи статора в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1НОМ} = \frac{P_{1НОМ}}{\sqrt{3}U_1 \cos\varphi_1} = \frac{534}{1,73 * 10 * 0,8} = 39 \text{ А.}$$

4. Пусковой ток в цепи статора

$$I_{П} = I_{1НОМ} (I_{П} / I_{НОМ}) = 39 * 5,2 = 203 \text{ А.}$$

5. Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{НОМ} = 9,55 P_{НОМ} / n_1 = 9,55 * 500 * 10^3 / 500 = 9550 \text{ Н * м.}$$

6. Максимальный (синхронный) момент

$$M_{max} = M_{НОМ} (M_{max} / M_{НОМ}) = 9550 * 1,9 = 18145 \text{ Н * м.}$$

7. Пусковой момент

$$M_{П} = M_{НОМ} (M_{П} / M_{НОМ}) = 9550 * 1,0 = 9550 \text{ Н * м.}$$

8. Момент входа в синхронизм (асинхронный момент при скольжении 5%)

$$M_{5\%} = M_{НОМ} (M_{5\%} / M_{НОМ}) = 9550 * 1,3 = 12415 \text{ Н * м.}$$

### Задача № 15.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения номинальной мощностью  $P_{\text{ном}}$  включен в сеть с напряжением  $U_c$ , КПД двигателя  $\eta_{\text{ном}}$ , обмотка якоря простая волновая ( $2a = 2$ ), с числом полюсов  $2p = 4$ , число активных проводников в обмотке  $N$ ; ток в обмотке возбуждения  $I_B = 0,02I_{a\text{ном}}$ , величина одностороннего воздушного зазора  $\delta$ , магнитная индукция в зазоре  $B_\delta$ , магнитная индукция в зубцах якоря  $B_2$ , коэффициент воздушного зазора  $k_B = 1,3$ , коэффициент магнитного насыщения магнитопровода двигателя  $k_\mu = 1,35$ . Значения перечисленных параметров приведены в табл. 5.4.

Требуется определить МДС реакции якоря по поперечной оси  $F_{qd}$  и число витков в полюсной катушке возбуждения  $w_{к.в}$ , необходимое для компенсации реакции якоря по поперечной оси при номинальной нагрузке двигателя.

Решение варианта 1.

1. Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме,

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (U_c \eta_{\text{ном}}) = 100 * 10^3 / (440 * 0,89) = 255 \text{ А.}$$

2. Ток в обмотке возбуждения

$$I_B = 0,02I_{\text{ном}} = 0,02 * 255 = 5 \text{ А.}$$

Таблица 5.4.

Параметр	Варианты						
	1	2	3	4	Л	Г	7
$P_{\text{ном}}$ , кВт	109	120	85	30	45	90	75
$U_c$ , В	440	440	220	220	440	440	220
$\eta_{\text{ном}}$ , %	89	90	87	85	85	87	86
$N$	280	300	150	120	260	240	120
$\delta$ , мм	2,0	2,0	1,8	13	1,6	1,8	1,6
$B_2$ , Тл	2,2	2,3	1,8	1,9	1,7	1,9	2,0
$B_\delta$ , Тл	0,82	0,85	0,80	0,83	0,80	0,83	0,82

3. Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

$$I_{a\text{ном}} = 255 - 5 = 250 \text{ А.}$$

4. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8B_\delta \delta k_B 10^3 = 0,8 * 0,82 * 2,0 * 1,3 * 10^3 = 1700 \text{ А.}$$

5. МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

$$F_{B0} = 2F_\delta k_\mu = 2 * 1700 * 1,35 = 4590 \text{ А.}$$

6. МДС якоря на пару полюсов в режиме номинальной нагрузки

$$F_{a\text{ном}} = NI_{a\text{ном}} / (4ap) = 280 * 250 / (4 * 1 * 2) = 8750 \text{ А.}$$

7. Коэффициент реакции якоря по поперечной оси (см. рис. 5.1); при  $B_2 = 2,2 \text{ Тл}$  (верхняя граница графика) и  $F_a / F_{B0} = 8750 / 4590 = 1,9$  коэффициент  $k_{p.я} = 0,22$ .

8. Приращение МДС возбуждения, компенсирующее влияние реакции якоря по поперечной оси,

$$F_{qd} = k_{p.я} F_{a\text{ном}} = 0,22 * 8750 = 1925 \text{ А.}$$

9. МДС возбуждения на пару полюсов при номинальной нагрузке двигателя, достаточное для компенсации влияния реакции якоря,

$$F_{B.\text{ном}} = F_{B0} + F_{qd} = 4590 + 1925 = 6515 \text{ А.}$$

10. Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения

$$w_{к.в} = F_{a\text{ном}} / (2I_B) = 6515 / (2 * 5) = 651 \text{ виток.}$$

## Список литературы

- 1) Кацман М.М. Сборник задач по электрическим машинам - М.: Академия, 2013.
- 2) Кацман М.М. Электрические машины - М.: Высшая школа, 2013.
- 3) Лопухина Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. –М.: Высшая школа,2002.-511 с.
- 4) 7. Макаричев Ю.А.Проектирование турбогенераторов. Учеб. Пособие. –Самара.: СамГТУ, 2000. -69 с.
- 5) 8. Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н., Махмадиев Ф.М. ”Электр қўлланма” курсидан “Трансформаторларни лойихалаш”. Методик қўлланма. –Т.: ТошДТУ, 2013.-95 с.
- 6) 9. Пирматов Н.Б., Ярмухаммедова З.А., Мустафакулова Г.Н., Электр машиналари фаннинг трансформаторлар қисми бўйича курс лойихасини бажаришга оид ўқув методик қўлланма –Т.:ТошДТУ, 2012.-120 б.
- 7) 10. Салимов Ж.С., Пирматов Н.Б. Электр машиналари.-Т.: Узбекистон файласуфлари миллий жамияти нашриёти, 2011.-408 б.
- 8) Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С., Проектирование электрических машин. –М.: Высшая школа , 2001 .-430 с.
- 9) 3. Гольдберг О.Д. Инженерное проектирование и САПР электрических машин: учебник для вузов/ О.Д. Гольдберг ,И.С. Свириденко; под ред. О.А. Гольдберга.-М.:Академия,2008.-560 с.

