

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**

Высшая школа технологии и энергетики

Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Выполнение расчетно-практической работы

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки

13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника

Составители:

И. Д. Зятиков

В. П. Иваненко

В. Ю. Кузнецов

Санкт-Петербург

2024

Утверждено
на заседании кафедры АЭиЭ
05.06.2024 г., протокол № 8/23-24

Рецензент В. И. Королев

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Электрические машины» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

В методических указаниях представлены задания и примеры расчета для выполнения расчетно-практической работы.

Методические указания предназначены для бакалавров всех форм обучения, в том числе для самостоятельной работы.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 10.12.2024 г. Рег. № 5058/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	5
2. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	8
2.1. Трансформаторы	8
2.2. Трехфазные асинхронные электродвигатели.....	16
2.3. Контрольная работа «Расчет мощности и выбор двигателя кранового механизма»	26
2.3.1. Методические указания по выполнению контрольной работы «Расчет мощности и выбор двигателя кранового механизма»	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	30
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	31

ВВЕДЕНИЕ

В настоящих методических указаниях собран и структурирован материал, позволяющий студенту самостоятельно рассчитывать параметры машин постоянного и переменного тока, иметь представление об устройстве, принципе действия и области применения машин постоянного и переменного тока, понимать назначение основных конструктивных элементов, знать особенности работы электрических машин, уметь анализировать их характеристики.

1. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для решения задач данного раздела студент должен иметь четкое представление об устройстве, принципе действия и области применения машин постоянного тока; понимать назначения основных конструктивных элементов; знать особенности работы в генераторном и двигательном режимах; уметь анализировать характеристики генераторов, механические характеристики двигателей; проводить сравнительный анализ способов регулирования скорости двигателей с независимым и последовательным возбуждением; знать назначение и отличия пусковых и регулировочных сопротивлений. Уметь рассчитывать параметры двигателей постоянного тока.

Пример расчета параметров двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Двигатель параллельного возбуждения, присоединенный к сети с напряжением $U_n = 220$ В, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_n = 15$ А, а при холостом ходе – $I_0 = 1,8$ А. Сопротивление обмотки якоря $R_{я} = 0,82$ Ом, а сопротивление обмотки возбуждения $R_{в} = 200$ Ом, номинальная скорость вращения $n_n = 1350$ об/мин .

Определить номинальную мощность на валу двигателя, номинальный КПД, номинальный момент, пусковой ток $I_{п}$ при пуске двигателя без реостата, сопротивление пускового реостата R_p при условии $I_{пр} = 2,5 I_n$, пусковой момент при пуске с реостатом. При расчетах принять, что магнитные и механические потери не зависят от нагрузки.

Номинальная мощность на валу двигателя:

$$R_{2н} = R_{1н} - \sum \Delta P,$$

где $\sum \Delta P$ – потери в двигателе;

$R_{1н}$ – потребляемая мощность;

$$R_{1н} = U_n \cdot I_n = 220 \cdot 15 = 3300 \text{ Вт} = 3,3 \text{ кВт}.$$

Для определения потерь в цепи якоря и цепи возбуждения надо знать ток якоря $I_{ян}$ и ток возбуждения $I_{в}$:

$$I_{в} = U_n / R_{в} = 220 / 200 = 1,1 \text{ А},$$

$$I_{ян} = I_n - I_{в} = 15,0 - 1,1 = 13,9 \text{ А}.$$

Потери в обмотке якоря в номинальном режиме и в цепи возбуждения:

$$\Delta P_{ян} = I_{ян}^2 R_{я} = 13,9^2 \cdot 0,82 = 158,43 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_{в} = I_{в}^2 R_{в} = 1,1^2 \cdot 200 = 242 \text{ Вт}.$$

Магнитные и механические потери:

$$\Delta P_{м} = P_0 - \Delta P_{я0} - \Delta P_{в},$$

где $P_0 = U_n \cdot I_0 = 220 \cdot 1,5 = 330$ Вт;

$\Delta P_{я0}$ – потери в цепи якоря при холостом ходе:

$$\Delta P_{я0} = (I_0 - I_B)^2 \cdot P_{ян} = (1,5 - 1,1)^2 \cdot 0,82 = 0,13 \text{ Вт},$$

$$\Delta P_M = 330 - 0,13 - 242 = 87,87 \text{ Вт}.$$

Суммарные потери в двигателе в номинальном режиме:

$$\sum \Delta P_H = 158,43 + 242 + 87,87 = 488,3 \text{ Вт}.$$

Номинальная мощность на валу двигателя:

$$P_H = 3300 - 488,3 = 2811,7 \text{ Вт} \approx 2,8 \text{ кВт}.$$

Номинальный КПД:

$$\eta_H = P_{2H} / P_{1H} = 2,8 / 3,3 = 0,844.$$

Номинальный вращающий момент:

$$M_H = 9550 \cdot P_{2H} / n_H = 9550 \cdot (2,8 / 1350) = 19,8 \text{ Нм}.$$

Пусковой ток двигателя при пуске без реостата:

$$I_{\Pi} = U_H / R = 220 / 0,82 = 258,3 \text{ А}.$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства:

$$I_{\text{пр}} = 2,5 \cdot I_{ян} = \frac{U_H}{R_{я} + R_p}, \text{ из чего}$$

$$R_p = \frac{U_H}{2,5 I_{ян}} - R_{я} = \frac{220}{(2,5 \cdot 13,9)} - 0,82 = 5,51 \text{ Ом}.$$

Вращающий момент двигателя определяется уравнением:

$$M = C_m \Phi I_{я},$$

где C_m – конструктивная постоянная,

Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения. Полагая магнитный поток неизменным, пусковой момент двигателя при включении в цепь якоря дополнительного сопротивления определяется по формуле:

$$M_{\Pi} = M_H \cdot I_{\Pi} / I_{ян} = 19,8 \cdot 2,5 = 49,5 \text{ Нм}.$$

Задача № 1

Двигатель параллельного возбуждения, присоединенный к сети с напряжением U_H , потребляет при номинальной нагрузке ток I_H , а при холостом ходе – I_0 . Сопротивление обмотки якоря $R_{я}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{в}$, номинальная скорость вращения n_H .

Определить номинальную мощность на валу двигателя, номинальный КПД, номинальный вращающий момент, пусковой ток при пуске двигателя без пускового реостата, сопротивление реостата $I_{\Pi} = 2,5 I_H$ и пусковой момент при пуске двигателя с реостатом. При решении принять, что механические и магнитные потери не зависят от нагрузки и скорости вращения. Данные двигателя приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Данные двигателя

Вариант	U_H	l_H	l_o	$R_{я}$	$R_{я}$	n_H
	В	А	А	Ом	Ом	об/мин
0	220	15	1,6	1,2	180	1025
1	110	100	9,5	0,11	50	1000
2	220	163	1,78	1,16	75	1025
3	220	19,8	2,0	15	150	960
4	220	32	2,8	0,94	120	1600
5	220	40	4,2	0,52	190	1420
6	220	32	3,5	0,62	200	1350
7	220	60	6,8	0,40	130	935
8	220	50	5,7	0,40	150	1340
9	220	102	9,5	0,12	110	750

2. МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Трансформаторы

Задача № 2. Расчет параметров однофазного трансформатора

Однофазный трансформатор малой мощности характеризуется следующими номинальными величинами: мощность S_n , первичное напряжение $U_{1н}$, вторичное напряжение $U_{2н}$, процентное значение тока холостого хода i_0 %, мощность потерь в сердечнике трансформатора P_0 , процентное значение напряжения короткого замыкания u_k %, мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$. Числовые значения заданных величин исходных данных для каждого из вариантов указаны в табл. 2.

Определить:

1. Коэффициент трансформации трансформатора k , номинальные токи первичной $I_{1н}$ и вторичной $I_{2н}$ обмоток.
2. Начертить схему замещения трансформатора и определить параметры T-образной схемы замещения.
3. КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$. На основании расчетов построить зависимость $\eta = f(\beta)$.
4. Процентное изменение вторичного напряжения Δu % и вторичное напряжение U_2 при $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$. На основании расчетов построить зависимость $U_2 = f(\beta)$.
5. Характер нагрузки, при котором вторичное напряжение не зависит от коэффициента β .

Таблица 2 – Исходные данные к задаче № 2

Вариант	Тип трансформатора	$S_{н,}$ ВА	$U_{н,}$ В	$U_{2н,}$ В	$i_0,$ %	$P_0,$ Вт	$u_k,$ %	$P_{кн,}$ Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ОМ-О,3/6	300	6300	230	30	23	8	20
2	ОМ-0,66/6	660	6000	230	20	25	8	46
3	ОМ-1,2/6	1200	5150	230	20	32	7	66
4	ОМ-0,66/10	660	10500	230	30	25	8	46
5	ОМ-1,2/10	1200	10000	230	20	32	7	66
6	ОМ-1,2/6	1200	5700	115	20	32	7	66
7	ОМ-1,2/6	1200	5400	115	20	32	7	66
8	ОМ-1,2/10	1200	9500	115	20	32	7	66
9	ОМ-1,2/10	1200	9000	115	20	32	7	66
10	ОМ-1,2/10	1200	8590	115	20	32	7	66
11	ОМ-0,63/6	630	6000	230	34	18	6,8	42
12	ОМ-0,63/10	630	10000	230	34	18	6,8	42
13	ОМ-1,25/6	1250	6000	230	23	23	6	60
14	ОМ-1,25/10	1250	10000	230	23	23	6	60
15	ОМ-0,3/6	630	6000	115	34	18	6,8	42
16	ОМ-0,63/10	630	10000	115	34	18	6,8	42
17	ОМ-1,25/6	1250	600	115	23	23	6	60
18	ОМ-1,25/10	1250	1000	115	23	23	6	60
19	ПОБС-2АУЗ	300	220	17,6	14	20	12	20
20	ПОБС-3АУЗ	300	220	247,5	14	20	10	25
21	ПОБС-5АУЗ	300	220	44	14	18	11	20
22	ПРТ-АУЗ	65	220	12	4,4	3	15	5
23	ПТ-25АУЗ	65	220	60	4,4	3	14	4
24	ПТИУЗ	80	220	11,2	27	4,5	13	4
25	СОБСЗА	50	110	82,6	8	3	12	3
26	СТ-3	13	110	13	53	1	25	2
27	СТ-2	25	165	13	27	2	18	2
28	СТ-3	13	220	13	42	1,5	17	1,5
29	СКТ-1	12	220	165	50	3	17	1
30	СТ-2	25	165	13	29	1	15	2

Окончание табл. 2

Вариант	Тип трансформатора	$S_{н,}$ ВА	$U_{1н,}$ В	$U_{2н,}$ В	$i_0,$ %	$P_0,$ Вт	$u_{к,}$ %	$P_{кн,}$ Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
31	ТБС	63	220	24	24	12,75	12	6,15
32	ТБС	100	220	24	24	20,23	9	6,6
33	ТБС	160	220	24	23	21,7	7	7,9
34	ТБС	250	220	24	22	31,25	5,5	9
35	ТБС	400	220	24	20	42,3	4,5	10,75
36	ТБС	630	220	24	19	59,2	3,5	12,1
37	ТБС	1000	220	24	18	83,7	2,5	12,5
38	ТБС	63	380	36	24	11,81	12	5,75
39	ТБС	100	380	36	24	17,85	9	6,2
40	ТБС	160	380	36	23	19,6	7	6,9
41	ТБС	250	380	36	22	38,3	5,5	7,75
42	ТБС	400	380	36	20	38,3	4,5	9,1
43	ТБС	630	380	36	19	50,3	3,5	10,7
44	ТБС	1000	380	36	18	66,7	2,5	11,46
45		63	660	42	24	10,86	12	5,35
46		100	660	42	24	15,47	9	5,8
47		160	660	42	23	17,5	7	5,8
48		250	660	42	22	25	5,5	6,45
49		400	660	42	20	34,4	4,5	7,44
50		630	660	42	19	41,4	3,5	9,1
51		1000	660	42	18	50,2	2,5	10,4
52	ТБС	63	220	36	24	9,92	12	4,92
53	ТБС	100	220	42	24	13,1	9	5,4
54	ТБС	160	380	24	23	15,4	7	4,8
55	ТБС	250	380	42	22	21,9	5,5	5,16
56	ТБС	400	380	24	20	35,7	4,5	8,7
57	ТБС	630	380	42	19	49,7	3,5	11,2
58		1000	660	36	18	71,4	2,5	12,3
59		63	660	36	24	11,3	12	5,75
60		100	660	24	24	16,7	9	6,1

Пример решения задачи № 2

Однофазный трансформатор малой мощности характеризуется следующими номинальными величинами: мощность $S_{н} = 250$ ВА, первичное напряжение $U_{1н} = 220$ В, вторичное напряжение $U_{2н} = 24$ В, процентное значение тока холостого хода $i_0 = 20$ %, мощность потерь в сердечнике трансформатора $P_0 = 10$ Вт, процентное значение напряжения короткого замыкания u_k составляет 7 %, мощность потерь короткого замыкания $P_{кн} = 15$ Вт.

Определить:

1. Коэффициент трансформации трансформатора k , номинальные токи первичной $I_{1н}$ и вторичной $I_{2н}$ обмоток.
2. Начертить схему замещения трансформатора и определить параметры Т-образной схемы замещения.
3. КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$. На основании расчетов построить зависимость $\eta = f(\beta)$.
4. Процентное изменение вторичного напряжения Δu % и вторичное напряжение U_2 при $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$. На основании расчетов построить зависимость $U_2 = f(\beta)$.
5. Характер нагрузки, при котором вторичное напряжение не зависит от коэффициента β .

Решение:

1. Коэффициент трансформации однофазного трансформатора:

$$k = U_{1н} / U_{2н} = 220 / 24 = 9,17.$$

Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1н} = S_H / U_{1н} = 250 / 220 = 1,14 \text{ А.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки:

$$I_{2н} = S_H / U_{2н} = 250 / 24 = 10,42 \text{ А.}$$

2. Т-образная схема замещения однофазного трансформатора приведена на рисунке 1.

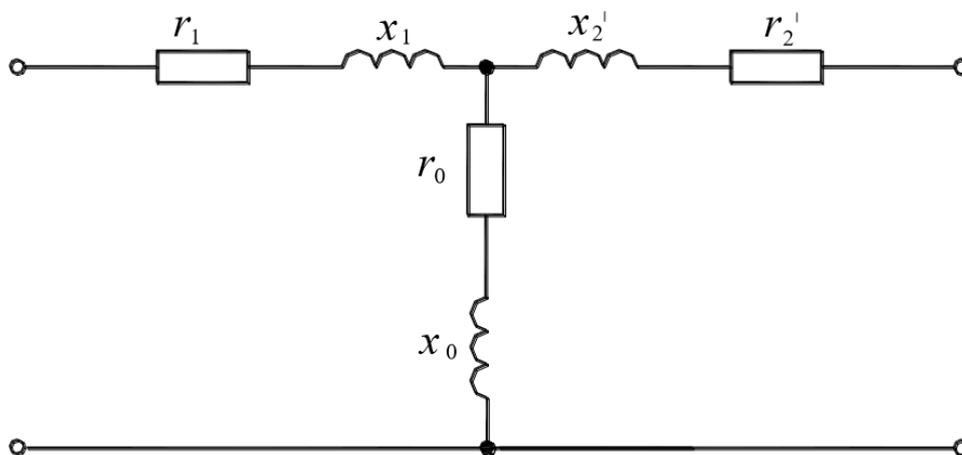


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения однофазного трансформатора

Определение параметров схемы замещения начинаем с расчета тока холостого хода:

$$I_o = \frac{i_o \cdot I_{1н}}{100} = \frac{20}{100} \cdot 1,14 = 0,23 \text{ А,}$$

тогда полное сопротивление намагничивающей ветви:

$$z_o = U_{1н} / I_o = 220 / 0,23 = 956,5 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление намагничивающей ветви:

$$r_o = \frac{P_o}{I_o^2} = \frac{10}{0,23^2} = 189,04 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление намагничивающей ветви:

$$x_o = \sqrt{z_o^2 - r_o^2} = \sqrt{956,5^2 - 189,04^2} = 937,63 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление короткого замыкания:

$$z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_{1н}}{S_n} = \frac{7}{100} \cdot \frac{220^2}{250} = 13,55 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания:

$$r_k = P_k / I_{1н}^2 = 15 / 1,14^2 = 11,62 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{13,55^2 - 11,62^2} = 6,98 \text{ Ом.}$$

Активные сопротивления обмоток приведенного трансформатора:

$$r_1 = r_2' = r_k / 2 = 11,62 / 2 = 5,81 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора:

$$x_1 = x_2' = x_k / 2 = 6,98 / 2 = 3,49 \text{ Ом.}$$

Сопротивление вторичной обмотки реального трансформатора:

$$r_2 = r_2' / k^2, \quad x_2 = x_2' / k^2.$$

3. КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,8$ можно определить из выражения:

$$\eta = 1 - \frac{P_o + \beta^2 P_{кн}}{\beta S_n \cos\varphi_2 + P_o + \beta^2 P_{кн}}.$$

Результаты расчета КПД представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчета КПД

β	0	0,25	0,5	0,75	1
η	0	0,82	0,88	0,89	0,89

На основании результатов расчета из таблицы 3 построим зависимость $\eta = f(\beta)$, представленную на рисунке 2.

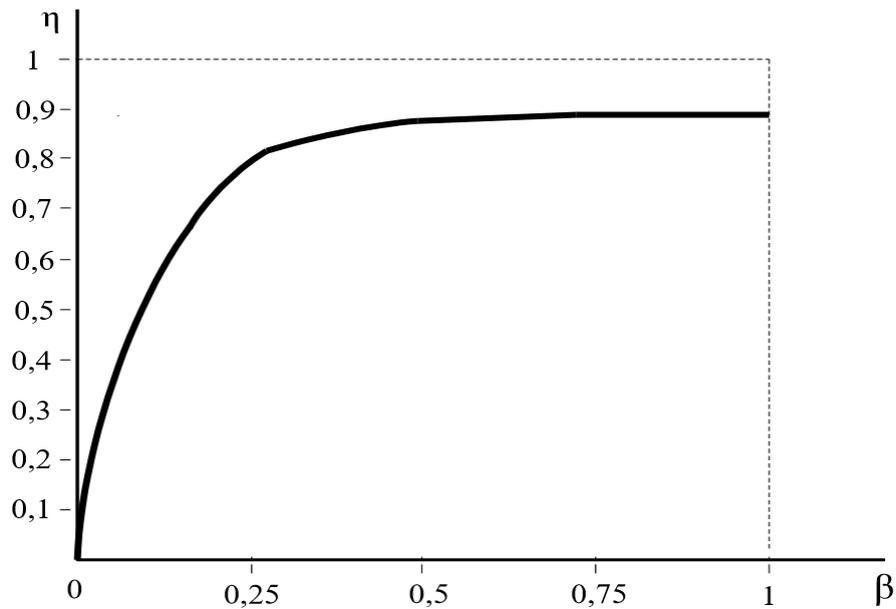


Рисунок 2 – Зависимость $\eta = f(\beta)$

4. Процентное изменение вторичного напряжения $\Delta u \%$ и вторичное напряжение U_2 при $\beta = (0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0)$ для активно-индуктивной нагрузки $\cos\varphi_2 = 0,8$ определяем, используя выражение:

$$\Delta u \% = \beta \left(\frac{I_{1н} r_k \cos \varphi_2 + I_{1н} x_k \sin \varphi_2}{U_{1н}} \right) \cdot 100 \%, U_2 = \left(1 - \frac{\Delta u \%}{100\%} \right) U_{2н}.$$

Результаты расчета $\Delta u \%$ и U_2 представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчета КПД

β	0	0,25	0,5	0,75	1
$\Delta u \%$	0	1,74	3,48	5,22	6,96
$U_2, В$	24	23,58	23,16	22,75	22,33

На основании результатов расчета, представленных в таблице 3, построим зависимость $U_2 = f(\beta)$, рисунок 3.

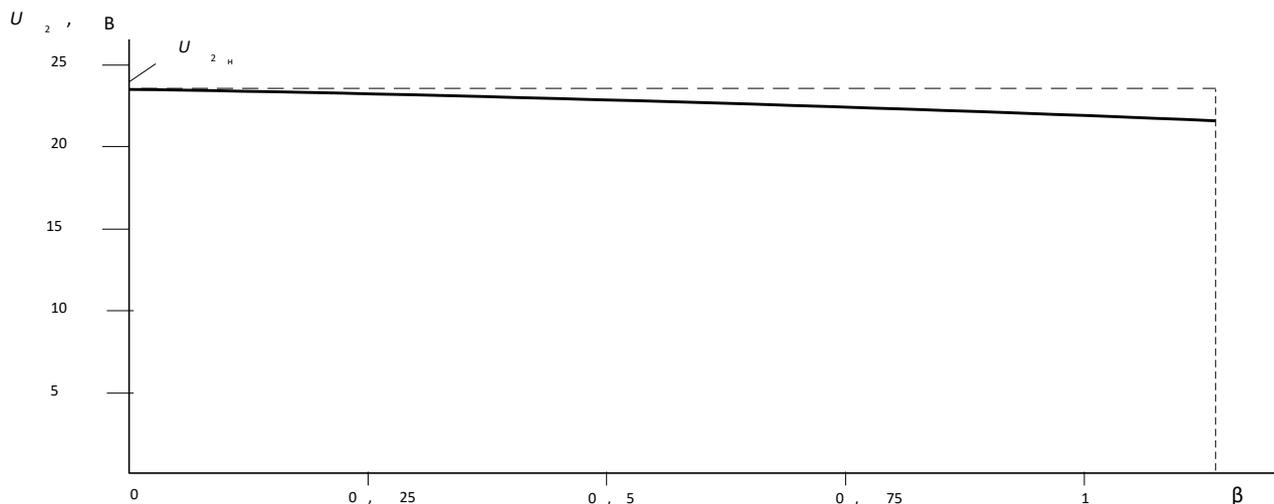


Рисунок 3 – Внешняя характеристика однофазного трансформатора

5. Напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки не будет зависеть от коэффициента нагрузки β при выполнении условия:

$$I_{1н} r_k \cos \varphi_2 + I_{1н} x_k \sin \varphi_2 = 0,$$

$$\text{Значит } \operatorname{tg} \varphi_2 = -r_k / x_k.$$

Отрицательный знак в правой части уравнения указывает на активноемкостной характер нагрузки, а величина угла:

$$\varphi_2 = -\operatorname{arctg} (r_k/x_k) = -\operatorname{arctg} (11,62/6,98) = -59^\circ.$$

Контрольные вопросы

1. Каковы условия проведения и назначение опыта холостого хода трансформатора?
2. Напишите уравнение токов трансформатора и объясните физический смысл составляющих тока первичной обмотки.
3. Что называют приведенными величинами вторичной обмотки? Как производится приведение параметров вторичной обмотки к параметрам первичной?
4. Какие величины определяются в опыте холостого хода; по какой схеме он производится?
5. Начертите схему опыта короткого замыкания трансформатора. Какие величины определяются в этом опыте?
6. Что называется напряжением короткого замыкания? Каков его физический смысл?
7. Что изменится в работе трансформатора, если на первичную обмотку подать постоянное напряжение, равное номинальному? Почему этот режим приводит к аварии?
8. Начертите принципиальную схему однофазного трансформатора и объясните принцип его работы.

9. Какой магнитный поток называется основным, какой – потоком рассеяния? Как выражаются ЭДС рассеяния обмоток?
10. Напишите уравнения напряжения для первичной и вторичной обмоток и объясните смысл каждого из членов этих уравнений.
11. Как изменится вторичное напряжение трансформатора, если его индуктивную нагрузку заменить емкостной?
12. Почему в качестве номинальной мощности трансформатора задается полная мощность в $\text{kV}\cdot\text{A}$?
13. В каких случаях целесообразно применение автотрансформаторов? Каковы их преимущества? Недостатки?
14. Какие трансформаторы используются для расширения пределов измерительных приборов? Как подключаются к ним несколько однотипных измерительных приборов?
15. Почему в опыте холостого хода можно пренебречь потерями в меди, а опыте короткого замыкания – потерями в стали?
16. Какие потери в трансформаторе являются постоянными, какие переменными, и почему?
17. Объясните, почему магнитный поток в трансформаторе практически не зависит от нагрузки.
18. Как устроены трехфазные трансформаторы и какие схемы соединения могут они иметь?
19. Для какой цели на электрических станциях в начале линии электропередачи устанавливают повышающие трансформаторы?
20. С какой целью в трансформаторе используется ферромагнитный сердечник? Почему сердечник трансформатора собирается из отдельных изолированных листов электротехнической стали?
21. Почему ток холостого хода имеет малую величину и как он определяется?
22. Какими элементами в схеме замещения учитываются первичная и вторичная обмотки, магнитопровод трансформатора?
23. Как рассчитываются параметры схемы замещения трансформатора?
24. При какой нагрузке (активной, активно-индуктивной или активноемкостной) напряжение на зажимах потребителей – минимальное?
25. Каковы причины изменения вторичного напряжения трансформатора при увеличении нагрузки?
26. Что вызывает нагрев трансформатора и почему ограничивается температура нагрева?
27. Почему у большинства трансформаторов максимальный КПД имеет место при нагрузке 0,5 – 0,75 от номинальной? Определить β , при котором КПД рассчитываемого трансформатора максимален.
28. В чем преимущества трехстержневого трехфазного трансформатора перед однотипным, выполненным из трех однофазных?
29. В каком режиме работают измерительные трансформаторы напряжения и в каком – трансформаторы тока?

2.2. Трехфазные асинхронные электродвигатели

Задача № 3. Расчет трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими величинами: номинальной мощностью P_n ; номинальным током I_n ; номинальной частотой вращения ротора n_n ; номинальным скольжением S_n ; коэффициентом полезного действия η_n ; мощностью, потребляемой из сети в номинальном режиме, P_{1n} ; коэффициентом мощности при номинальной нагрузке $\cos\varphi_{1n}$; номинальным моментом M_n ; кратностью максимального момента относительно номинального M_{\max}/M_n ; кратностью пускового момента относительно номинального M_{Π}/M_n ; кратностью пускового тока относительно номинального I_{Π}/I_n критическим скольжением $S_{\text{кр}}$; числом пар полюсов обмотки статора p ; синхронной частотой вращения n_1 . Двигатель питается от сети с линейным напряжением U_n . Номинальное фазное напряжение обмотки статора $U_{1\phi} = 220$ В. Числовые значения заданных величин и номера пунктов задания, подлежащих выполнению, указаны в таблицах 4–13. Необходимо сформулировать условие задачи в соответствии с перечнем пунктов задания, приведенного в таблице для своего варианта, и выполнить решение.

Примечание. Решаемый вариант выбирается по двум цифрам шифра. Предпоследняя цифра шифра должна совпадать с номером группы заданий в названии таблицы для данной задачи, а по последней цифре шифра выбирается строка числовых данных в таблице.

Перечень пунктов задания, необходимых для формирования условия задачи:

1. Определить схему соединения обмотки статора.
2. Начертить схему.
3. Определить число пар полюсов обмотки статора.
4. Определить значение пускового тока.
5. Вычислить частоту вращения двигателя при моменте сопротивления $M_c = 0,9 M_{\max}$.
6. Определить частоту вращения двигателя при моменте сопротивления $M_c = 1,4 M_n$.
7. Определить значение максимального момента.
8. Рассчитать значения момента, развиваемого двигателем при скольжениях: S_n ; $S_{\text{кр}}$; 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1, и построить график механической характеристики двигателя $n = f(M)$.
9. Определить максимальный момент и соответствующее ему критическое скольжение.
10. Определить значение пускового момента при снижении напряжения на 15 % относительно номинального.
11. Вычислить значение максимального момента при снижении напряжения на 10 % относительно номинального.

12. Рассчитать установившуюся частоту вращения ротора при моменте нагрузки $M_c = 1,5 M_H$.
13. Определить коэффициент мощности двигателя при номинальной нагрузке.
14. Определить коэффициент полезного действия двигателя при номинальной нагрузке.
15. Рассчитать мощность на валу и коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке.
16. Определить мощность, потребляемую двигателем из сети при номинальной нагрузке.
17. Выяснить, можно ли запустить двигатель под нагрузкой при напряжении сети, пониженном на 15 % относительно номинального, если статический момент сопротивления нагрузки $M_c = M_H$.

Таблица 4 – Числовые значения исходных данных к нулевой группе заданий

Вариант	P_H , кВт	n_H , об/мин	η_H , %	$\cos\varphi_{1H}$	M_{\max}/M_H	I_P/I_H	U_H , В
1	5,5	2880	87,5	0,91	2,5	7,5	380
2	7,5	1455	87,5	0,86	3,0	7,5	220
3	11,0	975	86,0	0,86	2,0	6,0	380
4	15,0	730	87,0	0,82	2,0	6,0	220
5	18,5	975	88,0	0,87	2,0	5,0	380
6	22,0	1470	90,0	0,90	2,3	6,5	220
7	30,0	590	88,0	0,81	1,9	6,0	380
8	37,0	980	91,0	0,89	2,3	6,5	220
9	45,0	1475	92,0	0,90	2,5	7,0	380
0	55,0	490	91,0	0,75	1,8	6,0	220

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1–4, 8, 17.

Таблица 5 – Числовые значения исходных данных к первой группе заданий

Вариант	$U_H, В$	$M_H, Нм$	$n_H, об/мин$	$I_H, А$	$\cos\varphi_{1H}$	M_{max}/M_H
1	220	490	585	109	0,80	1,7
2	380	260	1470	75	0,89	2,0
3	220	402	2970	388	0,90	2,2
4	380	536	980	101	0,90	1,8
5	220	516	740	130	0,89	1,7
6	380	180	2925	102	0,90	2,2
7	220	71.5	2940	72	0,91	2,5
8	380	288	730	45	0,84	2,0
9	220	143	1470	71,5	0,90	2,3
0	380	731	980	137	0,90	1,8

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1–3, 6, 14, 17.

Таблица 6 – Числовые значения исходных данных ко второй группе заданий

Вариант	$U_H, В$	p	$M_H, Нм$	$I_H, А$	$\cos\varphi_{1H}$	$s_H, \%$	$s_{кр}, \%$
1	380	5	728	96	0,78	1,67	5,47
2	380	1	60	34,5	0,92	2,0	8,30
3	380	2	487	134	0,92	2,00	7,46
4	220	5	890	199	0,79	1,67	5,47
5	220	4	516	130	0,89	1,33	3,99
6	220	3	536	175	0,390	2,00	6,59
7	380	1	120	70	0,89	1,83	8,60
8	380	4	715	101	0,90	2,00	6,15
9	220	5	653	145	0,80	2,50	7,68
0	220	2	650	307	0,92	2,00	7,46

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 5, 7, 14, 17.

Таблица 7 – Числовые значения исходных данных к третьей группе заданий

Вариант	U_H , В	n_H , об/мин	I_H , А	$\cos\varphi_{1H}$	η_H , %	M_{\max}/M_i
1	220	1435 950	11,6	0,83	82,0	2,4
2	380	2900 720	9,2	0,81	82,0	2,5
3	220	1460 970	25,6	0,88	87,5	2,8
4	380	2940	13,6	0,74	83,0	2,6
5	220	590	38,0	0,83	87,5	3,0
6	380	735	16,5	0,81	85,5	2,5
7	220	1470	71,9	0,91	88,5	2,5
8	380		79,2	0,78	91,0	1,8
9	380		37,9	0,84	88,5	2,2
0	220		96,4	0,90	91,0	2,3

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1–3, 8, 10, 17.

Таблица 8 – Числовые значения исходных данных к четвертой группе заданий

Вариант	U_H , В	M_{\max} , Нм	$s_{кр}$, %	n_H , об/мин	I_H , А	$\cos\varphi_{1H}$
1	220	1311	5,47	590	166	0,78
2	220	243	8,60	2945	97	0,90
3	220	965	6,59	980	175	0,90
4	220	974	7,46	1470	232	0,92
5	380	1602	5,47	590	115	0,79
6	380	877	3,99	740	75	0,89
7	380	726	6,20	2960	165	0,90
8	380	1290	4,85	1480	177	0,92
9	220	2185	5,47	590	286	0,80
0	380	1207	3,99	740	101	0,90

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1–3, 11, 14, 17.

Таблица 9 – Числовые значения исходных данных к пятой группе заданий

Вариант	U_H , В	P_{1H} , кВт	η_H , %	M_{max}/M_H	n_H , об/мин
1	380	12,79	86,0	2,0	975
2	380	25,00	88,0	2,2	2915
3	380	33,33	90,0	2,1	735
4	380	40,66	91,0	2,5	1475
5	220	50,00	90,0	1,8	585
6	380	60,77	90,5	1,8	490
7	220	80,65	93,0	2,3	1480
8	220	97,29	92,5	2,0	980
9	220	118,27	93,0	2,3	740
0	220	97,83	92,0	2,2	2945

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1–3, 12, 17.

Таблица 10 – Числовые значения исходных данных к шестой группе заданий

Вариант	U_H , В	P_{1H} , кВт	I_H , А	η_H , %	s_H , %	n_1 , об/мин	$s_{кр}$, %
1	380	40,18	95,7	91,5	1,66	600	5,47
2	220	41,11	121,6	90,0	1,8	3000	8,60
3	380	43,72	75,0	91,5	2,0	750	6,15
4	220	50,78	175,0	90,0	2,0	1000	6,59
5	380	80,65	136,0	93,0	1,3	1500	4,85
6	220	33,15	109,0	90,5	2,5	600	7,68
7	380	107,53	184,0	93,0	1,3	3000	5,40
8	220	106,95	305,0	93,5	14,3	1500	4,85
9	380	81,52	155,0	92,0	1,66	600	5,47
0	220	60,41	172,0	91,0	1,8	3000	8,60

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 8, 13, 17.

Таблица 11 – Числовые значения исходных данных к седьмой группе заданий

Вариант	U_H , В	n_H , об/мин	I_H , А	$\cos\phi_{1H}$	M_{max} , Нм	$s_{кр}$, %	$M/M_{max/H}$
1	380	2880	7,9	0,89	33,15	19,0	2,0
2	380	720	10,47	0,70	137,96	20,0	1,9
3	380	590	64,0	0,81	922,6	5,86	1,2
4	380	1470	134,0	0,92	974,0	7,46	1,1
5	380	980	99,0	0,92	964,8	6,59	1,1
6	220	2850	8,0	0,87	19,16	25,0	2,1
7	220	590	165	0,78	1311	5,47	1,0
8	220	1480	235	0,90	968,0	4,85	1,1
9	220	740	130	0,89	877,2	3,99	1,1
0	220	965	21,28	0,80	136,07	16,77	2,0

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1–2, 15–17.

Таблица 12 – Числовые значения исходных данных к восьмой группе заданий

Вариант	U_n , В	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\cos\varphi_{1n}$	I_n , А	I_n/I_n	$M M_{\max/n}$
1	220	100,0	2960	0,90	220	7,0	2,2
2	220	15,0	2940	0,91	345	7,0	2,2
3	380	30,0	735	0,81	376	6,0	2,1
4	380	45,0	740	0,84	537	6,0	2,0
5	220	22,0	2940	0,91	539	7,5	2,5
6	220	37,0	2945	0,89	912	7,5	2,5
7	380	55,0	2945	0,92	749	7,5	2,5
8	380	110,0	740	0,85	1376	6,5	2,3
9	220	90,0	1480	0,91	1959	7,0	2,3
0	380	75,0	590	0,80	930	6,0	1,8

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1–2, 8, 14, 17.

Таблица 13 – Числовые значения исходных данных к девятой группе заданий

Вариант	U_n , В	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\cos\varphi_{1n}$	η_n , %	I_n/I_n	M_{\max}/M_n
1	380	15,0	1465	0,88	88,5	7,0	2,3
2	220	18,5	975	0,85	87,0	6,0	2,0
3	380	22,0	730	0,84	89,0	5,5	2,0
4	220	30,0	590	0,81	88,0	6,0	1,9
5	380	55,0	490	0,78	90,5	5,5	1,8
6	220	45,0	2945	0,91	91,0	7,0	2,2
7	380	37,0	1475	0,90	91,0	7,0	2,5
8	220	55,0	985	0,89	91,5	6,5	2,1
9	380	75,0	735	0,85	92,0	5,5	1,9
0	220	90,0	590	0,82	91,5	5,5	1,8

Примечание. Пункты задания, подлежащие выполнению: 1, 2, 4, 5, 9, 16, 17.

Пример решения задачи № 3

Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими номинальными данными: мощность $P_n = 10$ кВт, напряжение $U_1 = 380$ В, частота вращения $n_n = 1420$ об/мин, КПД $\eta_n = 0,84$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{1n} = 0,85$. Кратность максимального момента (перегрузочная способность двигателя):

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_n} = 1,8.$$

Определить:

- 1) потребляемую активную мощность из сети при номинальной нагрузке;
- 2) номинальный и максимальный вращающие моменты;

- 3) номинальный ток;
- 4) номинальное и критическое скольжение;
- 5) построить механические характеристики $n = f(M)$ и $M = f(s)$;
- 6) определить электромагнитную мощность и потери энергии в статоре при номинальной нагрузке;
- 7) общие потери в двигателе при номинальной нагрузке;
- 8) электрические потери в роторе при номинальной нагрузке;
- 9) установить возможность пуска двигателя при полной его нагрузке на валу, т. е. когда $M_C = M_H$;
- 10) установить возможность работы двигателя при кратковременной перегрузке $M_C = 110 \text{ Нм}$;
- 11) определить кратность пускового момента $k_{П}$;
- 12) используя график $n = f(M)$, определить полезную мощность на валу двигателя P_2' при $n = 1450 \text{ об/мин}$.

Решение:

Потребляемая активная мощность при номинальной нагрузке:

$$P_{1н} = \frac{P_H}{\eta} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H} = 9,55 \frac{10 \cdot 10^3}{1420} = 67,3 \text{ Нм}; \quad M_{кр} = \lambda M_H = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Нм}$$

Номинальный ток:

$$I_{1н} = \frac{P_{1н}}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi_{1н}} = \frac{11,9 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 21,3 \text{ А.}$$

Номинальное и критическое скольжения:

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053,$$

$$s_{кр} = s_H (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,053 (1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,175.$$

Механическую характеристику $M = f(s)$ строим по уравнению Клосса, а для построения $n = f(M)$ дополнительно используем зависимость $n = n_1(1 - s)$. Результаты расчета заносим в табл. 14.

Таблица 14 – Результаты расчета характеристик асинхронного двигателя

s	0,033	0,053	0,1	0,175	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
n , об/мин	1450	1420	1350	1238	1200	1050	900	600	300	0
M , Нм	44	67,3	104,3	121	120	105,3	88,38	65,2	50,5	41,2

Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке:

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{н}} \omega_1 = M_{\text{н}} \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{M_{\text{н}} n_1}{9,55} = \frac{67,3 \cdot 1500}{9,55} = 10570 \text{ Вт.}$$

Потери энергии в статоре при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_{\text{с}} = P_{1\text{н}} - P_{\text{эм}} = 11900 - 10570 = 1330 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в роторе при номинальной нагрузке:

$$\Delta P_{\text{эл2}} = P_{\text{эм}} S_{\text{н}} = 10570 \cdot 0,0533 = 560 \text{ Вт.}$$

Общие потери энергии в двигателе при номинальной нагрузке

$$P_{\Sigma} = P_{1\text{н}} - P_{\text{н}} = 11900 - 10000 = 1900 \text{ Вт.}$$

На основании табличных данных строим характеристики $M = f(s)$ и $n = f(M)$, изображенные на рисунках 4 и 5.

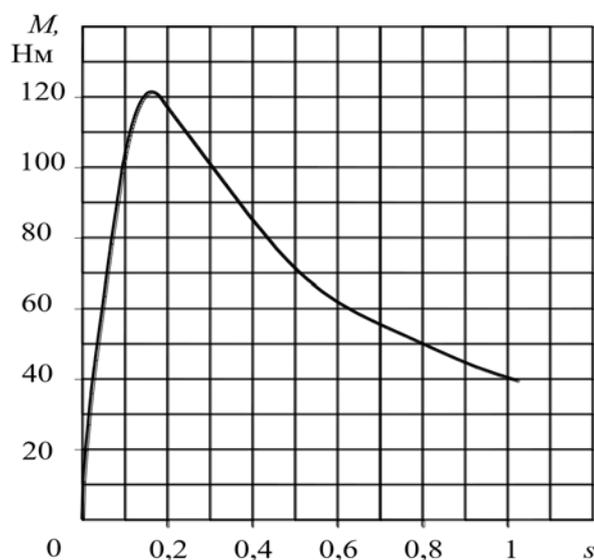


Рисунок 4 – Расчетная зависимость вращающего момента двигателя от скольжения

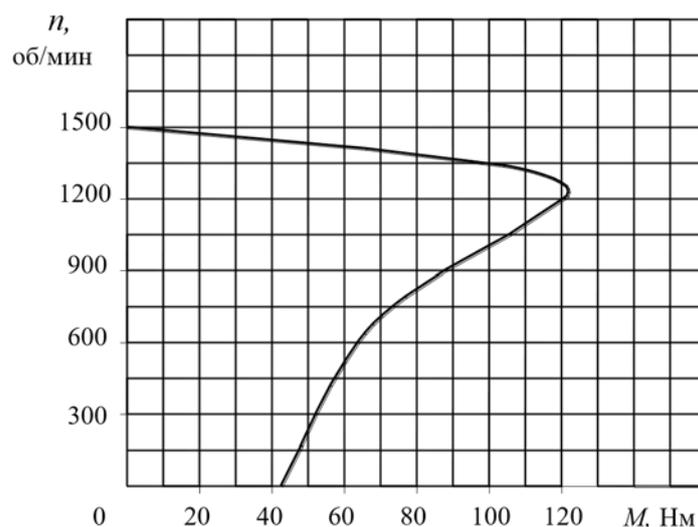


Рисунок 5 – Расчетная зависимость частоты вращения двигателя от вращающего момента

Из расчетной таблицы имеем при пуске двигателя $s = 1$ и $M_{п} = 41,2$ Нм. Так как $M_c = 67,3$ Нм $>$ $M_{п}$, то запустить двигатель нельзя. Работа двигателя при кратковременной перегрузке, равной 110 Нм, возможна, так как при этом $M_{кр} >$ M_c ($M_{кр} = 121$ Нм).

Кратность пускового момента:

$$k_{п} = \frac{M_{п}}{M_{н}} = \frac{41,2}{67,3} = 0,61.$$

Полезная мощность P_2' , Вт, на валу двигателя при частоте вращения ротора $n = 1450$ об/мин.

$$P_2' = 0,104Mn = 0,104 \cdot 44 \cdot 1450 = 6635 \text{ Вт},$$

где M , Нм, берется из рассчитанной выше таблицы для заданного n .

Контрольные вопросы

1. Как изменится ток холостого хода I_0 и номинальный коэффициент мощности двигателя $\cos\phi_{н}$, если увеличить воздушный зазор между ротором и статором?
2. Почему ток холостого хода двигателя меньше, чем ток номинального режима?
3. Почему в момент пуска двигателя ток статора имеет максимальное значение? Чему при этом равны скольжение s и частота тока ротора f_2 ?
4. С какой целью вводится добавочное сопротивление реостата R_p в цепь ротора двигателя с фазным ротором?
5. Начертите искусственные механические характеристики при регулировании частоты вращения посредством изменения частоты питающей сети.
6. Почему намагничивающий ток АД составляет (25...50 %) $I_{н}$, а у трансформатора он составляет (3...10 %) $I_{н}$?

7. В каком режиме ток обмотки короткозамкнутого ротора имеет максимальное значение? Чему при этом равно скольжение?
8. Чему равна частота тока ротора в момент пуска? Постройте зависимость $f_2(s)$.
9. Как влияет на процесс пуска двигателя момент нагрузки?
10. Как повлияет переключение обмотки статора с Δ на Y на величину пускового момента?
11. Почему пусковые свойства двигателя с фазным ротором лучше, чем у двигателя с короткозамкнутым ротором?
12. Каким образом можно уменьшить пусковой ток двигателя с короткозамкнутым ротором?
13. Зависит ли пусковой момент асинхронного двигателя от величины напряжения сети? Постройте качественные механические характеристики двигателя при $U_c = U_n$ и $U_c = 0,9U_n$.
14. Как зависит ЭДС ротора E_2 от частоты его вращения n_2 ? Когда в роторе наводится максимальная ЭДС?
15. Во сколько раз изменится максимальное значение момента M_{\max} , если напряжение сети снизится на 10 %?
16. Начертите рабочие характеристики АД и поясните их характер.
17. Поясните вид механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя.
18. Как изменятся величины максимального момента M_{\max} и критического скольжения $s_{\text{кр}}$ при введении пускового реостата в цепь ротора двигателя с фазным ротором?
19. Как изменится величина тока статора, $\cos \varphi$ и частота тока ротора f_2 при уменьшении противодействующего момента на валу двигателя?
20. Напишите уравнения намагничивающих сил и электрического состояния цепей ротора и статора АД.
21. Почему при введении реостата в цепь ротора АД с фазным ротором пусковой ток уменьшается, а пусковой момент увеличивается?
22. Каковы основные достоинства асинхронного двигателя? Начертите искусственные механические характеристики АД при регулировании частоты вращения изменением числа пар полюсов.
23. Как изменяется величина критического скольжения $s_{\text{кр}}$ с изменением величины добавочного сопротивления, введенного в цепь ротора?
24. Перечислить способы регулирования частоты вращения АД и указать наиболее экономичные из них.
25. Каково соотношение индуктивного сопротивления фазы ротора при пуске и в номинальном режиме?
26. Для чего последовательно с пусковой обмоткой однофазного АД включается конденсатор?
27. Сравните магнитные потери в статоре и роторе и укажите способы их уменьшения.

2.3. Контрольная работа

«Расчет мощности и выбор двигателя кранового механизма»

Задание:

1. Для двигателя подъема кранового механизма рассчитать и построить нагрузочную диаграмму.
2. Определить мощность двигателя и выбрать его тип по каталогу.
3. Предложить схему управления выбранным асинхронным двигателем с фазным ротором.
4. Предложить схему управления выбранным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.
5. Выбрать преобразователь частоты для управления выбранным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.
6. Ответить на контрольные вопросы.

Исходные данные приведены в таблице 15, где

G – вес поднимаемого груза, кН;

G_0 – вес захватываемого приспособления, кН;

h – высота подъема груза, м;

V – скорость подъема, м/мин;

η – коэффициент полезного действия;

$D_б$ – диаметр барабана лебедки, м;

i_p – передаточное число редуктора;

$t_п$ – время паузы, с;

$i_п$ – кратность полиспаста. Считать скорость подъема и спуска одинаковой.

Таблица 15 – Исходные данные

Параметры	Варианты									
	1, 11, 21	2, 12, 22	3, 13, 23	4, 14, 24	5, 15, 25	6, 16, 26	7, 17, 27	8, 18, 28	9, 19, 29	10, 20, 30
G	100	150	80	180	200	250	120	300	160	400
G_0	5	6	5	10	10	15	10	20	10	30
h	8	8	12	12	10	10	5	5	10	9
V	10	8	8	8	5	5	6	6	10	5
η	0,8	0,8	0,7	0,7	0,85	0,85	0,9	0,9	0,8	0,8
$D_б$	0,6	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7	0,8
i_p	30	40	30	40	40	50	30	50	30	60
$t_п$	50	60	60	50	40	40	50	50	60	40
$i_п$	4	4	4	4	4	5	4	5	4	5

Примечание: расчетный цикл времени состоит из суммы четырех отрезков времени работы и четырех отрезков времени пауз.

Для упрощения расчета принимают равными отрезки времени работы: t_{p1} – время работы на подъем груза, t_{p2} – время работы на спуск груза, t_{p3} – время работы на подъем пустого крюка, t_{p4} – время на спуск пустого крюка; а также равные четыре паузы между ними $t_{п1}$, $t_{п2}$, $t_{п3}$, $t_{п4}$.

2.3.1. Методические указания по выполнению контрольной работы «Расчет мощности и выбор двигателя кранового механизма»

Электрические двигатели кранов работают в тяжелых условиях (ударная нагрузка, перегрузки, повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками и реверсами), поэтому к ним предъявляют особые требования в отношении надежности и удобства эксплуатации. Для приводов механизмов кранов выпускаются специальные крановые двигатели повторно-кратковременного режима, имеющие прочность конструкции, увеличенную перегрузочную способность, нагревостойкую изоляцию, меньший момент инерции ротора. Основное конструктивное исполнение – закрытое, с горизонтальным валом, на лапах. Основным номинальным режимом работы двигателей является режим при $P_{вном} = 25\%$. В справочной литературе приводятся данные для ПВ 25, ПВ 40, ПВ 60.

Выбор мощности производят, исходя из эквивалентной мощности и нагрузочной диаграммы механизма, т. е. графика $P(t)$ за цикл работы, состоящей для механизма подъема из четырех рабочих операций.

Последовательность выполнения работы:

1. При известной высоте подъема груза h и скорости движения V определяют рабочее время для каждой операции t_{pi} , с :

$$t_{pi} = (h \cdot 60) / V.$$

2. При заданном времени паузы $t_{п}$ находят время рабочего цикла $t_{ц}$, с:

$$t_{ц} = \sum t_{pi} + \sum t_{ni}.$$

3. Производят расчет статических нагрузок. Определяют мощность двигателя подъема при подъеме груза $P_{п.груза}$, кВт:

$$P_{п.груза} = \frac{(G + G_0) \cdot V}{\eta \cdot 60}$$

4. Определяют мощность двигателя подъема при спуске груза $P_{сп.груза}$, кВт:

$$P_{сп.груза} = \frac{(G + G_0) \cdot V \cdot \eta}{60}$$

5. Определяют мощность двигателя при подъеме и спуске пустого крюка $P_{п.крюка}$, кВт:

$$P_{п.крюка} = P_{сп.крюка} = \frac{G_0 \cdot V}{\eta \cdot 60}$$

6. Выполняют построение нагрузочной диаграммы $P(t)$.

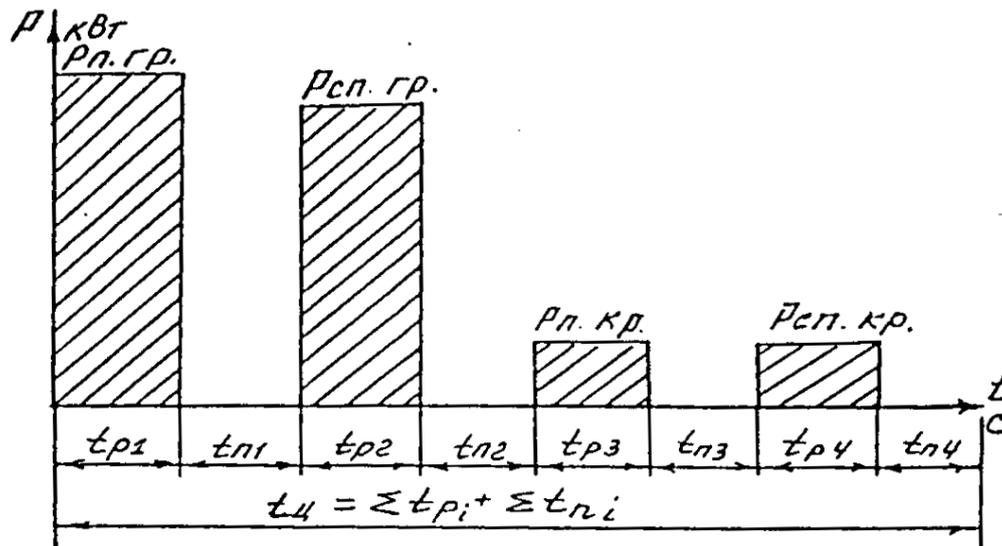


Рисунок 6 – Примерный график нагрузочной диаграммы

7. Далее находят действительную расчетную величину $PВ_{расч}$, %:

$$PВ_{расч} = \frac{\sum t_{pi}}{(\sum t_{pi} + \sum t_{ni})} \cdot 100\%$$

8. Подбирают близкое стандартное значение $PВ_{ном}$ (25 %; 40 %; 60 %).

9. Определяют эквивалентную мощность двигателя $P_э$, кВт:

$$P_э = \sqrt{\left(\frac{(\sum P_i)^2 \cdot t_{pi}}{\sum t_{pi}} \right) \cdot \left(\frac{PВ_{расч}}{PВ_{ном}} \right)} \cdot 100\%$$

10. Определяют номинальную скорость двигателя $n_{дв}$, об/мин:

$$n_{дв} = \frac{V \cdot i_p \cdot i_n}{\pi \cdot D_б^2}$$

11. В соответствии с расчетной номинальной скоростью подбирают тип кранового двигателя, исходя из условия: $P_{д.ном} \geq P_э$ по приложениям А, Б, В.

Записать тип двигателя, его технические данные: P_n , I_n , U_n , n_n .

Контрольные вопросы

1. Поясните режим работы мостовых кранов?
2. Дайте определение, напишите и поясните формулу ПВ.
3. Поясните особенности конструкции крановых двигателей.
4. Какие типы двигателей применяют для кранов?
5. Что такое нагрузочная диаграмма?
6. Что такое полный рабочий цикл?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По дисциплине «Электрические машины» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» предусмотрено выполнение расчетно-практических работ, являющихся подготовкой к овладению необходимыми профессиональными компетенциями, такими как:

- организация собственной деятельности, выбор типовых методов и способов выполнения профессиональных задач, способности оценивать их эффективность и качество;
- осуществление поиска и использование информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональных задач, профессионального и личностного развития;

Основные цели расчетно-практических работ:

- приобретение навыков по расчету, выбору и проверке электрооборудования.
- формирование умения пользоваться справочной и методической литературой, давать логическое объяснение результатам работы.

В результате выполнения расчетно-практических работ студент должен уметь производить расчеты мощности приводов металлорежущих станков, мостовых кранов, конвейеров, вентиляторов, лифтов других технологических объектов, выбирать электродвигатели и другое электрооборудование по каталогам и справочникам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ющенко, Л. В. Асинхронные двигатели с фазным ротором и схемы управления: учебно-методическое пособие / Л. В. Ющенко. – Хабаровск: ДВГУПС, 1999. – 88 с.

2. Галушко, В. Н. Электрические машины: практикум: учебно-методическое пособие для самостоятельной проработки курса / В. Н. Галушко, В. А. Пацкевич, А. В. Дробов. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 142 с.

3. Королев, В. И. Электротехника и электроника: программа, методические указания и контрольные работы для студентов заочного факультета / В. И. Королев, В. П. Николаев. – СПб., 2013. – 46 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Краново-металлургические асинхронные двигатели работают в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками в условиях повышенной тряски и вибрации. Обеспечивают высокие пусковые и максимальные моменты. Работают до 70 °С температуры окружающей среды. Имеют высокие классы нагревостойкости изоляции F (155°С), H (180°С). Степень защиты IP44.

Приложение А

Технические данные крановых двигателей с короткозамкнутым ротором

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	n_n , об/мин	I, А при 380 В	cosφ	КПД, %
1	2	3	4	5	6
МТКФ 011-6	1,4	875	5,2	0,66	61,5
012-6	2,2	880	7,2	0,69	67
111-6	3,5	885	9,4	0,79	72
МТКН 111-6	2,5	930	8,8	0,63	68
МТКФ 112-6	5	895	13,8	0,74	74
МТКФ 112-6	3,6	925	11,5	0,66	72
МТКФ 211-6	7,5	880	19,5	0,77	75,5
МТКН 211-6	7	895	20,8	0,7	73
МТКФ(Н) 311-6	11	910	28,5	0,76	77,5
312-6	15	930	36	0,78	81
411-6	22	935	51	0,79	82,5
412-6	30	935	70	0,78	83,5
311-8	7,5	690	21,8	0,71	73,5
312-8	11	700	29	0,74	78
411-8	15	695	40	0,71	80
412-8	22	700	60	0,69	80,5
МТКН 511-8	28	695	67	0,77	83
512-8	37	695	87	0,78	83

Приложение Б
Технические данные крановых двигателей с фазным ротором

Тип двигателя	$P_{ном},$ кВт	$n_{н},$ об/мин	$I,$ А при 380 В	$\cos\varphi$	КПД, %
1	2	3	4	5	6
МТФ 011-6	1,4	885	5,3	0,65	61,5
012-6	2,2	890	7,6	0,68	64
111-6	3,5	895	10,4	0,73	70
МТН 111-6	3	895	10,5	0,67	65
МТФ 112-6	5	930	14,4	0,7	75
МТН 112-6	4,5	910	13,9	0,71	69
МТФ 212-6	7,5	930	21	0,7	77
МТН 211-6	7	920	22,5	0,64	73
МТФ(Н) 311-6	11	945	30,5	0,69	78
312-6	15	955	38	0,73	81
411-6	22	965	55	0,73	83,5
412-6	30	970	75	0,71	85,5
МТН 512-6	55	960	120	0,79	88
611-6	75	950	154	0,85	87
612-6	99	960	193	0,85	88
613-6	118	960	237	0,84	90
МТФ(Н) 311-8	7,5	696	22,8	0,68	73
312-8	11	705	30,5	0,71	77
411-8	15	710	42	0,67	81
412-8	22	720	65	0,63	82
МТН 511-8	28	705	71	0,72	83
512-8	37	705	89	0,74	85
611-10	45	570	112	0,72	84
612-10	60	565	147	0,78	85
613-10	75	575	180	0,72	88

Приложение В

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором серии АИР
основного исполнения, закрытые, обдуваемые

Тип двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	cosφ	S _{ном} , %	K _п	K _{max}	K _{min}	K _л	Уровень звука, дБ, (по шкале А)	Момент инерции, кг · м ²	Масса, кг
Синхронная частота вращения 1500 об/мин											
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	50	0,000029	2,6
АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	50	0,000033	2,9
АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	56	0,00070	3,35
АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	56	0,00079	3,9
АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0012	4,7
АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	56	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	56	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	58	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	58	0,0056	17
АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	62	0,0087	21,6
АИР100L4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	62	0,011	27,3
АИР112M4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	65	0,017	41
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	69	0,028	58
АИР132M4	11	87,5	0,87	3,5	2	2,7	1,6	7,5	69	0,04	70
АИР160S4	15	90	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	70	0,078	100
АИР160M4	18,5	90,5	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	70	0,1	110
АИР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7	73	0,15	170
АИР180M4	30	92	0,87	2	1,7	2,7	1,5	7	74	0,19	190
АИР200M4	37	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	74	0,28	245
АИР200L4	45	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	74	0,34	270
АИР225M4	55	93	0,89	2	1,7	2,6	1,6	7	75	0,51	335
АИР250S4	75	94	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	77	0,89	450
АИР250M4	90	94	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	78	1,1	480

Тип двигателя	Мощность, кВт	КПД, %	cosφ	S _{ном} , %	K _п	K _{max}	K _{min}	K _г	Уровень звука, дБ, (по шкале А)	Момент инерции, кг · м ²	Масса, кг
Синхронная частота вращения 1500 об/мин											
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	50	0,000029	2,6
АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	50	0,000033	2,9
АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	56	0,00070	3,35
АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	56	0,00079	3,9
АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0012	4,7
АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	56	0,0013	7,8
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	56	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	56	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	58	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	58	0,0056	17
АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	62	0,0087	21,6
АИР100L4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	62	0,011	27,3
АИР112M4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	65	0,017	41
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	69	0,028	58
АИР132M4	11	87,5	0,87	3,5	2	2,7	1,6	7,5	69	0,04	70
АИР160S4	15	90	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	70	0,078	100
АИР160M4	18,5	90,5	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	70	0,1	110
АИР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7	73	0,15	170
АИР180M4	30	92	0,87	2	1,7	2,7	1,5	7	74	0,19	190
АИР200M4	37	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	74	0,28	245
АИР200L4	45	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	74	0,34	270
АИР225M4	55	93	0,89	2	1,7	2,6	1,6	7	75	0,51	335
АИР250S4	75	94	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	77	0,89	450
АИР250M4	90	94	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	78	1,1	480

Выбор преобразователя частоты для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Преобразователь частоты обеспечивает две его основные и взаимосвязанные функции: управление технологическим процессом рабочей установки в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями и электромеханическое преобразование энергии с максимальной ее эффективностью. Реализация этих функций требует особого подхода к выбору и эксплуатации регулируемого электропривода по сравнению с нерегулируемым. Теоретические аспекты такого подхода хорошо известны специалистам в области автоматизированного электропривода (АЭП). Однако за последние годы произошло заметное сокращение числа специализированных проектных организаций и отток из них наиболее квалифицированных

специалистов в области электропривода. Исчезла согласованность проектных и наладочных организаций, их разобщенность стала приводить к повторным ошибкам, а опыт ввода в эксплуатацию электроприводов стал практически (по конъюнктурным соображениям) ограничен для других специалистов.

Обоснование мощности и типа электрических двигателей и частотных преобразователей

Регулирование технологических координат с высокой статической и динамической точностью требует от электропривода дополнительного запаса по его динамической мощности. Последняя должна выбираться с учетом его реальных нагрузочных диаграмм, включая и динамические составляющие моментов, связанные с изменением приведенного к валу электродвигателя момента инерции. При модернизации электропривода, связанной с заменой одного типа привода на другой, следует учитывать и разницу в перегрузочных способностях по току, моменту и моментах инерции заменяемых электродвигателей. Наиболее актуальны эти замечания для приводов, работающих в повторно-кратковременных режимах работы и на валу которых по технологии рабочей установки имеют место скачкообразные изменения нагрузок.

Распространенной ошибкой является выбор мощности частотного преобразователя, питающего электродвигатель по реальной эксплуатационной мощности этого же двигателя в разомкнутой системе управления. При этом из-за ограничения максимально допустимого тока преобразователя возникает проблема обеспечения требуемых динамических показателей привода при введении обратных связей по регулируемым координатам.

Выбор преобразователя частоты на технологическую мощность привода, заметно меньшую номинальной установленной мощности электродвигателя, усугубляет и проблему автоматической идентификации значений его параметров и параметров регуляторов системы управления электроприводом с помощью встроенного в преобразователи их программного обеспечения. При несовпадении предварительно установленных граничных значений параметров двигателя близкого по мощности преобразователю его программное обеспечение либо указывает на невозможность идентификации параметров электродвигателя и блокирует работу преобразователя совместно с двигателем, либо вносит заметные погрешности в свою математическую модель двигателя, на основе которой вычисляются режимы работы и ограничения переменных электропривода. В итоге динамические показатели и эксплуатационная надежность электропривода снижаются.

При выборе частотных преобразователей, работающих в регулируемом электроприводе с высоко динамичными и повторно-кратковременными режимами, не редко игнорируется необходимость обеспечения рекуперации энергии со стороны электродвигателя в питающую сеть, либо на активную нагрузку. Такие преобразователи должны иметь либо двухсторонний обмен энергией между двигателем и питающей преобразователь сетью (ПЧ с непосредственной связью, на основе автономных инверторов тока, с блоком

рекуперации на входе инвертора), либо иметь дополнительный резистор для сброса на него рекуперированной энергии. Создание многодвигательного привода с единой шиной постоянного тока для питания инверторов ПЧ и установкой общего инвертора постоянного тока на неполную суммарную мощность привода способствует решению подобной проблемы. Понятно, что стоимость таких преобразователей возрастает, но технология работы установок и особенно требования их экстренного останова при аварийных режимах или опасности жизнедеятельности обслуживающего персонала вынуждает идти на дополнительные затраты.

Регулирование скорости привода переменного тока отражается и на ухудшении условий охлаждения электродвигателей с самовентиляцией при уменьшении их скорости. Российская электротехническая промышленность, к сожалению, отстает от производства специальных машин переменного тока при их питании от управляемых ПЧ. В итоге это заставляет либо увеличивать установленную мощность двигателей, либо решать в экстренных ситуациях проблему их дополнительного охлаждения.

Одна из особенностей питающих сетей крупных металлургических комбинатов России связана с тем, что их номинальное напряжение достигает 10 кВ. Это создает заметные трудности при замене нерегулируемого электропривода переменного тока на регулируемый, поскольку в отечественной промышленности отсутствует выпуск ПЧ с выходным напряжением до 10 кВ. Актуальность их создания весьма велика.

Для мощных технологических установок, где окружающая среда отличается повышенной влажностью или наличием токопроводящих частиц, наметилась тенденция заказа со стороны эксплуатационного персонала низковольтного исполнения электропривода. Подобное решение способствует заметному снижению эксплуатационных затрат на его обслуживание при увеличении надежности и безопасности электрооборудования.

Согласование преобразователей частоты с питающей их сетью и электродвигателем

Возможность резких колебаний и искажений напряжения и тока питающей преобразователя сети из-за коммутационных режимов (включения и отключения питающего преобразователя трансформатора, коммутации вентилей и т. п.) заставляет принимать специальные защитные меры по ограничению их влияния на работу преобразователя и системы его управления. К числу подобных мер относятся установка на входе преобразователя силовых токоограничивающих реакторов, защитных RC-цепей или варисторов. Актуальность обоснования и выбора их параметров сохраняется и до сих пор.

Особенно это проявляется при замене отечественных преобразователей на преобразователи иностранных фирм, когда сохраняется питающая сеть со всеми реальными для нее отклонениями напряжения и основные силовые элементы отечественного производства (трансформаторы, коммутационная аппаратура, электродвигатели) с параметрами (индуктивностью, емкостью, временем коммутации и т. п.), отличающимися от зарубежных.

Наличие промежуточного повышающего трансформатора на выходе ПЧ для питания электродвигателя с более высоким напряжением на статоре, чем выходное напряжение преобразователя, создает ряд проблем, связанных с дополнительным нагревом этого трансформатора из-за высокочастотных составляющих выходного тока преобразователя, с первоначальным пуском двигателя и выбором начальной частоты и выходного напряжения преобразователя. Они усиливаются для технологических установок с активным моментом сил сопротивления и требующих по технологии применения структур векторного управления электроприводом.

Внедрение ПЧ с широтно-импульсной модуляцией его выходного напряжения сопровождается усилением требований к состоянию изоляции силовых цепей элементов электропривода и возможности использования старых кабелей связи при реконструкции привода. Высокочастотные составляющие выходного напряжения преобразователей вынуждают устанавливать на их выходе либо дополнительные фильтры, либо ограничивать длину кабельных линий между преобразователем и двигателем для ограничения перенапряжений на силовых полупроводниковых ключах преобразователя. Заметно возросла и актуальность контроля изоляции силовых цепей электропривода с помощью специализированных устройств.

Для привода ряда механизмов (насосов, компрессоров, дутьевых вентиляторов и т. п.) по технологическим и экономическим соображениям часто закладываются требования управляемого пуска асинхронного двигателя до его номинальной скорости с последующим подключением двигателя на питающую сеть, или обратно от сети к ПЧ для управляемого режима торможения. Такие переключения могут сопровождаться заметными и, часто недопустимыми, изменениями тока в силовой цепи питания и скорости двигателя. Особенно это сказывается при больших нагрузках и малых моментах инерции привода. Для подобных режимов работы электропривода используется способ переключения с «перекрытием», когда асинхронный двигатель кратковременно подключается и к сети и к преобразователю частоты одновременно. При этом для достижения равенства частоты, амплитуды и синфазности выходного напряжения преобразователя с напряжением питающей сети в системе управления ПЧ должен предусматриваться специальный блок синхронизации, а для ограничения уравнивающих токов между ПЧ и сетью устанавливается разделительный дроссель.

Для регулируемого электропривода подъемно-транспортных механизмов (кранов, слитковозов и т. п.) могут возникать проблемы, связанные с кратковременными прерываниями тока в силовых цепях подключения статорных обмоток асинхронного электродвигателя к выходу ПЧ посредством контактных проводов (троллеев) через скользящие токосъемники. При работе ПЧ со скалярной системой управления координатами электродвигателя подобное прерывание тока лишь в одной его фазе не приводит к аварийным режимам и останову привода. При длительном прерывании тока в одной фазе электродвигателя из-за асимметрии его напряжения питания увеличиваются потери в двигателе и при нагрузке на его валу уменьшается частота вращения. В итоге ПЧ будет отключен со стороны защиты двигателя по превышению его

температуры. При работе ПЧ с векторной системой управления координатами электродвигателя кратковременное прерывание тока в одной из фаз вызывает аварийное отключение привода и его останов. Кратковременное двухфазное прерывание питания электродвигателя в скользящих токосъемниках приводит, как правило, к отключению преобразователя по его максимально-допустимому току при последующем восстановлении питания двигателя. Для подобных режимов необходимо в программное обеспечение системы управления преобразователем включать либо возможность его автоматического повторного включения или «самоподхвата», при котором используется кинетическая энергия вращения ротора двигателя.

Наладка частотного преобразователя

Развитие микропроцессорных систем управления электропривода позволяет получать весьма качественные его показатели, однако их техническая реализация требует и более глубокой информации о реальных параметрах элементов электропривода. К сожалению, в отечественных каталогах и паспортных данных на электрооборудование все реже можно найти данные по активным и реактивным сопротивлениям электрических обмоток двигателей, их тепловых постоянных времени, моментов инерции и т. п., т. е. по тем параметрам, которые должны вводиться в программное обеспечение системы управления электропривода. Отсутствие численных значений ряда параметров силовой части электропривода, которые должны вводиться в математическую модель электродвигателя, заметно ограничивает качество настройки и надежность работы электропривода. Поэтому во многих преобразователях предусмотрен режим идентификации этих параметров и автоматической настройки параметров регуляторов системы управления вводимого в эксплуатацию электропривода. Следует отметить, что настройка параметров регуляторов носит, как правило, «ориентировочный» характер, обеспечивая лишь устойчивость замкнутой системы регулирования выходных координат. Затем при необходимости увеличения динамических показателей электропривода параметры регуляторов должны корректироваться более качественно уже наладочным персоналом.

Увеличению точности и стабильности систем управления электропривода; их эксплуатационной надежности и снижению затрат на обслуживание способствуют идеология анализа и синтеза цифровых систем по подобию аналоговых систем управления; возможность реализации на их основе не только структур подчиненного регулирования координат электропривода, но и иных технологически обусловленных структур, например с переключающимися обратными связями, с системами по принципу фаззи-логики, нейронными системами и т. п.

Выбор структуры управления электропривода во многом определяет его конечные показатели регулирования. Для частотно-регулируемого асинхронного электропривода наиболее распространен скалярный принцип управления его координатами. Ему свойственна техническая простота измерения и регулирования переменных электродвигателя, а также возможность построения как замкнутых, так и разомкнутых систем управления

его скоростью. Основной недостаток скалярного управления – это трудность реализации желаемых законом регулирования момента и высоких динамических показателей регулирования координат электропривода. Поэтому для приводов, где по технологии требуется максимальное быстроедействие при регулировании его координат и управление моментом электропривода, применяется векторное управление его координатами.

Наличие в программном обеспечении преобразователей стандартных функциональных модулей, позволяющих при наладке электропривода оперативно менять структуру и алгоритмы его управления в соответствии с возможными коррекциями технологических режимов его работы, способствует увеличению качества их настройки. На основе функциональных модулей могут быть реализованы и системы логического управления электроприводом, блокировок, защит и диагностирования работоспособности привода. При этом процедура построения и программирования функциональных модулей, представленных в цифровой форме преобразования сигналов, должна быть близка к широко понятной эксплуатационным персоналом аналоговой форме их реализации. Подобное решение имеет место для многих зарубежных преобразователей, где функциональные блоки объединяются между собой аналоговыми и логическими «соединителями», кодируемыми численными номерами.

Обеспечение электромагнитной совместимости частотного преобразователя

Уменьшение мощности управления при резком увеличении динамических свойств элементов, роста мощности и числа дискретных преобразователей заметно обострили проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) элементов АЭП и АСУТП. Проблема усугубляется и частым игнорированием ее специалистами, непосредственно отвечающими за функционирование АЭП и АСУТП – проектантами, конструкторами, службами электромонтажа, наладки и эксплуатации.

Распространенной ошибкой с позиций обеспечения ЭМС элементов АЭП в последнее время стало применение неэкранированных силовых кабелей между ПЧ и электродвигателем. Способствует этому и отсутствие выпуска в отечественной промышленности силовых кабелей, имеющих экранированную оболочку с внешним изоляционным слоем и специально предназначенных для работы с мощными ПЧ. В итоге приходится пользоваться зарубежной кабельной продукцией с весьма высокими на нее ценами.

Обеспечения работоспособности электропривода связано и с необходимостью диагностирования его технического состояния в условиях промышленной эксплуатации АЭП. Кроме общепринятых и программно реализованных в устройствах управления ПЧ систем диагностирования собственно электроприводов, для контроля внешних устройств управления электроприводом и технологических режимов его работы целесообразно сопровождать эти системы видеотерминальными устройствами наблюдения и записи контролируемых координат со встроенными в них дополнительными программами диагностирования.