

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Владимирский государственный университет  
Кафедра электротехники и электроэнергетики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА»

Составители  
Ю.П. Максимов  
С.А. Сбитнев  
Ф.К. Макаров

Владимир 2005

УДК 621.313

ББК 31.26

М54

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры УИТЭС

Владимирского государственного университета

*С.И. Малафеев*

Печатается по решению редакционно-издательского совета

Владимирского государственного университета

**Методические** указания к выполнению расчетно-графических работ по дисциплине «Электромеханика» / сост.: Ю.П. Максимов, С.А. Сбитнев, Ф.К. Макаров; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Ред.-издат. комплекс ВлГУ, 2005. – 32 с.

Приводятся краткие теоретические сведения по разделам: “Трансформаторы” и “Асинхронные машины”, рассмотрены примеры расчетов и представлены варианты заданий для выполнения расчетно-графических работ. Разработаны в соответствии с Государственным образовательным стандартом.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по специальности 100400 – электроснабжение и других специальностей как очной.

Ил. 11. Табл. 5. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.313

ББК 31.26

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 4  |
| 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ.....   | 6  |
| 1.1. Краткие теоретические сведения.....   | 6  |
| 1.2. Пример расчетно-графической работы № 1: «Определение характеристик силового трансформатора по паспортным данным»..... | 9  |
| 1.2.1. Параметры трансформатора.....   | 10 |
| 1.2.2. Параметры намагничивающей ветви Т-схемы замещения.....  | 11 |
| 1.2.3. Параметры основной ветви Т-схемы замещения.....   | 11 |
| 1.2.4. Параметры нагрузки.....   | 12 |
| 1.2.5. Построение векторной диаграммы.....   | 13 |
| 1.3. Исходные данные к вариантам заданий расчетно-графической работы №1.....   | 18 |
| 2. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.....   | 19 |
| 2.1. Краткие теоретические сведения.....   | 19 |
| 2.2. Определение характеристик трехфазного асинхронного двигателя по паспортным данным.....                                | 22 |
| 2.2.1. Параметры двигателя.....  | 22 |
| 2.2.2. Параметры намагничивающей ветви.....  | 23 |
| 2.2.3. Параметры главной ветви схемы замещения при пусковом режиме ( $s = 1$ ).....  | 23 |
| 2.2.4. Параметры главной ветви схемы замещения при номинальном режиме ( $s_H = 0,0367$ ).....                              | 25 |
| 2.2.5. Механическая характеристика.....  | 27 |
| 2.3. Исходные данные к вариантам заданий расчетно-графической работы №2.....   | 29 |
| 3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РГР.....  | 30 |
| Рекомендательный библиографический список.....   | 31 |

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Электромеханика» призвана дать студентам основные теоретические сведения о принципах действия электрических машин и режимах их работы в системах электроснабжения.

К основным типам электрических машин относятся генераторы и электродвигатели. Генераторы служат для преобразования механической энергии в электрическую; электродвигатели – для преобразования электрической энергии в механическую.

Электрические машины применяются также для преобразования токов, например, постоянного в переменный, постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого и для преобразования частоты и числа фаз переменного тока. Такие машины называются электромашинными преобразователями.

Основными частями электрических машин являются статор (неподвижная часть) и ротор (вращающаяся часть).

В зависимости от рода генерируемого или потребляемого тока различают машины переменного и постоянного тока.

Машины переменного тока разделяются на синхронные и асинхронные. В тех и других при их работе создается вращающееся магнитное поле. Ротор синхронной машины вращается с частотой, равной частоте вращения магнитного поля. Частота вращения ротора асинхронной машины отличается от частоты вращения магнитного поля, т.е. ротор вращается асинхронно с полем.

Машины переменного тока бывают однофазными и многофазными, чаще всего трехфазными.

Машины постоянного тока снабжены коллектором. В генераторах постоянного тока коллектор служит для получения на щетках машины ЭДС, постоянно действующей в одном направлении. В двигателях постоянного тока коллектор служит для получения действующей в одном направлении электромагнитной силы.

Разновидностью машин переменного тока являются асинхронные коллекторные машины.

Проведенная краткая классификация электрических машин не исчерпывает всего многообразия их видов.

К группе электрических машин принято относить также и трансформаторы, которые используются для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения. Трансформаторы бывают однофазные и многофазные (чаще всего трехфазные).

Трансформаторы не являются машинами (не имеют двигающихся частей), но их принято рассматривать в общем курсе электромеханики, так как электромагнитные процессы, происходящие в них, имеют много общего с процессами, протекающими в электрических машинах.

Курс «Электромеханика» состоит из двух частей и читается для студентов очного обучения по специальности «Электроснабжение» в двух семестрах. В первом семестре изучаются вопросы, связанные с устройством, назначением, принципом действия и режимами работы трансформаторов и асинхронных машин. По учебному плану студентам необходимо выполнить две расчетно-графические работы (РГР). В данных методических указаниях приведены и подробно рассмотрены два примера РГР, приведены варианты заданий по разделам: «Трансформаторы» и «Асинхронные машины».

# 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

## 1.1. Краткие теоретические сведения

**Трансформатор** – статический электрический аппарат, предназначенный для преобразования одной (первичной) системы переменного тока ( $U_1, I_1$ ) в другую (вторичную) систему ( $U_2, I_2$ ), имеющую другое напряжение ( $U_1 \neq U_2$ ).

Передача энергии от первичной обмотки  $W_1$  (рис. 1) во вторичную обмотку  $W_2$  производится магнитным потоком  $\Phi_m$ , протекающим по замкнутому стальному сердечнику, на котором эти обмотки располагаются.

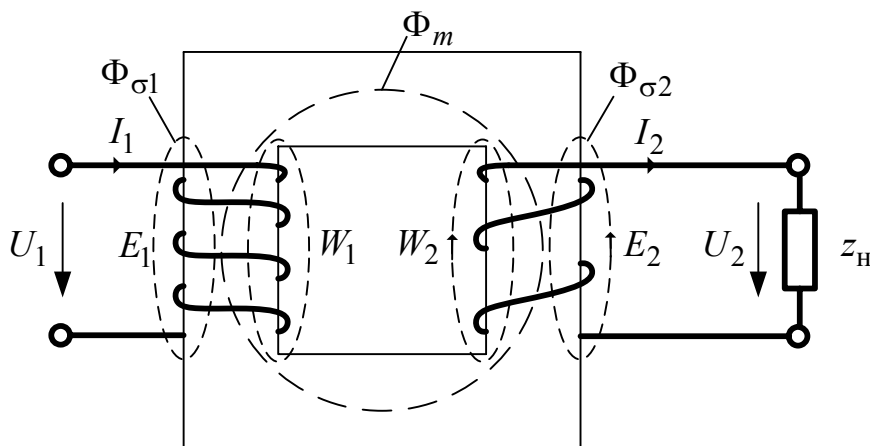


Рис. 1

В трехфазных сетях переменного тока в большинстве случаев используются трехфазные трансформаторы с несимметричным магнитопроводом (рис. 2). В первом приближении несимметрия не существенна, и все три фазы считаются полностью идентичными. Первичная и вторичная обмотки фаз располагаются на одном стержне одна над другой. Обмотки трехфазных трансформаторов, как первичные, так и вторичные, могут быть соединены в звезду или треугольник. И в том, и в другом случае при

одинаковом направлении намотки обмоток угол сдвига фазной вторичной ЭДС относительно первичной равен нулю (При разном направлении намотки и соответствующей маркировке зажимов обмоток –  $180^0$ ).

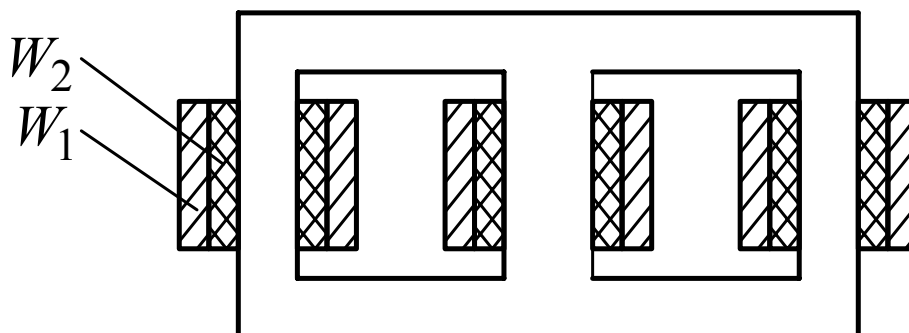


Рис. 2

Таким образом, в подавляющем большинстве случаев достаточно исследовать поведение одной фазы трансформатора.

Трансформатор рассчитывается на определенные условия работы, характеризующиеся номинальными величинами, значение которых приводятся на паспортном щитке. Номинальная полезная мощность  $S_H$  кВ·А – полная мощность трансформатора на зажимах вторичной обмотки. Для двухобмоточных силовых трансформаторов номинальная подведенная мощность (первичной обмотки) принимается равной номинальной полезной мощности (вторичной обмотки).

Номинальным напряжением обмотки трансформатора, не имеющей ответвлений,  $U_H$  называется напряжение между зажимами обмотки при холостом ходе трансформатора ( $z_H = \infty$ ).

Для номинального режима работы в паспорте трансформатора приводятся: напряжение короткого замыкания  $U_K$  (%) ( $I = I_H$ ,  $z_H = 0$ ), потери короткого замыкания  $P_K$  (кВт), ток холостого хода  $I_0$  (%) ( $U_1 = U_H$ ,  $z_H = \infty$ ) и потери холостого хода  $P_0$  (кВт). Перечисленных данных достаточно для построения векторной диаграммы и основных характеристик трансформатора для заданной нагрузки ( $z_H$ ).

При отсутствии паспорта трансформатора величины  $U_K$  (%),  $P_K$  (кВт),  $I_0$  (%) и  $P_0$  (кВт) определяются из опытов короткого замыкания и холостого хода.

При исследовании процессов в трансформаторе реальное устройство, имеющее индуктивную связь между первичной  $W_1$  и вторичной  $W_2$  обмотками, заменяется электрической схемой замещения (рис. 3).

В основе схемы лежит представление о том, что действие потоков рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$  эквивалентно действию индуктивных сопротивлений  $x_1$  и  $x_2$ , по которым текут токи  $I_1$  и  $I_2$ .

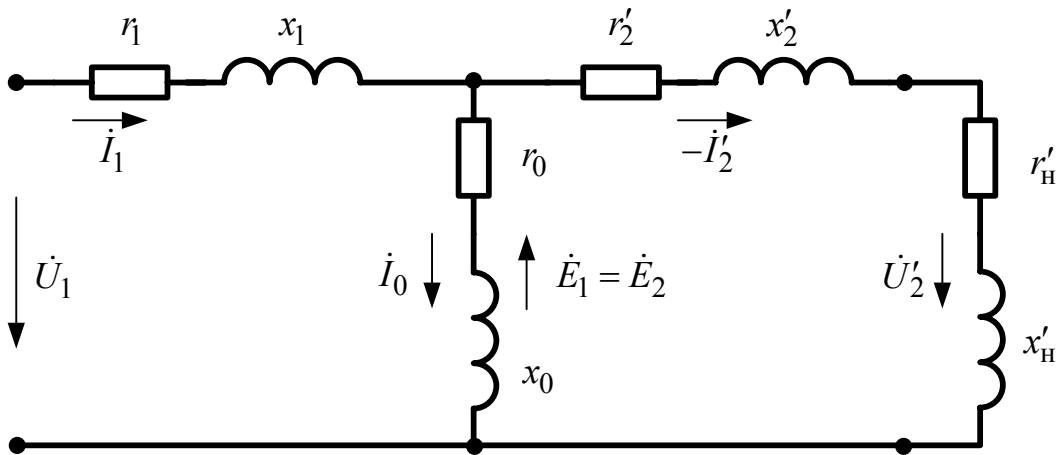


Рис. 3

Активные сопротивления соответственно первичной и вторичной обмоток обозначены  $r_1$  и  $r_2$ .

Стальной магнитопровод моделируется намагничивающей ветвью схемы, по которой течет намагничивающий ток  $I_0$ . Потери в стальном сердечнике определяются как потери в активном сопротивлении  $r_0$ . Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви  $x_1$  определяется основным магнитным потоком  $\Phi_m$ . Магнитный поток  $\Phi_m$  индуцирует в обмотках трансформатора ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ .

$$E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_m; E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_m.$$

$$\text{Коэффициент трансформации } K = \frac{W_1}{W_2}.$$

В общем случае  $W_1 \neq W_2$ ,  $E_1 \neq E_2$ ,  $I_1 \neq I_2$ . Для удобства исследования обе обмотки трансформатора приводятся к одному числу витков (обычно  $W_1$  – числу витков первичной обмотки) при условии, что эта опе-



рация не отразится на режиме работы первичной цепи, т.е. магнитный поток и мощность трансформатора не изменятся. Для этого достаточно:

$$\begin{aligned} E'_2 &= E_2 \frac{W_1}{W_2} E_2 K; & E'_{2\sigma} &= E_{2\sigma} K; \\ U'_2 &= U_2 K; & I'_2 &= I_2 \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_2}{K}; \\ r'_2 &= \left( \frac{I_2}{I'_2} \right)^2 r_2 = K^2 r_2; & x'_2 &= \frac{I_2}{I'_2} K = x_2 K^2; \end{aligned}$$

Обычно принимают  $r_1 \approx r'_2 = 0,5r_k$ ,  $x_1 \approx x'_2 = 0,5x_k$ .

Система уравнений для схемы замещения имеет вид

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1, \text{ где } z_1 = r_1 + jx'_1, \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2, \text{ где } z'_2 = r'_2 + jx'_2, \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2; \dot{U}_2 = \dot{I}'_2 z_H. \end{cases}$$

Индексом (') обозначаются приведенные значения токов, напряжений и сопротивлений. Величины их определяются из очевидных соотношений, приводимых в тексте примера выполнения курсовой работы.

## 1.2. Пример расчетно-графической работы №1: «Определение характеристик силового трансформатора по паспортным данным»

**Задание.** Определить параметры Т-схемы замещения, построить векторную диаграмму для  $K_H = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  и характеристики  $\Delta U \%(K_H)$ ,  $U_2(K_H)$ ,  $\eta \%(K_H)$  при  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . Нагрузка активно-индуктивная. Проанализировать полученные результаты.

**Пример.** Паспортные данные трехфазного масляного силового трансформатора ТМ-5600/35:  $S_H = 5600$  кВ·А,  $U_{1H}/U_{2H} = 35000/6600$  В,  $P_0 = 18,5$  кВт,  $I_0 = 4,5 \%$ ,  $f = 50$  Гц,  $m = 3$ , соединение обмоток Y/Δ,  $U_k = 7,5 \%$ ,  $P_k = 57$  кВт.

### 1.2.1. Параметры трансформатора

1. Номинальный ток стороны В.Н.  $I_{1Н} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1Н}} = \frac{5600}{\sqrt{3} \cdot 35} = 92,5 \text{ А}.$

2. Номинальный ток стороны Н.Н.  $I_{2Н} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{2Н}} = \frac{5600}{\sqrt{3} \cdot 6,6} = 490 \text{ А}.$

Фазный ток:  $I_{2Ф} = \frac{I_{2Н}}{\sqrt{3}} = \frac{490}{\sqrt{3}} = 283 \text{ А}.$

3. Фазное напряжение стороны В.Н.  $U_{1Ф} = \frac{U_{1Н}}{\sqrt{3}} = \frac{35000}{\sqrt{3}} = 20200 \text{ В}.$

4. Фазное напряжение стороны Н.Н.  $U_{2Ф} = U_{2Н} = 6600 \text{ В}.$

5. При группе соединений Y/Y  $U_{1Ф} = \frac{U_{1Н}}{\sqrt{3}}; U_{2Ф} = \frac{U_{2Н}}{\sqrt{3}}; I_{1Ф} = I_{1Н};$   
 $I_{2Ф} = I_{2Н}.$

6. При группе соединений Δ/Y  $U_{1Ф} = U_{1Н}; U_{2Ф} = \frac{U_{2Н}}{\sqrt{3}};$

$$I_{1Ф} = \frac{I_{1Н}}{\sqrt{3}}; I_{2Ф} = I_{2Н}.$$

7. При группе соединений Y/Δ  $U_{1Ф} = \frac{U_{1Н}}{\sqrt{3}}; U_{2Ф} = U_{2Н};$

$$I_{1Ф} = I_{1Н}; I_{2Ф} = \frac{I_{2Н}}{\sqrt{3}}.$$

8. Коэффициент трансформации  $K = \frac{U_{1Ф}}{U_{2Ф}} = \frac{20200}{6600} = 3,06.$

9. Фазный ток холостого хода со стороны В.Н.

$$I_{0Ф} = \frac{I_0\%}{100} I_{1Ф} = 0,045 \cdot 92,5 = 4,16 \text{ А}.$$

10. Мощность потерь холостого хода на фазу

$$P_{0Ф} = \frac{P_0}{m} = \frac{18500}{3} = 6170 \text{ Вт}.$$

11. Фазное напряжение короткого замыкания со стороны В.Н.

$$U_{кФ} = \frac{U_к\%}{100} U_{1Ф} = 0,075 \cdot 20200 = 1515 \text{ В}.$$

12. Мощность потерь короткого замыкания на фазу

$$P_{\text{кф}} = \frac{P_{\text{к}}}{m} = \frac{57000}{3} = 19000 \text{ Вт.}$$

13. Полная мощность на фазу  $S_{\text{ф}} = \frac{S_{\text{н}}}{m} = \frac{5600}{3} = 1867 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$

### **1.2.2. Параметры намагничивающей ветви T-схемы замещения**

14. Полное сопротивление  $z_0 = \frac{U_{1\text{ф}}}{I_{0\text{ф}}} = \frac{20200}{4,16} = 4860 \text{ Ом}.$

15. Активное сопротивление  $r_0 = \frac{P_{0\text{ф}}}{I_{0\text{ф}}^2} = \frac{6170}{4,16^2} = 360 \text{ Ом}.$

16. Реактивное сопротивление  $x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{4860^2 - 360^2} = 4850 \text{ Ом}.$

17. Угол между намагничивающим током  $I_{0\text{ф}}$  и потокосцеплением

$$\psi_m \quad \alpha_0 = \arctg \frac{r_0}{x_0} = \arctg \frac{360}{4850} = 4,25^\circ;$$

$$\cos \alpha_0 = 0,997; \quad \sin \alpha_0 = 0,074.$$

### **1.2.3. Параметры основной ветви T-схемы замещения**

18. Полное сопротивление  $z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{кф}}}{I_{1\text{ф}}} = \frac{1515}{92,5} = 16,4 \text{ Ом}.$

19. Активное сопротивление  $r_{\text{к}} = \frac{P_{\text{кф}}}{I_{1\text{ф}}^2} = \frac{19000}{92,5^2} = 2,2 \text{ Ом}.$

20. Реактивное сопротивление  $x_{\text{к}} = \sqrt{z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2} = \sqrt{16,4^2 - 2,2^2} = 16,3 \text{ Ом}.$

21. Активные и реактивные сопротивления обмоток В.Н. и Н.Н. в T-схеме замещения  $r_1 = r_2' = 0,5 r_{\text{к}} = 0,5 \cdot 2,2 = 1,1 \text{ Ом};$

$$x_1 = x_2' = 0,5 x_{\text{к}} = 0,5 \cdot 16,3 = 8,15 \text{ Ом}.$$

### 1.2.4. Параметры нагрузки

Эти величины определяются для номинальной мощности трансформатора  $S_H = 5600$  кВ·А, номинального напряжения на вторичной обмотке  $U_2 = 6600$  В и  $\cos \varphi = 0,8$ .

22. Активная мощность фазы  $P_{\text{фн}} = S_{\text{ф}} \cos \varphi_2 = 1\,867 \cdot 0,8 = 1\,494$  кВт.

23. Реактивная мощность фазы  $Q_{\text{фн}} = S_{\text{ф}} \sin \varphi_2 = 1\,867 \cdot 0,6 = 1\,120$  кВт.

24. Активное сопротивление фазы  $r_H = \frac{P_{\text{фн}}}{I_{2\text{ф}}^2} = \frac{149\,4000}{283^2} = 18,7$  Ом.

25. Реактивное сопротивление фазы  $x_H = \frac{Q_{\text{фн}}}{I_{2\text{ф}}^2} = \frac{1\,120\,000}{283^2} = 14$  Ом.

26. Приведенные активное и реактивное сопротивления фазы

$$r'_H = r_H K^2 = 18,7 \cdot 3,06^2 = 175,1 \text{ Ом};$$

$$x'_H = x_H K^2 = 14 \cdot 3,06^2 = 131,1 \text{ Ом}.$$

27. Приведенное напряжение на нагрузке

$$U'_2 = U_2 \cdot K = U_1 = 6600 \cdot 3,06 = 20200 \text{ В};$$

28. Приведенное полное сопротивление нагрузки

$$z'_H = \sqrt{r'^2_H + x'^2_H} = \sqrt{175,1^2 + 131,1^2} = 218,7 \text{ Ом}.$$

29. Угол между током  $I_2'$  и  $U_2'$   $\varphi_2 = \arccos 0,8 = 36,8^\circ$ .

30. Т-схема замещения представлена на рис. 4.

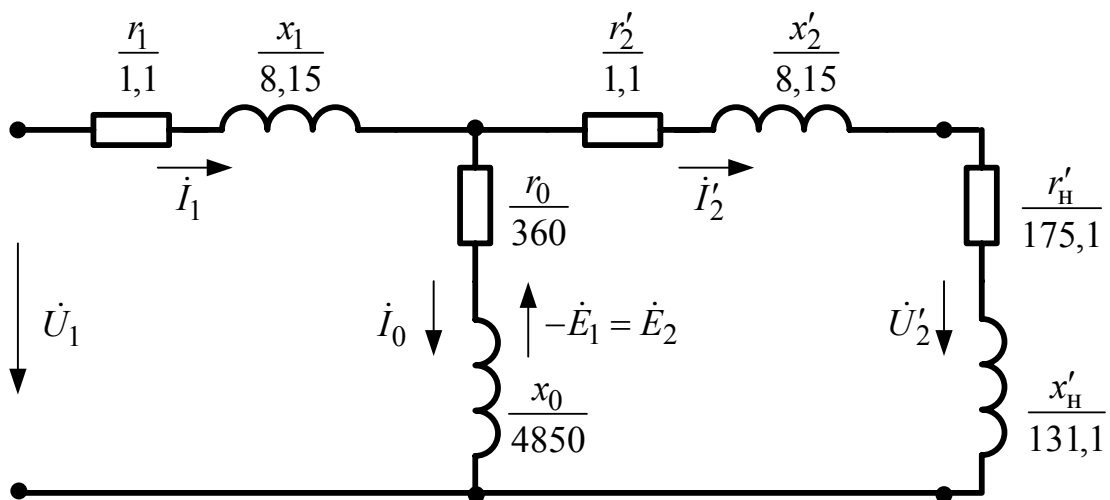


Рис. 4

### 1.2.5. Построение векторной диаграммы

Векторная диаграмма строится для номинальной мощности трансформатора  $S_H = 5600$  кВ·А и номинального напряжения на вторичной обмотке  $U_{2H} = 6600$  В.

За основу построения берется вектор  $\dot{U}'_2$ . В соответствии с этим система уравнений трансформатора имеет вид:

$$\begin{cases} -\dot{E}'_2 = -\dot{U}'_2 + I'_2 r'_2 + jI'_2 x'_2; \\ -\dot{U}'_1 = -\dot{E}'_1 + \dot{I}'_1 r'_1 + j\dot{I}'_1 x'_1; \\ \dot{I}'_1 = \dot{I}'_2 + I_0. \end{cases}$$

Качественно векторная диаграмма для вторичной обмотки приведена на рис. 5.

Для удобства предварительного построения вектор  $\dot{U}'_2$  направлен вдоль мнимой оси.

Угол

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_H + x'_2}{r'_H + z'_2} = \arctg \frac{131 + 8}{175 + 1} = 38,3^\circ.$$

$$\text{Угол } \gamma_2 = \psi_2 - \varphi_2 = 38,3^\circ - 36,8^\circ = 1,5^\circ.$$

$$\text{Ток } I'_2 = \frac{I_2}{K} = \frac{283}{3,06} = 92,5 \text{ А};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}'_2 &= -I_2 \cos(90^\circ - \varphi_2) - jI_2 \sin(90^\circ - \varphi_2) = \\ &= -92,5 \cdot 0,6 - j92,5 \cdot 0,8 = -55,5 - j74. \end{aligned}$$

$$\dot{E}'_2 = -jU'_2 + \dot{I}'_2 r_2 + jI'_2 x'_2 = -j20200 +$$

$$+ (-55,5 - j74) \cdot 1,1 + j(-55,5 - j74) \cdot 8,15 = 542 - j20734;$$

$$E'_2 = \sqrt{542^2 + 20734^2} = 20741 \text{ В}.$$

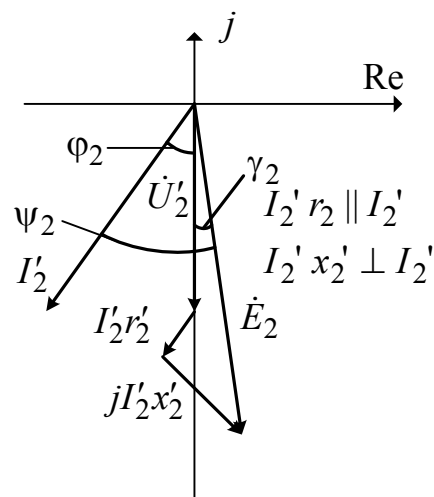


Рис. 5

Качественно векторная диаграмма трансформатора имеет обычный вид (рис. 6). В соответствии с уравнением трансформатора [5] система векторов напряжений и токов повернута на угол  $\gamma_2$  по часовой стрелке. В тексте РГР векторная диаграмма строится по вычисленным значениям векторов и углов. Целесообразно строить векторы по их составляющим на действительной и мнимой осях. Масштаб выбирается таким, чтобы векторная диаграмма уместилась на стандартном листе.

$$\text{Потокоцепление } \psi_m = \frac{E_{1\phi}}{4,44f} = \frac{20\,200}{4,44 \cdot 50} = 91 \text{ Вб}.$$

$$\begin{aligned} \text{Намагничивающий ток } \dot{I}_0 &= I_0 \cos \alpha_1 + jI_0 \sin \alpha_0 = \\ &= 4,16 \cos 4,25^\circ + j4,16 \sin 4,25^\circ = 4,15 + j0,31. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Напряжение } \dot{U}'_2 &= U'_2 \left[ -\cos(90^\circ - \gamma_2) - j \sin(90^\circ - \gamma_2) \right] = \\ &= 20\,200 \left( -\cos 88,5^\circ - j \sin 88,5^\circ \right) = -528,8 - j20\,193. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ток } \dot{I}'_2 &= I'_2 \left[ -\cos(90^\circ - \gamma_2) - j \sin(90^\circ - \gamma_2) \right] = \\ &= 92,5 \left( -\cos 51,7^\circ - j \sin 51,7^\circ \right) = -57,3 - j72,6. \end{aligned}$$

$$\text{Ток } \dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 + \dot{I}_0 = 57,3 + j72,6 + 4,15 + j0,31 = 61,5 + j72,9;$$

$$I_1 = \sqrt{61,5^2 + 72,9^2} = 95,4 \text{ А}.$$

$$\begin{aligned} \text{Напряжение } \dot{U}_1 &= -j\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 = j20\,741 + (61,5 + j72,9)1,1 + \\ &+ j(61,5 + j72,9)8,15 = -526 + j21\,322; \end{aligned}$$

$$U_1 = \sqrt{526^2 + 21322^2} = 21\,328 \text{ В}.$$

$$\text{Угол } \gamma_1 = \arctg \frac{U_a}{U_p} = \arctg \frac{526}{21322} = 1,4^\circ.$$

$$\text{Угол } \psi_1 = \arctg \frac{I_{1a}}{I_{1p}} = \arctg \frac{61,5}{72,9} = 40,2^\circ.$$

$$\text{Угол } \varphi_1 = \gamma_1 + \psi_1 = 1,4^\circ + 40,2^\circ = 41,6^\circ;$$

$$\cos \varphi_1 = 0,75; \quad \sin \varphi_1 = 0,66.$$

Ток и напряжение вторичной обмотки практически находятся в противофазе к току и напряжению первичной обмотки.

При  $U_2 = U_{2н} = 6\ 600$  В на стороне В.Н. должно быть  $U_1 = \sqrt{3} \cdot 21328 = 36900$  В = 36,9 кВ.

Реально такого уровня напряжения в сети 35 кВ не будет. Для получения  $U_2 = U_{2н}$  необходимо воспользоваться переключением ступеней напряжения. Коэффициенты мощности на стороне В.Н. и Н.Н. отличаются мало и практически определяются  $\cos\varphi$  нагрузки.

Падение напряжения на трансформаторе

$$\begin{aligned} \Delta U\% &= \frac{U_1 - U_{1н}}{U_1} 100\% = \\ &= \frac{36,9 - 35}{36,9} 100\% = 5,15\%. \end{aligned}$$

На практике падение напряжения в трансформаторе определяется с помощью приближенных формул, что менее громоздко и даёт достаточную точность.

Характеристики  $\Delta U\%(K_H)$  и  $U_2(K_H)$  строятся для  $U_1 = U_{1н} = 35$  кВ (рис. 7). Используется упрощенная формула, дающая вполне удовлетворительную точность. Результаты представляются в виде таблицы (табл.1).

$$\Delta U = K_H (U_{ка} \cos \varphi_2 + U_{кр} \sin \varphi_2); \quad K_H = \frac{I_2}{I_{2н}};$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8; \quad \sin \varphi_2 = 0,6;$$

$$U_{ка} = \frac{I_{1н} r_k}{U_{1ф}} 100 = \frac{92,5 \cdot 2,2}{20\ 200} 100 = 1\%;$$

$$U_{кр} = \frac{I_{1н} x_k}{U_{1ф}} 100 = \frac{92,5 \cdot 16,3}{20\ 200} 100 = 7,46\%;$$

$$\Delta U = K_H (1 \cdot 0,8 + 7,46 \cdot 0,6) = 5,28 K_H;$$

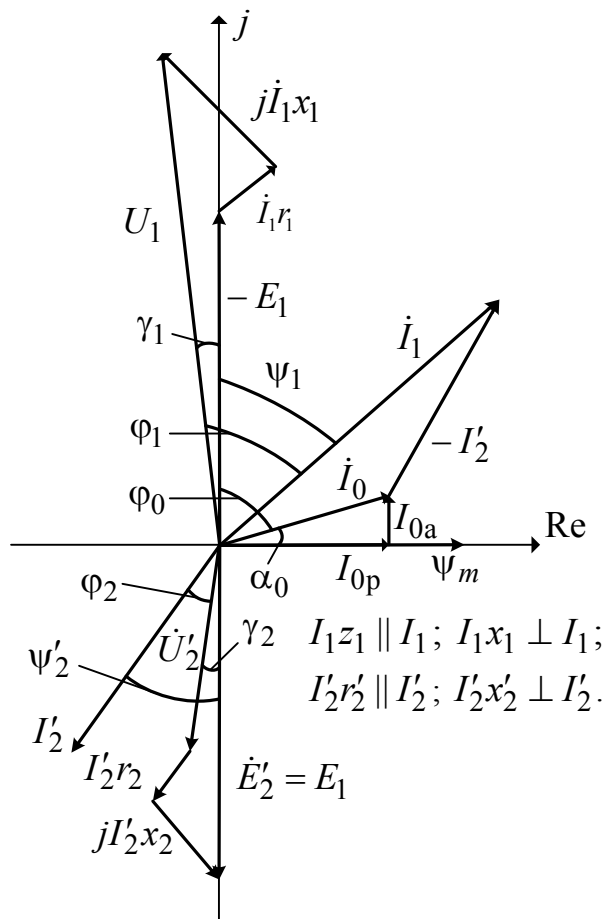


Рис. 6

$$U_2 = U_{2H} \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right) = 6\,600 - 66\Delta U.$$

Таблица 1

| $K_H$ | $\Delta U, \%$ | $U_2, В$ |
|-------|----------------|----------|
| 0     | 0              | 6 600    |
| 0,25  | 1,32           | 6 513    |
| 0,5   | 2,64           | 6 426    |
| 0,75  | 3,96           | 6 339    |
| 1     | 5,28           | 6 252    |

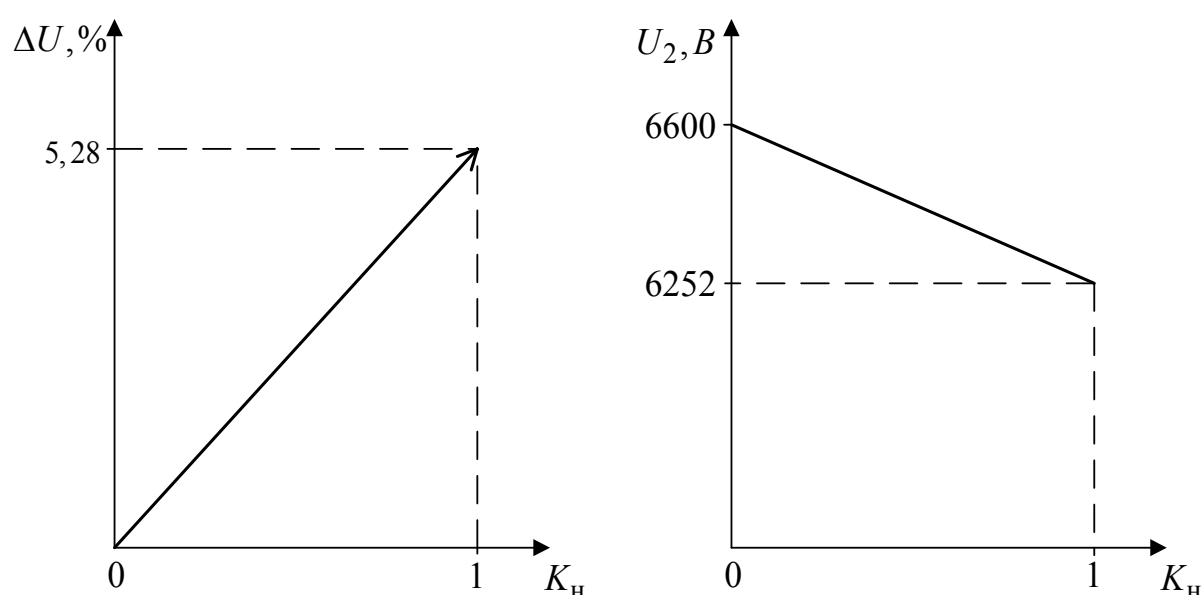


Рис. 7

Ошибка составила  $\Delta = \frac{5,28 - 5,15}{5,28} 100 = 2,5 \%$ , что для практических целей вполне удовлетворительно.

Мощность трансформатора на стороне Н.Н. с учетом падения напряжения при номинальной загрузке по току

$$S = mI_{2\phi}U_{2\phi} = 3 \cdot 283 \cdot 6252 = 5310000 \text{ В} \cdot \text{А} = 5310 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$P = S \cos \varphi_2 = 5310 \cdot 0,8 = 4248 \text{ кВт}.$$

Мощность уменьшилась на  $\Delta S = \frac{5600 - 5310}{5600} 100 \% = 5,2 \%$ .



Таким образом, для получения номинальной мощности необходимо использовать переключатель ступеней напряжения.

Характеристика  $\eta(K_H)$ ,  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (рис. 8). Результаты представляются в виде таблицы (табл. 2).

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_0 + K_H^2 P_K}{K_H S_H \cos \varphi_2 + P_0 + K_H^2 P_K} \right) 100 \% ;$$

$$\eta = \left( 1 - \frac{18,5 + K_H^2 57}{K_H 5600 \cdot 0,8 + 18,5 + K_H^2 57} \right) 100 \% ;$$

$$K_{\text{НОПТ}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{18,5}{57}} = 0,57 .$$

Таблица 2

|            |   |      |      |      |      |
|------------|---|------|------|------|------|
| $K_H$      | 0 | 0,25 | 0,57 | 0,75 | 1    |
| $\eta, \%$ | 0 | 98,1 | 98,6 | 98,5 | 98,3 |

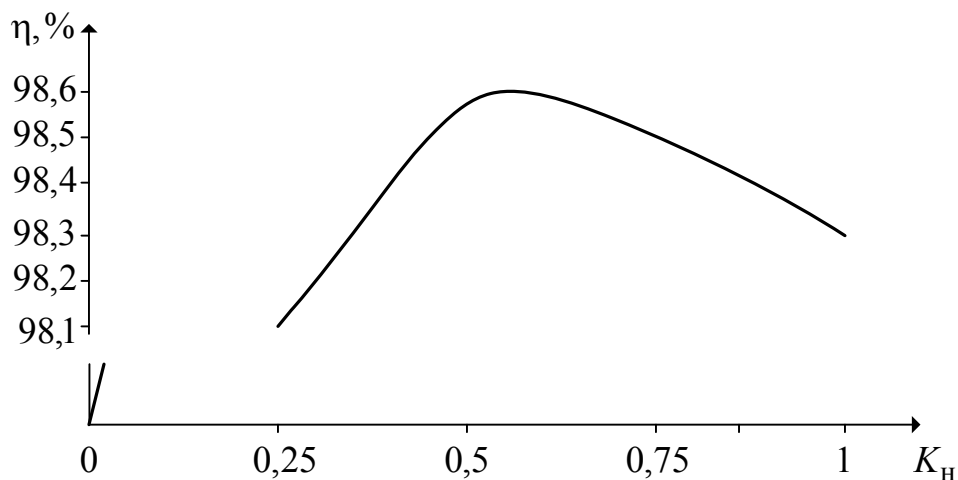


Рис. 8

При наличии на подстанции нескольких трансформаторов нагрузку каждого из них следует держать в районе  $K_{\text{НОПТ}}$ .

При выполнении курсовой работы вариант выбирается из табл. 3. Номер варианта соответствует номеру студента по журналу.

### 1.3. Исходные данные к вариантам заданий расчетно-графической работы № 1

Исходные данные к вариантам заданий расчетно-графической работы № 1 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Масляные двухобмоточные трансформаторы  
общего назначения классов напряжения 10 и 35 кВ

| №<br>п/п   | Группа соединения обмоток | Тип трансформатора | Верхний предел<br>номинального<br>напряжения<br>обмоток, кВ |          | Напряжение короткого<br>замыкания, % | Ток холостого хода, % | Потери, кВт                                       |  |
|--|---------------------------|--------------------|---|----------|--------------------------------------|-----------------------|---|--|
|  |                           |                    | ВН  | НН       |                                      |                       | Холостого хода при<br>номинальном на-<br>пряжении | Короткого<br>замыкания при но-<br>минальном токе |
|  |                           |                    | $U_{н1}$  | $U_{н2}$ |                                      |                       |   |  |
| 1  | 2                         | 3                  | 4   | 5        | 6                                    | 7                     | 8   | 9  |
| Трансформаторы классов напряжения 10 и 35 кВ,<br>соответствующие требованиям ГОСТ 12022-66 (ПВВ) |                           |                    |   |          |                                      |                       |   |  |
| 1  | Y/Y                       | ТМ-25/10           | 10  | 0,4      | 4,5                                  | 3,2                   | 0,125   | 0,600  |
| 2  | Y/Y                       | ТМ-40/10           | 10  | 0,4      | 4,5                                  | 3,0                   | 0,180   | 0,800  |
| 3  | Y/Y                       | ТМ-63/10           | 10  | 0,4      | 4,5                                  | 2,8                   | 0,265   | 1,280  |
| 4  | Y/Y                       | ТМ-100/10          | 10  | 0,4      | 4,5                                  | 2,6                   | 0,365   | 1,970  |
| 5  | Y/Y                       | ТМ-160/10          | 10  | 0,69     | 4,5                                  | 2,4                   | 0,540   | 2,650  |
| 6  | Y/Y                       | ТМ-250/10          | 10  | 0,69     | 4,5                                  | 2,3                   | 0,780   | 3,700  |
| 7  | Y/Y                       | ТМ-400/10          | 10  | 0,69     | 4,5                                  | 2,1                   | 1,080   | 5,500  |
| 8  | Y/Y                       | ТМ-630/10          | 10  | 3,15     | 5,5                                  | 2,0                   | 1,680   | 7,600  |
| 9  | Y/Y                       | ТМ-100/35          | 35  | 0,4      | 6,5                                  | 2,6                   | 0,465   | 1,970  |
| 10   | Y/Y                       | ТМ-160/35          | 35  | 0,69     | 6,5                                  | 2,4                   | 0,660   | 2,650  |
| 11   | Y/Y                       | ТМ-250/35          | 35  | 0,69     | 6,5                                  | 2,3                   | 0,960   | 3,700  |
| 12   | Y/Y                       | ТМ-400/35          | 35  | 0,69     | 6,5                                  | 2,1                   | 1,350   | 5,500  |
| 13   | Y/Y                       | ТМ-630/35          | 35  | 11       | 6,5                                  | 2,0                   | 2,000   | 7,600  |

| 1  | 2   | 3             | 4    | 5    | 6   | 7    | 8     | 9     |
|--|-----|---------------|------|------|-----|------|-------|-------|
| Трансформаторы классов напряжения 10 и 35 кВ,<br>соответствующие требованиям ГОСТ 11920-66 (ПБВ) |     |               |      |      |     |      |       |       |
| 14   | Y/Δ | ТМ-1 000/10   | 10   | 6,3  | 5,5 | 1,4  | 2,45  | 12,2  |
| 15   | Y/Δ | ТМ-1 600/10   | 10   | 6,3  | 5,5 | 1,3  | 3,30  | 18,0  |
| 16   | Y/Δ | ТМ-2 500/10   | 10   | 6,3  | 5,5 | 1,0  | 4,60  | 25,0  |
| 17   | Y/Δ | ТМ-4 000/10   | 10   | 6,3  | 6,5 | 0,9  | 6,40  | 33,5  |
| 18   | Y/Δ | ТМ-6 300/10   | 10   | 6,3  | 6,5 | 0,8  | 9,00  | 46,5  |
| 19   | Y/Δ | ТМ-1 000/35   | 35   | 10,5 | 6,5 | 1,5  | 2,75  | 12,2  |
| 20   | Y/Δ | ТМ-1 600/35   | 35   | 10,5 | 6,5 | 1,4  | 3,65  | 18,0  |
| 21   | Y/Δ | ТМ-2 500/35   | 35   | 10,5 | 6,5 | 1,1  | 5,10  | 25,0  |
| 22   | Y/Δ | ТМ-4 000/35   | 35   | 10,5 | 7,5 | 1,0  | 6,70  | 33,5  |
| 23   | Y/Δ | ТМ-6 300/35   | 35   | 10,5 | 7,5 | 0,9  | 9,40  | 46,5  |
| 24   | Y/Δ | ТД-10 000/35  | 38,5 | 10,5 | 7,5 | 0,8  | 14,50 | 65,0  |
| 25   | Y/Δ | ТД-16 000/35  | 38,5 | 10,5 | 8,0 | 0,75 | 21,00 | 90,0  |
| 26   | Y/Δ | ТД-40 000/35  | 38,5 | 10,5 | 8,5 | 0,65 | 39,00 | 180,0 |
| 27   | Y/Δ | ТДЦ-80 000/35 | 38,5 | 10,5 | 9,0 | 0,60 | 65,00 | 330,0 |

## 2. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 2.1. Краткие теоретические сведения

Трехфазная обмотка, расположенная на статоре, создает вращающееся магнитное поле, первая гармоника которого вращается относительно статора со скоростью  $n_1 = \frac{60f}{p}$ , ( $p$  – число пар полюсов статора). Если

цепь ротора замкнута, в ней возникает ток  $I_2$ , в результате взаимодействия которого с магнитным полем статора возникает электромагнитный момент.

Скорость вращения ротора  $n$  в асинхронных машинах отличается от скорости вращения магнитного поля статора  $n_1$ . При  $n = n_1$  ротор неподвижен относительно поля статора, ЭДС  $E_2$  в обмотке ротора и ток  $I_2$  равны нулю, электромагнитный момент отсутствует. Скольжение асинхронной машины  $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$  – одна из наиболее важных величин, определяющих

режим работы машины.

В обычной асинхронной машине между ее статором и ротором существует только индуктивная связь, такая же, как и между первичной и вто-

ричной обмотками трансформатора. Таким образом, асинхронная машина по существу представляет собой трансформатор, отличающийся от обычного трансформатора только конструкцией, наличием воздушного зазора в магнитопроводе, распределенной обмоткой ротора и статора и т.д. Математические соотношения, имеющие место для трансформатора, справедливы и для асинхронной машины.

В данной работе используется Г-образная схема замещения с вынесенной на зажимы внешней сети намагничивающей ветвью (рис. 9).

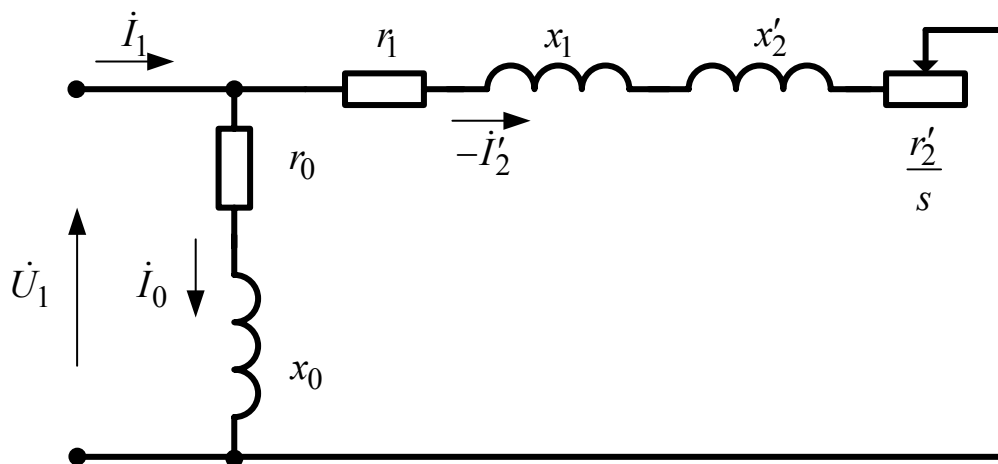


Рис. 9

В основе схемы лежит представление о том, что в воздушном зазоре между ротором и статором есть только основная гармоника магнитного поля, а параметры ротора  $r_2'$  и  $x_2'$  постоянны и не зависят от величины тока ротора  $I_2'$ . В действительности, в силу вытеснения тока в стержнях ротора и магнитного насыщения пазовой части пакета ротора в двигателях с короткозамкнутым ротором, эти параметры существенно переменны и требуют расчета для каждого конкретного значения скольжения  $s$ .

Во вращающемся роторе частота тока  $f_2 = fs$ , ЭДС  $E_{2s} = E_2s$ ,  $x_{2s} = x_2s$ .

$$\text{По закону Ома } I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2'^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2s}{\sqrt{r_2'^2 + (x_2s)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2^2}}.$$

Ток ротора  $I_2$  создает намагничивающую силу  $F_2$  и соответственно магнитное поле, вращающееся относительно ротора со скоростью  $n_2 = n_1s$ .

Кроме того, сам ротор вращается со скоростью  $n = n_1(1 - s)$ . Скорость вращения магнитного поля ротора относительно статора, т.е. в пространстве  $n_2 + n = n_1s + n_1(1 - s) = n_1$ .

Магнитное поле ротора вращается относительно поля статора с той же скоростью  $n_1$  и в ту же сторону, что и магнитное поле статора. Следовательно, магнитное поле статора и магнитное поле ротора относительно друг друга неподвижны.

Электромагнитный вращающий момент  $M_{\text{эм}} = \frac{m_1 I_2^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1}$ . Этот мо-

мент учитывается потерями в приведенном активном сопротивлении ротора  $r_2'$ .  $M_{\text{эм}}$  обратно пропорционален скольжению  $s$ .

Таким образом, явления во вращающемся роторе могут быть сведены к явлениям в неподвижном роторе, когда частота тока  $I_2$  и ЭДС  $E_2$  равны частоте  $f$  питающей сети, а величина активного сопротивления  $r_2$  обратно пропорциональна скольжению  $s$ .

В намагничивающей ветви  $x_0 = x_m + x_1$ ,  $r_0 = r_m + r_1$ ,  $x_m$  и  $r_m$  относятся к магнитопроводу,  $x_1$  и  $r_1$  – к обмотке статора.

На паспортной табличке двигателя указывается мощность  $P_{\text{н}}$ , кВт; КПД  $\eta$ , %;  $\cos \varphi$ ;  $n_{\text{н}}$ , об/мин;  $U$ , В, А, Гц; число фаз  $m_1$ . В каталогах приводятся кратности пускового момента  $K_{\text{п}}$ , пускового тока  $K_1$ , максимального момента  $K_{\text{max}}$  и минимального момента  $K_{\text{min}}$ .

Для построения характеристик двигателя необходимы также значения потерь холостого хода  $P_0$ , кВт и тока холостого хода  $I_0$ , А. Величина их определяется из опыта холостого хода. Для наших целей можно принять  $P_0 = 0,05P_{\text{н}}$ ,  $I_0 = 0,2I_{\text{н}}$ .

Провал в кривой момента  $M(s)$  при скольжении  $s \approx 0,8 \div 0,9$  обусловлен в основном действием седьмой и пятой высших пространственных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре  $\nu = 6K \pm 1$ ,  $K = 1$ . Седьмая гармоника вращается в ту же сторону, что и основная, пятая – в обратную.

## 2.2. Определение характеристик трехфазного асинхронного двигателя по паспортным данным

**Задание.** Определить параметры упрощенной Г-образной схемы замещения для пускового и номинального режимов. Построить векторную диаграмму для номинального режима. Построить механическую характеристику  $M(s)$ . Объяснить полученные результаты.

**Пример.** Паспортные данные трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: тип 4А112МЧУЗ,  $P_H = 5,5$ ,  $n_H = 1445$  об/мин,

$$U_1 = 380 \text{ В}, \quad \eta = 85,5\%, \quad \cos \varphi = 0,85, \quad K_I = \frac{I_{II}}{I_H} = 7, \quad K_{II} = \frac{M_{II}}{M_H} = 2,$$

$$K_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_H} = 2,2, \quad K_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_H} = 1,6, \quad f = 50 \text{ Гц}, \quad m_1 = 3, \quad 2p = 4.$$

### 2.2.1. Параметры двигателя

1. Потребляемая мощность  $P_1 = \frac{P_H}{\eta} = \frac{5,5}{0,855} = 6,433 \text{ кВт}.$

2. Номинальный ток  $I_H = \frac{P_1 10^3}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi} = \frac{6,433 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 11,51 \text{ А}.$

3. Номинальный момент  $M_H = \frac{60 P_H 10^3}{2\pi n_H} = \frac{60 \cdot 5,5 \cdot 10^3}{2\pi 14,45} = 36,37 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

4. Номинальное скольжение  $s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1445}{1500} = 0,0367;$

$$s_H = 3,67 \%$$

5. Пусковой момент  $M_{II} = K_{II} M_H = 2 \cdot 36,37 = 72,74 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

6. Пусковой ток  $I_{II} = K_I I_H = 7 \cdot 11,51 = 80,57 \text{ А}.$

7. Максимальный момент  $M_{\max} = K_{\max} M_H = 2,2 \cdot 36,37 = 80,01 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

8. Минимальный момент  $M_{\min} = K_{\min} M_H = 1,6 \cdot 36,37 = 58,19 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

9. Фазное напряжение  $U_{\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$

10. Потери холостого хода  $P_0 = 0,05P_H = 0,05 \cdot 5,5 = 0,275$  кВт.

11. Ток холостого хода  $I_0 = 0,2I_H = 0,2 \cdot 11,51 = 2,30$  А.

Упрощенная схема замещения приведена на рис. 9.

### 2.2.2. Параметры намагничивающей ветви

12. Коэффициент мощности  $\cos \varphi_0 = \frac{P_0 10^3}{m_1 U_\phi I_0} = \frac{0,275 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 2,3} = 0,181$ ;

$$\varphi_0 = 79,57^\circ; \quad \sin \varphi_0 = 0,983.$$

13. Полное сопротивление  $z_0 = \frac{U_\phi}{I_0} = \frac{220}{2,3} = 95,65$  Ом.

14. Активное сопротивление  $r_0 = z_0 \cos \varphi_0 = 95,65 \cdot 0,181 = 17,31$  Ом.

15. Реактивное сопротивление  $x_0 = z_0 \sin \varphi_0 = 95,65 \cdot 0,983 = 94,02$  Ом.

### 2.2.3. Параметры главной ветви схемы замещения при пусковом режиме ( $s = 1$ )

16. Полное сопротивление  $z_K = \frac{U_\phi}{I_\Pi} = \frac{220}{80,57} = 2,731$  Ом.

17. Приведенное активное сопротивление ротора

$$r'_2 = \frac{M_\Pi 2\pi f S}{I_\Pi^2 m_1 p} = \frac{72,74 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 1}{3 \cdot 2 \cdot 80,57^2} = 0,586 \text{ Ом.}$$

18. Активное сопротивление статора  $r_1 = r'_2 = 0,586$  Ом.

19. Активное сопротивление  $r_K = r_1 + \frac{r'_2}{S} = 0,586 + \frac{0,586}{1} = 1,172$  Ом.

20. Реактивное сопротивление  $x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{2,731^2 - 1,172^2} = 2,467$  Ом.

21. Индуктивное сопротивление статора и приведенное индуктивное сопротивление ротора  $x_1 = x'_2 = \frac{x_K}{2} = \frac{2,467}{2} = 1,234$  Ом.

22. Расчетный пусковой момент ( $S = 1$ )

$$M_{\text{пр}} = \frac{m_1 p U_{\phi}^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2 \frac{0,586}{1}}{2\pi 50 (1,172^2 + 2,467^2)} = 72,65 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$K_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}}}{M_{\text{н}}} = \frac{72,65}{36,37} = 1,997 \approx K_{\text{пн}} = 2.$$

23. Расчетный максимальный момент  $M_{\text{max p}} = \frac{1}{2} \frac{m_1 p U_{\phi}^2}{2\pi f [r_1 + (x_1 + x_2')]} =$

$$= \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2}{2 \cdot 2\pi \cdot 50 (0,586 + 2,467)} = 254 \text{ Н} \cdot \text{м} \gg M_{\text{max н}} = 80,01 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$K_{\text{max p}} = \frac{M_{\text{max p}}}{M_{\text{н}}} = \frac{151,46}{36,37} = 6,98.$$

24. Расчетный номинальный момент ( $s = s_{\text{н}} = 0,0367$ )

$$M_{\text{пр}} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2 \frac{0,586}{0,0367}}{2\pi \cdot 50 \left[ \left( 0,586 + \frac{0,586}{0,0367} \right)^2 + (1,234 + 1,234)^2 \right]} =$$

$$= 52,71 \text{ Н} \cdot \text{м} \gg M_{\text{н}} = 36,37 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определенные из условий короткого замыкания (пусковой режим) параметры схемы замещения не пригодны для расчета критического и номинального режимов двигателя. Причина – нелинейная зависимость сопротивлений  $r_2'$  и  $x_2'$  ротора от величины его тока. Они не пригодны также для построения характеристики  $M(s)$ .



**2.2.4. Параметры главной ветви схемы замещения  
при номинальном режиме ( $s_H = 0,0367$ )**

25. Комплекс номинального тока  $\cos \varphi_H = 0,85$ ;  $\varphi_H = 31,79^0$ ;  
 $\sin \varphi_H = 0,527$ ;

$$\begin{aligned} \dot{I}_H &= I_{Ha} + I_{Hp} = I_H \cos \varphi_H - jI_H \sin \varphi_H = \\ &= 11,51 \cdot 0,85 - j11,51 \cdot 0,527 = 9,78 - j6,07 \text{ A.} \end{aligned}$$

26. Комплекс намагничивающего тока

$$\dot{I}_0 = I_0 \cos \varphi_0 - jI_0 \sin \varphi_0 = 2,3 \cdot 0,181 - j2,3 \cdot 0,983 = 0,416 - j2,26 \text{ A};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{I_{0p}}{I_{0a}} = \frac{2,26}{0,416} = 5,433; \quad \varphi_0 = 79,57^0; \quad \sin \varphi_0 = 0,983;$$

$$\cos \varphi_0 = 0,181.$$

27. Комплекс тока рабочей ветви

$$\dot{I}'_{2H} = \dot{I}_H - \dot{I}_0 = 9,78 - j6,07 + j2,26 - 0,416 = 9,36 - j3,81;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{I'_{2p}}{I'_{2a}} = \frac{3,81}{9,36} = 0,407;$$

$$\varphi_2 = 22,15^0; \quad \cos \varphi_2 = 0,926; \quad \sin \varphi_2 = 0,377;$$

$$I'_{2H} = \sqrt{I'_{2a}{}^2 + I'_{2p}{}^2} = \sqrt{9,36^2 + 3,81^2} = 10,12 \text{ A.}$$

28. Приведенное активное сопротивление ротора

$$r'_2 = \frac{M_H \cdot 2\pi \cdot f \cdot S_H}{m_1 p I'_{2H}{}^2} = \frac{36,37 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,0367}{3 \cdot 2 \cdot 10,12^2} = 0,682 \text{ Ом.}$$

29. Активное сопротивление статора  $r_1 = r'_2 = 0,682 \text{ Ом.}$

30. Полное сопротивление основной ветви

$$z_H = \frac{U_\phi}{I'_{2H}} = \frac{220}{10,12} = 21,74 \text{ Ом.}$$

31. Приведенное номинальное активное сопротивление ротора

$$r'_{2H} = \frac{r'_2}{S_H} = \frac{0,682}{0,0367} = 18,583 \text{ Ом.}$$

32. Индуктивное сопротивление основной ветви

$$x_H = \sqrt{z_H^2 - (r_1 + r'_{2H})^2} = \sqrt{21,74^2 - (0,682 + 18,583)^2} = 10,07 \text{ Ом}.$$

33. Индуктивное сопротивление статора и ротора

$$x_1 = x'_2 = \frac{x_H}{2} = \frac{10,07}{2} = 5,04 \text{ Ом}.$$

34. Ток главной ветви

$$I'_{2H} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(r_1 + r'_{2H})^2 + x_H^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0,682 + 18,583)^2 + 10,07^2}} = 10,12 \text{ А}.$$

Величина  $I'_{2H}$  точно совпала с величиной, полученной в п. 27 из комплекса  $\dot{I}'_{2H}$ . Вычисления проведены верно.

35. Расчетный номинальный момент

$$M_{нр} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2 \cdot \frac{0,682}{0,0367}}{2\pi 50 \left( (0,682 + 18,583)^2 + 10,08^2 \right)} = 36,25 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_H = 36,37 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx M_{нр} = 36,25 \text{ Н} \cdot \text{м}; \Delta M \% = 0,33 \%.$$

36. Расчетный пусковой момент

$$M_{пр} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2 \cdot 0,682}{2\pi 50 \left( (0,682 + 0,682)^2 + (5,04 + 5,04)^2 \right)} = 6,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{пр} = 6,1 \text{ Н} \cdot \text{м} \ll M_{пн} = 71,74 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

37. Расчетный максимальный момент

$$M_{\max p} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 220^2}{2 \cdot 2\pi 50 (0,682 + 10,08)} = 43,0 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max p} = 43 \text{ Н} \cdot \text{м} \ll M_{\max H} = 80 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Параметры схемы замещения пригодны для расчета номинального режима и построения векторной диаграммы и не пригодны для построения

механической характеристики  $M(s)$ , а так же для расчета пускового и критического режимов. Пояснить результаты п.п. 16 – 37.

38. Векторная диаграмма двигателя для номинального режима (рис. 10).

$$\begin{aligned} \dot{U}_H &= 220 \text{ В}; \dot{I}_H = 9,78 - j6,07 \text{ А}; \cos \varphi_H = 0,85; \varphi_H = 31,79^\circ; \\ \sin \varphi_H &= 0,527; \dot{I}_0 = 0,416 - j2,26; \cos \varphi_0 = 0,181; \varphi_0 = 79,57^\circ; \\ \sin \varphi_0 &= 0,983; \dot{I}'_{2H} = 9,36 - j3,81; \cos \varphi_2 = 0,926; \varphi_2 = 22,15^\circ; \\ \sin \varphi_2 &= 0,377. \end{aligned}$$

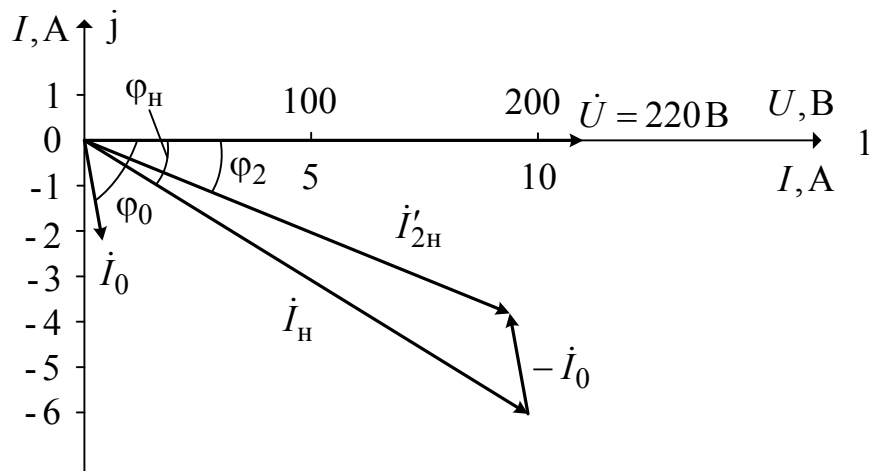


Рис. 10

### 2.2.5. Механическая характеристика

В силу нелинейной зависимости сопротивлений  $r'_2$  и  $x'_2$  ротора от величины его тока общую формулу для  $M(s)$  использовать нельзя. В рамках данной курсовой работы  $M(s)$  строится приближенно по известным из паспортных данных двигателя точкам  $M_H$ ,  $M_{кр} = M_{max}$ ,  $M_{min}$  и  $M_{п}$ . Величина  $s_{кр}$  определяется из упрощенной формулы Клосса:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

39. Критическое скольжение

$$s_{кр} = \frac{M_{max} s_H}{M_H} \pm \sqrt{\left(\frac{M_{max} s_H}{M_H}\right)^2 - s_H^2} = \frac{80}{36,37} \times$$

$$\times 0,0367 \pm \sqrt{\left(\frac{80 \cdot 0,0367}{36,37}\right)^2 - 0,0367^2} = 0,081 \pm 0,072;$$

$$s_{кр1} = 0,153; \quad s_{кр2} = 0,09.$$

Физический смысл имеет значение  $s_{кр1} = 0,153$ .

40. Уравнение механической характеристики

$$M = \frac{2 \cdot 80}{\frac{s}{0,153} + \frac{0,153}{s}}.$$

Уравнение по формуле Клосса может быть использовано до величины  $s = s_{кр}$ . Спадающая часть кривой  $M(s)$  (рис. 11) строится приближенно по точкам  $s_{II} = 1$ ,  $M = M_{II} = 73,74$  Н·м и  $s_{min} = 0,86$ ,  $M = M_{min} = 58,19$  Н·м.

Результат расчетов сведены в табл. 4.

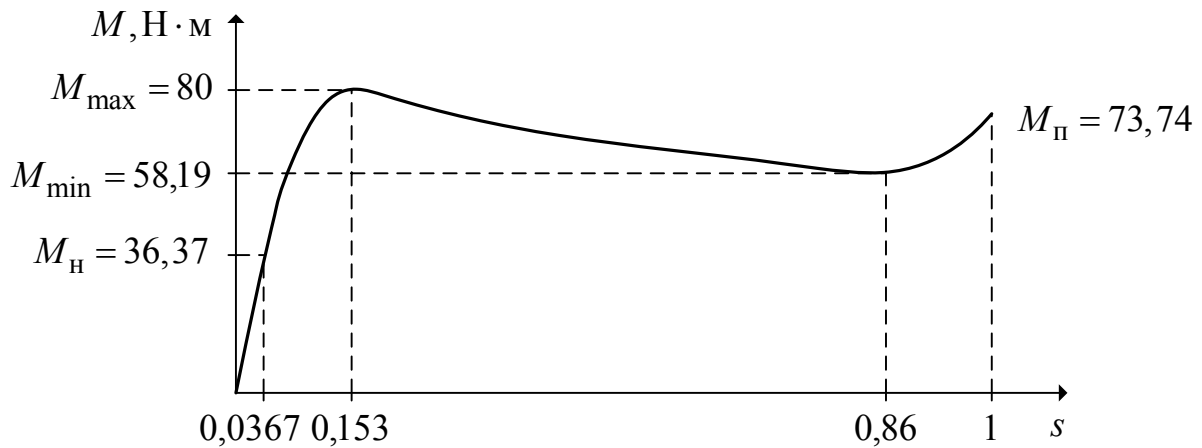


Рис. 11

Таблица 4

|                              |   |        |       |       |       |
|------------------------------|---|--------|-------|-------|-------|
| $s$                          | 0 | 0,0367 | 0,05  | 0,1   | 0,153 |
| $M, \text{Н} \cdot \text{м}$ | 0 | 36,37  | 47,24 | 73,26 | 80    |

### 2.3. Исходные данные к вариантам заданий расчетно-графической работы №2

При выполнении работы вариант выбирается из табл. 5. Номер варианта соответствует номеру студента по журналу.

Таблица 5

#### Основные технические данные двигателей серии АИ

| № п/п                                   | Тип двигателя | Мощность, кВт | КПД, % | cos φ | $s_H$ , % | $K_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}$ | $K_{max} = \frac{M_{max}}{M_H}$ | $K_{min} = \frac{M_{min}}{M_H}$ | $K_I = \frac{I_{II}}{I_H}$ |
|---|---------------|---------------|--------|-------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Синхронная частота вращения 3000 об/мин |               |               |        |       |           |                               |                                 |                                 |                            |
| 1                                       | АИР71В2       | 1,1           | 79     | 0,83  | 6,5       | 2,1                           | 2,2                             | 1,6                             | 6                          |
| 2                                       | АИР80А2       | 1,5           | 81     | 0,85  | 5         | 2,1                           | 2,2                             | 1,6                             | 7                          |
| 3                                       | АИР80В2       | 2,2           | 83     | 0,87  | 5         | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 7                          |
| 4                                       | АИР90L2       | 3             | 84,5   | 0,88  | 5         | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 7                          |
| 5                                       | АИР100S2      | 4             | 87     | 0,88  | 5         | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 7,5                        |
| 6                                       | АИР100L2      | 5,5           | 88     | 0,89  | 5         | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 7,5                        |
| 7                                       | АИР112M2      | 7,5           | 87,5   | 0,88  | 3,5       | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 7,5                        |
| 8                                       | АИР132M2      | 11            | 88     | 0,9   | 3         | 1,6                           | 2,2                             | 1,2                             | 7,5                        |
| 9                                       | АИР160S2      | 15            | 90     | 0,89  | 3         | 1,8                           | 2,7                             | 1,7                             | 7                          |
| 10                                      | АИР160M2      | 18,5          | 90,5   | 0,9   | 3         | 2                             | 2,7                             | 1,8                             | 7                          |
| Синхронная частота вращения 1500 об/мин |               |               |        |       |           |                               |                                 |                                 |                            |
| 11                                      | АИР80А4       | 1,1           | 75     | 0,81  | 7         | 2,2                           | 2,2                             | 1,6                             | 5,5                        |
| 12                                      | АИР80В4       | 1,5           | 78     | 0,83  | 7         | 2,2                           | 2,2                             | 1,6                             | 5,5                        |
| 13                                      | АИР90L4       | 2,2           | 81     | 0,83  | 7         | 2,1                           | 2,2                             | 1,6                             | 6,5                        |
| 14                                      | АИР100S4      | 3             | 82     | 0,83  | 6         | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 7                          |
| 15                                      | АИР100L4      | 4             | 85     | 0,84  | 6         | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 7                          |
| 16                                      | АИР112M4      | 5,5           | 85,5   | 0,86  | 4,5       | 2                             | 2,5                             | 1,6                             | 7                          |
| 17                                      | АИР132S4      | 7,5           | 87,5   | 0,86  | 4,0       | 2                             | 2,5                             | 1,6                             | 7,5                        |
| 18                                      | АИР132M4      | 11            | 87,5   | 0,87  | 3,5       | 2                             | 2,7                             | 1,6                             | 7,5                        |
| 19                                      | АИР160S4      | 15            | 90     | 0,89  | 3         | 1,9                           | 2,9                             | 1,8                             | 7                          |
| 20                                      | АИР160M4      | 18,5          | 90,5   | 0,89  | 3         | 1,9                           | 2,9                             | 1,8                             | 7                          |
| 21                                      | АИР80В6       | 1,1           | 74     | 0,74  | 8         | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 4,5                        |
| 22                                      | АИР90L6       | 1,5           | 76     | 0,72  | 7,5       | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 6                          |
| 23                                      | АИР100L6      | 2,2           | 81     | 0,74  | 5,5       | 2                             | 2,2                             | 1,6                             | 6                          |

| № п/п                                   | Тип двигателя | Мощность,<br>кВт | КПД, % | cos φ | S <sub>н</sub> ,<br>% | $K_{п} =$             | $K_{max} =$             | $K_{min} =$             | $K_{I} =$             |
|---|---------------|------------------|--------|-------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
|   |               |                  |        |       |                       | $\frac{M_{п}}{M_{н}}$ | $\frac{M_{max}}{M_{н}}$ | $\frac{M_{min}}{M_{н}}$ | $\frac{I_{п}}{I_{н}}$ |
| Синхронная частота вращения 1000 об/мин |               |                  |        |       |                       |                       |                         |                         |                       |
| 24                                      | АИР112МА6     | 3                | 81     | 0,76  | 5                     | 2                     | 2,2                     | 1,6                     | 6                     |
| 25                                      | АИР112МВ6     | 4                | 82     | 0,81  | 5                     | 2                     | 2,2                     | 1,6                     | 6                     |
| 26                                      | АИР132S6      | 5,5              | 85     | 0,8   | 4                     | 2                     | 2,2                     | 1,6                     | 7                     |
| 27                                      | АИР132М6      | 7,5              | 85,5   | 0,81  | 4                     | 2                     | 2,2                     | 1,6                     | 7                     |
| 28                                      | АИР160S6      | 11               | 88     | 0,83  | 3                     | 2                     | 2,7                     | 1,6                     | 6,5                   |
| 29                                      | АИР160М6      | 15               | 88     | 0,85  | 3                     | 2                     | 2,7                     | 1,6                     | 6,5                   |
| 30                                      | АИР180М6      | 18,5             | 89,5   | 0,85  | 2                     | 1,8                   | 2,4                     | 1,6                     | 6,5                   |

### 3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РГР

1. Расчетная часть РГР оформляется в виде пояснительной записки с приведением необходимых формул и пояснений на листах формата А4. оборот страницы не используется.

2. Текст оформляют чернилами (пастой, гелем, тушью) или печатают на компьютере без помарок и сокращений, с обязательными полями: левое – 35 мм, правое – 15 мм, верхнее и нижнее – 25 мм.

3. Схемы и рисунки должны быть выполнены аккуратно в соответствии с требованиями стандартов и ЕСКД.

4. Единицы применяемых величин приводятся в международной системе единиц (СИ), а их обозначения должны соответствовать Стандарту.

5. При использовании методик, формул, графиков и других материалов, взятых из литературных источников, необходимо делать ссылку на этот источник.

6. Список литературы составляют в соответствии с ГОСТ 7.1-84.

7. При исправленной РГР новый вариант сдают вместе со старым, в котором сделаны замечания.

8. При несоблюдении требований к РГР они к рассмотрению и рецензированию не принимаются.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Копылов, И. П.* Электрические машины: учеб. пособие для вузов / И.П. Копылов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2002. – 607 с. – ISBN 5-06-003841-6.

2. Проектирование электрических машин / под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 2002.

3. *Гольдберг, О. Д.* Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высш. шк., 2001. – 430 с. – ISBN 5-06-003842-4.

4. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 2. Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля / под ред. П.А. Ионкина. – М.: Высш. шк., 1979. – 382 с.

5. *Алиев, И. И.* Справочник по электротехнике и электрооборудованию / И.И. Алиев. – 4-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – 480 с. – ISBN 5-222-03004-0.

6. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 2 / под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова [и др.]; гл. ред. И.Н. Орлов. – 8-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 382 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА»

Составители

МАКСИМОВ Юрий Павлович

СБИТНЕВ Станислав Александрович

МАКАРОВ Феликс Константинович

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой, профессор С.А. Сбитнев

Редактор Л.В. Пукова

Компьютерная верстка Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 14.06.05.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.  
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,94. Тираж 200 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс  
Владимирского государственного университета.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.