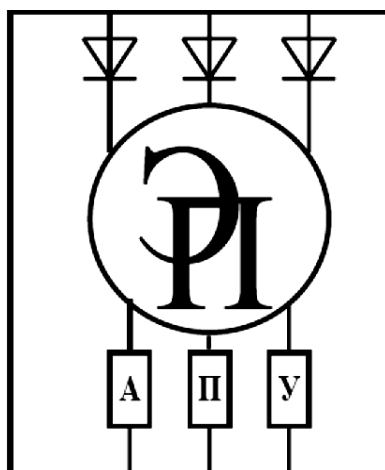


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Методические рекомендации к самостоятельной работе  
для студентов специальности  
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
заочной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.313.01  
ББК 31.261  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «11» января 2023 г.,  
протокол № 5

Составитель ст. преподаватель В. А. Лапицкий

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения самостоятельной работы по дисциплине «Электрические машины» студентами специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заочной формы обучения.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Ответственный за выпуск	С. М. Фурманов
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2023

## Содержание

1 Состав теоретической части курса .....	4
2 Наименование тем лекционных занятий .....	4
3 Наименование тем лабораторных работ .....	5
4 Наименование тем практических занятий .....	5
5 Аудиторная контрольная работа .....	5
Список литературы .....	11

# 1 Состав теоретической части курса

## 1.1 Цель преподавания дисциплины

Целью преподавания дисциплины является получение студентами необходимых теоретических знаний процессов преобразования энергии, устройства, принципов действия и свойств электрических машин различных типов, применяемых при производстве и передаче электроэнергии, а также для их эффективного использования, приобретение практических навыков при работе с ними.

## 1.2 Задачи изучения дисциплины

1.2.1 Студент, изучивший дисциплину, должен иметь представление:

- о современном состоянии отечественного и мирового электромашиностроения в Республике Беларусь, в странах СНГ и ведущих мировых странах.

1.2.2 Студент, изучивший дисциплину, должен знать:

- принципы работы трансформаторов и электрических машин, выпускаемых отечественным и мировым машиностроением;
- методы регулирования частоты вращения электрических машин.

1.2.3 Студент, изучивший дисциплину, должен уметь:

- выбирать и использовать на практике электромашины и трансформаторы по заданным техническим требованиям;
- выполнять необходимые электромагнитные, тепловые и механические расчеты при необходимости проведения капитального ремонта электромашин на ремонтных предприятиях (участках) отрасли;
- определять параметры и снимать характеристики электромашин на испытательном стенде после ремонта;
- пользоваться ЭВМ при электромагнитных и механических расчетах в процессе работы над курсовым проектом.

## 2 Наименование тем лекционных занятий

**Тема 1.** Электромашины как электромеханические преобразователи энергии. Краткая история развития электромашин и трансформаторов. Конструкция и принцип действия машин постоянного тока (МПТ).

**Тема 2.** Двигатели постоянного тока (ДПТ).

**Тема 3.** Устройство и принципы действия асинхронной машины (АМ).

**Тема 4.** Устройство и принцип действия синхронных машин (СМ).

### 3 Наименование тем лабораторных работ

**Лабораторная работа № 1.** Исследование трехфазного трансформатора.

**Лабораторная работа № 2.** Исследование генератора постоянного тока независимого возбуждения.

**Лабораторная работа № 3.** Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

**Лабораторная работа № 4.** Исследование однофазного синхронного генератора.

### 4 Наименование тем практических занятий

**Тема 1.** Выбор главных размеров.

**Тема 2.** Электромагнитный расчет.

**Тема 3.** Механический расчет.

### 5 Аудиторная контрольная работа

Контрольная работа выполняется студентами заочной и дистанционной форм обучения.

В состав контрольной работы входят две из четырех задач по темам теоретического курса.

#### 5.1 Примеры решения задач

**Задача 1.** Генератор постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением  $U_{ном}$  и номинальной частотой вращения  $n_{ном}$  имеет на якоре простую волновую обмотку, состоящую из  $N$  проводников. Число полюсов генератора  $2p = 4$ , сопротивление обмоток в цепи якоря при рабочей температуре  $R_t$ , щетки угольно-графитовые  $U_{щ} = 2$  В, основной магнитный поток  $\Phi$ . Значения перечисленных параметров приведены в таблице 1. Требуется определить для номинального режима работы генератора: ЭДС якоря  $E_{а ном}$ , ток нагрузки  $I_{а ном}$  (размагничивающим влиянием реакции якоря пренебречь), полезную мощность  $P_{ном}$ , электромагнитную мощность  $P_{эм}$  и электромагнитный момент  $M_{ном}$ .

Таблица 1 – Параметры генераторов постоянного тока независимого возбуждения

Параметры	Вариант										
	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{ном}, В$	230	230	460	460	460	115	460	230	230	230	460
$n_{ном}, об/мин$	1500	2300	3000	2300	1500	1000	2300	1000	3000	2300	2300
$R_t, Ом$	0,175	0,08	0,17	0,3	0,7	0,09	0,27	0,25	0,08	0,14	0,3
$N$	100	118	280	240	200	80	270	114	100	138	240
$\Phi, 10^{-2}, Вб$	4,8	2,6	1,7	2,6	4,8	4,5	2,4	6,1	2,4	2,3	2,6

### Решение варианта X

Конструктивный коэффициент обмотки якоря  $C_e$ , с учетом того, что число пар параллельных ветвей простой волновой обмотки  $a = 1$ ,

$$C_e = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} = \frac{2 \cdot 100}{60 \cdot 1} = 3,33.$$

ЭДС якоря генератора при номинальной частоте вращения

$$E_{a ном} = C_e \cdot \Phi \cdot n_{ном} = 3,33 \cdot 4,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1500 = 240 \text{ В.}$$

Ток якоря в номинальном режиме можно определить, воспользовавшись уравнением напряжений для генератора:

$$U_{ном} = E_{a ном} - I_{a ном} \cdot R_t - U_{щ},$$

откуда ток якоря в номинальном режиме

$$I_{a ном} = \frac{E_{a ном} - U_{ном} - U_{щ}}{R_t} = \frac{240 - 230 - 2}{0,175} = 45,7 \text{ А.}$$

Полезная (номинальная) мощность генератора

$$P_{a ном} = U_{ном} \cdot I_{a ном} = 230 \cdot 45,7 = 10511 \text{ Вт.}$$

Электромагнитная мощность генератора

$$P_{эм} = E_{a ном} \cdot I_{a ном} = 240 \cdot 45,7 = 10968 \text{ Вт.}$$

### Электромагнитный момент в номинальном режиме

$$M_{эм} = \frac{P_{эм} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{ном}} = \frac{10968 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1500} = 69,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

**Задача 2.** В таблице 2 приведены данные двигателей постоянного тока независимого возбуждения серии 2П: номинальная мощность  $P_{ном}$ , номинальное напряжение, подводимое к цепи якоря,  $U_{ном}$ , номинальная частота вращения  $n_{ном}$ , КПД двигателя  $\eta_{ном}$ , сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре,  $R_t$ . Требуется определить сопротивление добавочного резистора  $R_d$ , который следует включить в цепь якоря, чтобы при номинальной нагрузке двигателя частота вращения якоря составила  $0,5 n_{ном}$ .

Таблица 2 – Параметры двигателей постоянного тока независимого возбуждения серии 2П

Тип двигателя	$P_{ном}$ , кВт	$U_{ном}$ , В	$n_{ном}$ , об/мин	$\eta_{ном}$ , %	$R_t$ , Ом	Вариант
2П0200L	7,1	220	750	83,5	0,48	X
2П0200M	20	440	2200	90	0,28	1
2ПФ200M	30	440	2200	90	0,22	2
2ПФ200L	20	220	1000	85,5	0,18	3
2ПН225M	37	220	1500	86,5	0,07	4
2ПФ225M	10	220	500	74,5	0,58	5
2П0180M	17	440	3000	90	0,31	6
2ПН225M	37	220	1500	86,5	0,07	7
2ПФ225M	10	220	500	74,5	0,58	8
2П0180M	17	440	3000	90	0,31	9
2П0200M	20	440	2200	90	0,28	10

*Решение варианта X с двигателем 2П0200L*

Ток в цепи якоря в режиме номинальной нагрузки при  $n_{ном} = 750$  об/мин

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{КПД_{ном} \cdot U_{ном}} = \frac{7100}{0,835 \cdot 220} = 38,6 \text{ А}.$$

ЭДС в режиме номинальной нагрузки (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем)

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{ном} \cdot R_t = 220 - 38,6 \cdot 0,48 = 201,5 \text{ В}.$$

Частота вращения идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{n_{ном} \cdot U_{ном}}{E_{ном}} = \frac{750 \cdot 220}{201,5} = 820 \text{ об/мин.}$$

Номинальный момент на валу двигателя

$$M_{2 \text{ ном}} = \frac{P_{ном} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{ном}} = \frac{7100 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 750} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Частота вращения при включении в цепь якоря добавочного резистора  $R_d$

$$n_1 = n_{ном} \cdot 0,5 = 750 \cdot 0,5 = 375 \text{ об/мин.}$$

Сопротивление резистора

$$R_d = \frac{U_{ном}}{I_{ном} \cdot \left(1 - \frac{n_1}{n_{ном}}\right)} - R_t = \frac{220}{I_{ном} \cdot \left(1 - \frac{375}{750}\right)} - 0,48 = 2,61 \text{ Ом.}$$

**Задача 3.** Однофазный трансформатор включен в сеть с частотой тока  $f = 50$  Гц. Номинальное вторичное напряжение  $U_{2 \text{ ном}}$ , а коэффициент трансформации  $k$  – см. таблицу 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 3 – Параметры однофазного трансформатора

Параметры	Вариант										
	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{2 \text{ ном}}, \text{ В}$	230	400	680	230	230	400	400	680	230	230	680
$k$	15	10	12	8	10	6	8	12	14	8	12
$Q_{ст}, \text{ м}^2$	0,049	0,08	0,12	0,18	0,065	0,08	0,12	0,076	0,06	0,085	0,07
$B_{\max}, \text{ Тл}$	1,3	1,6	1,8	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,5	1,2	1,3

*Решение варианта X*

Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{\max} = B_{\max} \cdot Q_{ст} \cdot K_c = 1,3 \cdot 0,049 \cdot 0,95 = 0,06 \text{ Вб.}$$



Число витков во вторичной обмотке трансформатора

$$W_2 = \frac{U_{2 \text{ ном}}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\text{max}}} = \frac{230}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,06} = 17 \text{ ВИТКОВ.}$$

Количество витков в первичной обмотке

$$W_1 = W_2 \cdot k = 17 \cdot 15 = 255 \text{ ВИТКОВ.}$$

**Задача 4.** Трехфазный трансформатор имеет параметры, значения которых приведены в таблице 4: номинальная мощность  $S_{\text{ном}}$  и номинальные напряжения (линейные)  $U_{1 \text{ ном}}$  и  $U_{2 \text{ ном}}$ , напряжение короткого замыкания  $U_{\text{к}}$ , ток холостого хода  $i_0$ , потери холостого хода  $P_{0 \text{ ном}}$  и потери короткого замыкания  $P_{\text{к ном}}$ . Обмотки трансформатора соединены по схеме Y–Y.

Требуется определить параметры T-образной схемы замещения, считая ее симметричной ( $r_1 = r_2'$  и  $x_1 = x_2'$ ), а также фактические значения сопротивлений вторичной обмотки.

Таблица 4 – Параметры трехфазного трансформатора

Параметры	Вариант										
	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$ , кВА	100	120	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
$U_{1 \text{ ном}}$ , кВ	0,5	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
$U_{2 \text{ ном}}$ , кВ	0,23	0,4	0,4	0,4	0,4	3,0	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23
$U_{\text{к}}$ , %	5,5	5,5	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5
$i_0$ , %	6,5	6,5	5,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,5
$P_{0 \text{ ном}}$ , кВт	0,65	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5
$P_{\text{к ном}}$ , кВт	2,0	2,2	3,6	5,8	9,0	13,5	10,0	9,0	8,2	6,0	4,0

*Решение варианта X*

Напряжение короткого замыкания

$$U_{1 \text{ к}} = \frac{u_{1 \text{ к}} \cdot U_{1 \text{ ном}}}{100} = \frac{5,5 \cdot 500}{100} = 27,5 \text{ В.}$$

Ток короткого замыкания

$$I_{1 \text{ к}} = I_{1 \text{ ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1 \text{ ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 500} = 115,6 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa \text{ ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1 \kappa} \cdot I_{1 \text{ ном}}} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 27,5 \cdot 115,6} = 0,36;$$

$$\sin \varphi_{\kappa} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\kappa}} = \sqrt{1 - 0,36^2} = 0,93.$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{1 \kappa}}{\sqrt{3} \cdot I_{1 \kappa}} = \frac{27,5}{\sqrt{3} \cdot 115,6} = 0,137 \text{ Ом.}$$

Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_{\kappa} = Z_{\kappa} \cdot \cos \varphi_{\kappa} = 0,137 \cdot 0,36 = 0,05 \text{ Ом.}$$

Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_{\kappa} = Z_{\kappa} \cdot \sin \varphi_{\kappa} = 0,137 \cdot 0,93 = 0,13 \text{ Ом.}$$

Активные и индуктивные сопротивления T-образной схемы замещения трансформатора

$$r_1 = \frac{r_{\kappa}}{2} = \frac{0,05}{2} = 0,0225 \text{ Ом;}$$

$$x_1 = \frac{x_{\kappa}}{2} = \frac{0,13}{2} = 0,065 \text{ Ом.}$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{1 \text{ ном}}}{U_{2 \text{ ном}}} = \frac{0,5}{0,23} = 2,173.$$

Фактические (не приведенные) значения сопротивлений вторичной обмотки трансформатора

$$R_2 = \frac{r_1}{k^2} = \frac{0,0225}{2,173^2} = 0,005 \text{ Ом;}$$

$$X_2 = \frac{x_1}{k^2} = \frac{0,065}{2,173^2} = 0,014 \text{ Ом.}$$

Ток холостого хода

$$I_0 = \frac{i_0 \cdot I_{1 \text{ ном}}}{100} = \frac{6,5 \cdot 115,6}{100} = 7,5 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0 \text{ ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1 \text{ ном}} \cdot I_{0 \text{ ном}}} = \frac{650}{\sqrt{3} \cdot 500 \cdot 7,5} = 0,1;$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0} = \sqrt{1 - 0,1^2} = 0,995.$$

Полное сопротивление ветви намагничивания Т-образной схемы замещения трансформатора

$$Z_m = \frac{U_{1 \text{ ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{0 \text{ ном}}} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 7,5} = 38,5 \text{ Ом.}$$

Активное и индуктивное составляющие ветви намагничивания

$$r_m = Z_m \cdot \cos \varphi_0 = 38,5 \cdot 0,1 = 3,85 \text{ Ом;}$$

$$x_m = Z_m \cdot \sin \varphi_0 = 38,5 \cdot 0,995 = 38,3 \text{ Ом.}$$

## Список литературы

- 1 **Вольдек, А. И.** Электрические машины: учебник / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Москва: Альянс, 2018. – 832 с.: ил.
- 2 **Токарев, Б. Ф.** Электрические машины: учебное пособие / Б. Ф. Токарев. – Москва: Энергоатомиздат, 1990 – 624 с.
- 3 **Кацман, М. М.** Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 6-е изд., испр. и доп. – Москва: Академия, 2006. – 496 с.
- 4 **Кацман, М. М.** Сборник задач по электрическим машинам: учебное пособие / М. М. Кацман. – Москва: Академия, 2003. – 160 с.
- 5 Электрические машины. Машины постоянного тока: методические указания для студентов заочной формы обучения специальности 1-53 01 05 «Авто-

матизированный электропривод»: в 2 ч. / Сост. С. В. Кольцов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 44 с.

6 Электрические машины. Машины постоянного тока: методические указания для студентов заочной формы обучения специальности 1-53 01 05 «Автоматизированный электропривод»: в 2 ч. / Сост. С. В. Кольцов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 2. – 44 с.

7 Электрические машины. Трансформаторы: методические указания для студентов заочной формы обучения специальности 1-53 01 05 «Автоматизированный электропривод»: в 2 ч. / Сост. С. В. Кольцов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 1. – 47 с.

8 Электрические машины. Трансформаторы: методические указания для студентов заочной формы обучения специальности 1-53 01 05 «Автоматизированный электропривод»: в 2 ч. / Сост. С. В. Кольцов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 2. – 33 с.