

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим занятиям

по дисциплине «Электрические машины»

Направление подготовки 140400.62

«Электроэнергетика и электротехника»

Профиль подготовки:

Электроэнергетические системы и сети

Электроснабжение

Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

Менеджмент в электроэнергетике

Методические указания по выполнению практических занятий составлены в соответствии с требованиями ГОС ВПО, программы дисциплины «Электрические машины» для студентов по направлению подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника», профиль Электроэнергетические системы и сети, Электроснабжение, Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, Менеджмент в электроэнергетике.

Методические указания включают в себя теоретическую часть и задания к практическим занятиям.

Составители: к.т.н., доцент О. И. Юдина.

Рецензент: к.т.н., доцент В. А. Мамаев

Содержание

Введение.....	5
1. Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе.....	6
2. Работа трансформатора под нагрузкой	8
3. Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора	18
4. Трансформация трехфазных токов.....	25
5. Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора...	27
6. Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока.....	32
7. Электромагнитные процессы в синхронной машине	41
8. Построение векторных диаграмм синхронного генератора	44
9. Расчет основных параметров синхронных генераторов	50
10. Расчет основных параметров синхронных двигателей	53
11. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе.....	57
12. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.....	60
13. Потери, КПД асинхронного двигателя.....	64
14. Механическая характеристика асинхронного двигателя.....	68
15. Однофазный асинхронный двигатель.....	73
16. Пусковые свойства асинхронного двигателя.....	76
17. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.....	81
18. Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока.....	83
19. Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке.....	88
20. Режимы работы машины постоянного тока.....	92
21. Коммутация и реакция якоря машины постоянного тока.....	96
22. Характеристики генераторов постоянного тока независимого возбуждения.....	99

23. Характеристики генераторов постоянного тока параллельного возбуждения.....	105
24 Характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения.....	107
25. Характеристики двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения.....	111
26. Пусковые и регулировочные свойства двигателей постоянного тока....	114
Литература.....	121

Введение

Электрическая машина является существенным элементом энергетических систем и установок, а также многочисленных электротехнических схем, поведение которых в значительной мере зависит от рабочих свойств электрической машины. Поэтому для специалистов, работающих в самых разнообразных отраслях электроэнергетики, является необходимым изучение основ теории электрических машин. Необходимо иметь физические представления о процессах, происходящих в электрических машинах, понимать принцип действия и знать их устройство. Инженерная практика имеет дело с количественными расчетами и теория должна дать для этого необходимую основу. Такой основой должно служить по возможности аналитическое описание рабочих свойств электрических машин и процессов, происходящих в них. Изучающему дисциплину нужно помимо физических представлений усвоить уравнения, описывающие электрические машины, параметры, входящие в эти уравнения, и, наконец, сами методы исследования.

Данные методические указания призваны оказать помощь студентам в практическом применении теоретических знаний для решения задач по расчету параметров и режимов работы электрических машин и трансформаторов.

1 Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-4, ПК-5.

Теоретическая часть

Под холостым ходом трансформатора понимают такой режим его работы, при котором к зажимам первичной обмотки подводят напряжение, а вторичная обмотка разомкнута, то есть вторичный ток равен нулю.

Холостой ход – это предельный режим работы, позволяющий определить такие важные величины как: коэффициент трансформации, ток холостого хода трансформатора, потери при холостом ходе трансформатора.

Пусть к зажимам первичной обмотки трансформатора приложено гармоническое напряжение,

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t ; \quad (1.1)$$

под действием которого по обмотке течёт ток i_0 . Этот ток создаёт намагничивающую силу $i_0 w_1$, где w_1 – число последовательно соединённых между собой витков первичной обмотки. Н.с. первичной обмотки вызывает появление магнитного потока. Этот поток имеет несколько составляющих: Φ_0 – основной поток, составляющий большую часть суммарного потока, замыкается по сердечнику и сцепляется с обеими обмотками; $\Phi_{\sigma 1}$ – поток рассеяния первичной обмотки, замыкается вне сердечника, сцепляется только с первичной (возможно частично со вторичной) обмоткой.

Поток Φ_0 наводит в первичной обмотке основную ЭДС, e_1 и во вторичной - e_2 . Поток $\Phi_{\sigma 1}$ – создаёт в первичной обмотке ЭДС рассеяния $e_{\sigma 1}$.

Поскольку по первичной обмотке течёт ток i_0 , то на активном её сопротивлении r_1 имеет место падение напряжения $i_0 r_1$. Согласно второму закону Кирхгофа, в векторной форме можно записать:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_0 \cdot r_1 ; \quad (1.2)$$

В трансформаторах обычной конструкции поток рассеяния при холостом ходе ($P_{cm} \approx 0$) мал, r_1 тоже мало и $\dot{I}_0 \cdot r_1 - \dot{E}_{\sigma 1}$ обычно не превышает 5% от \dot{U}_1 . По этому в первом приближении этой разностью можно пренебречь. Тогда уравнение (1.2) имеет вид :

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1; \quad (1.3)$$

то есть при холостом ходе напряжение, подведённое к обмотке трансформатора, практически уравнивается только ЭДС, создаваемой в этой обмотке основным магнитным потоком.

Выражение (1.4) является основным в теории трансформаторов для расчёта действующего значения ЭДС.

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (1.4)$$

Вторичная обмотка пронизывается тем же потоком Φ_m , поэтому действующее значение ЭДС вторичной обмотки, аналогично уравнению (1.4), можно записать в виде:

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (1.5)$$

Отношение E_1 к E_2 называется коэффициентом трансформации трансформатора:

$$k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2. \quad (1.6)$$

Мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме х.х. расходуется только на потери в стали.

Задачи

1. Определить номинальный ток вторичной обмотки $I_{2н}$ однофазного трансформатора, если номинальная мощность $S_n = 20$ кВА, номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1н} = 10$ кВ, коэффициент трансформации $k = 15$.

2. Определить номинальную мощность трехфазного трансформатора S_n и номинальный ток первичной обмотки $I_{1н}$, если номинальное напряжение

первичной обмотки $U_{1н} = 20$ кВ, номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2н} = 0.4$ кВ, номинальный ток вторичной обмотки $I_{2н} = 150$ А.

3. Найти действующие значения ЭДС в обмотках E_1 и E_2 , если максимальный магнитный поток $\Phi_{\max} = 0.02$ Вб, частота тока $f = 50$ Гц, числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно $W_1 = 100$, $W_2 = 50$.

4. Максимальный магнитный поток в сердечнике однофазного трансформатора $\Phi_{\max} = 0.02$ Вб, число витков первичной обмотки $W_1 = 500$. Определить коэффициент трансформации k и подведенное напряжение U_1 , если напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостом ходе $U_{2о} = 127$ В, частота напряжения сети $f = 50$ Гц.

5. Трансформатор включен в сеть переменного тока промышленной частоты. Индуктивность рассеяния первичной обмотки $L_{\sigma 1} = 0.001$ Гн. Определить индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки $x_{\sigma 1}$.

Вопросы к практическому занятию

1. Какие параметры трансформатора позволяет определить такой режим работы, как холостой ход?
2. Как определить действующее значение ЭДС трансформатора?
3. Что такое коэффициент трансформации, как его определить?
4. На что расходуется мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе?

2 Работа трансформатора под нагрузкой

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

В паспорте трехфазных трансформаторов дается номинальная мощность и мощность потерь всех трех фаз; под номинальными напряжениями

понимаются линейные напряжения на зажимах трансформатора в режиме холостого хода, а под номинальными токами — линейные токи независимо от схемы соединения обмоток.

Полная мощность трехфазного двухобмоточного трансформатора, $B \cdot A$,

$$S_H = \sqrt{3} U_{1H} \cdot I_{1H}. \quad (2.1)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения, равное отношению числа витков этих обмоток, называется коэффициентом трансформации:

$$k = E_{1H} / E_{2H} = w_1 / w_2. \quad (2.2)$$

Трансформатор, у которого параметры вторичной цепи приведены к числу витков первичной обмотки w_1 , называется приведенным трансформатором. Такому трансформатору соответствует электрическая схема замещения (рис. 2.1) и основные уравнения:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \quad (2.3)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2;$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2).$$

Индуктивные сопротивления первичной x_1 и вторичной x_2 обмоток обусловлены потоками рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$.

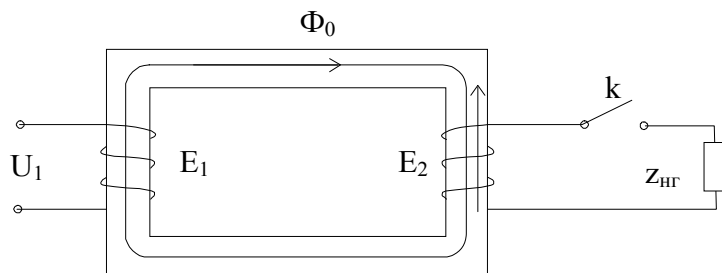


Рисунок 2.1 – Схема замещения трансформатора

Формулы приведения параметров вторичной цепи:

– ток вторичной обмотки

$$I'_2 = I_2 \cdot k; \quad (2.6)$$

– ЭДС и напряжение вторичной обмотки

$$E'_2 = E_2 \cdot k, U'_2 \approx U_2 \cdot k; \quad (2.7)$$

– активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки

$$r'_2 = r_2 \cdot k^2, x'_2 = x_2 \cdot k^2; \quad (2.8)$$

– полное сопротивление вторичной обмотки

$$z'_2 = z_2 \cdot k^2; \quad (2.9)$$

– полное сопротивление нагрузки

$$z'_H = z_H \cdot k^2. \quad (2.10)$$

При изменении нагрузки трансформатора в широком диапазоне (от холостого хода до номинального режима) магнитный поток может считаться практически постоянным и равным магнитному потоку в режиме холостого хода. Это в свою очередь определяет постоянство потерь в стали, которые легко определяются из режима холостого хода.

В режиме «нормального» короткого замыкания магнитный поток в сердечнике трансформатора настолько мал, что им можно пренебречь, а следовательно, при этом режиме потери в стали трансформатора практически равны нулю, а потери в меди (в обмотках трансформатора) равны потерям при номинальной нагрузке трансформатора. Величины токов, напряжений и мощностей, полученные из режимов холостого хода и «нормального» короткого замыкания, позволяют определить основные параметры трансформатора.

Сопротивление короткого замыкания трансформатора

– полное

$$z_K = U_{K\phi} / I_{K\phi}; \quad (2.11)$$

– активное

$$r_K = P_K / 3 \cdot I_K^2; \quad (2.12)$$

– реактивное

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (2.13)$$

Сопротивления первичной обмотки

$$r_1 = r_2' = r_k / 2, \quad (2.14)$$

$$x_1 = x_2' = x_k / 2. \quad (1.15)$$

Сопротивления вторичной обмотки

$$r_2 = r_2' / k^2, \quad (2.16)$$

$$x_2 = x_2' / k^2. \quad (2.17)$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$\begin{array}{c} \text{---} \end{array} \quad (2.18)$$

$$u_{кр} = u_k \cdot \sin \varphi_k. \quad (2.19)$$

Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_k / \sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k. \quad (2.20)$$

Максимальное значение магнитного потока находится по формуле:

$$\Phi_m = B_m \cdot Q_{ст} \cdot k_c, \quad (2.21)$$

где B_m – максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода,

$Q_{ст}$ – площадь поперечного сечения магнитопровода,

k_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cos \varphi_2 + P_{0H} + \beta^2 P_{KH}}, \quad (2.22)$$

где P_{0H} – мощность холостого хода при номинальном напряжении,

P_{KH} – мощность КЗ при номинальных токах в обмотках трансформатора.

Электрические потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке можно определить, если известны значения активных сопротивлений и токов обмоток трансформатора:

$$P_{эм} = P_{э1} + P_{э2} = m I_1^2 r_1 + m_1 I_2'^2 r_2' \quad (2.23)$$

Наибольший КПД соответствует коэффициенту нагрузки:

$$\beta_{ont} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KH}}} \quad (2.24)$$

Тогда формула для КПД принимает вид:

$$\eta_{\max} = \frac{\beta' S_H \cos \varphi_2}{\beta' S_H \cos \varphi_2 + 2P_{0H}} \quad (2.25)$$

Пример 1. Дан масляный трансформатор ТМ-25/10 с номинальными параметрами: номинальной мощностью $S_{ном} = 25 \text{кВ} \cdot \text{А}$, номинальным напряжением $U_1=10 \text{кВ}$, номинальным током первичной обмотки I_1 , напряжением КЗ $U_k\%=4,5$ и его активными и реактивными параметрами U_{ka} и U_{kr} , мощности холостого хода и КЗ $P_0 = 0,13 \text{кВт}$ и $P_k = 0,6 \text{кВт}$, ток холостого хода $I_0\% = 3,2$, коэффициенты мощности холостого хода и КЗ $\cos \varphi_k$ и $\cos \varphi_x$, Сопротивление КЗ Z_k , и его активная и реактивная части r_k и x , его номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{ном}\%$ (индуктивный характер). Соединение трансформатора Y/Y. Определить неизвестные параметры трансформатора.

Решение:

- Номинальный ток в первичной обмотке

$$I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} \cdot U_{1H}) = 25 / (1,73 \cdot 10) = 1,44 \text{ А}.$$

- Ток холостого тока

$$I_0 = (i_0/100)/I_{1H} = (3,2/100)1,44 = 0,46 \text{ А}.$$

- Коэффициент мощности Холостого тока

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3} I_0 \cdot U_{1H}) = 0,13 / (1,73 \cdot 0,46 \cdot 10) = 0,16.$$

- Напряжение Короткого замыкания

$$U_k = (U_k / 100) U_{1H} / \sqrt{3} = (4,5/100)10/1,73 = 0,26 \text{ кВ}.$$

- Коэффициент мощности Короткого замыкания

$$\begin{aligned} \cos \varphi_k &= P_k / (3 I_{1H} \cdot U_k) = 0,6 / (3 \cdot 1,44 \cdot 0,26) = 0,53; \\ \sin \varphi_k &= 0,85. \end{aligned}$$

- Активная и реактивная составляющие напряжения Короткого замыкания

$$U_{\kappa a} = U_{\kappa} \cos \varphi_{\kappa} = 4,5 \cdot 0,53 = 2,38\%$$

$$U_{\kappa p} = U_{\kappa} \sin \varphi_{\kappa} = 4,5 \cdot 0,85 = 3,8\%$$

- Сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\kappa} = U_{\kappa} / I_{1H} = 0,26 \cdot 10^3 / 1,44 = 180 \text{ Ом.}$$

- Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_{\kappa} = Z_{\kappa} \cos \phi_{\kappa} = 1800,53 = 95,4 \text{ Ом;}$$

$$x_{\kappa} = Z_{\kappa} \sin \phi_{\kappa} = 180 \cdot 0,85 = 153 \text{ Ом.}$$

- Номинальное изменение напряжения трансформатора при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{H\%} = U_{\kappa a} \cos \varphi_2 + U_{\kappa p} \sin \varphi_2 = 2,38 \cdot 0,8 + 3,8 \cdot 0,6 = 4,18\% .$$

Пример 2. Технические данные трехфазного трансформатора ТМ-630/10: номинальная мощность $S_{ном} = 630 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, номинальные первичное $U_{1H} = 10 \text{ кВ}$ и вторичное $U_{2ном} = 0,4 \text{ кВ}$ напряжения, напряжение короткого замыкания $U_k = 5,5\%$ мощность короткого замыкания $P_{кном} = 7,6$ мощность холостого хода $P_{0H} = 1,56$, ток холостого хода $i_0 = 2,0$. Определить необходимые параметры и построить треугольник короткого замыкания (обмотки соединены Y/Y; параметры приведены к рабочей температуре).

Решение:

- Напряжение короткого замыкания

$$U_{1\kappa} = 10^2 \cdot U_k \cdot U_{ном} = 10^2 \cdot 5,5 \cdot 10 \cdot 10^3 = 550 \text{ В.}$$

- Ток короткого замыкания

$$I_{1\kappa} = I_{ном1} = S_{ном} / (\sqrt{3} \cdot U_{1ном}) = 630 \cdot 10^3 / (1,73 \cdot 10 \cdot 10^3) = 36,4 \text{ А.}$$

- Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \phi_{\kappa} = P_{\kappa H} / U_{1H} \cdot I_{\kappa 1} = 7600 / (1,73 \cdot 550 \cdot 36,4) = 0,22 ;$$

$$\phi_{\kappa} = 77^\circ ; \sin \phi_{\kappa} = 0,97 .$$

- Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\kappa} = U_{\kappa} / (\sqrt{3} I_{1\kappa}) = 550 / (\sqrt{3} \cdot 36,4) = 8,7 \text{ Ом}$$

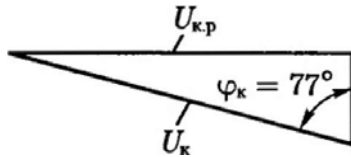
- Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_{\kappa} = Z_{\kappa} \cos \phi_{\kappa} = 8,7 \cdot 0,22 = 1,9 \text{ Ом.}$$

- Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_k = Z_k \sin \phi_k = 8,7 \cdot 0,97 = 8,44 \text{ Ом.}$$

- Стороны треугольника напряжений короткого замыкания



$$U = I_k z_k = 36,4 \cdot 8,7 = 317 \text{ В;}$$

$$U_{ka} = I_k r_k = 36,4 \cdot 1,9 = 69 \text{ В;}$$

$$U_{kp} = I_k \cdot x_k = 36,4 \cdot 8,44 = 307 \text{ В.}$$

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

$$U_k = 317/5 = 63 \text{ мм; } U_{ka} = 69/5 = 14 \text{ мм; } U_{kp} = 307/5 = 61 \text{ мм.}$$

Задачи

1. Трехфазный трансформатор имеет параметры, значения которых приведены в табл. 1.2.1: номинальная мощность $S_{ном}$ и номинальные напряжения (линейные) $U_{1ном}$ и $U_{2ном}$, напряжение короткого замыкания ток холостого хода Γ_0 , потери холостого хода $P_{ном}$ и потери короткого замыкания $P_{к1ном}$. Обмотки трансформатора соединены по схеме «звезда—звезда». Требуется определить: параметры Т-образной схемы замещения, считая ее симметричной ($r = r'_2$ и $x = x'_2$), а также фактические значения сопротивлений вторичной обмотки; величины КПД η , соответствующие значениям полной мощности трансформатора $0,25 S_{ном}$; $0,5 S_{ном}$; $0,75 S_{ном}$ и при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер нагрузки) и $\cos \varphi_2 = 1$; номинальное изменение напряжения ΔU . Построить графики $\eta = f(\beta)$ и $U_2 = f(\beta)$.

Таблица 2. 1– Исходные данные к задаче 1

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_H , кВ·А	100	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
U_{1H} , кВ	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
U_{2H} , кВ	0,23	0,4	0,4	0,4	3,0	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23
U_K , %	5,5	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5
I_0 , %	6,5	5,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,5
P_{0H} , Вт	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5
$P_{кз\text{ном}}$, кВт	2,0	3,6	5,8	9,0	13,5	10,0	9,0	8,2	6,0	4,0

2. В таблице 2.2 приведены данные трехфазных силовых трансформаторов серии ТМ: полная поминальная мощность S_H номинальные потери холостого хода P_{0H} и короткого замыкания $P_{кз}$ коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$. Требуется определить величину снижения КПД при номинальной нагрузке по сравнению с его максимальным значением.

Таблица 2.2 – Исходные данные к задаче 2

Тип трансформатора	$S_{\text{ном}}$ В А	$P_{0\text{ном}}$ кВт	$P_{кз\text{ном}}$, кВт	$\cos \varphi_2$
ТМ-100/35	100	0,465	1,97	0,8
ТМ-160/35	160	0,70	2,65	0,85
ТМ-250/35	250	10	3,70	0,85
ТМ-400/35	400	1,35	5,50	0,8
ТМ-630/35	G30	100	7,60	0,75
ТМ-1000/35	1000	2,75	12,2	0,70
ТМ-1600/35	1G00	3,65	18,0	0,8
ТМ-2500/35	2500	5,10	25,0	0,75
ТМ-4000/35	4000	6,70	33,5	0,85
ТМСЭ00/35	6300	9,40	46,5	0,8

3. В таблице 2.3 приведены технические данные трехфазных трансформаторов серии ТСЗ (трансформатор трехфазный сухой с заземленным первичной обмоткой). Используя эти данные, определить: коэффициент трансформации k , номинальные значения токов первичной $I_{1\text{ном}}$ и $I_{2\text{ном}}$ вторичной обмоток; ток холостого хода $I_{0\text{ном}}$ напряжение короткого замыкания $U_{кз}$; сопротивление короткого замыкания Z_K и его активную r_K и индуктивную x_K , составляющие; определить номинальное изменение напряжения при значениях коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$; 0,8(инд.) и 0,8(емк.); номинальные и максимальные значения КПД трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$ и 0,8.

Таблица 2.3– Исходные данные к задаче 3

Тип трансформатора	$S_{ном}$, кВ А	$U_{1ном}$ В	$U_{2ном}$ В	$P_{0ном}$ кВт	$P_{кном}$ кВт	U_k	I_0
4.0	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5	
4.0	160	10	0,4	0,7	2,7	5,5	
3,5	250	6	0,23	1,0	3,5	5,5	
3,5	250	10	0,4	1,0	3,5	5,5	
3,0	400	6	0,23	1,5	5,4	5,5	
3,0	400	10	0,4	1,0	5,4	5,5	
1,5	G30	6	0,4	2,0	7,5	5,5	
1,5	630	10	0,4	2,0	7,5	5,5	
1,5	1000	6	0,4	3,0	11,3	5,5	
1,5	1000	10	0,4	3,0	11,3	5,5	
1,5	1600	10	0,4	4,2	16,0	5,5	

4. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_H = 10500$ кВА, $U_{1H}/U_{2H} = 110/6,3$ кВ. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_{1K} = 115$ кВ, $P_{1K} = 81,5$ кВт, Опыт проводится при температуре обмоток 75°C . Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая $R_K = R'_2$ и $X_K = X'_2$. Какое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

5. Изменение вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке и $\cos\varphi_2 = 1$ составляет 1,97 %. Определить в абсолютных единицах электрические потери трансформатора, если $S_H = 100$ кВА.

6. Определить изменение вторичного напряжения трансформатора в относительных единицах для нагрузки $I_2 = 0,5I_{2H}$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ по следующим данным: $S_H = 100$ кВ·А, $P_K = 1970$ Вт, $u_K = 4,5$ %.

7. Трансформатор мощностью 63 кВ А имеет потери короткого замыкания 1280 Вт и напряжение короткого замыкания $U_K = 4,5$ %. Найти значения угла нагрузки, при котором изменения вторичного напряжения не происходит.

8. Потери трансформатора, имеющего номинальную мощность $S_H = 63$ кВ·А, при холостом ходе $P_x = 265$ Вт, при коротком замыкании $P_K = 1280$ Вт. Определить КПД трансформатора для номинальной нагрузки при трех значениях коэффициента мощности $\cos\varphi_2 = 0,8; 1; (-0,8)$.

9. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_n = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; напряжение первичной обмотки $U_{1\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$; вторичной обмотки $U_{2\text{ном}} = 400 \text{ В}$; потери при холостом ходе $P_x = 125 \text{ Вт}$; сопротивление первичной обмотки $R_1 = 48,4 \text{ Ом}$; вторичной обмотки $R_2 = 0,077 \text{ Ом}$. Определить КПД трансформатора для значений $\beta = 0,5; 1; 1,25$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,9$.

10. Для однофазного трансформатора номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и номинальным первичным напряжением $U_{\text{ном}} = 31,5 \text{ кВ}$ мощностью короткого замыкания $P_{\text{кз}} = 20 \text{ кВт}$ и напряжением короткого замыкания $U_{\text{к}} = 8,5\%$. Рассчитать данные и построить график зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β , если коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$.

Вопросы к практическому занятию

1. Что такое внешняя характеристика трансформатора?
2. Для чего делается приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной?
3. Изменяется ли магнитный поток трансформатора при изменении его нагрузки?
4. Что такое коэффициент загрузки трансформатора?
5. Как определяются электрические потери в трансформаторе?
6. Как определяется изменение напряжения трансформатора?
7. Какие потери в трансформаторе не зависят от его нагрузки?
8. Зависят ли от нагрузки электрические потери в трансформаторе?

3 Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

В отечественных трансформаторах приняты соединения обмоток: звезда, треугольник, зигзаг.

При соединении звезда Y концы обмоток образуют общую точку, а начала идут к сети. При соединении обмоток в треугольник Δ начало первой фазной обмотки присоединяют к концу второй, начало второй к концу третьей, начало третьей – к концу первой, а вершины образовавшегося треугольника – к сети. При соединении зигзаг \sim каждая фаза вторичной обмотки располагается на двух различных стержнях.

Вообще говоря, понятия начала и конца обмоток условны, они необходимы для правильного соединения фазных обмоток. В трёхфазном трансформаторе положительному направлению тока от начала к концу обмотки должно соответствовать определённое направление потока в стержнях.

Начала фазных обмоток ВН обозначают обычно большими буквами А, В, С, их концы соответственно Х, Y, Z, для обмоток НН эти обозначения соответственно а, в, с, и х, у, z. Если обмотка соединена звездой и у неё выведена нулевая точка, то применяют обозначение \star .

При включении трансформатора на параллельную работу большое значение имеет способ соединения обмоток, который определяется группой соединения. Номер группы соответствует углу между векторами линейных напряжений обмоток ВН и НН, отсчитанному по часовой стрелке от вектора линейного напряжения обмотки ВН. За единицу углового перемещения принят угол 30° . Существует 12 групп соединения – от 0-й до 11-й. (Раньше нулевая группа называлась 12).

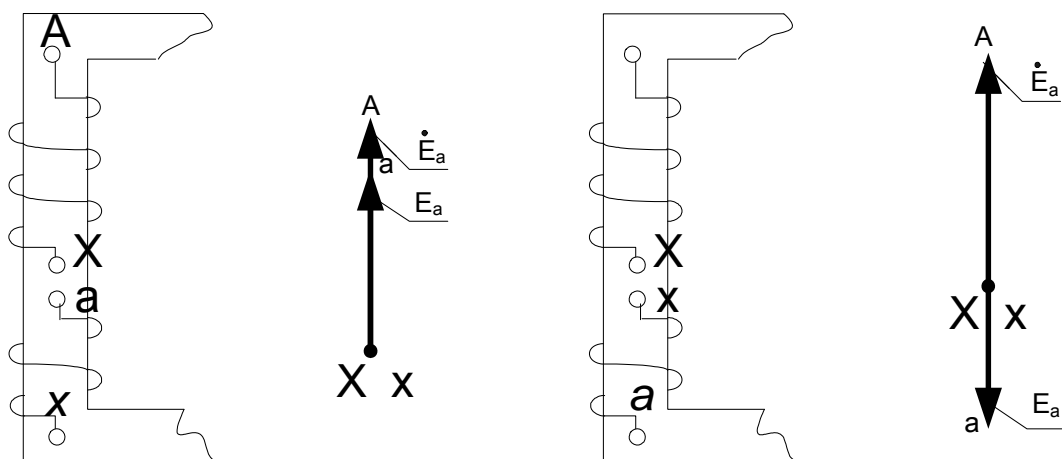


Рисунок 3.1– Группы соединений однофазного трансформатора

Методика определения групп трансформаторов.

Рассмотрим одну фазу трёхфазного трансформатора. Если обмотки низкого и высокого напряжения намотаны в одну сторону, то есть или по левой или по правой винтовой линии, верхние зажимы обмоток принять за их начала, а нижние за их концы, то ЭДС (векторы) индуцируемые в обмотках, во-первых, параллельны, т.к. индуцируются одним и тем же потоком, а во-вторых, направлены в одну сторону. Если зажимы обмотки НН перемаркировать, то E_A и E_a будут направлены параллельно, но встречно. При построении ВД, необходимой для определения группы, следует также учитывать, что, если на схеме концы обмоток соединены в одной точке, то и на векторной диаграмме соответствующие точки векторов фазных напряжений, обозначенных теми же буквами, также соединены вместе.

Обычно векторы линейных ЭДС обмоток уподобляют стрелкам часового циферблата, причём вектор ВН принимают за минутную стрелку, установленную на цифре 12, а вектор НН – за часовую стрелку, и цифра, на которую указывает часовая стрелка, определяет группу трансформатора. Пусть трёхфазный трансформатор имеет соединение обмоток ВН и НН в звезду. При этом:

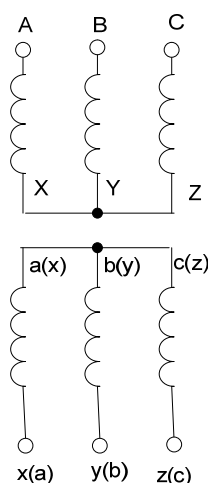


Рисунок 3.2 – Трехфазный трансформатор со схемой соединения звезда

- 1) обмотки НН и ВН имеют одинаковую намотку;
- 2) начала и концы обмоток расположены одинаково;
- 3) одноимённые обмотки расположены на общих стержнях (например А и а, В и в).

Построим теперь ВД фазных и линейных ЭДС обмоток ВН и НН.

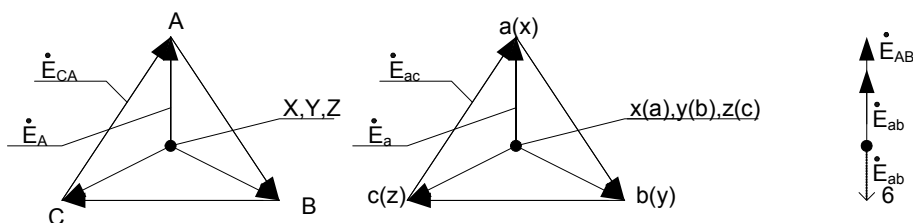


Рисунок 3.3 – Трехфазный трансформатор с группой соединений Y/Y-0

При этом одноимённые векторы ЭДС совпадают по фазе, и если \dot{E}_{AB} совместимость на циферблате с цифрой 12, то «часовая стрелка» \dot{E}_{ab} покажет 12 или 0 «часов».

Если теперь в схеме Y/Y поменять местами начала и концы обмоток НН, то в ВД НН вектор \dot{E}_{ab} поменяет направление на противоположное, и «часы» будут показывать 6-ю группу. При круговой перемаркировке фаз обмотки НН можно получить группы 4 и 8, поменяв местами начала и концы:

2 и 6, т.е. все чётные группы. Чётные группы получаются также при соединении Δ / Δ , а нечётные - Δ/Y и Y/Δ .

Рассмотрим теперь соединение Y/Δ .

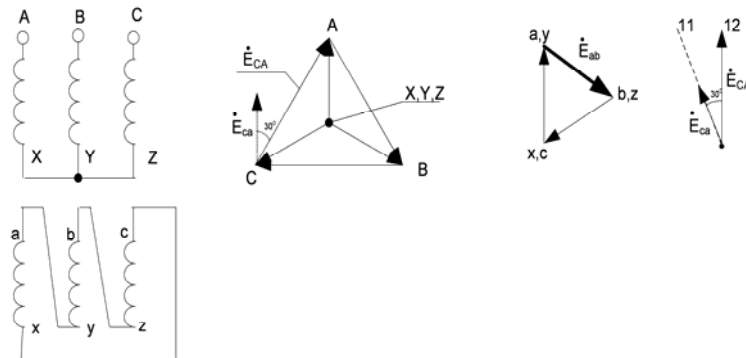


Рисунок 3.4 – Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений $Y/-11$

Из рисунка видно, что вектор линейной ЭДС НН смещен на 30° по отношению к вектору ВН и расположится напротив цифры 11. Перемаркировкой зажимов можно получить группы 1, 3, 5, 7 и 9. Чтобы обеспечить параллельную работу трансформаторов в РФ изготавливаются трансформаторы: Y/Y_0-0 ; Δ/Y_0-11 , $Y_0/\Delta-11$, $Y/\Delta-11$; слева от дроби – ВН; справа НН; «0» – вывод наружу нулевой точки. Y/Y_0-0 – применяют на 10/0,4 и 6/0,4 кВ, при неравномерной нагрузке фаз: $Y/\Delta-11$; 35/10 кВ и 35/6 – $Y/\Delta-11$, при $U_{ЛН} > 110$ кВ – $Y_0/\Delta-11$.

С точки зрения влияния высших гармоник и поведения при несимметричной нагрузке целесообразно одну из обмоток соединить в треугольник, т. к. при этом исчезают во внешней цепи токи нулевой последовательности и гармоник, кратных трём.

Задачи

1. Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом.

2.2 Задания для решения.

Задача 2.1

Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом.

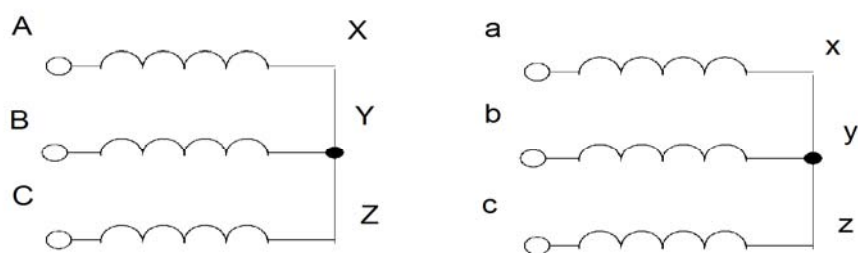


Рисунок 2.5 – Вариант 1

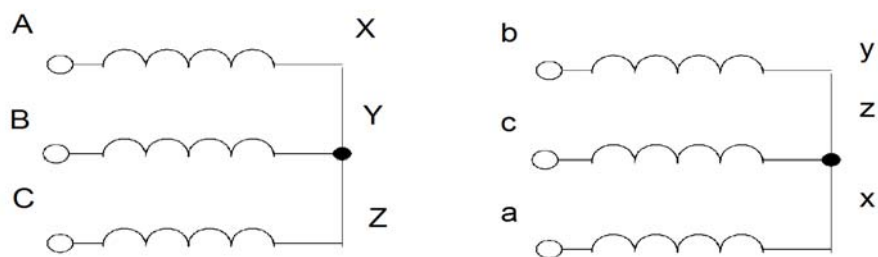


Рисунок 2.6 – Вариант 2

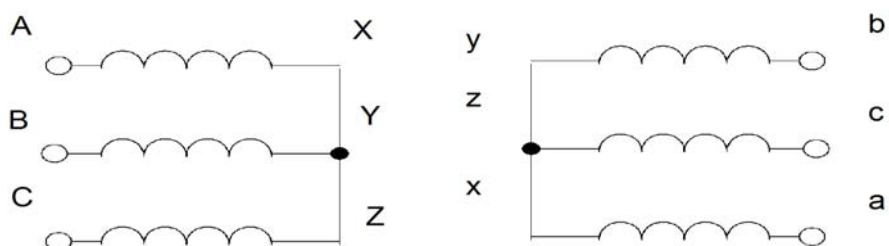


Рисунок 2.7– Вариант 3

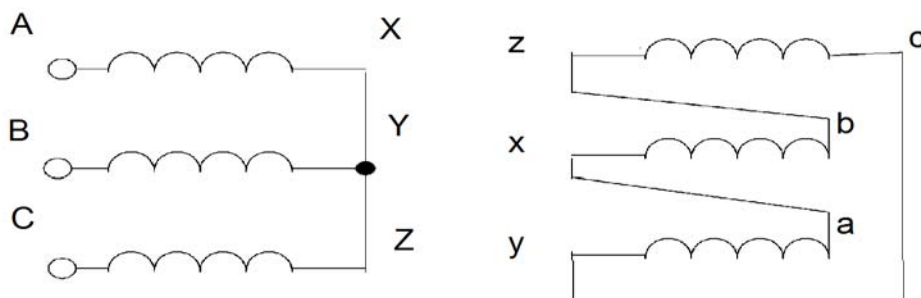


Рисунок 2.8 – Вариант 4

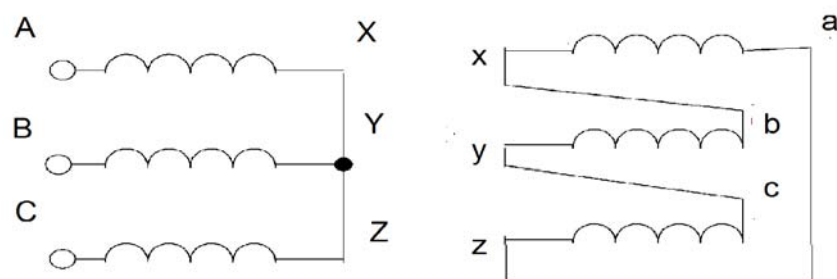


Рисунок 2.9 – Вариант 5

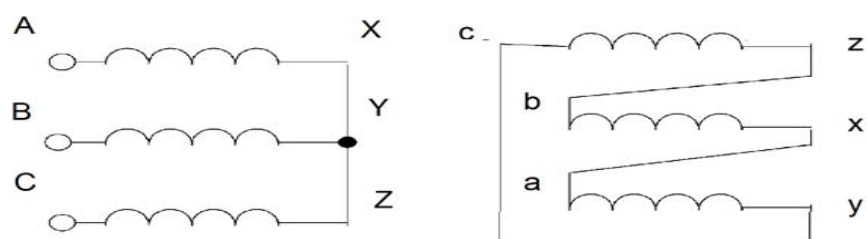


Рисунок 2.10 – Вариант 6

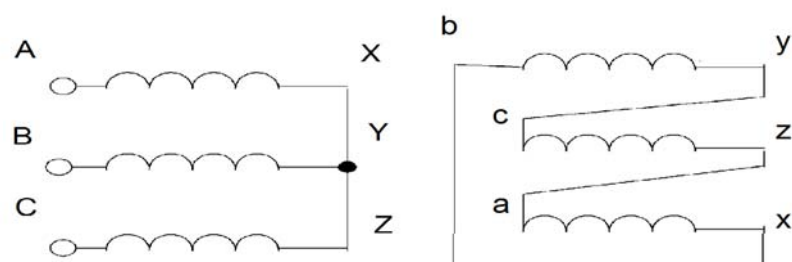


Рисунок 2.11 – Вариант 7

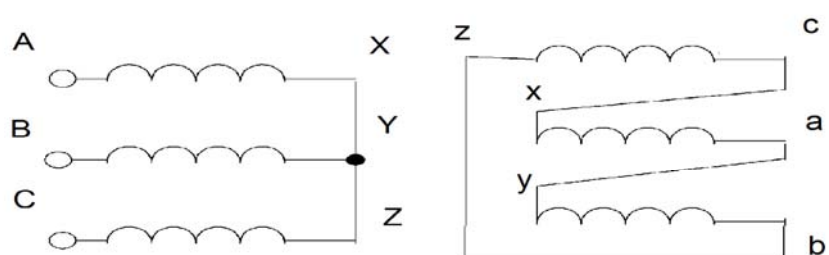


Рисунок 2.12 – Вариант 8

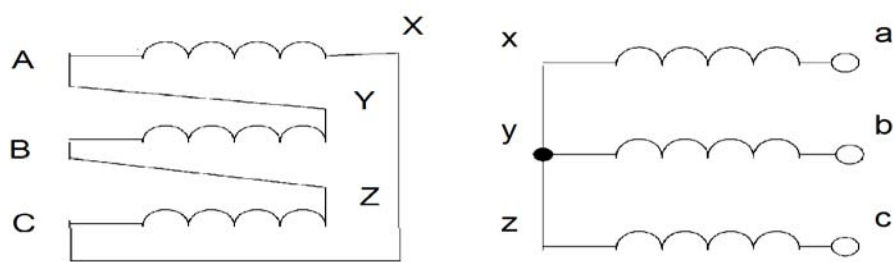


Рисунок 2.13 – Вариант 9

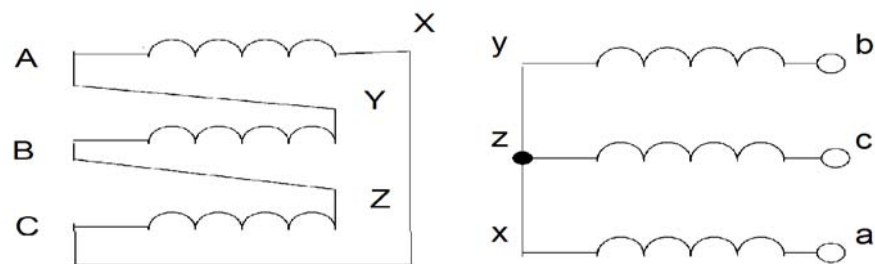


Рисунок 2.14 – Вариант 10

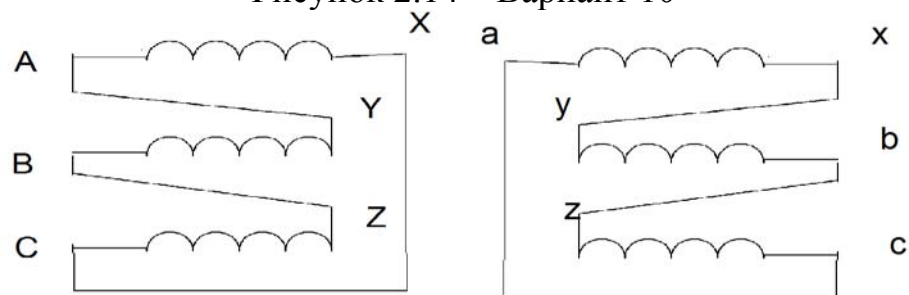


Рисунок 2.15 – Вариант 11

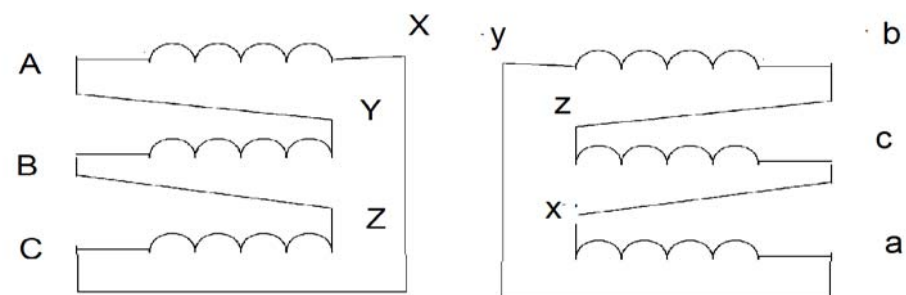


Рисунок 2.16 – Вариант 12

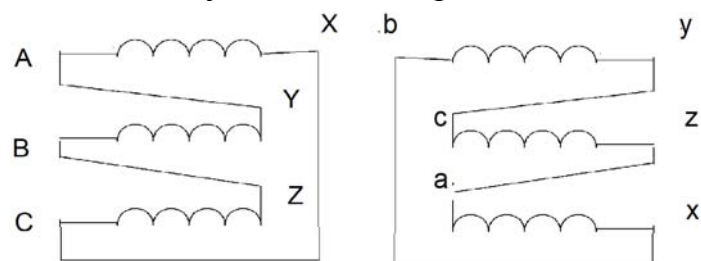


Рисунок 2.17 – Вариант 13

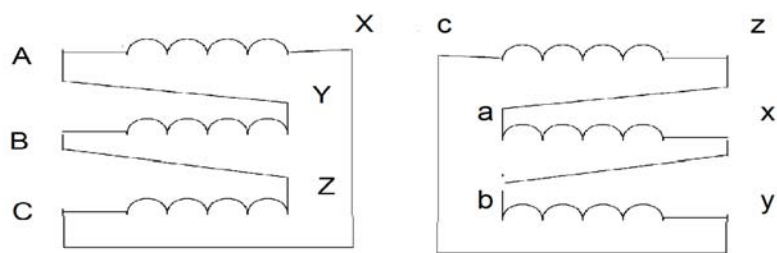


Рисунок 2.18 – Вариант 14

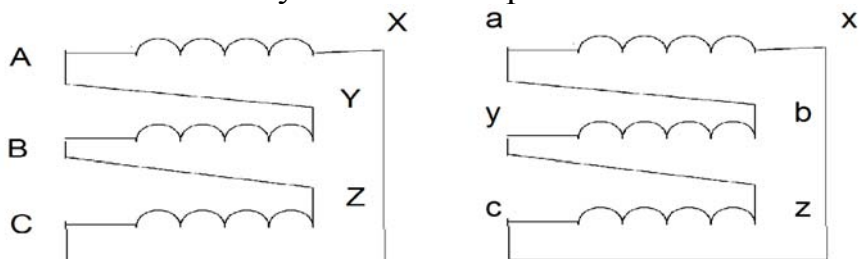


Рисунок 2.19 – Вариант 15

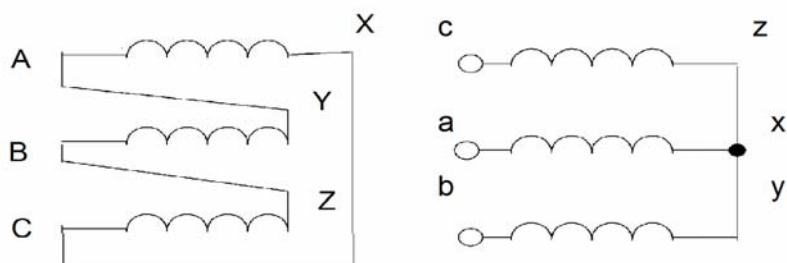


Рисунок 2.20 – Вариант 16

Вопросы к практическому занятию

1. Какие схемы соединения обмоток трансформатора Вы знаете
2. Что такое группа соединения трансформатора?
3. Для Чего необходимо знать группу соединения трансформатора?
4. Как определяется группа соединения трансформатора?

4 Трансформация трехфазных токов

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Трансформация трехфазных токов и напряжений осуществляется с помощью группы из трех однофазных трансформаторов или с помощью трех-

фазного двухобмоточного трансформатора со стержневым или броневым магнитопроводом.

Обмотки отдельных фаз соединяются в звезду – Y или треугольник – Δ .

Напряжения и токи обмоток трехфазного трансформатора: при симметричных первичных линейных напряжениях:

$$\dot{U}_{AB} = U_{1л}; \dot{U}_{BC} = U_{1л} e^{-j(2\pi/3)}; \dot{U}_{CA} = U_{1л} e^{j(2\pi/3)}; \quad (4.1)$$

и симметричных сопротивлениях нагрузки фазные токи и напряжения трансформатора получаются симметричными.

Фазные напряжения и токи трансформатора при соединении в звезду и зигзаг:

$$U_{\phi} = U_{л} / \sqrt{3}; I_{\phi} = I_{л}; \quad (4.2)$$

при соединении в треугольник:

$$U_{\phi} = U_{л}; I_{\phi} = I_{л} / \sqrt{3}. \quad (4.3)$$

Задачи

1. Группа из трех однофазных трансформаторов одинаковой мощности с номинальными фазными напряжениями $U_{1нф} = 500$ кВ и $U_{2нф} = 20$ кВ используется для трансформации трехфазных токов. Первичные обмотки соединены в треугольник, вторичные – в звезду. Чему равны линейные напряжения на обмотках трансформатора? Найти коэффициент трансформации.

2. Напряжение трехфазной сети высокого напряжения $U_{1с} = 525$ кВ, низкого – $U_{2с} = 20$ кВ. При каком соединении обмоток трех однофазных трансформаторов с номинальными напряжениями $U_{1н}/U_{2н} = 303/20$ кВ возможна трансформация трехфазных токов?

3. Обмотки трехфазного трансформатора соединены по схеме Y/ Δ , число витков каждой фазы первичной обмотки $W_1 = 1000$, вторичной обмотки $W_2 = 200$. Определить линейное напряжение на выходе трансформатора, если линейное напряжение питающей сети $U_1 = 1000$ В.

Вопросы к практическому занятию

1. Как определить фазные напряжения и токи при соединении обмотки трансформатора по схеме «звезда»?
2. Как определены фазные напряжения и токи при соединении обмотки трансформатора по схеме «треугольник»?
3. Что собой представляет групповой трансформатор?

5 Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

В процессе опыта холостого хода трансформатора фиксируется $U_{1(2)0}$, P_0 , I_{10} . По данным опыта рассчитывают сопротивления:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}}; \quad (5.1)$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_{10}^2}; \quad (5.2)$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}. \quad (5.3)$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_{10}}. \quad (5.4)$$

В опыте короткого замыкания трансформатора к первичной обмотке подводят меньшее (по сравнению с номинальным) напряжение так, чтобы ток I_{k1} был в пределах номинальных значений.

Так же, как и в предыдущем случае рассчитываются P_k , Z_k , r_k , и x_k .

Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания имеет вид, показанный на рисунке 5.1.

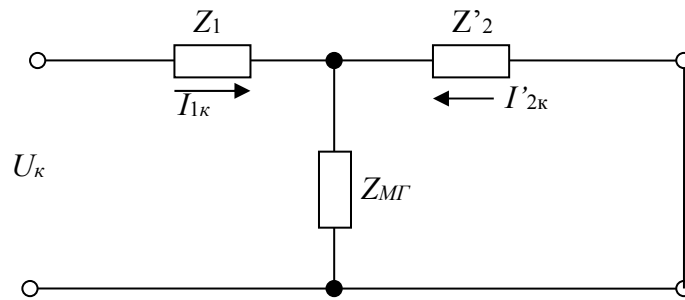


Рисунок 5.1 –Схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Общее сопротивление схемы:

$$Z_{\kappa} = Z_1 + \frac{Z_{MГ} \cdot Z'_2}{Z_{MГ} + Z'_2}, \quad (5.5)$$

так как $Z_{MГ} \gg Z'_2$, то в знаменателе членом Z'_2 можно пренебречь, тогда:

$$Z_{\kappa} \approx Z_1 + Z'_2, \quad (5.6)$$

т.е. упрощенная схема замещения имеет вид:

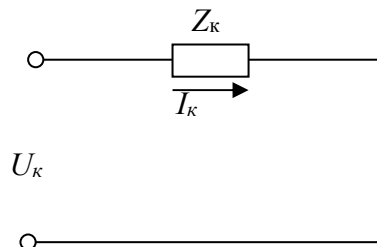


Рисунок 5.2 – Упрощенная схема замещения трансформатора
в режиме к.з.

Напряжение U_{κ} , при котором ток короткого замыкания равен номинальному $I_{\kappa} = I_n$, называется напряжением короткого замыкания.

В относительных единицах:

$$U_{\kappa*} = \frac{I_n Z_{\kappa}}{U_n} = Z_{\kappa*}. \quad (5.7)$$

Величина U_k обычно выражается в паспортной табличке трансформатора. U_k можно определить из векторной диаграммы в режиме короткого замыкания:

Составляющим напряжения короткого замыкания:

$$U_{ка} = U_k \cdot \cos \varphi_k ; \quad (5.8)$$

$$U_{кг} = U_k \sin \varphi_k . \quad (5.9)$$

Пример 1.

Номинальные данные трехфазного трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда-звезда»: мощность $S_n = 63$ кВА, напряжение на обмотке высокого и низкого напряжения соответственно $U_{вн} = 21$ кВ и $U_{нн} = 0,4$ кВ. Потери холостого хода – $P_0 = 0,29$ кВт, ток холостого – $I_0 = 0,035 I_n$, потери короткого замыкания – $P_k = 1,65$ кВт, напряжение короткого замыкания – $U_k = 4,5$ %, активная составляющая напряжения короткого замыкания – $U_{ка} = 2,54$ %. Определить: коэффициент мощности при коротком замыкании и холостом ходе, сопротивления схемы замещения для режима короткого замыкания, КПД при номинальной нагрузке и коэффициентах мощности $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0.8$; активную мощность на вторичной стороне для $\cos \varphi_2 = 0.8$, при которой значение КПД будет наибольшим; потери в трансформаторе при мощности $S = 10$ кВ·А; напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке и коэффициентах мощности $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0.8$.

Решение:

Номинальные токи, А:

$$I_{1н} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{вн}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot 10^3} = 1.73 ;$$

$$I_{2н} = \frac{U_{вн}}{U_{нн}} I_{1н} = \frac{21}{0.4} 1.73 = 91.0 .$$

Коэффициенты мощности, о.е.:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{вн}I_0} = \frac{0.29}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot (0.035 \cdot 1.73)} = 0.132 ;$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} U_K I_{1H}} = \frac{1.65}{\sqrt{3(0.045 \cdot 21)} 1.73} = 0.592.$$

Сопротивления короткого замыкания, Ом:

$$r_K = r_1 + r'_2 = \frac{P_K}{m I_{1H}^2} = \frac{1650}{3(1.73)^2} = 183;$$

$$x_K = x_1 + x'_2 = \frac{U_{\kappa p} [\%] \cdot (U_{1H} / \sqrt{3})}{100 I_{1H}} = \frac{\sqrt{U_K^2 - U_{Ka}^2} \cdot U_{1H}}{100 \sqrt{3} I_{1H}} =$$

$$= \frac{\sqrt{(4.5)^2 - (2.54)^2} \cdot 21000}{100 \sqrt{3} \cdot 1.73} = 260.$$

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке, о.е.:

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{S_H \cos \varphi_2}{S_H \cos \varphi_2 + P_o + P_K};$$

$$\text{при } \cos \varphi_2 = 1 \quad \eta_H = \frac{63 \cdot 1}{63 \cdot 1 + 0.29 + 1.65} = 0.97;$$

$$\text{при } \cos \varphi_2 = 0.8 \quad \eta_H = \frac{63 \cdot 0.8}{63 \cdot 0.8 + 0.29 + 1.65} = 0.963.$$

Максимальное значение коэффициента полезного действия соответствует условию $P_o = P_K$. Учитывая, что потери короткого замыкания $P_K = 3 I_{1\phi}^2 r_K$, определяются значения тока

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_K}{3 r_K}} = \sqrt{\frac{P_o}{3 r_K}} = \sqrt{\frac{290}{3 \cdot 183}} = 0.727 \text{ А}$$

и активной мощности на вторичной стороне

$$P_2 = \sqrt{3} U_{2H} I_2 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} U_{2H} \left(\frac{U_{1H}}{U_{2H}} \right) I_1 \cos \varphi_2 =$$

$$= \sqrt{3} \cdot 400 \cdot \left(\frac{21000}{400} \right) 0.927 \cdot 0.8 = 16.9 \text{ кВт.}$$

Потери мощности в трансформаторе при $S = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$:

$$\Sigma \Delta P = P_o + \kappa_H^2 P_K = P_o + \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 P_K = 0.29 + \left(\frac{10}{60} \right)^2 1.65 = 0.336 \text{ кВт.}$$

Напряжение на вторичной обмотке, соответствующее упрощенной схеме замещения трансформатора под нагрузкой:

$$U'_2 = U_1 - I_1 (r_K \cos \varphi_2 + x_K \sin \varphi_2);$$

$$\cos \varphi_2 = 1 \quad U'_2 = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1.73 \cdot 183 \cdot 1 = 11820 \text{ В};$$

$$\cos \varphi_2 = 0.8 \quad U'_2 = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1.73(183 \cdot 1 + 260 \cdot 0.599) = 11630 \text{ В}.$$

Напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке:

$$U_{2н.н} = \frac{\sqrt{3}U'_2}{k} = \frac{\sqrt{3}U'_2}{(U_{вн}/U_{нн})};$$

$$\cos \varphi_2 = 1 \quad U_{2нн} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11820}{(21/0.4)} = 390 \text{ В};$$

$$\cos \varphi_2 = 0.8 \quad U_{2нн} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11630}{(21/0.4)} = 383 \text{ В}.$$

Задачи

1. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_n = 25 \text{ кВ А}$; номинальные напряжения $U_{1н} = 10 \text{ кВ}$; вторичной обмотки $U_{2н} = 0,4 \text{ В}$. Схема соединения Y/Y. Трансформатор испытан в режиме холостого хода со стороны обмотки НН. При номинальном напряжении ток $I_{2х} = 1,15 \text{ А}$, потребляемая мощность $P_{2х} = 0,135 \text{ кВт}$. Найти ток холостого хода трансформатора в относительных единицах и коэффициент мощности в режиме холостого хода.

2. Частота питающей сети в опыте холостого хода трансформатора $f = 49 \text{ Гц}$. Какое напряжение необходимо подвести к первичной обмотке трансформатора с номинальным напряжением $U_{1н} = 400 \text{ В}$ и частотой 50 Гц , чтобы реактивная составляющая тока холостого хода осталась без изменений?

3. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_n = 10500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $U_{1н}/U_{2н} = 110/6,3 \text{ кВ}$. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_{1к} = 11,5 \text{ кВ}$, $P_{1к} = 81,5 \text{ кВт}$. Опыт проводился при температуре обмоток 75°С . Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая $R_1 = R'_2$ и $X_1 = X'_2$. Ка-

кое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

Вопросы к практическому занятию

1. Какие опыты проводятся для определения параметров схемы замещения трансформатора?
2. Каковы условия проведения опыта короткого замыкания трансформатора?
3. Чему равно напряжение короткого замыкания в относительных единицах?
4. Что определяет мощность, измеренная в опыте короткого замыкания?

6 Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Разложение магнитодвижущей силы (МДС) периодической системы катушек в ряд Фурье.

Пространственное распределение МДС в момент времени $t = 0$

$$F = \sum_{\nu=1}^{\infty} F_{\nu m} \cos \nu \alpha. \quad (6.1)$$

Амплитуда ν -ой гармонической МДС периодической системы катушек

$$F_{\nu m} = \frac{4}{\pi \nu} F_{km} k_{y\nu} = \frac{4}{\pi \nu} \sqrt{2} I_a \cdot w_k \cdot k_{y\nu}; \quad (6.2)$$

где $\nu = 1 + 2c$, $c = 0, 2, 3 \dots$

Коэффициент укорочения шага обмотки, характеризующий влияние шага катушки y_k на амплитуду гармоник МДС,

$$k_{nv} = \sin \frac{\nu \cdot y_k \cdot \pi}{2\tau}, \quad (6.3)$$

При выборе шага катушки

$$y_k = (\nu - 1)\tau / \nu, \quad (6.4)$$

гармонических ν -го порядка в МДС содержаться не будет.

Магнитодвижущая сила фазы.

Амплитуда ν -й гармонической МДС фазы через амплитудный ток катушечной стороны

$$F_{\phi\nu} = qF_{\kappa\nu m} \cdot k_{p\nu} = 4qk_{y\nu}k_{p\nu}\sqrt{2}I_a w_\kappa / (\pi\nu). \quad (6.5)$$

Амплитуда ν -й гармонической МДС фазы через действующий ток фазы $I = aI_a$

$$F_{\phi\nu m} = 2\sqrt{2}Iwk_{p\nu}k_{y\nu} / (\pi p \nu), \quad (12.6)$$

где $w = 2pw_\kappa q / a$ – число витков в параллельной ветви фазы.

Коэффициент распределения обмотки:

$$k_{p\nu} = \frac{\sin[\nu\pi / (2m)]}{q \sin[\nu\pi / (2mq)]}. \quad (12.7)$$

Обмоточный коэффициент для основной гармонической МДС

$$k_{o\delta} = k_{y1} \cdot k_{p1}. \quad (6.8)$$

Порядок зубцовых высших гармонических

$$\nu = kZ / p \pm 1 = 2mqk \pm 1, \quad (6.9)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки

$$F(\alpha, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} F_{\nu m} \cos(\pm \omega t - \nu\alpha), \quad (6.10)$$

где

$$F_{\nu m} = (3/2)F_{\phi\nu m} = 3\sqrt{2}I \cdot w \cdot k_{p\nu} \cdot k_{y\nu} / (\pi\nu p), \quad (6.11)$$

или

$$F_{vm} = 6qk_{pv}k_{yv}\sqrt{2}I_a \cdot w_k / (\pi\nu), \quad (6.12)$$

где $\nu = 6c \pm 1$, $c = 0, 1, 2, 3, \dots$

Прямая гармоническая МДС трехфазной обмотки вращается с угловой скоростью

$$\Omega = \omega / p, \quad (6.13)$$

в положительном направлении,

ν -я гармоническая МДС вращается с угловой скоростью

$$\Omega_\nu = \pm \Omega_1 \cdot \nu. \quad (6.14)$$

Обмотка статора бесколлекторной машины постоянного тока располагается в пазах на внутренней поверхности сердечника статора. Она выполняется из медного изолированного провода круглого или прямоугольного сечения.

Элементом обмотки статора является одно- или многовитковая катушка. Элементы катушки, располагаемые в пазах, называются пазовыми сторонами, а части, находящиеся вне пазов и служащие для соединения пазовых сторон, – лобовыми частями.

Обмотки статора характеризуются параметрами:

числом фазных обмоток, m_1 – однофазные ($m_1 = 1$) и многофазные, обычно трехфазные ($m_1 = 3$);

шагом обмотки по пазам y_1 – с полным (диаметральным) шагом ($y_1 = \tau$) и укороченным шагом ($y_1 < \tau$).

Здесь τ – полюсное деление, м,

$$\tau = \pi D_1 / (2p), \quad (6.15)$$

где D_1 – внутренний диаметр статора, м;

$2p$ – число полюсов обмотки статора.

Полный шаг обмотки

$$y_1 = Z_1 / (2p) = \tau. \quad (6.16)$$

В этом случае ЭДС, индуцируемая в каждом витке катушки статора вращающимся магнитным полем, определяется арифметической суммой ЭДС сторон этого витка, то есть

$$e_{\text{sum}} = e_1 + e_2. \quad (6.17)$$

Если шаг обмотки укороченный ($y_1 < \tau$), то ЭДС витка определяется геометрической суммой ЭДС его пазовых сторон, т.е. учитывается фазовый сдвиг этих ЭДС, при этом ЭДС витка, а следовательно, и ЭДС всей фазной обмотки E_y уменьшается. Это уменьшение ЭДС, вызванное укорочением шага обмотки, учитывается коэффициентом укорочения $k_y = E_y/E_d$. Коэффициент укорочения первой (основной) гармоники:

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (6.18)$$

где $\beta = \frac{y_1}{\tau}$ – относительный шаг обмотки.

Для ЭДС любой гармоники (ν – номер гармоники)

$$k_{y\nu} = \sin\left(\nu\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (6.19)$$

Порядок зубцовых высших гармоник

$$\nu = k \cdot Z / p \pm 1 = 2m \cdot q \cdot k \pm 1, \quad (6.20)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Так как высшие гармоники ЭДС могут вызвать в электрических сетях и приемниках ряд нежелательных явлений, необходимо принимать меры для подавления этих гармоник.

Таблица 6.1 – Значения коэффициента $k_{y\nu}$ в зависимости от относительного шага β

Относительный шаг обмотки β	4/5	6/7	1
Коэффициент укорочения $k_{y\nu}$			
1-я гармоника	0,951	0,975	1
5-я гармоника	0	0,433	1
7-я гармоника	0,573	0	

Подавление высших гармоник ЭДС можно осуществить с помощью соответствующей конструкции обмоток. К конструктивным мерам относятся:

- 1) укорочение шага обмотки;
- 2) распределение обмотки по пазам таким образом, чтобы число катушек в катушечной группе было $q > 1$.

По своей конструкции обмотки статора разделяются на сосредоточенные и распределенные. В сосредоточенных обмотках статора обмотка каждой фазы располагается в двух пазах, а в распределенной обмотке – катушки каждой фазы занимают несколько пазов. Распределение катушек в пазах сердечника статора вызывает некоторое уменьшение ЭДС катушечной группы распределенной обмотки $E_{\text{зр}}$ по сравнению с ЭДС катушечной группы сосредоточенной обмотки $E_{\text{зс}}$.

Для количественной оценки этого уменьшения ЭДС используется коэффициент распределения обмотки, представляющий собой отношение ЭДС распределенной обмотки к ЭДС сосредоточенной обмотки:

$$k_p = (E_{\text{зр}} / E_{\text{зс}}) < 1. \quad (6.21)$$

Коэффициент распределения обмотки для первой гармоники ЭДС

$$k_{p1} = \frac{\sin(0,5 \cdot q_1 \cdot \gamma)}{q_1 \cdot \sin(0,5\gamma)}, \quad (6.22)$$

где γ – угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС, т.е. ЭДС, наводимых в проводниках, лежащих в соседних пазах статора, эл. град.:

$$\gamma = 360 p / Z_1, \quad (6.23)$$

где Z_1 – число пазов обмотки.

Так как угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС для ν -й гармоники в ν раз больше пазового угла γ , то коэффициент распределения обмотки для любой гармоники ЭДС равен

$$k_{p\nu} = \frac{\sin(0,5 \cdot \nu \cdot q_1 \cdot \gamma)}{q_1 \cdot \sin(0,5 \cdot \nu \cdot \gamma)}. \quad (6.24)$$

ЭДС фазной обмотки статора определяется выражением

$$E_{\phi 1} = 4,44 \Phi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\phi 1}, \quad (6.25)$$

где Φ – основной магнитный поток,

$$\Phi = (2/\pi) B_{\delta} \cdot l_1 \cdot \tau; \quad (6.26)$$

B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором, Тл;

f_1 – частота переменного тока в обмотке статора, Гц;

w_1 – число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_1 = 2pq_1 \cdot w_k = Z_1 \cdot w_k / m_1; \quad (6.27)$$

w_k – число витков в катушке обмотки статора;

$k_{об1}$ – обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшения ЭДС, вызванные укорочением шага катушки и распределенной конструкцией обмотки

$$k_{об1} = k_{y1} k_{p1}.$$

При выборе шага катушки

$$y_1 = \frac{(\nu - 1)\tau}{\nu}, \quad (6.28)$$

гармонических ν -го порядка в ЭДС содержаться не будет.

Пример 1.

Статор трехфазной бесколлекторной машины переменного тока с внутренним диаметром $D_1 = 0,2$ м; длиной $l_1 = 0,2$ м имеет число пазов $Z_1 = 36$, число полюсов $2p = 4$. Определить ЭДС одной фазы обмотки статора, если шаг обмотки по пазам $y_1 = \tau$, число витков в катушке $w_k = 4$, магнитная индукция в воздушном зазоре машины $B_{\delta} = 0,75$ Тл, а частота тока питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение:

Полюсное деление

$$\tau = \pi \cdot D_1 / (2p) = 3,14 \cdot 0,2 / 4 = 0,157 \text{ м.}$$

Основной магнитный поток

$$\Phi = (2/\pi) B_{\delta} \cdot l_1 \cdot \tau = 0,64 \cdot 0,75 \cdot 0,2 \cdot 0,157 = 0,015 \text{ Вб.}$$

Число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_1 = Z_1 \cdot w_k / m_1 = 36 \cdot 4 / 3 = 48 \text{ витков.}$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2 p m_1) = 36 / (4 \cdot 3) = 3 \text{ паз.}$$

Коэффициент распределения и обмоточный коэффициент для первой (основной) гармоники:

$$k_{p1} = 0,96; k_{об1} = k_{p1} = 0,96.$$

ЭДС фазной обмотки

$$E_\phi = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,96 = 153 \text{ В.}$$

Пример 2.

Используя данные примера 1 и результаты его расчета, определить ЭДС фазной обмотки статора первой (основной) гармоники; обмотку выполнить с укороченным шагом. Рассчитать линейную ЭДС основной гармоники при соединениях обмотки статора «звездой» и «треугольником». На сколько будут ослаблены ЭДС пятой и седьмой гармоник при принятом укорочении шага обмотки на один паз.

Решение:

Полный (диаметральный) шаг

$$y_1 = Z_1 / 2 p = 36 / 4 = 9 \text{ пазов.}$$

Укороченный шаг

$$y_k = 9 - 1 = 8 \text{ пазов.}$$

Относительный шаг

$$\beta = y_k / y_1 = 8 / 9 = 0,89 /$$

Угол сдвига фаз между векторами пазовых ЭДС:

– для первой (основной) гармоники ($\nu = 1$)

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(0,89 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,985;$$

– для пятой гармоники ($\nu = 5$)

$$k_{y5} = \sin\left(5 \cdot 0,89 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,649;$$

– для седьмой гармоники ($\nu = 7$)

$$k_{y7} = \sin\left(7 \cdot 0,89 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = -0,353.$$

Коэффициенты распределения для 1, 5, 7-й гармоник при $q_1 = 3$ (смотри таблицу 6.2)

$$k_{p1} = 0,96; k_{p5} = 0,217; k_{p7} = -0,178.$$

Обмоточные коэффициенты

$$k_{o\bar{o}1} = 0,985 \cdot 0,96 = 0,946;$$

$$k_{o\bar{o}5} = 0,649 \cdot 0,217 = 0,14;$$

$$k_{o\bar{o}7} = -0,353 \cdot (-0,178) = 0,062.$$

ЭДС фазы основной гармоники

$$E_{\phi 1y} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\bar{o}1} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,946 = 151 \text{ В}.$$

Таким образом, укорочение шага обмотки на один паз привело к уменьшению ЭДС основной гармоники на:

$$\frac{(E_{\phi 1} - E_{\phi 1y})100}{E_{\phi 1}} = \frac{(153 - 151)100}{153} \approx 1,3 \, \%.$$

При этом ЭДС 5-й гармоники уменьшится на 35 %, в седьмой гармонике – на 65 %.

Линейная ЭДС при соединении обмоток «треугольником» останется равной фазной ЭДС $E_{\phi 1y} = 151 \text{ В}$, а при соединении «звездой», она будет равна

$$E_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot 151 = 261 \text{ В}.$$

Задачи

1. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой основной гармонической МДС, если в зубцовых делениях полюсное деление обмотки равно 15, а ее шаг $y = 11$.

2. Общее число катушек восьмиполюсной двухслойной обмотки равно 72. Шаг обмотки в зубцовых делениях равен 7. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой, третьей и пятой гармонических МДС.

3. Число зубцов магнитопровода равно 90. Определить шаг шестиполюсной двухслойной обмотки в зубцовых делениях, при котором пятая гармоническая в МДС содержаться не будет. Чему равен при таком шаге коэффициент укорочения для первой гармонической?

4. Определить коэффициент распределения трехфазной обмотки основной гармонической МДС фазы, если фаза состоит из двух периодических систем катушек ($q = 2$). Чему равен k_p при удвоении числа q ?

5. Трехфазная шестиполюсная обмотка с числом витков в фазе $w = 68$ и обмоточным коэффициентом $k_{об} = 0,866$ питается симметричной системой токов прямой последовательности с током в фазе А $i_A = 250 \cos 314t$ А. Определить амплитуду и частоту вращения первой гармонической МДС обмотки.

6. Определить амплитуду основной, пятой и седьмой гармонических МДС трехфазной двухслойной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 3$, шагом обмотки $y_k = 0,8\tau$, числом витков в катушке $w_k = 21$. Ток параллельной ветви $I_a = 15$ А.

7. Четырехполюсная трехфазная двухслойная обмотка содержит 60 катушек. Шаг обмотки $y = 11$ зубцовых делений. Число витков в фазе $w = 50$. Ток в фазе $I = 442$ А. Определить амплитуды, угловые скорости и направления вращения основной, пятой и первой зубцовых гармонических МДС обмотки. Частота тока $f = 50$ Гц.

8. Общее число катушек восьмиполюсной двухслойной обмотки равно 72. Шаг обмотки в зубцовых делениях $y_1 = 7$. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой, третьей и пятой гармонических ЭДС.

9. Число зубцов магнитопровода $Z = 90$. Определить шаг шестиполюсной двухслойной обмотки в зубцовых делениях, при котором пятая гармоническая в ЭДС содержаться не будет. Чему равен при таком шаге коэффициент укорочения для первой гармонической?

10. Вычислить обмоточный коэффициент для основной, пятой и седьмой гармонических трехфазных двухслойных обмоток, если магнитопровод имеет $Z = 72$ зубца, шаг обмотки в зубцовых делениях $y = 7$. Обмотка многополюсная $2p = 8$

Вопросы к практическому занятию

1. Что характеризует влияние шага катушки обмотки на амплитуду гармоник МДС?
2. Объясните смысл коэффициента распределения обмотки.
3. Как определить обмоточный коэффициент обмотки?
4. С какой скоростью вращается основная гармоническая МДС трехфазной обмотки?
5. Как определить полную МДС трехфазной обмотки при симметричной нагрузке?
6. Какие параметры характеризуют обмотки статора машины переменного тока?
7. Как определить ЭДС витка при укорочении шага обмотки?
8. Как с помощью конструкции обмотки осуществить подавление высших гармоник ЭДС?
9. Как влияет распределение обмотки на величину ЭДС катушечной группы?
10. Как выбрать шаг обмотки, при котором не будет в ЭДС содержаться гармонических составляющих ν -го порядка?
11. Чем определяется необходимость подавления высших гармоник ЭДС обмотки машины переменного тока?

7 Электромагнитные процессы в синхронной машине

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Характерным признаком синхронных машин является жесткая связь между частотой вращения ротора n_1 и частотой переменного тока в обмотке статора f_1 :

$$n_1 = f_1 \cdot 60 / p. \quad (7.1)$$

В обмотке статора в процессе работы синхронной машины индуцируется ЭДС и протекают токи, которые создают магнитодвижущую силу (МДС), максимальное значение которой

$$F_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1} / p. \quad (7.2)$$

Эта МДС создает вращающееся магнитное поле, а в воздушном зазоре δ машины создается магнитная индукция.

Амплитуда продольной составляющей МДС обмотки якоря

$$F_{dm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot I_d \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1} / p, \quad (7.3)$$

Амплитуда поперечной составляющей МДС обмотки якоря

$$F_{qm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot I_q \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1} / p, \quad (7.4)$$

где $I_d = I |\sin \beta|$ и $I_q = I |\cos \beta|$ – действующее значение продольной и поперечной систем токов якоря;

β – угол между ЭДС возбуждения \dot{E}_f и током \dot{I} (или МДС F_{am}).

Для явнополюсной синхронной машины справедливо уравнение напряжений:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I}_1 \cdot r_1, \quad (7.5)$$

где \dot{E}_0 – основная ЭДС синхронной машины, пропорциональная основному магнитному потоку синхронной машины Φ_0 ;

\dot{E}_{1d} – ЭДС реакции якоря синхронной машины по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по продольной оси F_{1d} ;

\dot{E}_{1q} – ЭДС реакции якоря по поперечной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси F_{1q} ;

$\dot{E}_{\sigma 1}$ – ЭДС рассеяния, обусловленная наличием магнитного потока рассеяния Φ_{σ} , величина этой ЭДС пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора x_1

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 \cdot x_1; \quad (7.6)$$

$\dot{I}_1 \cdot r_1$ – активное падение напряжения в фазной обмотке статора, обычно при решении задач этой величиной пренебрегают ввиду ее небольшого значения.

Для неявнополюсной синхронной машины уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_1 \cdot r_1. \quad (7.7)$$

Здесь

$$\dot{E}_c = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1}, \quad (7.8)$$

где \dot{E}_1 – ЭДС реакции якоря неявнополюсной синхронной машины.

Задачи

1. Определить магнитный поток взаимной индукции, соответствующий току $I = 1300$ А в трехфазной обмотке двухполюсного турбогенератора, его потокосцепление с фазой обмотки статора и индуцируемую в ней ЭДС, если известно: число витков в фазе обмотки $w_1 = 16$, число пазов на полюс и фазу $q = 8$, шаг обмотки $y = 20$, расчетный зазор $\delta' = 3,3$ см, полюсное деление $\tau = 150$ см, расчетная длина $l_{\delta} = 210$ см, частота тока 50 Гц.

2. По известным значениям главных индуктивных сопротивлений обмотки якоря по продольной $X_{ad} = 2,02$ Ом и поперечной $X_{aq} = 1,53$ Ом осям гидрогенератора определить соответствующую ЭДС взаимной индукции якоря E_{ad} и E_{aq} для режима работы, характеризуемого током $I = 2800$ А и углом $\beta = 50^\circ$.

3. Номинальная мощность гидрогенератора $S_n = 26200 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальное линейное напряжение $U_{нл} = 10,5 \text{ кВ}$, частота тока $f = 50 \text{ Гц}$, соединение фаз – звезда, номинальная частота вращения $n_n = 125 \text{ об/мин}$. Найти амплитуду основной гармонической МДС обмотки якоря, если число витков в фазе $w_1 = 126$, обмоточный коэффициент $k_{об} = 0,94$. Найти составляющие МДС по продольной и поперечной осям при активно-индуктивной ($\beta = 50^\circ$) нагрузке.

Вопросы к практическому занятию

1. Как определить синхронную скорость вращения синхронной машины?
2. Какое поле в синхронной машине называется полем реакции якоря?
3. Какое поле реакции якоря является поперечным, а какое продольным?
4. Напишите уравнение напряжения для явнополюсной синхронной машины.
5. Напишите уравнение напряжения для неявнополюсной синхронной машины.

8 Построение векторных диаграмм синхронного генератора

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Векторная диаграмма ЭДС синхронных генераторов с одной стороны, позволяет на стадии проектирования определять значение $F(x)$ (а, следовательно, и основные конструктивные данные) для обеспечения необходимого режима работы, с другой – оценить эксплуатационные характеристики уже готовой машины при различной нагрузке, не производя при этом многочисленных опытов.

Два типа задач, о которых говорилось выше, определяют два основных вида векторных диаграмм: различают диаграммы Блонделя и диаграммы Потье.

Диаграммы Блонделя

Эти диаграммы используются для анализа характеристик генератора и строятся в следующем порядке. Исходным является уравнение синхронного генератора:

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad}\dot{I}_d - j\dot{I}_q x_{aq} - jx_{\sigma a}\dot{I} - \dot{I} \cdot r_a; \quad (8.1)$$

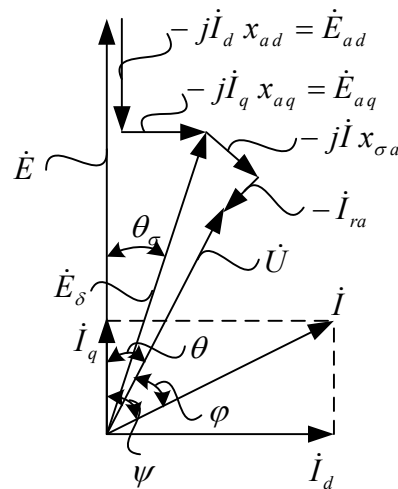


Рисунок 8.1 – Векторная диаграмма Блонделя с учетом сопротивлений реакции якоря (для R - L нагрузки)

Это 1-й вид векторных диаграмм строится в указанном ниже порядке:

$$\dot{E} \rightarrow \dot{I} \rightarrow \dot{E}_{ad} \rightarrow \dot{E}_{aq} \rightarrow \dot{E}_\delta \rightarrow \dot{E}_{\sigma a} \rightarrow \dot{I}_{ra} \rightarrow \dot{U}$$

Угол между векторами \dot{E} и \dot{U} θ называется углом нагрузки. В генераторном режиме работы вектор \dot{E} всегда опережает \dot{U} и θ считается положительным. Название θ идёт оттого, что он зависит от нагрузки (активной мощности) синхронного генератора.

$$P = m\dot{U} \dot{I} \cos \varphi. \quad (8.2)$$

Из диаграммы можно проследить, что, если, $\dot{U}, \dot{I} = const$, а φ — меняется, то меняется $\dot{I}_q \Rightarrow \dot{E}_{aq}$, а \Rightarrow и θ .

2-й вид диаграммы Blondеля основан на уравнении, записанном через синхронные сопротивления:

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_d x_d - j\dot{I}_q x_q - \dot{I} r_a \quad (8.3)$$

и строится в том же порядке, как и предыдущая.

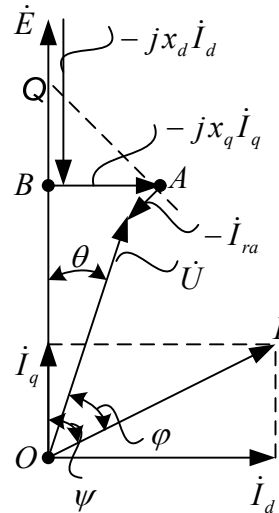


Рисунок 8.2 – Векторная диаграмма Blondеля с учетом синхронных индуктивных сопротивлений

Если в векторах падений напряжений поменять знаки, то получим векторные диаграммы, соответствующие уравнению:

$$\dot{E} = \dot{U} + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I} r_a. \quad (8.4)$$

Прямая, проведенная из точки A перпендикулярно вектору \dot{I} до пересечения вектора \dot{E} (или его продолжения) в точке Q будет отсекал отрезок $AQ = x_q I$.

Угол $\angle QAB = \psi$ (так как имеет стороны перпендикулярные сторонам угла ψ), значит

$$AQ = \frac{AB}{\cos \psi} = \frac{\dot{I}_q x_q}{\cos \psi} = \dot{I} x_q. \quad (8.5)$$

Это свойство используется в диаграммах Потье, где по \dot{I} , \dot{U} и $\cos \varphi$ находят \dot{E} .

Для неявнополюсных машин $x_d = x_q$, поэтому нет необходимости разлагать ток на составляющие, и векторная диаграмма выглядит значительно проще.

Рассмотренные векторные диаграммы справедливы для любого установившегося режима работы синхронного генератора с постоянной степенью насыщения, т. е. с постоянными x_{ad} и x_{aq} .

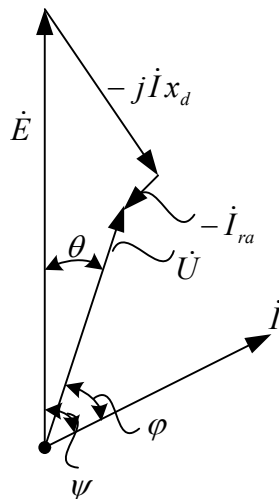


Рисунок 8.3 – Векторная диаграмма неявнополюсного СГ

Диаграмма Потье (неявнополюсный синхронный генератор)

Как уже говорилось, такой тип диаграмм используется при проектировании и эксплуатации синхронных машин, когда надо определить i_f , необходимый для обеспечения заданных \dot{U} , \dot{I} , $\cos \varphi$, с учетом насыщения.

Сначала строят \dot{U} и \dot{I} , затем $j\dot{I}x_{\sigma a}$ и $\dot{I}r_a$, находят \dot{E}_δ , необходимую для создания режима.

Затем по характеристике холостого хода определяют i_μ необходимую для создания \dot{E}_δ . Затем вычитая из $\dot{F}'_{\chi e}$ н.с. р. я., приведённую к i_χ \dot{F}'_a , получим полную н. с. ОВ.

Диаграмма Потье таким образом состоит из двух: векторная диаграмма ЭДС4. Как определить по диаграмме Потье напряжение на зажимах генератора при сбросе нагрузки? и векторная диаграмма намагниченных сил.

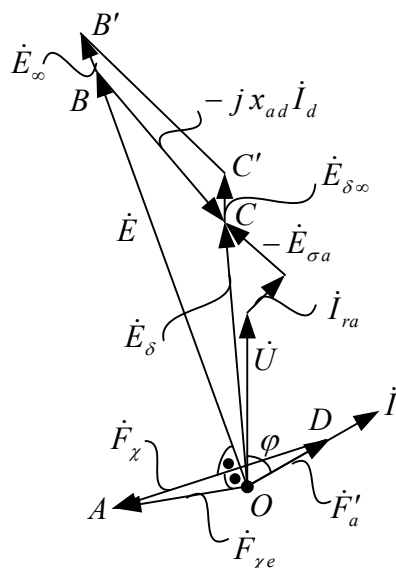


Рисунок 8.4 – Векторная диаграмма ЭДС Потье

При практическом использовании диаграммы Потье, её совмещают с характеристикой холостого хода.

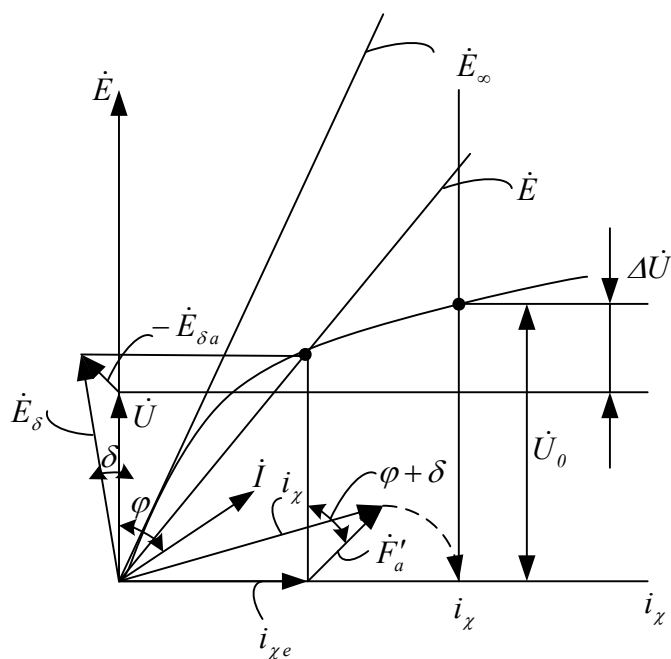


Рисунок 18.5 – Векторная диаграмма намагничивающих сил Потье

При построении принимается $r_a = 0$. Более точные результаты диаграмма даёт, если вместо $x_{\sigma a}$ взять x_p . Диаграмма построена для неявнополюсных машин.

Вектор \dot{E} должен быть перпендикулярен AD (н. с. \dot{F}_χ). Если из точки С провести прямую перпендикулярную \dot{I} , то пересечения её и ОВ даст насыщенное \dot{E} , если вместо \dot{E}_δ отложить $\dot{E}_{\delta\infty}$, то аналогичным способом получим \dot{E}_∞ .

По совмещенной диаграмме Потье и характеристики холостого хода можно получить значение напряжения на зажимах при сбросе нагрузки \dot{U}_0 ($i_\chi = const$) и найти изменения напряжения $\Delta\dot{U}$. Разница между \dot{U}_0 и \dot{E} при этом имеет место от того, что для режима нагрузки и холостого хода принимается (при определении \dot{E}) одна степень насыщения, а на самом деле они различны.

Задачи

1. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активно-емкостную нагрузку.
2. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.
3. Построить векторную диаграмму для неявнополюсного синхронного генератора, имеющего активно-емкостную нагрузку.
4. Построить векторную диаграмму для неявнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.

Вопросы к практическому занятию

1. Что определяю с помощью векторных диаграмм синхронного генератора?
2. Каков порядок построение диаграммы Blondеля?
3. Как выглядит диаграмма Blondеля для неявнополюсного генератора?
4. Порядок построения диаграммы Потье для явноплюсного генератора.

9 Расчет основных параметров синхронных генераторов

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Номинальные параметры генераторов.

Завод-изготовитель предназначает генератор для определенного длительно допустимого режима работы, который называют номинальным. Этот режим работы характеризуется параметрами, которые носят название номинальных.

Для синхронных электрических машин в установившемся режиме работы имеется строгое соответствие между частотой вращения агрегата n , об/мин, и частотой сети f , Гц:

$$n = 60 f / p , \quad (9.1)$$

Номинальное напряжение генератора- это линейное (междуфазное) напряжение обмотки статора в номинальном режиме.

Номинальным током статора генератора называется то значение тока, при котором допускается длительная нормальная работа генератора при номинальных параметрах охлаждения (температура, давление и расход охлаждающего газа и жидкости) и номинальных значениях мощности и напряжения, указанных в паспорте генератора.

Номинальная активная мощность генератора – это наибольшая активная мощность, для длительной работы с которой он предназначен в комплекте с турбиной.

Номинальная активная мощность генератора определяется следующим выражением:

$$P = S \cos \varphi . \quad (9.2)$$

Номинальная полная мощность генератора определяется по следующей формуле:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I . \quad (9.3)$$

Номинальный ток ротора – это наибольший ток возбуждения генератора, при котором обеспечивается отдача генератором его номинальной мощности при отклонении напряжения статора в пределах $\pm 5\%$ номинального значения и при номинальном коэффициенте мощности.

Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi$ принимается равным 0,8 для генераторов мощностью до 125 МВ·А, 0,85 для турбогенераторов мощностью до 588 МВ·А и гидрогенераторов до 360 МВ·А, 0,9 для более мощных машин.

Каждый генератор характеризуется также КПД при номинальной нагрузке и номинальном коэффициенте мощности. Для современных генераторов номинальный коэффициент полезного действия колеблется в пределах 96,3 - 98,8 %.

Пример 1. Найти ЭДС, индуцируемую в одной фазе статора генератора переменного тока, если количество витков 24; обмоточный коэффициент 0,9; частота ЭДС 50 Гц, а магнитный поток 0,05 Вб.

Решение:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot k_{о\phi} \cdot w \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 0,05 = 239,8 \text{ В.}$$

Задачи

1. Ротор трехфазного синхронного генератора имеет 12 полюсов. Частота напряжения на зажимах генератора $f = 50$ Гц. Полезная мощность приводного двигателя 5 кВт. Определить вращающий момент на валу генератора.

2. Трехфазный синхронный генератор вырабатывает напряжение частотой $f = 50$ Гц. Число полюсов $2p = 2$. Приводной двигатель создает вращающий момент на валу $M_1 = 29$ Нм. Определить полезную мощность приводного двигателя.

3. Определить напряжение на зажимах трехфазного синхронного генератора, работающего в режиме холостого хода, при соединении обмотки статора по схеме «треугольник» и «звезда», если известно, что частота $f = 50$ Гц,

число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора $w_1 = 180$, обмоточный коэффициент $k_{об1}=0,92$, максимальное значение магнитного потока одной фазы $\Phi_{\max} = 0,012$ Вб.

4. Определить нагрузочный ток турбогенератора при линейном напряжении на зажимах $U_n = 6,3$ кВ и коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0,8$, если известны ЭДС возбуждения генератора $E_f = 7,5$ кВ, активное и полное индуктивное сопротивления обмотки якоря $R = 0,235$ Ом, $X_1 = 32,9$ Ом. Обмотка соединена в звезду. Влиянием насыщения пренебречь.

5. Явнополюсный синхронный генератор включен на активно-индуктивную нагрузку $\bar{Z}_n = 8,8 + j6,6$ Ом. Фазный ток генератора $I = 346,8$ А. Определить ЭДС возбуждения генератора (без учета насыщения), если индуктивное сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям: $X_d = 9,89$ Ом, $X_q = 6,03$ Ом. Активное сопротивление обмотки якоря $R = 0,147$ Ом.

6. Имеется трехфазный синхронный генератор мощностью S_n с напряжением на выходе U_n (обмотка статора соединена «звездой») при частоте тока 50 Гц и частоте вращения n_1 . КПД генератора при номинальной нагрузке η_n (табл. 18.1). Генератор работает на нагрузку с $\cos\varphi_n = 0,9$. Требуется определить активную мощность генератора при номинальной нагрузке P_n , ток в обмотке статора I_{1n} , мощность первичного двигателя P_1 и вращающий момент M_1 при непосредственном механическом соединении валов генератора и двигателя.

Таблица 9.1 – Данные к задаче 6

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_n , кВ·А	330	400	170	470	230	600	780	450	700	500
U_{1n} , кВ	6,3	3,2	0,4	6,3	0,7	3,2	06,3	0,4	6,3	3,2
η_n , %	92	92	90	91	90	93	93	91	93	92
n_1 об/мин	1000	750	600	1000	600	500	1000	500	1000	600

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте понятие номинальных параметров синхронного генератора.

2. В каких пределах колеблется КПД синхронного генератора?
3. Как определить ЭДС фазы обмотки статора синхронного генератора?

10 Расчет основных параметров синхронных двигателей

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Электромагнитный момент СД

Из принципа действия синхронного двигателя запишем, что сила, действующая на проводник с током в поле:

$$F_{эм} = B_{\delta} l I. \quad (10.1)$$

Если проводник уложен в статоре диаметром D_a , то $F_{эм}$ создает электромагнитный момент:

$$M_{эм} = F_{эм} D_a / 2 = B_{\delta} l I D_a / 2, \quad (10.2)$$

являющийся в двигателе вращающим моментом. Следует отметить, что в машинах переменного тока вращающий момент создается только активной составляющей тока.

$$M_{эм} = B_{\delta} \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot D_a / 2 \quad (10.3)$$

Поскольку уравнение угловой характеристики для СМ имеет вид приведенный ранее, то

$$M_{эм} = \frac{mEU}{\Omega x_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta, \quad (10.4)$$

Из выражения (20.4) можно определить: максимальный электромагнитный момент:

$$M_{эм\max} = \frac{mEU}{\Omega x_d}; \quad (10.5)$$

синхронизирующий момент:

$$M_{см} = \frac{dM_{эм}}{d\Theta} = \frac{mEU}{\Omega x_d} \cos \Theta + \frac{mU^2}{\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\Theta \quad (10.6)$$

коэффициент статической перегружаемости:

$$K_n = M_{эмт} / M_{эмн}. \quad (10.7)$$

Определяется номинальным режимом работы ($M_{эмн}=M_{ст}$ статическому моменту нагрузки).

Из выражения (20.4) можно определить реактивный момент (невозбужденной явнополюсной СМ):

$$M_{эмп} = \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta, \quad (10.8)$$

который существует из-за магнитной несимметрии явнополюсной СМ, если $x_d = x_q$, $M_{эмп} = 0$.

Физически возникновение реактивного момента в явнополюсной машине объясняется тем, что ротор (невозбужденный) стремится занять по отношению к вращающемуся полю положение, при котором сопротивление магнитного потока и энергия поля минимальны.

Если $M_{ст}=0$, то $M_{эм}=0$ и $\Theta=0$, т.е. ось ротора и поля совпадают. Если вал нагружен, т.е. $M_{эм}$.

Пример 1. Трехфазный синхронный двигатель номинальной мощностью $P_n = 575$ кВт, числом полюсов $2p = 6$ работает от сети промышленной частоты напряжением $U_n = 6$ кВ. Перегрузочная способность двигателя $M_{\max}/M_n = 1,5$, кратность пускового тока $I_n/I_n = 5$, кратность пускового момента $M_n/M_n = 1,4$. Схема соединения обмотки статора – «звезда». В номинальном режиме работы двигатель имеет коэффициент полезного действия $\eta = 93\%$, коэффициент мощности при опережающем токе статора $\cos \varphi_n = 0,8$. Определить: 1) потребляемую двигателем из сети активную мощность P_1 и ток I_n , суммарные потери мощности $\Sigma \Delta P$, вращающий момент двигателя M_n при номинальной нагрузке; 2) пусковой ток I_n и пусковой момент M_n ; максимальный момент M_{\max} , при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Решение:

Потребляемая двигателем из сети активная мощность:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{575}{0,93} = 618 \text{ кВт.}$$

Потребляемый из сети ток:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_n} = \frac{618}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,8} = 74,5 \text{ А.}$$

Номинальная частота вращения:

$$n_n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Развиваемый двигателем вращающий момент:

$$M_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot n_n} = \frac{575 \cdot 10^3}{2\pi \cdot (1000/60)} = 5494 \text{ Н·м.}$$

Суммарные потери мощности в двигателе:

$$\Sigma \Delta P = P_1 - P_n = 618 - 575 = 43 \text{ кВт.}$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_n = 1,4 M_n = 1,4 \cdot 5494 = 7691 \text{ Н·м.}$$

Пусковой ток двигателя:

$$I_n = 5 I_n = 5 \cdot 74,5 = 372 \text{ А.}$$

Максимальный момент двигателя, Нм:

$$M_{\max} = 1,5 M_n = 1,5 \cdot 5494 = 8240 \text{ Н·м.}$$

Задачи

1. Трехфазный синхронный двигатель номинальной мощностью P_n и числом полюсов $2p$ работает от сети напряжением U_{1n} (обмотка статора соединена «звездой»). КПД двигателя η_n , коэффициент мощности $\cos \varphi_n$ при опережающем токе статора. Перегрузочная способность двигателя λ , а его пусковые параметры определены кратностью пускового тока I_n/I_n и кратностью пускового момента M_n/M_n . Значения этих величин приведены в таблице 20.1 Требуется определить: потребляемые двигателем из сети активную мощность P_{1n} и ток I_{1n} , развиваемый двигателем при номинальной нагрузке

вращающий момент M_n , суммарные потери мощности $\Sigma \Delta P$, пусковой момент M_n и пусковой ток I_n , а также вращающий момент M_{\max} , при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Таблица 10.1– Данные к задаче 1

Варианты	Величины							
	P_n , кВт	U_{1n} , кВ	$2p$	$\cos \varphi_n$	η_n , %	I_n/I_n	M_n/M_n	M_{\max}/M_n
1	575	6,0	16	0,8	93	5,0	1,4	1,5
2	600	3,0	10	0,9	92	5,5	1,7	1,5
3	325	3,0	8	0,9	90	4,5	1,7	1,6
4	60	0,38	6	0,8	89	4,5	2,2	1,6
5	160	0,38	6	0,8	90	4,8	2,4	1,5

2. Трехфазный синхронный двигатель в номинальном режиме имеет технические данные: мощность $P_n = 600$ кВт, напряжение $U_n = 3000$ В, коэффициент полезного действия $\eta_n = 93$ %, коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,8$, угол нагрузки $\theta = 30^\circ$. Определить потребляемый из сети ток и перегрузочную способность двигателя.

3. Трехфазный синхронный двигатель номинальной мощностью P_n и числом полюсов $2p$ работает от сети напряжением U_{1n} (обмотка статора соединена «звездой»). КПД двигателя η_n , коэффициент мощности $\cos \varphi_n$ при опережающем токе статора. Перегрузочная способность двигателя – λ , а его пусковые параметры определены кратностью пускового тока I_n/I_n и кратностью пускового момента M_n/M_n . Значения этих величин приведены в таблице 20.2. Требуется определить: потребляемые двигателем из сети активную мощность P_{1n} и ток I_{1n} , развиваемый двигателем при номинальной нагрузке вращающий момент M_n , суммарные потери мощности $\Sigma \Delta P$, пусковой момент M_n и пусковой ток I_n , а также вращающий момент M_{\max} , при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Таблица 10.2 – Данные к задаче 3

Варианты	Величины							
	P_n , кВт	U_{1n} , кВ	$2p$	$\cos \varphi_n$	η_n , %	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$
1	575	6,0	16	0,8	93	500	1,4	1,5

2	600	3,0	10	0,9	92	505	1,7	1,5
3	325	3,0	8	0,9	90	405	1,7	1,6
4	60	0,38	6	0,8	89	4,5	2,2	1,6
5	160	0,38	6	0,8	90	4,8	2,4	1,5

Вопросы к практическому занятию

1. Дайте определение электромагнитного момента синхронного двигателя.
2. Каков физический смысл реактивного момента синхронного двигателя?
3. Как определить пусковой ток и пусковой момент синхронного двигателя?
4. Что такое коэффициент статической перегружаемости?

11 Электромагнитные процессы в асинхронных машинах

при холостом ходе

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

При неподвижном роторе асинхронная машина (АМ) представляет собой трансформатор, отличающийся от обычного трансформатора по конструкции (распределённая обмотка на статоре и роторе, наличие зазора и т.п.). С физической точки зрения неподвижная АМ и трансформатор эквивалентны. Поэтому изучения АМ начинается со случая, когда $n_2=0$ а режим работы – холостой ход.

Пусть ротор АМ имеет фазное исполнение, и его обмотка разомкнута, а статор включён на сеть с напряжением U_1 и частотой f_1 . Этот режим эквивалентен трансформатору при холостом ходе, причём первичная обмотка – это статор, вторичная ротор. Под действием напряжения U_1 по обмотке статора протекает ток холостого хода, создающий магнитный поток, имеющий две

составляющие: $\dot{\Phi}_m$ – основной поток, $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ – поток рассеяния статора. Скорость вращения потока n_1 определяется частотой питающей сети:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}. \quad (11.1)$$

Основной поток создаёт в обеих обмотках ЭДС:
статора

$$E_1 = \sqrt{2} \pi f_1 w_1 k_{o\sigma 1} \Phi_m; \quad (11.2)$$

ротора

$$E_2 = \sqrt{2} \pi f_1 w_2 k_{o\sigma 2} \Phi_m. \quad (11.3)$$

Поток рассеяния создаёт в статоре ЭДС:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_0 x_{\sigma 1}, \quad (11.4)$$

где $x_{\sigma 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора. Статор обладает и активным сопротивлением, учитывая которое (а, следовательно, и падение напряжения в r_1), можно записать уравнение напряжений для х.х. обмотки статора заторможенной АМ:

$$\dot{U} = \dot{I}_0 r_1 + j x_{\sigma 1} \dot{I}_0 - \dot{E}_1. \quad (11.5)$$

По аналогии с трансформатором обмотку ротора АМ приводят к обмотке статора, причём $E'_2 = E_1$, а коэффициент приведения напряжений равен:

$$k_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{o\sigma 1}}{w_2 k_{o\sigma 2}}. \quad (11.6)$$

Для приведённой неподвижной АМ можно построить схему замещения, аналогичную схеме замещения трансформатора тоже определяется конструктивными особенностями.

Реактивная составляющая тока холостого хода АД:

$$I_{0p} = \frac{m_1 \cdot p \cdot F_{0m}}{\sqrt{2} \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\sigma 1}}. \quad (11.7)$$

где m_1 – число фаз обмотки статора;

p – число пар полюсов;

F_{0m} – амплитуда МДС, образующей поток взаимной индукции Φ_m .

Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_m}{m_1 \cdot E_1}, \quad (11.8)$$

где P_m – магнитные потери в магнитопроводе статора.

Пример 1. Принимая синусоидальное распределение индукции в зазоре, определить основной магнитный поток асинхронной машины при соединении обмоток статора звездой, если число последовательно соединенных витков фазы статора $w_1 = 336$, обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0,96$. Напряжение сети $U_c = 380$ В, частота $f = 50$ Гц. Известно также, что падение напряжения на сопротивлениях статорной обмотки составляет 4 % от фазного напряжения.

Решение:

ЭДС фазы обмотки статора:

$$E_1 = U_\phi - \Delta U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} - 0,04 \frac{380}{\sqrt{3}} = 210,86 \text{ В.}$$

Основной магнитный поток асинхронной машины:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = \frac{210,86}{3,14 \cdot \sqrt{2} \cdot 336 \cdot 0,96} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Задачи

1. Вычислить магнитный поток асинхронной машины при несинусоидальном распределении индукции, если фазная ЭДС, индуцированная в обмотке статора, $E_1 = 365$ В, число витков фазы статора $w_1 = 176$, обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0,958$, коэффициент насыщения зубцового слоя $k_z = 1,2$, частота тока $f = 50$ Гц. Сравнить полученное значение магнитного потока с его величиной при ненасыщенной машине.

2. Найти ток идеального холостого хода четырехполюсного асинхронного двигателя по следующим данным: ЭДС, индуцированная в фазе статора, $E_{1\phi} = 213$ В, МДС, образующая основной магнитный поток, $F_{0m} = 457,5$ А;

число витков обмотки статора $w_1 = 126$, обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0,96$, магнитные потери в магнитопроводе статора $P_m = 150$ Вт.

3. Реактивная составляющая тока холостого хода шестиполусного асинхронного двигателя $I_{0p} = 40$ А. Амплитуда МДС, образующей основной магнитный поток, $F_{0m} = 1088$ А, обмоточный коэффициент обмотки статора $k_{об1} = 0,886$. Определить число витков в фазе обмотки статора.

4. ЭДС, индуцированная в фазе обмотки статора асинхронного двигателя при вращении ротора с той же частотой, что и поле статора, $E_1 = 215$ В. Ток в статоре $I_0 = 5,6$ А. Определить составляющие главного сопротивления обмотки статора, если магнитные потери в магнитопроводе статора $P_m = 180$ Вт.

Вопросы к практическому занятию

1. Для чего необходимо приведение асинхронной машины к машине с неподвижным ротором?
2. Сравните режим холостого хода трансформатора с режимом холостого хода асинхронно машины.
3. Как определить составляющие тока холостого хода обмотки статора асинхронной машины?
4. Как определить коэффициент приведения по напряжению?
5. Как выглядит схема замещения неподвижной приведенной асинхронной машины?

12 Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке

Цель: формирование у студента компетенций ПК-5, ПК-6.

Теоретическая часть

Скорость поля асинхронной машины n_1 называют синхронной, потому что она постоянна и определяется f_1 , а скорость ротора n_2 – асинхронной, потому что она меньше, чем n_1 .

Относительная разность скоростей вращения n_1 и n_2 называется скольжением s .

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (12.1)$$

В нормальных режимах АД $s = 1,5 \div 7\%$

Скорость вращения ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (12.2)$$

Частота тока в обмотке ротора:

$$f_2 = sf_1. \quad (12.3)$$

Режимы работы асинхронной машины:

- 1) двигательный: $0 < s \leq 1$;
- 2) генераторный: $-\infty < s < 0$;
- 3) тормозной (противовключение): $1 < s < \infty$.

Действующее значение ЭДС взаимной индукции в фазе вращающегося ротора:

$$E_{2s} = \pi \sqrt{2} f_1 \cdot s \cdot w_2 \cdot k_{o\delta 2} \cdot \Phi_m = sE_2. \quad (12.4)$$

Действующее значение ЭДС рассеяния ротора:

$$E_{2\sigma s} = x_{2s} I_2, \quad (12.5)$$

где индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора при скольжении:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = sx_2. \quad (12.6)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора:

$$x_2 = 2\pi f_1 L_{2\sigma}. \quad (12.7)$$

Ток в фазе ротора, обусловленный действием ЭДС вращения E_{2s} :

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}}. \quad (12.8)$$

Уравнение токов асинхронной машины:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2', \quad (12.9)$$

где \dot{I}_2' – приведенный ток ротора

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_I}, \quad (12.10)$$

где k_I – коэффициент приведения по току

$$k_I = \frac{m_1 k_{об1} w_1}{m_2 k_{об2} w_2}. \quad (12.11)$$

Коэффициенты приведения сопротивлений

$$k = k_U k_I. \quad (12.12)$$

Уравнение напряжений для режима КЗ АМ такое же, как и для трансформатора

$$\dot{U}_{1\kappa} = -\dot{E}_{1\kappa} + \dot{I}_1 z_{\kappa}, \quad (12.13)$$

где $z_{\kappa} = z_1 + z'_2$.

Пример 1. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные: максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta} = 1,5$ Тл, диаметр расточки статора $D_1 = 180$ мм, длина сердечника статора $l_1 = 141$ мм, число полюсов обмотки статора и ротора $2p = 4$, число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора $w_1 = 48$, ротора $w_2 = 8$, обмоточные коэффициенты статора и ротора $k_{об1} = k_{об2} = 0,93$. Определить фазные значения ЭДС в обмотке статора E_1 и в обмотке ротора при неподвижном его состоянии E_2 и вращающемся со скольжением $s = 8$ %, частоту тока в неподвижном и вращающемся роторе. Частота тока питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение:

Полюсное деление

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

Основной магнитный поток

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta} \cdot l_1 \cdot \tau = \frac{2}{3,14} 1,5 \cdot 180 \cdot 10^{-3} \cdot 141 \cdot 10^{-3} = 0,019 \text{ Вб.}$$

ЭДС фазной обмотки статора

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

ЭДС в обмотке неподвижного ротора

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

ЭДС во вращающемся роторе при скольжении

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

Частота тока в неподвижном роторе $f_2 = f_1 = 50 \text{ Гц}$, частота во вращающемся роторе

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

Задачи

1. Шестиполюсная асинхронная машина питается от трехфазной сети с частотой 60 Гц. Скольжение машины равно 0,025. Найти угловую скорость и частоту вращения поля и ротора. Как изменятся эти величины при частоте 400 Гц? В каком режиме работает машина?

2. Ротор асинхронного двигателя вращается с угловой скоростью $\omega = 298 \text{ рад/с}$. В каком режиме и при каком скольжении будет работать машина в первый момент после переключения обмоток статора на противоположное направление вращения, если угловая скорость поля $\omega_1 = 314 \text{ рад/с}$?

3. Ротор трехфазного асинхронного двигателя вращается с частотой $n = 1440 \text{ об/мин}$. Определить ЭДС взаимной индукции в фазе ротора E_{2s} , если синхронная частота вращения $n_1 = 1500 \text{ об/мин}$, а ЭДС при неподвижном роторе $E_2 = 200 \text{ В}$.

4. ЭДС, индуцируемая в фазе ротора асинхронной машины при скольжении $s = 0,03$, равна 6 В. Найти ток в обмотке неподвижного ротора, если активное сопротивление фазы обмотки ротора $r_2 = 0,01 \text{ Ом}$, а индуктивность рассеяния $L_{2\sigma} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$. Частота сети $f_1 = 50 \text{ Гц}$.

5. Активное сопротивление фазы обмотки ротора асинхронной машины с фазным ротором $r_2 = 0,01 \text{ Ом}$, ЭДС взаимной индукции в фазе ротора при

неподвижном роторе $E_2 = 212$ В, ток $I_2 = 2400$ А. Определить индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора при скольжении $s = 0,03$.

Вопросы к практическому занятию

1. Каким скольжением определяется двигательный режим работы асинхронной машины?
2. Как определить ЭДС вращения?
3. Как определяется коэффициент приведения сопротивления роторной цепи?
4. Каким образом обмотку ротора АМ приводят к обмотке ротора, а вращающуюся машину к неподвижной?

13 Потери, КПД асинхронного двигателя

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Из сети к первичной обмотке асинхронного двигателя подводится мощность:

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \varphi_1. \quad (13.1)$$

Часть этой мощности теряется в виде электрических потерь в первичной обмотке

$$p_{эл} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (13.2)$$

а часть – в стали статора (магнитные потери)

$$p_{мг} = m_1 I_0^2 r_m = \frac{m_1 E_1^2}{r_m}. \quad (13.3)$$

Оставшаяся часть передается электромагнитным способом на ротор, согласно схеме замещения (электромагнитная мощность)

$$P_{эм} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_2 I_2^2 \frac{r_2}{s} = m_1 E_1 I_2' \cos \psi_2. \quad (13.4)$$

Часть $P_{эм}$ теряется в виде тепла в обмотке ротора (электрические потери в обмотке ротора)

$$p_{эл2} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2, \quad (13.5)$$

оставшаяся часть превращается в механическую мощность, развиваемую на роторе

$$P_{мх} = P_{эм} - p_{эл2} = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}, \quad (13.6)$$

часть $P_{мх}$ теряется в машине в виде механических потерь $p_{мх}$.

Добавочные потери рассчитать очень трудно, поэтому их принимают равными 0,5% от P_1 при $I_1 = I_n$.

Полезная мощность на валу

$$P_2 = P_{мх} - p_{мх} - p_{\delta}; \quad (13.7)$$

$$P_2 = P_1 - \Sigma p, \quad (13.8)$$

где суммарные потери

$$\Sigma p = p_{эл1} + p_{мг} + p_{эл2} + p_{мх} + p_{\delta}. \quad (13.9)$$

КПД двигателя определяется как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}. \quad (13.10)$$

Из выражения для $P_{эм}$ и $p_{эл2}$ вытекают соотношения

$$p_{эл2} = s P_{эм}; \quad (13.11)$$

$$P_{мх} = (1-s) P_{эм}. \quad (13.12)$$

из которых видно, что при $s = 0$ потерь в роторе нет (идеальный холостой ход), а при $s = 1$ вся $P_{эм}$ идет на потери в обмотке ротора, а $P_{мх} = 0$. Поэтому с точки зрения КПД чем меньше s , тем лучше ($s_n = 0,02 \div 0,05$).

Пример 1. Асинхронный трехфазный двигатель при напряжении сети $U_c = 380$ В развивает номинальную мощность $P_n = 10$ кВт, вращаясь с частотой $n_n = 2920$ об/мин и потребляя ток $I_{1n} = 18,6$ А при коэффициенте мощности $\cos \varphi_n = 0,913$. В режиме холостого хода двигатель потребляет из сети мощность $P_0 = 325$ Вт при токе $I_0 = 5,04$ А. Активное сопротивление обмотки

статора $r_1 = 0,326$ Ом, механические потери мощности $p_{mx} = 130$ Вт. Схема соединения обмотки статора – «звезда». Определить потери мощности в меди статора и ротора, потери в стали, добавочные потери при нагрузке, коэффициент полезного действия АД.

Решение:

При решении задачи принято допущение, что сумма потерь в стали и механических потерь – величина постоянная.

Потери в стали:

$$P_{cm} = P_0 - (m_1 I_0^2 + p_{mx}) = 325 - (3 \cdot 5,04^2 + 130) = 170 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в обмотке статора:

$$p_{эл1} = m_1 I_{1н}^2 r_1 = 3 \cdot 18,6^2 \cdot 0,326 = 338 \text{ Вт.}$$

Потребляемая из сети мощность:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1н} \cdot I_{1н} \cdot \cos \varphi_n = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 18,6 \cdot 0,913 = 11163,8 \text{ Вт.}$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{эм} = P_1 - p_{cm} - p_{эл1} = 11163,8 - 170 - 338 = 10655,8 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в обмотке ротора:

$$p_{эл2} = s \cdot P_{эм} = 0,027 \cdot 10655,8 = 287,7 \text{ Вт,}$$

где при частоте вращения магнитного поля статора $n_1 = 3000$ об/мин скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = \frac{3000 - 2920}{3000} = 0,027.$$

Добавочные потери:

$$P_\delta = P_{эм} - P_n - p_{эл2} - p_{mx} = 10655,8 - 10000 - 287,7 - 130 = 238 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери мощности:

$$\Sigma p = p_{эл1} + p_{эл2} + p_{cm} + p_{mx} + p_\delta = 338 + 287,7 + 170 + 130 + 238 = 1163,8 \text{ Вт.}$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} \cdot 100 \% = \frac{10000}{11163,8} \cdot 100 \% = 89,6 \%$$

Задачи

1. Электрические потери в обмотке статора АД $p_{эл} = 500$ Вт. Мощность, подводимая к двигателю, 13,8 кВт. Определить электромагнитную мощность, мощность на валу двигателя, электрические потери в обмотке ротора, механические и добавочные потери, если четырехполюсный двигатель вращается с частотой $n = 1450$ об/мин, КПД машины $\eta = 87\%$. Частота сети 50 Гц, Магнитные потери в магнитопроводе статора принять равными 2/3 от электрических потерь в обмотке статора.

2. Асинхронный двигатель при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода потребляет из сети ток 30 А с коэффициентом мощности 0,09. Активное сопротивление фазы шестиполюсной обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,07 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети активную мощность 145 кВт при коэффициенте мощности 0,88 и вращается с частотой $n = 965$ об/мин. Пренебрегая механическими и добавочными потерями, определить полезный вращающий момент на валу двигателя. Частота питающей сети $f = 50$ Гц.

3. Потребляемая асинхронным двигателем мощность 16,7 кВт, напряжение сети 380 В, коэффициент мощности 0,88. Активное сопротивление обмотки статора, измеренное между ее линейными выводами, 0,56 Ом. Скольжение – 0,033. Предположим, что магнитные потери в сердечнике статора равны половине электрических потерь в обмотке статора, механические и добавочные потери составляют 5 % от суммарных потерь. Определить полезную мощность и коэффициент полезного действия двигателя.

4. Электромагнитная мощность асинхронного двигателя $P_{эм} = 500$ Вт, полная механическая мощность $P_{мх} = 470$ Вт. Найти скольжение, при котором работает двигатель, и электрические потери в роторе.

5. Четырехполюсный АД с фазным ротором при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода вращается с частотой 1500 об/мин и при коэффициенте мощности 0,08 потребляет из сети ток 25 А. Активное сопротивление фазы обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,02 Ом. Обмотка

ротора включена в треугольник. Сопротивление обмотки ротора, измеренное на кольцах, равно 0,008 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети 110,5 кВт при коэффициенте мощности 0,85, линейный ток в роторной цепи 278,5 А. Предполагая, что механические потери равны магнитным потерям в сердечнике статора, определить скорость вращения ротора в номинальном режиме.

Вопросы к практическому занятию

1. Какие потери в асинхронном двигателе относятся к постоянным потерям, а какие к переменным?
2. Какие потери относятся к механическим потерям в асинхронном двигателе?
3. Чем определяются добавочные потери в АД и как они рассчитываются?
4. Перечислите все виды потерь мощности в асинхронном двигателе.
5. Какова зависимость между электрическими потерями в обмотке ротора АД и электромагнитной мощностью?

14 Механическая характеристика асинхронного двигателя

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43

Теоретическая часть

Механической характеристикой называется зависимость электромагнитного момента от скольжения $M_{эм} = f(s)$, при $U_1, f_1 = \text{const.}$

Известно, что

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1}, \quad (14.1)$$

где

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}. \quad (14.2)$$

Уравнение механической характеристики

$$M_{\text{эм}} = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right]}, \quad (14.3)$$

где

$$\omega_1 = 2\pi f_1. \quad (14.4)$$

Скольжение, при котором $M_{\text{эм}}$ достигает максимальных значений $\pm M_m$, называется критическим $\pm s_{\text{кр}}$.

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2}}. \quad (14.5)$$

Обычно в знаменателе r_1 по сравнению с $x_{\sigma 1}$ и $x'_{\sigma 2}$ мало и можно получить

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{(x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})}. \quad (14.6)$$

Максимальный момент двигателя

$$M_m \cong \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})}. \quad (14.7)$$

Для практического построения механической характеристики часто используют формулу Клосса, которая определяет связь между текущим значением $M_{\text{эм}}$ и M_m , согласно которой

$$\frac{M_{\text{эм}}}{M_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}. \quad (14.8)$$

Начальный пусковой момент

$$M_n = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{\omega_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2]}. \quad (14.29)$$

Эксплуатационная механическая характеристика АД – это зависимость $M_2 = f(n_2)$, а чаще $n_2 = f(M_2)$, имеет вид:

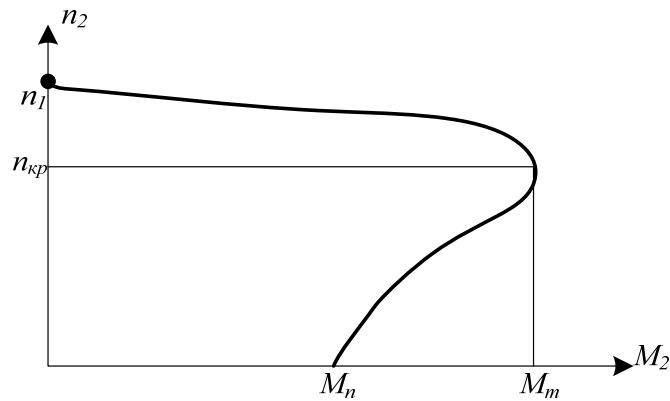


Рисунок 14.1 – Эксплуатационная механическая характеристика АД

Пример 1. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии А2, работающий от сети частотой 50 Гц напряжением 380 В. при соединении обмотки статора «звездой», имеет номинальные параметры: полезная мощность $P_n = 22$ кВт, частота вращения $n_n = 1455$ об/мин, КПД $\eta = 90$ %, коэффициент мощности $\cos \varphi_{1n} = 0,88$, кратность пускового тока $I_n/I_n = 7$, кратность пускового момента $M_n/M_n = 1,2$ и максимального момента $M_m/M_n = 2$, активное сопротивление фазной обмотки статора 0,21 Ом. Требуется рассчитать параметры и построить механическую характеристику двигателя $n_2 = f(M)$. Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания принять равным $\cos \varphi_k = 0,5 \cos \varphi_{1n}$.

Решение:

Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1n} = P_n / \eta = 22 / 0,9 = 24,4 \text{ кВт.}$$

Потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1n} = \frac{P_{1n}}{3 \cdot U_{1\phi} \cos \varphi_{1n}} = \frac{24400}{3 \cdot 220 \cdot 0,88} = 42 \text{ А.}$$

Пусковой ток двигателя

$$I_n = I_{1n} \frac{I_n}{I_{1n}} = 42 \cdot 7 = 294 \text{ А.}$$

Сопротивление короткого замыкания двигателя

$$z_{\kappa} = \frac{U_{1\phi}}{I_n} = 5220 / 294 = 0,75 \text{ Ом.}$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\kappa} = 0,5 \cdot 0,88 = 0,44; \sin \varphi_{\kappa} = 0,895.$$

Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_{\kappa} = z_{\kappa} \sin \varphi_{\kappa} = 0,75 \cdot 0,895 = 0,67 \text{ Ом;}$$

$$x_{\kappa} = z_{\kappa} \cos \varphi_{\kappa} = 0,75 \cdot 0,44 = 0,33 \text{ Ом.}$$

Скольжение в режиме номинальной нагрузки

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0,03.$$

Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора

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

Номинальное значение электромагнитного момента

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \cdot r'_2 / s_n}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2 / s_n)^2 + x_{\kappa}^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,12 / 0,03}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 [(0,21 + 0,12 / 0,03)^2 + 0,67^2]} = 204 \text{ Н·м}$$

Максимальный момент

$$M_m = M \cdot \frac{M_m}{M} = 204 \cdot 2 = 408 \text{ Н·м.}$$

Пусковой момент

$$M_n = 204 \cdot 1,2 = 245 \text{ Н·м.}$$

Критическое скольжение

$$s_{kp} = s_n \left[\frac{M_m}{M} + \sqrt{(M_m / M)^2 - 1} \right] = 0,03 [2 + \sqrt{2^2 - 1}] = 0,11$$

Момент при скольжении $s = 0,5$

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \cdot r'_2 / s_n}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2 / s_n)^2 + x_{\kappa}^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,12 / 0,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 [(0,21 + 0,12 / 0,5)^2 + 0,67^2]} = 341 \text{ Н·м.}$$

Рассчитав частоту вращения по формуле

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

Таблица 14.1 – Результаты расчета механической характеристики

Номер	1	2	3	4	5
Скольжение	0	0,03	0,11	0,5	1
Частота вращения, об/мин	1500	1455	1335	750	0
Момент, Н·м	0	204	410	341	245

По результатам расчета построить механическую характеристику $n_2 = f(M)$.

Задачи

1. Определить приведенное активное сопротивление обмотки ротора трехфазного четырехполюсного асинхронного двигателя, имеющего номинальную мощность 110 кВт, номинальную частоту вращения $n = 1470$ об/мин, номинальное фазное напряжение $U_{1n} = 220$ В, частоту $f_1 = 50$ Гц, кратность максимального момента $M_m/M_n = 2$, активное сопротивление обмотки статора $r_1 = 0,021$ Ом.

2. Двухполюсный трехфазный асинхронный двигатель в номинальном режиме потребляет мощность $P_1 = 12,5$ кВт при частоте вращения $n = 2930$ об/мин. Частота сети 50 Гц. Построить механическую характеристику двигателя по следующим данным: кратность максимального момента $M_m/M_n = 2,2$, КПД $\eta = 88\%$.

3. При какой частоте вращения асинхронный двигатель развивает максимальный момент, если отношение максимального момента к номинальному моменту $M_m/M_n = 2,2$, а номинальная частота вращения шестиполюсного двигателя при частоте сети 50 Гц $n = 983$ об/мин.

4. Четырехполюсный асинхронный двигатель при номинальной нагрузке потребляет из сети активную мощность $P_1 = 16,9$ кВт. Номинальная частота вращения $n = 1470$ об/мин, суммарные потери в двигателе $\Sigma p = 1,9$ кВт. Отношение пускового момента к номинальному $M_n/M_n = 1,1$. Определить приведенное активное сопротивление обмотки ротора, если активное сопро-

тивление обмотки статора $r_1 = 1,1$ Ом, индуктивные сопротивления обмотки статора и ротора $x_1 + x'_2 = 5,2$ Ом. Частота сети $f_1 = 50$ Гц.

Вопросы к практическому занятию

1. Какая характеристика называется механической?
2. Поясните физический смысл механических характеристик АМ.
3. Какое скольжение соответствует максимальному моменту асинхронного двигателя, как его рассчитать?
4. Чему равно скольжение в момент пуска асинхронного двигателя?

15 Однофазный асинхронный двигатель

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

В тех случаях, когда потребление электрической энергии невелико (жилые дома, торговые предприятия и др.) или, когда трудно выполнить 3-фазную сеть (железные дороги, электрифицируемые на переменном токе), применяются однофазные сети. При этом возникает необходимость использования однофазных двигателей переменного тока.

Однофазный асинхронный двигатель имеет на статоре однофазную обмотку, а на роторе – короткозамкнутую обмотку в виде беличьей клетки. Можно представить, что 1-фазный асинхронный двигатель получается из 3-фазного путем отключения одной фазы статора.

Однофазный ток статора создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на 2 поля, имеющих равные амплитуды и вращающиеся в противоположные стороны.

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_{np} - \dot{\Phi}_{обр}; \quad (15.1)$$

$$\dot{\Phi}_{np} = \dot{\Phi}_{обр} = \frac{1}{2} \Phi_m. \quad (15.2)$$

Прямое поле вращается с синхронной скоростью

$$n_{np} = n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (15.3)$$

обратное – с такой же скоростью, но с другим знаком .

$$n_{обр} = -n_1. \quad (15.4)$$

Прямая волна имеет по отношению к ротору скольжение

$$s_1 = s = \frac{n_1 - n}{n_1}; \quad (15.5)$$

Обратная волна по отношению к ротору имеет скольжение

$$s_2 = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = 2 - s. \quad (15.6)$$

Под действием прямого и обратного полей в роторе наводится ЭДС соответствующей частоты и протекают токи, которые, взаимодействуя со своими полями будут создавать вращающие моменты, противоположные по знаку. В момент пуска $M_{np} = -M_{обр}$, поэтому результирующий пусковой момент равен нулю и однофазный асинхронный двигатель не может самостоятельно прийти во вращение при подключении его к сети, а нуждается в постороннем толчке.

При небольших s асинхронный двигатель развивает вращающий момент, равный M_n , но его надо подтолкнуть. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя имеет вид суммы двух характеристик: 1) $M_{np} = f(s)$; 2) $M_{обр} = f(s)$, получается при подстановке в уравнение механической характеристики вместо s величины $2-s$ и с учетом того, что M_{np} и $M_{обр}$ на характеристике имеют разные знаки

$$M_{обр} = - \frac{pm_1 U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{2-s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{2-s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right]}. \quad (15.7)$$

Зависимость $M_{эм} = f(s)$ однофазного асинхронного двигателя показывает, чтобы появился пусковой M_n необходимо во время пуска двигателя со-

здать в нем вращающееся магнитное поле. Для этого на статоре двигателя помимо рабочей обмотки РО применяют ещё одну – пусковую. Эти обмотки располагают на статоре так, чтобы их оси были смещены на 90° в пространстве, а по ним протекали токи, сдвинутые во времени на 90° . Для получения временного сдвига в цепь пусковой обмотки включают фазосдвигающий элемент, в качестве которого используют: R , L или C . При достижении частотой вращения значения близкого к номинальному, пусковую обмотку отключают с помощью реле. Таким образом, во время пуска – двигатель 2-х фазный, в рабочем режиме – однофазный.

Задачи

1. Частота вращения ротора однофазного асинхронного двигателя $n = 1400$ об/мин, двигатель четырехполюсный. Частота питающей сети 50 Гц. С каким скольжением перемещается ротор по отношению к прямой и обратной волнам магнитных полей обмотки статора?

2. Определить электромагнитный момент однофазного четырехполюсного асинхронного двигателя при частоте вращения ротора $n = 1390$ об/мин. Параметры схемы замещения: $r_{1*} = r'_{2*} = 0,04$; $x_{1*} = x'_{2*} = 0,1$; $r_{0*} = 0$, $x_{0*} = 2,8$. Двигатель работает при напряжении $U_{1*} = 1$ и частоте 50 Гц.

3. При работе трехфазного асинхронного двигателя оборвался один из линейных проводов. Оценить изменение линейного тока двигателя, если мощность на валу двигателя осталась неизменной.

4. Асинхронный конденсаторный двигатель при напряжении $U_1 = 220$ В имеет в фазе, включенной непосредственно в сеть, ток $\dot{I}_B = 5,2 - j3$ А. Определить величину емкости, обеспечивающей получение кругового поля.

Вопросы к практическому занятию

1. Почему невозможен самостоятельный запуск однофазного асинхронного двигателя?

2. Что произойдет, если работающий трехфазный АД перейдет в однофазный режим (сгорит предохранитель в одной из фаз)?
3. Какое назначение имеет фазосдвигающий элемент в схемах включения однофазных АД?
4. Какое скольжение имеет обратная волна по отношению к ротору?

16 Пусковые свойства асинхронного двигателя

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

По типу ротора различают способы пуска двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором.

Пуск двигателей с фазным ротором производится с помощью реостата в цепи ротора. Добавочное сопротивление r_∂ включается в цепь ротора с одной стороны для уменьшения пускового тока ротора, равного

$$I'_{2n} = \frac{E'_2}{(r'_2 + r_\partial) + jx'_{2\sigma}}, \quad (16.1)$$

а с другой – для увеличения пускового момента M_n . Причем r_∂ выбирается так, чтобы $M_n = M_m$, а $s_{kp}=1$, следовательно

$$s_{kp} \approx \frac{c_1(r'_2 + r_\partial)}{x_{\sigma 1} + c_1 x'_{2\sigma}}, \quad (16.2)$$

откуда

$$r'_\partial = x_k - r'_2 \cdot C_1 / C_1; \\ r_\partial = \frac{r'_\partial}{k^2}. \quad (16.3)$$

Начальный пусковой ток двигателя с фазным ротором

$$I_n \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + x_k^2}}. \quad (16.4)$$

Начальный пусковой момент двигателя с фазным ротором

$$M_n = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2'}{\omega_1 [(r_1 + r_2')^2 + x_\kappa^2]} \approx \frac{m_1 \cdot I_n^2 \cdot r_2'}{\omega_1}. \quad (16.5)$$

Начальный пусковой момент максимальный, если сопротивление фазы обмотки ротора

$$r_{2m}' = \sqrt{r_1^2 + x_\kappa^2} \approx x_\kappa. \quad (16.6)$$

Для расчета активного сопротивления добавочного резистора $r_{доб}$, необходимого для получения заданного повышенного скольжения s при заданной (номинальной) нагрузке:

$$r_{доб} = r_2 (s/s_n - 1). \quad (16.7)$$

Способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: прямой, реакторный, автотрансформаторный, переключением «звезда–треугольник».

Прямой пуск – $I_c = I_n$; $M_{n.пр.} = M_n$.

Пуск через реактор с индуктивным сопротивлением x_p :

$$I_c = I_n / \alpha; M_{n.p.} = M_n / \alpha^2, \quad (16.8)$$

где

$$\alpha = \sqrt{[r_\kappa^2 + (x_\kappa + x_p)^2] / (r_\kappa^2 + x_\kappa^2)}. \quad (16.9)$$

Пуск через автотрансформатор с коэффициентом трансформации k

$$I_c = I_n / k^2; M_{n.am.} = M_n / k^2. \quad (16.10)$$

Пример 1. Для асинхронного двигателя с фазным ротором, номинальная мощность $P_n = 15$ кВт, номинальное скольжение $s_n = 5\%$, перегрузочная способность $\lambda = M_{\max} / M_n = 3,0$; число полюсов $2p = 8$, сопротивление обмотки ротора $r_2 = 0,37$ Ом. Рассчитать сопротивления резисторов трехступенчатого пускового реостата ПР (рис. 26.1).

Решение:

Номинальная частота вращения

$$n_n = n_1 (1 - s_n) = 750 (1 - 0,05) = 712 \text{ об/мин.}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_n = 9,55 P_n / \eta_n = 9,55 \cdot 15000 / 712 = 201 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Принимаем значение момента переключений, равным номинальному

$$M_2 = 1,0 M_n = 1,0 \cdot 201 = 204 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Отношение начального пускового момента к моменту переключений принимаем

$$\lambda = M_1 / M_2 = 2,1.$$

Начальный пусковой момент

$$M_1 = M_2 \cdot \lambda = 201 \cdot 2,1 = 422 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

т.е. $M_1/M_2 = 422/(3 \cdot 201) = 0,7$; это позволяет применить аналитический метод расчета сопротивлений пускового реостата.

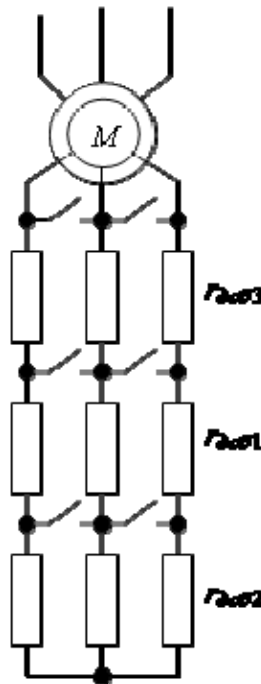


Рисунок 16.1 – Трехступенчатый пусковой реостат

Сопротивление резистора третьей ступени ПР

$$r_{доб3} = r_2 (\lambda - 1) = 0,37 / (2,1 - 1) = 0,41 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора второй ступени ПР

$$r_{доб2} = r_{доб3} \cdot \lambda = 0,41 \cdot 2,1 = 0,86 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора первой ступени

$$r_{\partial\partial\partial 1} = r_{\partial\partial\partial 2} \cdot \lambda = 0,86 \cdot 2,1 = 1,8 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на первой ступени

$$R_{ПР1} = r_{\partial\partial\partial 1} + r_{\partial\partial\partial 2} + r_{\partial\partial\partial 3} = 1,8 + 0,86 + 0,41 = 3,07 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на второй ступени

$$R_{ПР2} = r_{\partial\partial\partial 2} + r_{\partial\partial\partial 3} = 0,86 + 0,41 = 1,27 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на третьей ступени

$$R_{ПР3} = r_{\partial\partial\partial 3} = 0,41 \text{ Ом.}$$

Задачи

1. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором серии 4А имеют следующие данные каталога, приведенные в таблице 10.1: номинальная мощность P_n ; номинальное скольжение s_n ; КПД η_n ; коэффициент мощности $\cos \varphi_n$; ток ротора I_{2n} ; ЭДС ротора E_2 ; перегрузочная способность $\lambda_m = M_{\max} / M_n$.

Определить: номинальный M_n и максимальный M_{\max} моменты; критическое скольжение $s_{кр}$ в режиме естественной механической характеристики; сопротивление пускового реостата $R_{ПР}$, необходимого для получения кратности пускового момента $M_{П}/M_n = 1,5$, и сопротивление $r_{\partial\partial\partial}$, требуемое для получения частоты вращения $n_2 = 0,5 n_1$ при номинальном нагрузочном моменте.

Таблица 16.1 – Данные для задачи 1

Тип двигателя	Величины							
	P_n , кВт	$2p$	s_n , %	η_n , %	$\cos \varphi_n$	I_{2n} , А	E_2 , В	M_{\max}/M_n
4АНК225М8	30	8	5	86,5	0,8	165	120	1,8
4АНК250SM8	37	8	5,5	57,5	0,8	190	115	2,2
4АНК250И8	45	8	4	89	0,82	190	140	2,2
4АНК250М8	55	8	3,5	89,5	0,83	185	190	2,2
4АНК280S8	75	8	4	90,5	0,84	257	190	1,9
4АНК280М8	90	8	4	90,5	0,84	267	214	1,9
4АНК315S8	110	8	3,5	91,5	0,84	311	225	1,9
4АНК315М8	132	8	3,5	92	0,84	364	247	1,9
4АНК355S8	160	8	2,7	92,5	0,86	353	285	1,7
4АНК355М8	200	8	2,7	92,5	0,86	359	350	1,7

2. Определить величину начального пускового тока при прямом включении в сеть и величину начального пускового момента трехфазного асинхронного двигателя по следующим данным: номинальная мощность $P_n = 7,5$ кВт, номинальное фазное напряжение $U_{1n} = 220$ В, номинальная частота вращения $n_n = 720$ об/мин, $\cos \varphi_n = 0,75$, КПД $\eta = 86$ %, кратность начального пускового момента $M_n/M_n = 1,4$, кратность начального пускового тока $I_n/I_n = 6$.

3. С помощью реактора ток в сети при пуске трехфазного асинхронного двигателя ограничен до значения $I_c = 2I_n$. Возможен ли пуск двигателя при моменте нагрузки на валу $M_B = 0,15$ Н·м, если кратность начального пускового момента двигателя $k_n = 1,2$, а кратность начального пускового тока $k_I = 5$?

4. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя $P_n = 2000$ кВт, номинальная частота вращения $n_n = 1490$ об/мин, кратность начального пускового момента $k_n = 1,2$. Напряжение питающей сети $U_{1c} = 6$ кВ. Обмотка статора соединена в звезду. Определить начальный пусковой момент двигателя при автотрансформаторном пуске со снижением напряжения на зажимах машины до $U_1 = 4$ кВ.

5. Начальный пусковой ток трехфазного асинхронного двигателя $I_n = 130$ А при коэффициенте мощности $\cos \varphi_n = 0,65$, начальный пусковой момент $M_n = 450$ Н·м. Напряжение сети $U_c = 380$ В. Обмотка статора двигателя соединена в звезду. Определить величину активного сопротивления, которое необходимо включить в цепь статора для снижения пускового тока в 2,5 раза. Чему равен при этом начальный пусковой момент двигателя? Какое индуктивное сопротивление обеспечит аналогичные условия пуска?

Вопросы к практическому занятию

1. Какие ограничения имеет прямой пуск в ход асинхронного двигателя?
2. Для чего нужен пусковой реостат в АД с фазным ротором?

3. Чем автотрансформаторный пуск АД предпочтительнее реакторного пуска?
4. Почему нежелателен реостатный пуск АД с короткозамкнутым ротором?

17 Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Способы регулирования угловой скорости ротора

$$\omega = \omega_1(1 - s) = \frac{2\pi f}{p}(1 - s). \quad (17.1)$$

Регулирование частоты вращения за счет изменения угловой скорости вращения поля:

1) изменением частоты тока; при этом для поддержания $\Phi = \text{const}$ при изменении частоты необходимо выполнение условий:

$$U_1 / f_1 = \text{const} \text{ при } M_B = \text{const};$$

$$U_1 / \sqrt{f_1} = \text{const} \text{ при } M_B = \text{const}/\omega;$$

$$U_1 / f^2 = \text{const} \text{ при } M_B = k\omega^2;$$

2) изменением числа пар полюсов.

Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения:

1) изменением напряжения;

2) изменением активного сопротивления цепи обмотки фазного ротора; при этом при введении в цепь обмотки ротора дополнительного сопротивления r_d критическое скольжение:

$$s_{кр} = \pm(r'_2 + r_d) / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}. \quad (17.2)$$

С введенным сопротивлением r_d скольжение на механической характеристике двигателя

$$s_1 = s(r_2 + r_\delta)/r_2, \quad (17.3)$$

где s – скольжение на естественной механической характеристике ($r_\delta = 0$);

3) введением дополнительной ЭДС в цепь обмотки фазного ротора.

Скольжение после введения дополнительной ЭДС

$$s_1 = s - k'_\delta, \quad (17.4)$$

где $k'_\delta = \dot{E}_\delta / \dot{E}_2 > 0$ если \dot{E}_δ в фазе с \dot{E}_2 , и $k'_\delta < 0$, если \dot{E}_δ в противофазе с \dot{E}_2 .

Задачи

1. Напряжение на зажимах трехфазного асинхронного двигателя, частота вращения которого регулируется изменением частоты тока, увеличилось в 1,41 раза. Регулирование частоты вращения осуществляется при условии $P_2 = const$. Определить соответствующее увеличение частоты тока.

2. Определить величину дополнительного сопротивления R_δ при введении которого в цепь обмотки фазного ротора шестиполюсного асинхронного двигателя частота вращения ротора при той же нагрузке снизится от значения $n = 950$ об/мин до $n = 600$ об/мин. Сопротивление обмотки ротора $R_2 = 0,009$ Ом, частота питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

3. Номинальная частота вращения шестиполюсного асинхронного двигателя при частоте 50 Гц $n_n = 950$ об/мин. Активное сопротивление обмотки фазного ротора $R_2 = 0,1$ Ом. Как изменится частота вращения двигателя, если при неизменной нагрузке ввести добавочное сопротивление $R_\delta = 0,5$ Ом?

4. Введением дополнительного сопротивления в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором частота вращения двигателя в номинальном режиме снижена на 25 %. Определить величину дополнительного сопротивления R_δ и оценить изменение КПД при таком режиме, если номинальная мощность шестиполюсного двигателя $P_H = 160$ кВт, номинальная частота

вращения $n_n = 970$ об/мин, активное сопротивление обмотки ротора $R_2 = 0,01$ Ом, номинальный КПД $\eta_n = 93\%$. Частота питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

5. При номинальной частоте вращения $n_n = 950$ об/мин шестиполусного асинхронного двигателя с фазным ротором ЭДС в обмотке ротора $E_{2s} = 9,2$ В. В этом режиме в цепь обмотки ротора вводится дополнительная ЭДС $E_\partial = 5$ В, находящаяся в фазе с E_{2s} , и той же частоты. Как изменится при этом частота вращения двигателя? Определить частоту вращения двигателя при введении E_∂ , находящейся в противофазе с E_{2s} .

18 Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Обмотка якоря является важнейшим элементом машины и должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальные мощности;
- 2) обмотка должна иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочность, обеспечивающую достаточно продолжительный срок службы машин (до 15-20 лет);
- 3) конструкция обмотки должна обеспечить удовлетворительные условия токосъема с коллектора, без вредного искрения;
- 4) расход материала при заданных эксплуатационных показателях (к.п.д. и др.) должен быть минимальным;
- 5) технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

По схеме соединения проводников обмотки якоря машин постоянного тока разделяются на простые петлевые, простые волновые, сложные петлевые, сложные волновые и лягушачьи. Свое название петлевые и волновые

обмотки получили по форме, которую они образуют при последовательном соединении секций; первые имеют форму петель, вторые – форму волн.

По числу слоев в пазу обмотки машин постоянного тока выполняются, как правило, двухслойными, лягушачьи – четырехслойными.

При составлении схемы обмотки необходимо определить ее шаги как по пазам, так и по коллектору.

Число элементарных пазов

$$Z_{\text{э}} = Z \cdot u_n, \quad (18.1)$$

где u_n – число секционных сторон в одном слое паза;

Z – действительное число пазов.

Полное число элементарных пазов

$$Z_{\text{э}} = S = K. \quad (18.2)$$

Для построения схемы обмотки необходимо определить следующие шаги:

y_1 – первый частичный шаг, равный числу элементарных пазов по ширине секции;

y_2 – второй частичный шаг, равный числу элементарных пазов между конечной стороной при обходе секции и начальной стороной последующей секции;

y – результирующий шаг, равный сдвигу секций, следующих одна за другой по схеме обмотки; этот шаг также измеряется числом элементарных пазов;

y_k – шаг по коллектору, равный числу коллекторных делений между началом и концом секции.

Шаг y_1 обмоток постоянного тока принимается близким полюсному делению $\tau = Z_{\text{э}}/2p$, то есть

$$y = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon, \quad (18.3)$$

где ε – укорочение или удлинение шага обмотки.

Величина ε является дробной частью отношения $Z_3/2p$, которая при знаке минус уменьшает его, а при знаке плюс дополняет до ближайшего целого числа

Шаг по пазам равен:

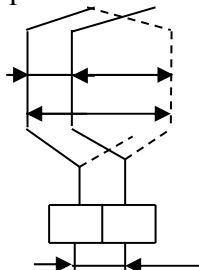
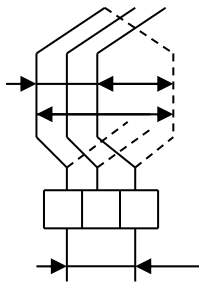
$$y_z = y_1 / u_n. \quad (18.4)$$

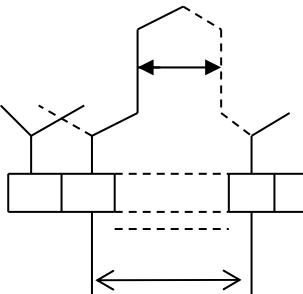
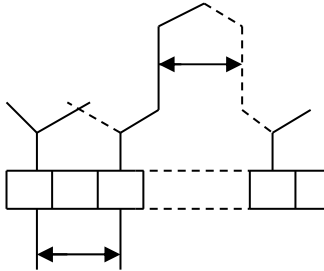
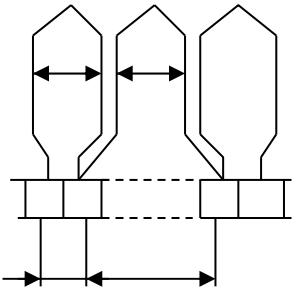
Если y_z – целое число, то обмотка является равносекционной, если y_z – дробное – ступенчатой.

В процессе расчета обмотки необходимо определить: число параллельных ветвей обмотки $2a$ и шаги y_1, y, y_k , а также максимально возможное число уравнильных соединений.

Расчетные выражения в зависимости от схемы обмотки следует принять по таблице 18.1.

Таблица 18.1 – Основные данные обмоток якоря

Тип обмотки	Число параллельных ветвей	Шаги обмотки		Максимальное число уравнильных соединений
		y	y_1	
Простая петлевая 	$2a = 2p$	$y = y_k = \pm 1$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	K / p
Сложная петлевая двух-ходовая 	$2a = 4p$	$y = y_k = \pm 2$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	K / p

<p>Простая волновая</p> 	$2a = 2$	$y = y_{\kappa} = \frac{K \pm 1}{p}$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	
<p>Сложная волновая многоходовая</p> 	$2a = 2m$	$y = y_{\kappa} = \frac{K \pm m}{p}$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	m
<p>Лягушачья</p> 	$2a = 2p \cdot 2m$	$y_{\kappa n} + y_{\kappa \phi} = \frac{K}{p}$	$y_{1n} + y_{1\phi} = \frac{K}{p}$ $y_{2n} \pm y_{2\phi}$	—

Порядок выполнения таблицы соединения секционных сторон обмотки:

Таблица представляет собой условное упрощенное изображение последовательно соединенных секций обмотки (рисунок 28.1), причем сплошной линией показывают секционную сторону, уложенную в верхний слой элементарного паза, штриховой – в нижний слой паза.

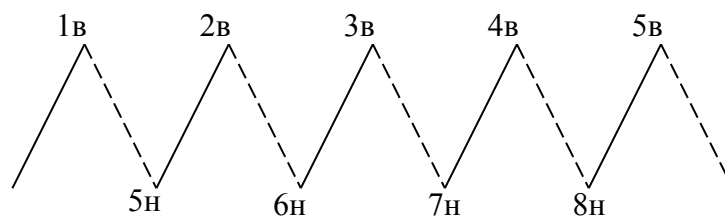


Рисунок 18.1 – Таблица соединения секционных сторон обмотки

Номера верхних сторон секций проставляются в таблице сверху, нижних – снизу, причем нумерация соответствует шагам обмотки.

Например, для обмотки, таблица которой показана на рисунке 28.2, шаги составляют: $y_1 = 4$, $y = 1$.

Первая секционная сторона для 1-й секции укладывается в верхний слой первого паза, а вторая сторона – соответственно в нижний слой $1 + y_1 = 1 + 4 = 5$ н пятого паза.

С первой секцией последовательно соединяется вторая. Верхняя секционная сторона 2-й секции укладывается в $1в + y = 1 + 1 = 2в$, т.е. в верхний слой второго паза и т.д.

Если нумерация секционных сторон в таблице выполнена верно, то для двухслойной обмотки номер каждого паза должен повториться дважды – для верхнего и нижнего слоя паза.

Развернутая схема обмотки якоря строится в соответствии с таблицей соединения секционных сторон. При этом необходимо соблюдение следующих правил:

- пазовая часть обмотки якоря изображается в виде двух параллельных линий (на каждый элементарный паз) – сплошной и штриховой, соответствующих верхнему и нижнему слою (стороне) паза. Номер паза совпадает с номером секции, уложенной в верхний слой этого паза.

- коллектор изображается в виде коллекторных пластин, причем номер коллекторной пластины соответствует номеру секции, начало которой соединяется с данной пластиной.

– для того, чтобы лобовые части секций были симметричными, нумерация коллекторных пластин должна быть сдвинута по направлению намотки (вправо) относительно нумерации пазов на половину полюсного деления

$$\tau = \frac{Z_p}{2p}. \quad (18.5)$$

На коллектор накладываются щетки, полярность которых чередуется, а количество – равно числу полюсов $2p$.

Расстояние между соседними щетками должно быть равно τ , щетки одной полярности соединяются между собой.

На развернутой схеме необходимо показать штриховой линией $1 \div 2$ уравнивающих соединения, соединяющих равнопотенциальные точки лобовых частей с шагом $y_y = Z/p$.

Задачи

Каждый студент получает индивидуальное задание по расчету обмотки и, выполняет все расчеты и построения.

Вопросы к практическому занятию

1. Какие виды якорных обмоток машины постоянного тока вы знаете?
2. Какие шаги необходимо определить при построении якорной обмотки?
3. Какая обмотка является равносекционной, какая ступенчатой?

19 Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43

Теоретическая часть

ЭДС параллельной ветви обмотки якоря

$$E_a = 4fw\Phi = C_0 \cdot \omega \cdot \Phi, \quad (19.1)$$

где f – частота ЭДС обмотки якоря;

w – число витков в параллельной ветви обмотки якоря

$$w = \frac{N}{4a}; \quad (29.2)$$

C_0 – постоянный коэффициент

$$C_0 = \frac{pN}{2\pi a}; \quad (19.3)$$

Φ – магнитный поток на один полюс

$$\Phi = B_\delta \cdot l_\delta \cdot b_\delta, \quad (19.4)$$

где B_δ – магнитная индукция в зазоре;

l_δ – расчетная длина якоря;

b_δ – расчетная полюсная дуга.

Магнитный поток при холостом ходе

$$\Phi_\epsilon = \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot B_\delta, \quad (19.5)$$

где α_δ – коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_\delta = b_\delta / \tau, \quad (19.6)$$

Результирующая МДС при холостом ходе

$$F_B = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_s = F_{\delta z} + F_m + F_s, \quad (19.7)$$

где $F_{\delta z}$ – магнитное напряжение зазора, зубцов и ярма якоря;

F_m – магнитное напряжение сердечника полюса;

F_s – магнитное напряжение станины.

Уравнение напряжения якоря при нагрузке:

– для генератора постоянного тока

$$U_r = E - I_a R_a; \quad (19.8)$$

– для двигателя постоянного тока

$$U_d = E + I_a R_a. \quad (19.9)$$

Пример 1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения номинальной мощностью $P_n = 100$ кВт включен в сеть с напряжением

$U_c = 440$ В; КПД двигателя $\eta = 89$ %; обмотка якоря простая волновая ($2a = 2$); с числом полюсов $2p = 4$, число активных проводников $N = 280$; ток в обмотке возбуждения $I_\epsilon = 0,02 I_{ан}$, величина одностороннего воздушного зазора $\delta = 2$ мм; магнитная индукция в зазоре $B_\delta = 0,82$ Тл; магнитная индукция в зубцах якоря $B_z = 2,2$ Тл; коэффициент воздушного зазора $k_\delta = 1,3$; коэффициент магнитного насыщения магнитопровода двигателя $k_\mu = 1,35$.

Определить МДС реакции якоря по поперечной оси F_{qd} и число витков в полюсной катушке возбуждения w_ϵ , необходимое для компенсации реакции якоря по поперечной оси при номинальной нагрузке двигателя.

Решение:

Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме

$$I_n = \frac{P_n}{U_c \eta} = \frac{100 \cdot 10^3}{440 \cdot 0,89} = 255 \text{ А.}$$

Ток в обмотке возбуждения

$$I_\epsilon = 0,02 \cdot I_n = 0,02 \cdot 255 = 5 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

$$I_{ан} = 255 - 5 = 250 \text{ А.}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора

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

МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

$$F_{\epsilon 0} = 2 F_\delta \cdot k_\mu = 2 \cdot 1700 \cdot 1,35 = 4590 \text{ А.}$$

МДС якоря на пару полюсов в режиме номинальной нагрузки

$$F_{ан} = \frac{N \cdot I_{ан}}{4ap} = \frac{280 \cdot 250}{4 \cdot 1 \cdot 2} = 8750 \text{ А.}$$

Коэффициент реакции якоря по поперечной оси при $B_z = 2,2$ Тл и $F_a/F_{\epsilon 0} = 8750/4590 = 1,9$ коэффициент $k_{pa} = 0,22$.

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

$$F_{qd} = k_{pa} \cdot F_{ан} = 0,22 \cdot 8750 = 1925 \text{ А.}$$

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

$$F_{\text{вн}} = F_{\text{в0}} + F_{\text{qd}} = 4590 + 1925 = 6515 \text{ А.}$$

Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения

$$w = \frac{F_{\text{вн}}}{2I_{\text{в}}} = \frac{6515}{2 \cdot 5} = 651 \text{ виток}$$

Задачи

1. Определить ЭДС параллельной ветви простой волновой обмотки якоря четырехполюсной машины постоянного тока, если число эффективных проводников якоря $N = 920$, частота вращения $n = 1500$ об/мин, магнитный поток на полюс $\Phi = 0,425 \cdot 10^{-2}$ Вб.

2. При частоте вращения якоря $n = 1500$ об/мин ЭДС машины постоянного тока равна 115 В. Найти величину и частоту ЭДС обмотки якоря при частотах вращения: 1000, 750, 600 об/мин. Число пар полюсов машины $2p = 2$.

3. ЭДС машины постоянного тока $E = 225$ В. Определить напряжение для режима генератора и двигателя при токе якоря $I_a = 500$ А, если сопротивление цепи якоря $R_a = 0,01$ Ом.

4. Магнитный поток на полюс машины постоянного тока при номинальном возбуждении $\Phi_{\text{н}} = 1,29 \cdot 10^{-2}$ Вб, постоянный коэффициент $C_0 = 126$. Определить напряжение машины в генераторном режиме при номинальном токе 100 А, если частота вращения якоря $n = 1500$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_a = 0,25$ Ом.

5. Генератор постоянного тока нагружен на сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 0,44$ Ом, напряжение генератора 220 В, сопротивление цепи якоря $R_a = 0,01$ Ом. Определить частоту вращения якоря генератора, если магнитный поток $\Phi = 2,96 \cdot 10^{-2}$ Вб, число эффективных проводников $N = 304$, обмотка якоря простая петлевая.

Вопросы к практическому занятию

1. Поясните физическую сущность реакции якоря МПТ. От чего зависит характер реакции якоря?
2. Каким образом учитывается размагничивающее действие поперечной реакции якоря в инженерных расчетах?
3. Как рассчитать напряжение на зажимах генератора постоянного тока, и двигателя постоянного тока?
4. Что определяет магнитный поток на полюс в машине постоянного тока?

20 Режимы работы машины постоянного тока

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Машина постоянного тока является обратимой, т.е. может работать в генераторном и двигательном режимах.

При работе машины в генераторном режиме механическая мощность, подводимая к валу машины:

$$P_1 = M_1 \cdot \omega, \quad (20.1)$$

где M_1 – вращающий момент первичного двигателя.

Механическая мощность, преобразуемая электромагнитным путем в электромагнитную мощность:

$$P_{\text{мех}} = P_1 - p_T - p_M - p_D = P_{\text{ЭМ}}, \quad (20.2)$$

где p_T – механические потери;

p_M – магнитные потери в зубцах и ярме якоря;

p_D – добавочные потери.

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{ЭМ}} = c_0 \cdot I_a \cdot \Phi \cdot \omega = E \cdot I_a. \quad (20.3)$$

Электрическая мощность, снимаемая со щеток якоря:

$$P_{\text{я}} = P_{\text{эм}} - p_{\text{э}} = UI_{\text{я}}, \quad (20.4)$$

где $p_{\text{э}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$ – электрические потери в цепи якоря.

Полезная электрическая мощность:

$$P = P_{\text{я}} - P_{\text{в}} = UI, \quad (20.5)$$

где $P_{\text{в}} = R_{\text{в}} \cdot I_{\text{в}}^2$ – мощность, расходуемая на питание обмотки независимого (параллельного) возбуждения.

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P / P_1 = 1 - \frac{\Sigma p}{(P + \Sigma p)}, \quad (20.6)$$

где $\Sigma P = p_{\text{т}} + p_{\text{д}} + p_{\text{э}} + p_{\text{в}}$ – сумма потерь.

В режиме двигателя $U > E$, ток $I_{\text{я}} < 0$, поэтому мощность P_1 , $P_{\text{мех}}$, $P_{\text{эм}}$, P и моменты M_1 и M_2 получаются отрицательными и полезная механическая мощность P_1 меньше потребляемой из сети электрической мощности P на потери в машине ΣP .

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_1 / P = 1 - \frac{\Sigma P}{(P_1 + \Sigma P)}. \quad (20.7)$$

Пример 1. Номинальная мощность двигателя постоянного тока $P_{\text{н}} = 25$ кВт, напряжение питания цепи якоря $U_{\text{н}} = 440$ В, напряжение питания цепи возбуждения $U_{\text{в}} = 220$ В, частота вращения якоря в номинальном режиме $n_{\text{н}} = 2200$ об/мин, сопротивление цепи якоря $\Sigma r = 0,3$ Ом, цепи возбуждения $r_{\text{в}} = 60$ Ом, падение напряжения в щеточном контакте при номинальном токе $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta n_{\text{н}} = 8,0\%$, ток якоря в режиме холостого хода $I_0 = 6$ А.

Решение:

Частота вращения в режиме холостого хода

$$n_0 = n_{\text{н}} [1 + (\Delta n_{\text{н}} / 100)] = 2200(1 + 8/100) = 2376 \text{ об/мин.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем ввиду его незначительной величины в режиме холостого хода):

$$E_{a0} = U_H - I_0 \Sigma r = 440 - 6 \cdot 0,3 = 438,2 \text{ В.}$$

Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55 \cdot 438,2 \cdot 6 / 2376 = 10,6 \text{ Н·м.}$$

Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{2H} = 9,55 P_H / n_H = 9,55 \cdot 25 \cdot 10^3 / 2200 = 108,5 \text{ Н·м.}$$

Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_H = M_0 + M_{2H} = 10,6 + 108,5 = 119 \text{ Н·м}$$

Электромагнитная мощность двигателя в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{\Sigma M.H} = 0,105 M_H \cdot n_H = 0,105 \cdot 119 \cdot 2200 = 17490 \text{ Вт.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода:

$$E_{a0} = c_e \Phi n_0, \text{ откуда } c_e \Phi = E_{a0} / n_0 = 438,2 / 2376 = 0,185,$$

но так как $c_m / c_e = 9,55$, то

$$c_m \Phi = 9,55 c_e \Phi = 9,55 \cdot 0,185 = 1,77.$$

Из выражения электромагнитного момента в режиме номинальной нагрузки

$$M_H = c_m \cdot \Phi \cdot I_{aH}$$

определим значение тока якоря в режиме номинальной нагрузки:

$$I_{aH} = M_H / (c_m \Phi) = 119 / 1,77 = 67 \text{ А.}$$

Сумма магнитных и механических потерь двигателя пропорциональна моменту холостого хода:

$$p_{\Sigma} + p_{\text{мех}} = 0,105 M_0 \cdot n_0 = 0,105 \cdot 10,6 \cdot 2376 = 2644 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в цепи обмотки якоря:

$$p_{a\Omega} = I_{aH}^2 \cdot \Sigma r = 67^2 \cdot 0,3 = 1347 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в щеточном контакте якоря:

$$P_{\text{щ.э}} = I_{aH} \cdot \Delta U_{\text{щ}} = 67 \cdot 2 = 134 \text{ Вт.}$$

Мощность, подводимая к цепи якоря, в номинальном режиме:

$$P_{1aH} = U_H \cdot I_{aH} = 440 \cdot 67 = 29480 \text{ Вт.}$$

Ток в обмотке возбуждения:

$$I_B = U_B / r_B = 220 / 60 = 3,7 \text{ А.}$$

Мощность в цепи возбуждения

$$P_B = U_B \cdot I_B = 220 \cdot 3,7 = 814 \text{ Вт.}$$

Мощность, потребляемая двигателем в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{1H} = P_{1aH} + P_B = 29480 + 814 = 30295 \text{ Вт.}$$

КПД двигателя в номинальном режиме:

$$\eta_H = (P_H / P_{1H}) \cdot 100 = (25 \cdot 10^3 / 30,3 \cdot 10^3) \cdot 100 = 82,5 \text{ \%}.$$

Задачи

1. Генератор постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением $U_H = 230 \text{ В}$ и номинальной частотой вращения $n_H = 1500 \text{ об/мин}$ имеет простую петлевую обмотку якоря, состоящую из $N = 200$ проводников. Число полюсов генератора $2p = 4$, сопротивление обмоток якоря при рабочей температуре $\Sigma r_a = 0,175 \text{ Ом}$, основной магнитный поток $\Phi = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$. Для номинального режима работы генератора определить: ЭДС якоря E_{aH} , ток нагрузки I_{aH} , электромагнитную мощность $P_{эм}$ и электромагнитный момент $M_{эм}$. Размагничивающим действием реакции якоря пренебречь.

2. В шестиполусной машине постоянного тока поток возбуждения $\Phi_B = 0,01 \text{ Вб}$, якорь вращается с частотой $n = 60 \text{ об/мин}$. Определить среднее значение ЭДС, индуцируемой в проводнике обмотки якоря.

3. ЭДС генератора независимого возбуждения $E_a = 240 \text{ В}$, сопротивление якорной обмотки $r = 0,1 \text{ Ом}$. Определить напряжение на щетках генератора при токе нагрузки $I_H = 100 \text{ А}$.

4. Мощность, потребляемая генератором постоянного тока от приводного двигателя, $P_1 = 50$ кВт, суммарные потери мощности в генераторе $\Sigma \Delta P = 5$ кВт. Определить коэффициент полезного действия генератора.

5. При частоте вращения $n = 975$ об/мин двигатель постоянного тока отдает полезную мощность $P_2 = 5$ кВт. Определить полезный момент двигателя.

6. Для генератора постоянного тока независимого возбуждения известны технические данные: номинальное напряжение $U_H = 230$ В, потребляемая мощность $P_1 = 45$ кВт, ток возбуждения $I_B = 20$ А, сопротивление обмотки возбуждения и якоря соответственно $r_B = 100$ Ом и $r_a = 0,12$ Ом, коэффициент полезного действия $\eta = 0,865$. Определить ЭДС якорной обмотки E_a , электромагнитную мощность $P_{эм}$, потери в обмотке возбуждения $P_{эл.В}$, суммарные потери мощности ΣP .

7. Генератор параллельного возбуждения работает на сеть напряжением $U_H = 120$ В. Сопротивления обмоток якоря и возбуждения в рабочем режиме $r_a = 0,08$ Ом, $r_B = 18$ Ом, сопротивление нагрузки $r_H = 1,2$ Ом. Определить: ток нагрузки генератора, ток в цепи возбуждения, ток якоря, ЭДС генератора, полезную мощность

Вопросы к практическому занятию

1. Какой вид имеет энергетическая диаграмма ГПТ и ДПТ?
2. Какие потери в машинах постоянного тока являются механическими?
3. Где происходят магнитные потери мощности?
4. Где происходят электрические потери в машинах постоянного тока?

21 Коммутация и реакция якоря машины постоянного тока

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Одной из основных проблем теории МПТ является коммутация, которой называется процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и изменение направления тока в них на обратное (с $+i_a$ на $-i_a$). Во время коммутации секции замыкаются накоротко щетками, через которые ток передается во внешнюю цепь. Скользящий контакт – это то место, где происходит разрыв коммутационного контура, сопровождающийся выделением электромагнитной энергии.

Период коммутации:

$$T_{\kappa} = [2\pi / K\omega] \frac{b_{щ}}{b_{\kappa}}, \quad (21.1)$$

где $b_{щ}$ – ширина щетки,

b_{κ} – ширина коллекторного деления.

Важным процессом, влияющим на рабочие свойства машины постоянного тока, является реакция якоря. В результате влияния этого процесса происходит искажение магнитного поля в воздушном зазоре и зубцовом слое якоря машины и ее размагничивание. Для ослабления нежелательного воздействия реакции якоря в машинах постоянного тока применяют добавочные полюсы, а в машинах значительной мощности – еще и компенсационную обмотку.

Размагничивающее влияние реакции якоря по поперечной оси приходится учитывать. Обычно это делают посредством коэффициента реакции якоря, который используют при расчете МДС, компенсирующей влияние реакции якоря по поперечной оси:

$$F_{qd} = k_{p.я.} F_a, \quad (21.2)$$

где F_a – МДС обмотки якоря на пару полюсов, А,

$$F_a = NI_a / (4ap). \quad (21.3)$$

Для определения коэффициента реакции якоря пользуются графиком $k_{p.я.} = f(F_a / F_{BO})$ (рисунок 32.1), где нижняя граница графика соответствует магнитной индукции в зубцах сердечника якоря $B_z = 1,7$ Тл, а верхняя – $B_z = 2,3$ Тл.

Величина F_{BO} представляет собой МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода, А,

$$F_{BO} = 2F_{\delta} k_{\mu}, \quad (21.4)$$

где F_{δ} – магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_{\delta} = 0,8 B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^3 F_{\delta}; \quad (21.5)$$

$k_{\mu} = 1,2-1,7$ – коэффициент магнитного насыщения магнитной цепи машины;

B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре машины, Тл;

k_{δ} – коэффициент воздушного зазора, учитывает увеличение воздушного зазора, вызванное зубчатой поверхностью якоря.

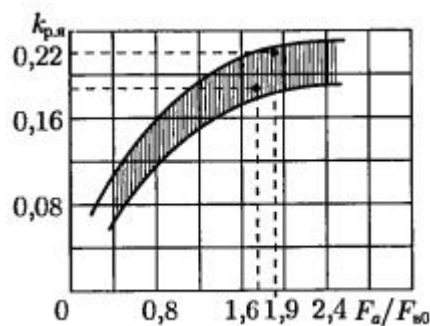


Рисунок 21.1 – $k_{p.я.} = f(F_a / F_{BO})$

Задачи

1. Генератор постоянного тока с согласно включенной последовательной обмоткой возбуждения имеет ток якоря $I_a = 40$ А, число витков на полюс параллельной обмотки возбуждения $w_B = 910$ и последовательной обмотки $w_{II} = 6$, ток в параллельной обмотке возбуждения $I_B = 1,7$ А, продольная МДС, компенсирующая размагничивающее действие поперечной МДС якоря, $F_{qd} = 220$ А.

Определить результирующую продольную МДС F_0 . Найти значение МДС F_0 при встречном включении последовательной обмотки.

2. Найти период коммутации машины постоянного тока, если число коллекторных пластин $K = 93$, диаметр коллектора $D_k = 12,5$ см, ширина щетки $b_{щ} = 10$ мм, частота вращения $n = 1500$ об/мин.

3. Машина постоянного тока имеет $Z = 31$ пазов, число секций в пазу $u_c = 3$, коллекторное деление $b_k = 0,5$ см. Щетка перекрывает две с половиной коллекторной пластины. Определить период коммутации при частоте вращения 1450 об/мин.

Вопросы к практическому занятию

1. Поясните физическую сущность реакции якоря МПТ. От чего зависит характер реакции якоря?
2. Каким образом учитывается размагничивающее действие поперечной реакции якоря в инженерных расчетах?
3. Для чего в машине постоянного тока нужна компенсационная обмотка?
4. В чем сущность коммутации машины постоянного тока и каким образом можно учесть ее качество?
5. Каким образом в МПТ выполняется настройка коммутации?

22 Характеристики генераторов постоянного тока независимого возбуждения

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Свойства генераторов анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают связь между основными величинами, характеризующими работу генераторов: U , I_b , I_a . Как правило, характеристики определяются для $n = \text{const}$. Существует пять основных характеристик холостого хода., корот-

кого замыкания, внешняя, регулировочная, нагрузочная. Для ГПТ с различными типами возбуждения характеристики имеют свои особенности, поэтому характеристики для ГПТ будем рассматривать отдельно.

В генераторе постоянного тока независимого возбуждения:

1) характеристика ХХ:

Это зависимость $U = f(I_\epsilon)$ при $I_a = 0$.

Поскольку $I_\epsilon \sim F_\epsilon$, а $U = E_a \sim \Phi_\sigma$, то характеристика х.х. точно повторяет кривую намагничивания машины.

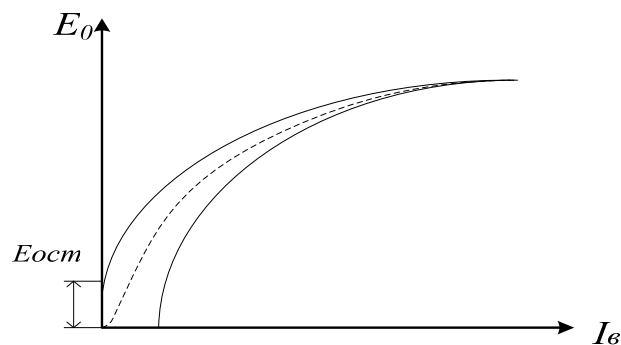


Рисунок 22.1 – Характеристика холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения

2) характеристика к.з.

Представляет собой зависимость $I_a = f(I_\epsilon)$ при закороченной якорной цепи, т.е. при $U=0$. В этом случае:

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_a} = \frac{E_a}{R_a}, \quad (22.1)$$

и т.к. r_a мало, то значение E_a должно быть понижено, т.е. машина будет нена-
сыщенна и характеристика к.з. будет иметь вид прямой.

Т.к. есть (при $I_\epsilon = 0$) $E_{ост}$, то $I_a = I_{ост}$.

Машину надо либо размагнитить, пропустив по ОВ I_ϵ другого знака, либо перенести характеристику параллельно самой себе в точку О.

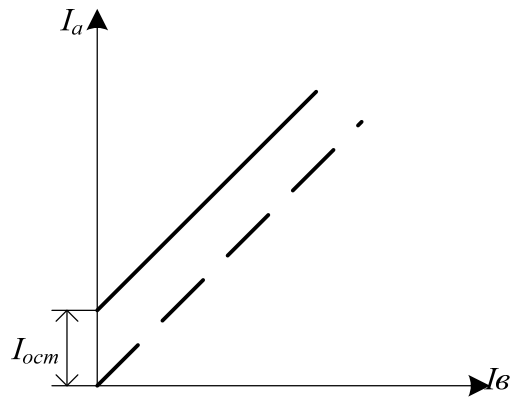


Рисунок 22.2 – Характеристика к.з. ГПТ независимого возбуждения

3) внешняя характеристика.

Это зависимость $U = f(I_a)$, при $I_ε = \text{const}$. Если щётки стоят на геометрической нейтрали, то с ростом тока якоря I_a , напряжение U – падает из-за падения напряжения в обмотке якоря $I_a R_a$ и поперечной реакции якоря.

Если снимать эту характеристику с точки U_n, I_n вниз, то можно получить номинальное изменение напряжения генератора $\Delta U_{\text{н}\%} = \frac{\Delta U}{U_n} 100\%$.

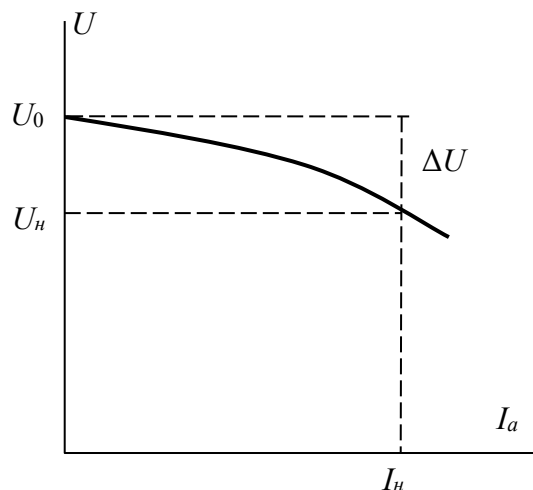


Рисунок 22.3 – Внешняя характеристика ГПТ независимого возбуждения

4) регулировочная характеристика.

Это зависимость $I_ε = f(I_a)$ при $U = \text{const}$.

Характеристика показывает, как надо изменять $I_ε$, чтобы при изменении тока якоря I_a напряжение U было постоянным.

Если щётки на нейтрали, то регулировочная характеристика носит возрастающий характер из-за $I_a R_a$ и размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

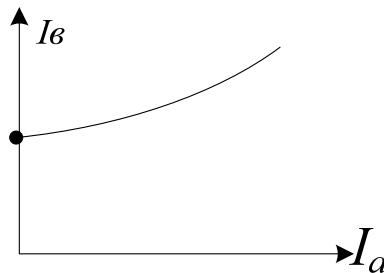


Рисунок 22.4 – Регулировочная характеристика ГПТ
независимого возбуждения

5) нагрузочная характеристика.

Это зависимость $U = f(I_\delta)$ при $I_a = \text{const}$. Характеристика х.х. – частный случай нагрузочной при токе якоря $I_a = 0$.

Нагрузочная характеристика идёт несколько ниже характеристики холостого хода из-за падения напряжения в цепи якоря $I_a R_a$ и поперечной реакции якоря.

Пример 1. Генератор постоянного тока независимого возбуждения мощностью $P_n = 20$ кВт и напряжением $U_n = 230$ В имеет сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, $\Sigma R = 0,12$ Ом; в генераторе применены электрографитированные щетки марки ЭГ ($\Delta U_{щ} = 2,5$ В). Определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

Решение

Ток в номинальном режиме:

$$I_{ан} = P_n / U_n = 20 \cdot 10^3 / 230 = 87 \text{ А.}$$

ЭДС генератора

$$E_a = U_n + I_{ан} \cdot \Sigma R + \Delta U_{щ} = 230 + 87 + 0,12 + 2,5 = 243 \text{ В.}$$

Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_n = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100 = \frac{243 - 230}{230} 100 = 5,65\%.$$

Пример 2. Генератор постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением $U_n = 230$ В и номинальной частотой вращения $n_n = 1500$ об/мин имеет простую петлевую обмотку якоря, состоящую из $N = 200$ проводников. Число полюсов генератора $2p = 4$, сопротивление обмоток якоря при рабочей температуре $\Sigma R_a = 0,175$ Ом, основной магнитный поток $\Phi = 4,8 \cdot 10^{-2}$ Вб. Для номинального режима работы генератора определить: ЭДС якоря $E_{ан}$, ток нагрузки $I_{ан}$, электромагнитную мощность $P_{эм}$ и электромагнитный момент $M_{эм}$. Размагничивающим действием реакции якоря пренебречь.

Решение:

Для простой петлевой обмотки число параллельных ветвей $2a$ равно числу полюсов $2p$: $2a = 2p = 4$.

Электродвижущая сила якоря:

$$E_{ан} = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} n_n \cdot \Phi = \frac{2 \cdot 200}{60 \cdot 2} \cdot 1500 \cdot 4,8 \cdot 10^{-2} = 240 \text{ В.}$$

Ток обмотки якоря:

$$I_{ан} = \frac{E_{ан} - U_n}{\Sigma R_a} = \frac{240 - 230}{0,175} = 57,1 \text{ А}$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{эм} = I_{ан} \cdot E_{ан} = 57,1 \cdot 240 = 13714 \text{ Вт}$$

Электромагнитный момент:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{2\pi n_n} = \frac{13714}{2\pi(1500/60)} = 87,4 \text{ Н·м.}$$

Задачи

1. Для генератора постоянного тока независимого возбуждения известны технические данные: номинальная мощность $P_n = 40$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 230$ В, сопротивление цепи якоря при рабочей температуре $R_a = 0,12$ Ом, коэффициент полезного действия $\eta = 0,86$, номинальная частота вращения $n = 1470$ об/мин. Определить: номинальный ток генератора I_n , со-

противление нагрузки R_n , ЭДС генератора E_a , суммарные потери мощности $\Sigma\Delta P$, электромагнитную мощность $P_{эм}$, электромагнитный момент $M_{эм}$.

2. Графически, с помощью характеристики холостого хода (таблица 32.1) и характеристического треугольника построить внешнюю и регулировочную характеристики генератора независимого возбуждения, если при номинальном напряжении $U_n = 230$ В, номинальный ток якоря $I_{ан} = 30$ А. Сопротивление последовательно включенных обмоток якоря $R_a = 0,65$ Ом. Падением напряжения на щетках пренебречь. Ток возбуждения $I_{\phi} = 2,4$ А, продольная МДС $F_d = 300$ А. Число витков обмотки возбуждения $w_{\phi} = 600$.

Таблица 22.1 – Характеристика холостого хода

$I_{\phi}, \text{ А}$	0	0,47	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
$E_{\phi}, \text{ В}$	13	84,5	151	200	233	256	274	289	300

3. Для генератора постоянного тока независимого возбуждения известны технические данные: номинальная мощность $P_n = 40$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 230$ В, сопротивление цепи якоря при рабочей температуре $r_a = 0,12$ Ом, коэффициент полезного действия $\eta = 0,86$, номинальная частота вращения $n = 1270$ об/мин. Определить: номинальный ток генератора I_n , сопротивление нагрузки r_n , ЭДС генератора E_a , суммарные потери мощности $\Sigma\Delta P$, электромагнитную мощность $P_{эм}$, электромагнитный момент $M_{эм}$.

Вопросы к практическому занятию

1. Почему характеристика холостого хода ГПТ имеет нелинейный характер, а характеристика короткого замыкания – прямая линия?
2. Поясните физический смысл характеристического треугольника и порядок его построения по характеристикам х.х. и к.з.
3. Поясните физический смысл внешней характеристики.
4. Поясните физический смысл регулировочной характеристики.
5. Поясните физический смысл нагрузочной характеристики.

23 Характеристики генераторов постоянного тока параллельного возбуждения

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Характеристики ГПТ с самовозбуждением.

Для самовозбуждения ГПТ необходимо выполнение следующих условий:

- 1) наличие остаточного потока полюсов;
- 2) правильное подключение ОВ (или правильное направление вращения);
- 3) сопротивление цепи возбуждения R_v должно быть меньше некоторого критического значения.

При выполнении этих условий процесс протекает следующим образом: Остаточный поток индуцирует в обмотке якоря (ОЯ) ЭДС (небольшую), под действием которой в ОЯ и обмотке возбуждения (ВО) протекают токи I_a и I_v . Ток ОВ I_v увеличивает поток полюсов, а значит и E_a , что, в свою очередь ведёт к увеличению I_v . Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора U_g не достигнет установившегося значения. Если ОВ подключена неверно, то ток I_v , возникающий под действием остаточного потока протекает в обратную сторону и ослабляет магнитный поток $\Phi_{ост}$.

Характеристики генератора параллельного возбуждения:

- 1) *характеристика холостого хода:*

Имеет такой же вид, как у независимого двигателя, но может быть снята только в одном квадранте ($U_a = E_a - i_v R_a$); $I_v R_a \approx 0$;

- 2) *характеристика короткого замыкания:*

Снимается при независимом питании ОВ, иначе, если $U=0$, то $I_v = 0$ при любой ЭДС E_a и частоте вращения n ;

- 3) *внешняя характеристика:*

Это зависимость $U = f(I_a)$ при $R_\delta = \text{const}$.

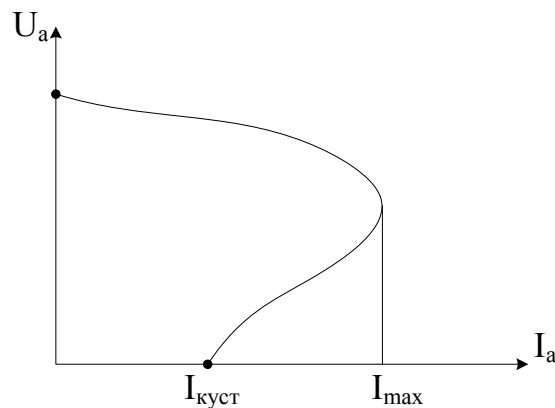


Рисунок 23.1 – Внешняя характеристика ГПТ параллельного возбуждения

Также как в независимом двигателе, с ростом тока якоря I_a напряжение U падает, но сильнее, т.к. к двум причинам (реакция якоря и падение напряжения $I_a R_a$) прибавляется третья: при снижении напряжения U падает ток возбуждения I_δ (а, значит и ЭДС E_a), поэтому у параллельного двигателя: $\Delta U_n = 10 \div 20\%$ (а у независимого $5 \div 10\%$).

Особенность внешней характеристики заключается в том, что при некотором максимальном значении тока якоря она делает петлю и приходит в точку на оси абсцисс, которая соответствует установившемуся току к.з.. В этой точке $U=0$, $I_\delta=0$, а установившийся ток короткого замыкания $I_{куст}$ определяется только остаточным потоком, поэтому он невелик.

Регулировочная и нагрузочная характеристики ГПТ параллельного возбуждения мало отличаются от характеристик ГПТ независимого возбуждения.

Задачи

1. Для генератора постоянного тока параллельного возбуждения известны технические данные: номинальное напряжение $U_H = 115$ В, номинальный ток $I_H = 20$ А, сопротивление цепи якоря работающей машины $r_a = 0,4$ Ом, сопротивление цепи возбуждения работающей машины $r_B = 145$ Ом, коэффициент полезного действия $\eta = 0,8$, частота вращения $n = 2850$ об/мин. Определить: номинальную мощность генератора, мощность первичного двигателя.

ля, ток якоря, электромагнитную мощность, ЭДС генератора, электромагнитный момент.

2. Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения известны технические данные: номинальная мощностью $P_H = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_H = 220$ В, сопротивление цепи якоря при рабочей температуре $r_a = 0,3$ Ом, сопротивление цепи возбуждения при рабочей температуре $r_B = 85$ Ом, КПД двигателя $\eta = 0,795$. Определить: потребляемую мощность, ток якоря, ЭДС, электрические потери в цепи якоря, потери в цепи возбуждения, суммарные потери мощности, потери холостого хода.

3. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальную мощность $P_n = 50$ кВт при напряжении $U = 110$ В, сопротивление цепи якоря $R_a = 0,01$ Ом, частота вращения генератора $n = 1440$ об/мин, сопротивление цепи возбуждения $R_e = 11$ Ом. Определить частоту вращения и потребляемую мощность данной машины при ее работе в режиме двигателя параллельного возбуждения от сети $U = 110$ В для сохранения токов в обмотке якоря и в обметке возбуждения неизменными.

Вопросы к практическому занятию

1. Каковы условия самовозбуждения генераторов постоянного тока?
2. Как протекает процесс самовозбуждения?
3. Какова величина остаточного магнитного потока в генераторах постоянного тока, необходимая для самовозбуждения?
4. Объясните особенности внешней характеристики генератора постоянного тока с параллельным возбуждением.

24 Характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43

Теоретическая часть

Если в двигателе обмотка якоря и обмотка возбуждения подключены к источникам питания с различными напряжениями, то его называют двигателем с независимым возбуждением. Такие двигатели применяют в электрических приводах, у которых питание обмотки якоря осуществляется от генератора или полупроводникового преобразователя. Механические и рабочие характеристики двигателя с независимым возбуждением аналогичны характеристикам двигателя с параллельным возбуждением, так как у них ток возбуждения I_e также не зависит от тока якоря I_a .

Скоростная характеристика двигателей постоянного тока (ДПТ) независимого (параллельного) возбуждения имеет вид прямой, выходящей из точки

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi_\sigma}, \quad (24.1)$$

которая немного падает (при изменении тока якоря I_a от 0 до I_n – на 2-5%). Это происходит потому, что с ростом тока якоря I_a растёт падение напряжения $I_a R_a$, но одновременно падает магнитный поток машины Φ_σ из-за реакции якоря. Вид характеристики зависит от того, какой фактор преобладает. Если реакция якоря окажется сильнее, то характеристика может иметь вид 2 (рис. 24.1). Это недопустимо по условиям устойчивости.

Характеристика без учёта сопротивления регулировочного реостата R_p называется естественной, имеет жесткий, т.е. слабо падающий вид – это хорошо там, где надо держать скорость вращения $n = \text{const}$ при переменной нагрузке (металлорежущие станки).

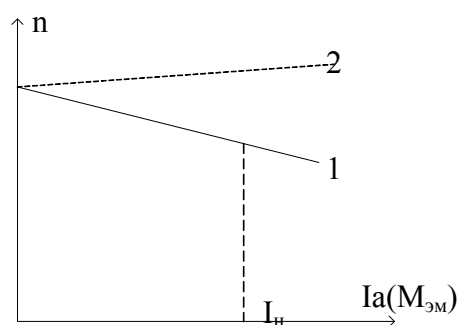


Рисунок 24.1 – Скоростная характеристика ДПТ параллельного возбуждения

Рабочие характеристики двигателя (рис. 24.2 представляют собой зависимости потребляемой мощности P_1 тока $I_a \approx I_n$ частоты вращения n , момента M и КПД η от отдаваемой мощности P_2 на валу двигателя при $U = \text{const}$ и $I_s = \text{const}$. Характеристики $n = f(P_2)$ и $M = f(P_2)$ являются линейными, а зависимости $P_1 = f(P_2)$, $I_a = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$ имеют характер, общий для всех электрических машин. Иногда рабочие характеристики строят в зависимости от тока якоря I_a .

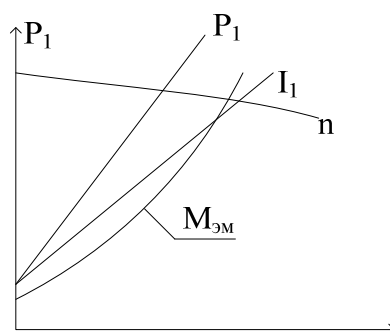


Рисунок 24.2 – Рабочие характеристики ДПТ параллельного (независимого) возбуждения

Задачи

1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения работает от сети напряжением $U_c = 220$ В. Технические данные двигателя приведены в таблице 33.1: номинальный ток I_n , номинальная частота вращения n_n , ток хо-

лостого хода I_0 , сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, Σr , ток возбуждения I_ϵ ; падение напряжения на пару угольно-графитных щеток $\Delta U_{щ} = 2$ В.

Рассчитать данные и построить графики зависимости КПД η , частоты вращения n , момента на валу M_2 от мощности на валу двигателя P_2 . Влиянием реакции якоря пренебречь и считать $\Phi = \text{const}$.

Таблица 24.1 – Данные к задаче 1

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
I_n , А	65	86	116	192	44	33
n_n , об/мин	770	690	650	575	840	1100
I_0 , А	6,5	9,0	9,8	13,4	6,6	5,8
Σr , Ом	0,28	0,17	0,11	0,055	0,42	0,57
I_ϵ , А	1,6	2,2	2,7	4,0	1,5	1,18

2. Двигатель параллельного возбуждения имеет сопротивление в цепи якоря $R_a = 0,39$ Ом. Сопротивление цепи возбуждения $R_\epsilon = 137$ Ом. В режиме холостого хода при напряжении $U = 220$ В частота вращения двигателя $n = 1700$ об/мин, потребляемый ток $I = 3,5$ А. Определить частоту вращения двигателя при номинальной нагрузке двигателя с током $I = 43$ А. Реакцией якоря пренебречь.

3. Определить момент, потребляемый ток, а также токи в цепях якоря и возбуждения двигателя параллельного возбуждения, если мощность на валу $P_n = 4,5$ кВт, подводимое напряжение $U = 220$ В, частота вращения $n = 1000$ об/мин. Сопротивление цепи возбуждения $R_\epsilon = 137$ Ом, КПД двигателя $\eta = 81$ %.

4. Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения известны технические данные: номинальная мощностью $P_n = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 220$ В, сопротивление цепи якоря при рабочей температуре $r_a = 0,3$ Ом, сопротивление цепи возбуждения при рабочей температуре $r_\epsilon = 85$ Ом, КПД двигателя $\eta = 0,795$. Определить: потребляемую мощность, ток якоря, ЭДС, электрические потери в цепи якоря, потери в цепи возбуждения, суммарные потери мощности, потери холостого хода.

Вопросы к практическому занятию

1. Поясните физический смысл рабочих характеристик двигателя.
2. Какая скоростная характеристика ДПТ является жесткой?
3. Какая скоростная характеристика ДПТ является естественной?
4. От чего зависит вид скоростной характеристики ДПТ независимого (параллельного) возбуждения?

25 Характеристики двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

В двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением ток возбуждения $I_s = I_a$, поэтому магнитный поток Φ является некоторой функцией тока якоря I_a . Характер этой функции изменяется в зависимости от нагрузки двигателя. При $I_a < (0,8 \div 0,9)I_n$, когда магнитная система машины не насыщена, $\Phi = k_\Phi I_a$, причем коэффициент пропорциональности k_Φ в значительном диапазоне нагрузок остается практически постоянным. При дальнейшем возрастании тока якоря поток Φ возрастает медленнее, чем I_a , и при больших нагрузках ($I_a > I_n$) можно считать, что $\Phi \approx \text{const}$. В соответствии с этим изменяются в зависимости $n = f(I_a)$ и $M = f(I_a)$.

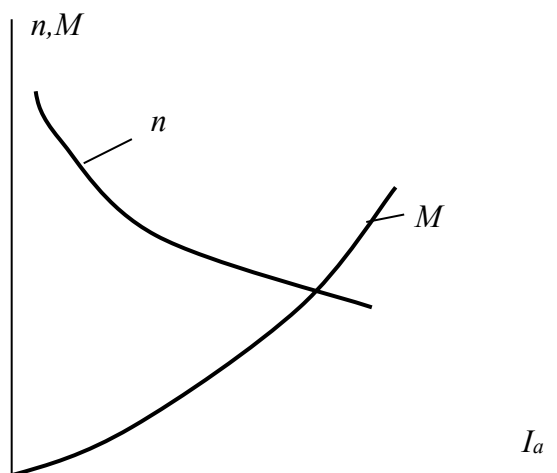


Рисунок 25.1 – Скоростная и моментная характеристика ДПТ последовательного возбуждения

При $I_a < (0,8 \div 0,9)I_n$ скоростная характеристика двигателя $n = f(I_a)$ (рис. 25.1) имеет форму гиперболы, так как частота вращения

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r_a}{c_e \Phi}, \quad (25.1)$$

При $I_a > I_n$ скоростная характеристика становится линейной

Аналогично можно получить зависимость электромагнитного момента от тока якоря $M = f(I_a)$. При $I_a < (0,8 \div 0,9) I_n$ моментная характеристика $M = f(I_a)$ имеет форму параболы. (рис. 35.1), так как электромагнитный момент

$$M = c_m \Phi I_a. \quad (25.2)$$

В двигателях постоянного тока смешного возбуждения магнитный поток Φ создается в результате совместного действия двух обмоток возбуждения – параллельной и последовательной. Поэтому его механические характеристики располагаются между характеристиками двигателей с параллельным и последовательным возбуждением. Одним из достоинств двигателя со смешанным возбуждением является то, что он, обладая мягкой механической характеристикой, может работать при холостом ходе, так как его частота вращения n_0 имеет конечное значение.

Задачи

1. Тяговый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет номинальную мощность $P_n = 52$ кВт, коэффициент полезного действия $\eta = 81\%$, частоту вращения $n = 650$ об/мин, номинальное напряжение $U_n = 550$ В, общее сопротивление обмоток якоря и возбуждения $r_a + r_e = 0,095$ Ом. Определить: потребляемую мощность, ток двигателя, полезный момент на валу, ЭДС, суммарные потери мощности.

2. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения имеет следующие технические данные: номинальная мощность $P_n = 25$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 220$ В, сопротивление якорной цепи $r_a = 0,111$ Ом, сопротивление последовательной обмотки возбуждения $r_{e.c} = 0,0048$ Ом, сопротивление параллельной обмотки возбуждения $r_{e.ш} = 48,4$ Ом, коэффициент полезного действия $\eta = 0,86$. Определить: номинальный ток двигателя, ток якоря, потребляемую мощность, ЭДС, электрические потери в параллельной обмотке возбуждения.

3. Двигатель смешенного возбуждения при напряжении $U = 220$ В и частоте вращения $n = 1500$ об/мин потребляет ток $I = 40$ А, Сопротивление последовательно включенной обмотки якоря равно $0,3$ Ом, падение напряжения на щетках $\Delta U_{щ} = 2$ В, сопротивление цепи возбуждения $r_e = 100$ Ом, число витков на полюс параллельной обмотки возбуждения $w_e = 900$. Продольная МДС, компенсирующая размагничивающее действие поперечной МДС якоря, $F_{qdh} = 220$ А. Характеристика намагничивания машины приведена в таблице 35.1, постоянная $c_0 = 165$. Определить изменение частоты вращения двигателя при токе 20 А.

Таблица 25.1 – Характеристика намагничивания к задаче 3

Ф, Вб	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$	$0,72 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$0,88 \cdot 10^{-2}$	$0,92 \cdot 10^{-2}$
Фв, А	560	860	1100	1400	1800	2200

4. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением с частотой вращения 1500 об/мин потребляет из сети ток $I = 14$ А при напряжении $U = 220$ В. Сопротивление цепи якоря $r_a = 1,7$ Ом. Определить ЭДС якоря, электромагнитный момент двигателя, потребляемую из сети мощность и электрические потери.

5. Двигатель последовательного возбуждения работает от сети напряжением $U = 220$ В, развивает на валу вращающий момент $M = 60$ Н·м при токе $I_H = 50$ А и частоте вращения $n = 1500$ об/мин. Сопротивление цепи якоря $r_a = 0,2$ Ом. Определить изменение частоты вращения и КПД двигателя при введении в цепь якоря дополнительного сопротивления $r_u = 0,8$ Ом при неизменном вращающем моменте на валу.

Вопросы к практическому занятию

1. Объясните вид скоростной характеристики ДПТ последовательного возбуждения.
2. Как создается магнитный поток в двигателях постоянного тока со смешанным возбуждением?
3. Какой механической характеристикой обладает двигатель постоянного тока смешанного возбуждения?

26 Пусковые и регулировочные свойства двигателей постоянного тока

Цель: формирование у студента компетенций ПК-3, ПК-16, ПК-24, ПК-43.

Теоретическая часть

Пуск в ход ДПТ.

При пуске необходимо:

1) обеспечить достаточный пусковой момент и достижение необходимой скорости вращения;

2) ограничить пусковой ток.

Применяют следующие способы пуска:

а) прямой пуск;

б) пуск с помощью пускового реостата;

в) пуск при понижении напряжений.

Прямой пуск:

В этом случае $E_a=0$ ($n=0$)

$$I_n = \frac{U}{R_a}, \quad (26.1)$$

т.к. $R_a^*=0.02 \div 0.1$, то $I_n=(10 \div 50)I_n \rightarrow$ такой пуск допустим только в мало-мощных машинах, где R_a^* , больше.

Реостатный пуск:

Последовательно с якорем включают пусковое сопротивление R_n , тогда:

$$I_n = \frac{U}{R_a + R_n}, \quad (26.2)$$

при пуске R_n отключают последовательно отдельными ступенями и скорость достигает номинального значения.

Пуск при пониженном напряжении:

В этом случае якорь питают либо от ГПТ с переменной частотой, либо в последнее время от импульсных, или управляемых тиристорных преобразователей.

В последнем случае, меняя скважность импульсов:

$$\gamma = \frac{t_n}{T}, \quad (26.3)$$

или величину угла зажигания тиристорov α меняют среднее значение U , которое и определяет ток I и n .

Регулирование скорости вращения ДПТ.

При регулировании n двигателя необходимо обеспечить:

- 1) широкий диапазон изменения скорости;
- 2) плавное изменение n ;
- 3) минимальные потери мощности, устойчивую работу.

Способы регулирования n следуют из уравнения скоростной характеристики:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi_\sigma}. \quad (26.4)$$

1) регулирование изменением основного потока Φ_δ . Как правило, двигатель рассчитывается на максимальный поток, поэтому в процессе регулирования его можно только снижать (а скорость – увеличивать вверх от номинального значения).

Нельзя допускать разрыва цепи возбуждения в независимом и параллельном двигателе, это может привести к «разносу» двигателя и резкому ухудшению процесса коммутации.

Этот способ даст плавное и экономичное регулирование с высоким к.п.д., т.к. U и I_a при этом не меняются, а потери на возбуждение падают. Но диапазон ограничен, т.к. сверху частота вращения n ограничена условиями механической прочности и коммутацией.

2) регулирование включением в цепь якоря регулировочного реостата, при этом:

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_p)}{C_e \Phi_\delta}. \quad (26.5)$$

Скорость изменяется вниз от номинальной, плавно, но при этом резко уменьшается КПД из-за потерь в реостате.

Например: если при $U_* = I_{a*} = 1$, $\Phi_\delta = \text{const}$, $R_{a*} = 0.05$ надо уменьшить скорость вдвое, то надо вдвое уменьшить числитель:

$U_* - R_{a*} I_{a*} = 1 - 0.05 \cdot 1 = 0.95$ - было, $1 - 0.05 - R_{p*} = 0.475$, стало, откуда $R_{p*} = 0.475$, т.е. в реостате будет теряться 47.5% приложенного к якорю напряжения и столько же мощности, подводимой к цепи якоря.

3) Регулирование n изменений подводимого к якорю U .

Это также плавный способ и экономичный – т.к. нет дополнительных источников потерь. Способ регулирует скорость в широком диапазоне вниз от $n_{ном}$.

Пример 1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: номинальная мощность $P_n = 25$ кВт, напряжение питания $U = 440$ В, номинальная частота вращения $n_n = 1500$ об/мин, сопротивление обмоток в цепи якоря $\Sigma r = 0,15$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $r_\phi = 88$ Ом, падение напряжения в щеточном контакте щеток $\Delta U_{щ} = 2$ В.

Определить потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки I_n , сопротивление пускового реостата $R_{пр}$, при котором начальный пусковой ток в цепи якоря двигателя был бы равен $2,5I_n$, начальный пусковой момент M_n , частоту вращения n_0 и ток I_0 в режиме холостого хода, номинальное изменение частоты вращения якоря двигателя при сбросе нагрузки. Влиянием реакции якоря пренебречь.

Решение:

Потребляемая двигателем мощность при номинальной нагрузке

$$P_{1n} = P_n / \eta = 25 / 0,85 = 29,4 \text{ кВт.}$$

Ток, потребляемый двигателем при номинальной нагрузке

$$I_n = P_{1n} / U_n = 29,4 \cdot 10^3 / 440 = 67 \text{ А.}$$

Ток в цепи обмотки возбуждения

$$I_\phi = U_n / r_\phi = 440 / 88 = 5 \text{ А.}$$

Ток в обмотке якоря

$$I_{ан} = I_n - I_\phi = 67 - 5 = 62 \text{ А.}$$

Начальный пусковой ток якоря при заданной кратности пускового тока 2,5

$$I_{ан} = 2,5I_n = 2,5 \cdot 62 = 155 \text{ А.}$$

Требуемое сопротивление цепи якоря при заданной кратности тока 2,5

$$R_a = R_{пр} + \Sigma r = U_n / I_{ан} = 440 / 155 = 2,83 \text{ Ом.}$$

Сопротивление пускового реостата

$$R_{np} = R_a - \Sigma r = 2,83 - 0,15 = 2,68 \text{ Ом.}$$

ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки

$$E_{an} = U_n - I_{an} \cdot \Sigma r - \Delta U_{щ} = 440 - 62 \cdot 0,15 - 2 = 428,7 \text{ В.}$$

Из выражения

$$E_a = c_e \cdot \Phi \cdot n,$$

определим

$$c_e \Phi = E_a / n = 428,7 / 1500 = 0,285;$$

отношение коэффициентов

$$c_m / c_e = [pN / (2\pi a)] / [pN / (60a)] = 9,55;$$

следовательно,

$$c_m \Phi = 9,55 c_e \Phi = 9,55 \cdot 0,285 = 2,72.$$

Начальный пусковой момент при заданной кратности пускового тока 2,5

$$M_n = c_m \Phi I_{an} = 2,72 \cdot 155 = 422 \text{ Н·м.}$$

Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{2n} = 9,55 P_n / n_n = 9,55 \cdot 25 \cdot 10^3 / 1500 = 159 \text{ Н·м.}$$

Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$P_{эм} = E_{an} I_{an} = 428,7 \cdot 62 = 26579 \text{ Вт.}$$

Момент холостого хода

$$M_0 = M_n - M_{2n} = 169 - 159 = 10 \text{ Н·м.}$$

Ток якоря в режиме холостого хода

$$I_{a0} = M_0 / c_m \Phi = 10 / 2,72 = 3,68 \text{ А.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода (принимая $\Delta U_{щ} = 0$)

$$E_{a0} = U_n - I_{an} \Sigma r = 440 - 3,68 \cdot 0,15 = 439 \text{ В.}$$

Частота вращения якоря в режиме холостого хода

$$n_0 = E_{a0} / c_e \Phi = 439 / 0,285 = 1540 \text{ об/мин.}$$

Номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки

$$\Delta n_n = \frac{n_0 - n_n}{n_n} 100 = \frac{1540 - 1500}{1500} 100 = 2,66 \text{ \%}.$$

Задачи

1. В табл. 26.1 приведены данные каталога на двигатели 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, Σr . Требуется определить сопротивление добавочного резистора r_d , который следует включить в цепь якоря, чтобы при номинальной нагрузке двигателя частота вращения якоря составила $0,5n_{ном}$; построить естественную и искусственную механические характеристики двигателя.

Таблица 26.1 – Каталожные данные на двигатели постоянного тока независимого возбуждения серии 2П

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	Σr , Ом
2ПО200L	7,1	220	750	83,5	0,48
2ПО200М	20	440	2200	90	0,28
2ПФ200М	30	440	2200	90	0,22
2ПФ200L	20	220	1000	85,5	0,18
2ПН225М	37	220	1500	86,5	0,07
2ПФ225М	10	220	500	74,5	0,58
2ПО180М	17	440	3000	90	0,31

2. Двигатель параллельного возбуждения при номинальном напряжении $U_n = 220$ В потребляет ток $I = 33,2$ А и вращается с частотой 1000 об/мин, сопротивление цепи якоря $r_a = 0,4$ Ом, сопротивление цепи обмотки возбуждения $r_e = 160$ Ом. Определить частоту вращения и электромагнитный момент двигателя при включении в цепь якоря дополнительного сопротивления $R_u = 3$ Ом, если ток в обмотке якоря и ток возбуждения остаются при этом неизменными.

3. Какое сопротивление необходимо включить в цепь якоря двигателя параллельного возбуждения номинальной мощности $P_n = 55$ кВт с номинальным напряжением $U_n = 220$ В, чтобы при неизменных значениях номиналь-

ного момента на валу и тока возбуждения частота вращения двигателя уменьшилась вдвое? Сопротивление цепи якоря $r_a = 0,04$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $r_b = 54$ Ом, КПД двигателя 89 %.

Вопросы к практическому занятию

1. Какие требования предъявляются к пуску двигателей постоянного тока (ДПТ)?
2. Какие способы пуска ДПТ вы знаете?
3. Каковы недостатки реостатного пуска?
4. Запишите уравнение скоростной характеристики ДПТ.
5. Назовите способы регулирования скорости вращения ДПТ.
6. Почему регулирование частоты вращения ДПТ изменением магнитного потока можно осуществлять только вверх от номинального значения? Чем при этом ограничивается верхний предел частоты вращения?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для ВУЗов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.
2. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для ВУЗов. – СПб: Питер, 2010. – 350 с.

Дополнительная

1. Читечян В. И. Электрические машины. Сборник задач: учебное пособие для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1988. – 231 с.
2. Кацман М. М. Сборник задач по электрическим машинам. – М.: Академия, 2008. – 157 с.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Юдина О.И.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Лабораторные работы

Направление подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника»
Профиль подготовки – Электроэнергетические системы и сети,
Электроснабжение, Релейная защита и автоматизация
электроэнергетических систем, Менеджмент в электроэнергетике

Квалификация выпускника – бакалавр

Ставрополь 2015

Предисловие

Целью дисциплины «Электрические машины» является формирование базовых знаний в области теории электромеханического преобразования энергии, принципов действия основных видов электрических машин и особенностей их применения на электрических станциях и подстанциях, предприятиях промышленности и транспорта, и в результате формирования компетенций ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6.

Составители: к.т.н., доцент О. И. Юдина.

Рецензент: к.т.н., доцент В. А. Мамаев

Содержание

1 Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания.....	3
2 Исследование нагрузочных режимов трехфазного трансформатора.....	13
3 Расчет обмотки статора машины переменного тока.....	20
4 Исследование трехфазного синхронного генератора.....	36
5 Исследование трехфазного синхронного двигателя.....	40
6 Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором (подключение звездой и треугольником).....	47
7 Исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя с помощью программного обеспечения «ActiveDrive/Active ASM».....	53
8 Исследование генератора постоянного тока с независимым возбуждением.....	57
9 Исследование двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.....	65
10 Исследование двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением.....	71
Список рекомендуемой литературы.....	78

1 Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания

Цель работы: изучение процессов, происходящих в трансформаторе при таких режимах его работы, как холостой ход и короткое замыкание; освоение методов испытаний трансформатора, и обработка полученных данных.

Актуальность: формирование компетенций ПК-3, ПК-4, ПК-5.

В работе выполняются следующие задачи::

1.Снятие и построение характеристик холостого хода. Расчет коэффициента трансформации.

2.Снятие и построение характеристик короткого замыкания.

3.На основании данных опытов холостого хода и короткого замыкания определение:

а) параметры Т-образной схемы замещения трансформатора и вычерчивание этой схемы для режима нагрузки;

б) заполнение каталожных данных.

Теоретическое обоснование

Для определения параметров схемы замещения трансформатора производится опыты холостого хода и короткого замыкания.

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора по результатам опыта холостого хода определяются следующие величины:

а) среднее значение фазного тока холостого хода

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; \quad (1.1)$$

б) среднее значение фазного напряжения холостого хода первичной обмотки

$$U_{01} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}; \quad (1.2)$$

в) среднее значение фазного напряжения холостого хода вторичной обмотки

$$U_{02} = \frac{U_a + U_\epsilon + U_c}{3}; \quad (1.3)$$

г) мощность холостого хода

$$P_0 = P_A + P_B + P_C; \quad (1.4)$$

д) коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_{01} \cdot I_{01}}; \quad (1.5)$$

е) коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{01}}{U_{02}}; \quad (1.6)$$

ж) активное сопротивление холостого хода

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_{01\phi}^2}; \quad (1.7)$$

з) полное сопротивление холостого хода

$$z_0 = \frac{U_{01}}{I_{01\phi}}; \quad (1.8)$$

к) индуктивное сопротивление холостого хода

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (1.9)$$

л) коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{01}}{U_{02}}; \quad (1.6)$$

По результатам опыта короткого замыкания определяются следующие величины:

а) среднее значение фазного тока короткого замыкания

$$I_{\kappa} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; \quad (1.7)$$

б) среднее значение фазного напряжения короткого замыкания

$$U_{\kappa} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}; \quad (1.8)$$

в) мощность короткого замыкания

$$P_{\kappa} = P_A + P_B + P_C; \quad (1.9)$$

г) коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3 \cdot U_{\kappa\phi} \cdot I_{\kappa\phi}}. \quad (1.10)$$

д) сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{I_{\kappa}}; \quad (1.11)$$

е) активное сопротивление короткого замыкания

$$r_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{\kappa}^2}; \quad (1.12)$$

ж) индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - r_{\kappa}^2}. \quad (1.13)$$

По результатам опытов холостого хода и короткого замыкания определяются также каталожные данные трансформатора. К каталожным данным относятся электромагнитные величины, характеризующие работу трансформатора в нормальном режиме.

Порядок определения каталожных данных следующий:

а) номинальная мощность S_n , схема соединения, номинальные линейные напряжения $U_{нВН}$ и $U_{нНН}$ указаны на щитке трансформатора;

б) номинальные линейные токи в обмотках рассчитываются по формуле:

$$I_{нВН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{нВН}}; \quad (1.14)$$

$$I_{нНН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{нНН}}; \quad (1.15)$$

в) из опыта холостого хода при номинальном напряжении определяется мощность холостого хода P_0 и ток холостого хода I_0 в процентах от номинального тока:

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_{нВН}} \cdot 100 \% ; \quad (1.16)$$

г) на основании опыта короткого замыкания в каталог заносятся мощность P_k напряжение U_k короткого замыкания, соответствующие номинальному току и пересчитанные на рабочую температуру трансформатора 75С по следующим формулам:

$$r_{к75^0} = r_{к\theta} [1 + \alpha(75^0 C - \theta)], \quad (1.17)$$

где $\alpha = \frac{1}{233 + \theta}$ – температурный коэффициент сопротивления,

θ – температура окружающей среды

д) полное сопротивление короткого замыкания:

$$z_{к75^0} = \sqrt{r_{к75^0}^2 + x_k^2} ; \quad (1.18)$$

е) напряжение короткого замыкания:

$$u_k \% = \frac{z_{к75^0} \cdot I_{нВН}}{U_{нВНф}} 100 \% . \quad (1.19)$$

При этом составляющие напряжения короткого замыкания:

– активная

$$u_{ка} \% = \frac{r_{к75^0} \cdot I_{нВНф}}{U_{нВНф}} 100 \% ; \quad (1.20)$$

– реактивная

$$u_{кр} \% = \frac{x_k \cdot I_{нВНф}}{U_{нВНф}} 100 \% ; \quad (1.21)$$

ж) мощность короткого замыкания (1.22)

$$P_{к75^0} = 3 \cdot I_{нф}^2 \cdot r_{к75^0} . \quad (1.23)$$

Аппаратура и материалы

1) Разделительный трансформатор, трехфазный, мощностью 1 кВА;

- 2) трехфазный измерительный прибор;
- 3) анализатор качества электрической энергии;
- 4) силовой выключатель;
- 5) регулируемый блок питания трехфазного тока.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.
2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.
3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.
4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.
5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.
6. Все необходимые переключения производить при выключенном напряжении. Любое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем.
7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.
8. При неисправности в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателю.
9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. Опыт холостого хода.

Собрать схему, указанную преподавателем. При выполнении опыта холостого хода первичная обмотка трансформатора соединяется по схеме «треугольник», вторичная обмотка – по схеме «звезда». Вторичная обмотка разомкнута. К первичной обмотке подводится трехфазное питающее напряжение 400 В. В процесс опыта снимаются характеристики холостого хода, представляющие зависимости тока, потребляемой мощности и коэффициента мощности от напряжения первичной обмотки при разомкнутой вторичной:

$$I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_0), \text{ при } f = \text{const}, I_2 = 0$$

Опыт проводят при изменении питающего напряжения в пределах от $0,6U_n$ до U_n .

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 1.1:

Таблица 1.1 – Опыт холостого хода

Измеренные величины															
№	I_A А	I_B А	I_C А	U_A В	U_B В	U_C В	U_a В	U_b В	U_c В	P_A Вт	P_B Вт	P_C Вт	Q_A вар	Q_B вар	Q_C вар
1...6															
Рассчитанные величины															
№	I_0 А	U_{01} В	U_{02} В	P_0 Вт	Q_0 вар	r_m кОм	x_m кОм	k	$\cos \varphi_0$						
1...6															

Рассчитать сопротивления цепи намагничивания r_m и x_m , при условии, что $r_0 = r_m$; $x_0 = x_m$; $z_0 = z_m$.

Результаты расчета занести в таблицу 1.1/

По данным таблицы 1.1 строят графики характеристик холостого хода (рисунок 1.1) и зависимость сопротивлений цепи намагничивания (r'_m и x'_m) от первичного напряжения.

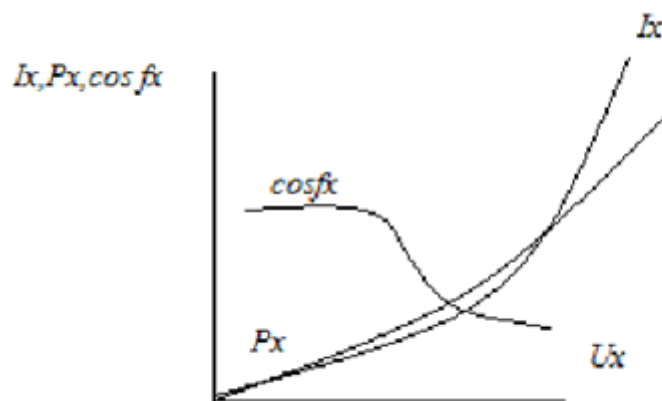


Рисунок 1.1 – Характеристики холостого хода

2. Опыт короткого замыкания

Опыт по снятию характеристик короткого замыкания проводят по схеме, указанной преподавателем, с учетом закороченной вторичной обмотки (штриховые линии) при значительно пониженном напряжении. При этом ток в первичной обмотке не должен превышать номинального значения.

В процессе опыта снимаются характеристики короткого замыкания, которые представляют собой зависимость тока, потребляемой мощности и $\cos \varphi_k$ от подводимого напряжения при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора:

$$I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k), \text{ при } U_2 = 0$$

Чтобы избежать значительного нагревания обмоток трансформатора, опыт начинают с режима, при котором ток равен номинальному. Затем при постепенном понижении напряжения U_k снимают характеристики, измеряя напряжение, ток и мощность. Результаты измерений и последующих вычислений заносят в таблицу 1.2. По данным таблицы 1.2 строят характеристики короткого замыкания (рисунок 1.2).

Таблица 1.2 – Опыт короткого замыкания

Измеренные величины												
№	I_A	I_B	I_C	U_A	U_B	U_C	P_A	P_B	P_C	Q_A	Q_B	Q_C
	A	A	A	B	B	B	$Вт$	$Вт$	$Вт$	$Вар$	$Вар$	$Вар$
1...6												

Рассчитанные величины							
№ опыта	I_K A	U_K B	P_K Bm	$\cos \varphi_K$	z_K , Ом	r_K , Ом	x_K , Ом
1...6							

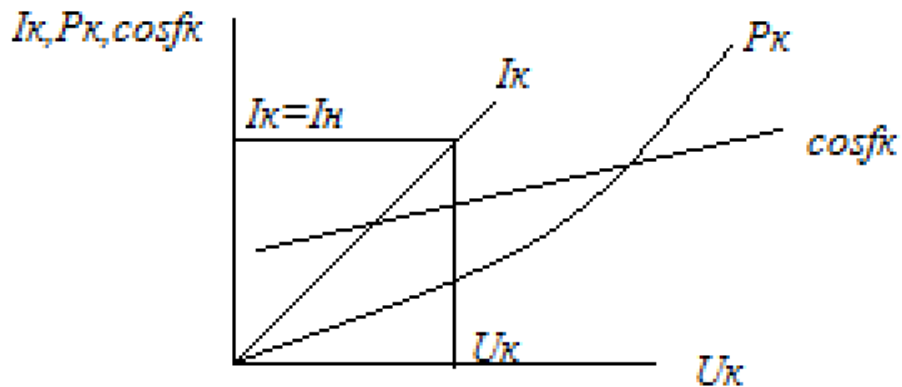


Рисунок 1.2 – Характеристики короткого замыкания

3. Определение параметров Т-образной схемы замещения трансформатора.

Т-образная схема замещения трансформатора представлена на рисунке 3:

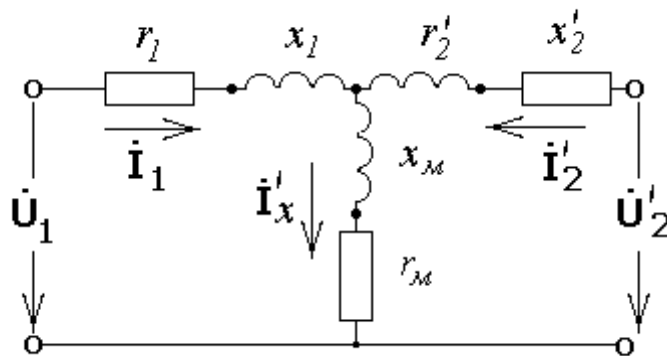


Рисунок 1.3 – Т-образная схема замещения трансформатора

Параметры Т-образной схемы замещения рассчитываются по данным опытов холостого хода и короткого замыкания в следующем порядке:

$$r_K = r_1 + r'_2; \quad r_1 = r'_2 = \frac{r_K}{2};$$

$$x_k = x_1 + x'_2; \quad x_1 = x'_2 = \frac{x_k}{2}.$$

4. Каталожные данные трансформатора

В настоящей работе следует определить некоторые каталожные данные и занести их в таблицу 3.

Таблица 1.3 – Каталожные данные трансформатора

S_n	$U_{нвн}$	$U_{ннн}$	$I_{нвн}$	$I_{ннн}$	$P_{к75^\circ}$	P_0	u_k	$u_{ка}$	$u_{кр}$	I_0	k	Схема соединения
кВА	В	В	А	А	Вт	Вт	%	%	%	%		

Порядок определения каталожных данных для таблицы 1.3 представлен в разделе «Теоретическое обоснование» данных методических указаний.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.
5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Приведите уравнения напряжений двухобмоточного трансформатора.
2. Для чего делается приведения параметров вторичной обмотки к первичной?
3. Что такое коэффициент трансформации?
4. Для чего проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания?
5. Порядок выполнения опыта холостого хода.
6. Порядок выполнения опыта короткого замыкания.
7. Поясните физический смысл параметров Т-образной схемы замещения трансформатора.

2 Исследование нагрузочных режимов трехфазного трансформатора

Цель работы: исследование влияния характера нагрузки на основные физические параметры трансформатора.

Актуальность: изучение работы трансформатора в режиме нагрузки, формирование компетенций ПК-3, ПК-4, ПК-5.

Выполняются следующие задачи:

1. Снятие и построение внешней характеристики трансформатора при омической нагрузке. Измерение, расчет и построение зависимостей напряжения, мощности вторичной обмотки и КПД от тока нагрузки. Расчет изменения напряжения и коэффициента мощности трансформатора.
2. Снятие и построение внешней характеристики трансформатора при индуктивной нагрузке.
3. Снятие и построение внешней характеристики трансформатора при емкостной нагрузке.

Теоретическое обоснование

Зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ называется внешней характеристикой. Из уравнения (2.1) для упрощенной схемы замещения трансформатора следует, что с изменением тока во вторичной обмотке (тока нагрузки I_2) напряжение на вторичной обмотке изменяется.

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}_1 - \dot{I}'_2 r_k - j \dot{I}'_2 x_k. \quad (2.1)$$

Значение напряжения на вторичной обмотке определяется не падением напряжения, а потерей напряжения в обмотках. Потеря напряжения есть арифметическая разность между первичным и приведенным вторичным напряжением:

$$\Delta U'_2 = U_1 - U_2. \quad (2.2)$$

При отсутствии нагрузки ($I_2 = 0$) напряжение на вторичной обмотке $U'_2 = U'_{20} = U_1$, а поскольку напряжение U_1 не зависит от нагрузки, то $\Delta U'_2$ есть изменение напряжения U'_2 по сравнению с его значением при холостом ходе U'_{20} , или

$$\Delta U'_2 = U'_{20} - U'_2, \quad (2.3)$$

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2. \quad (2.4)$$

откуда

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2. \quad (2.5)$$

Потеря напряжения определяется из векторной диаграммой упрощенной схемы замещения трансформатора (рис.2.1):

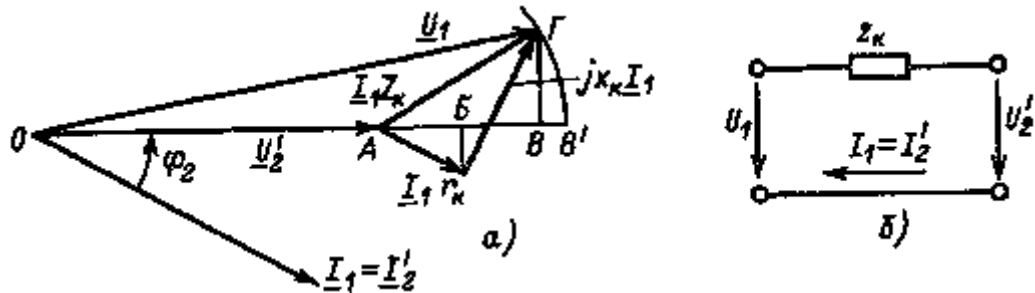


Рисунок 2.1 – Векторная диаграмма а) упрощенной схемы замещения б)
трансформатора

На рис. 2.2 изображены внешние характеристики трансформатора при различных значениях коэффициента мощности потребителей. Изменение напряжения U_2 во многом зависит не только от значений z_k , $\cos \varphi_2$, но и от соотношения значений r_k и x_k . Изображенные внешние характеристики (рис. 2.2) справедливы для трансформаторов средней и большой мощности, у которых z_k мало и $x_k > r_k$. У трансформаторов малой мощности z_k относительно велико и $r_k > x_k$. Поэтому изменение напряжения у них более значительное и взаимное расположение внешних характеристик при различных значениях коэффициента мощности потребителей существенно отличается от трансформаторов большой мощности. Примерные внешние характеристики трансформаторов малой мощности при различных значениях $\cos \varphi_2$ изображены на рис. 2.3.

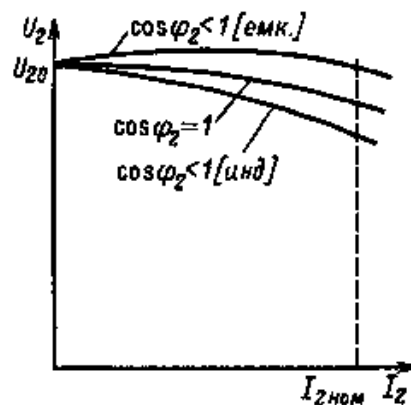


Рисунок 2.2 – Внешние характеристики трансформаторов средней и большой мощности

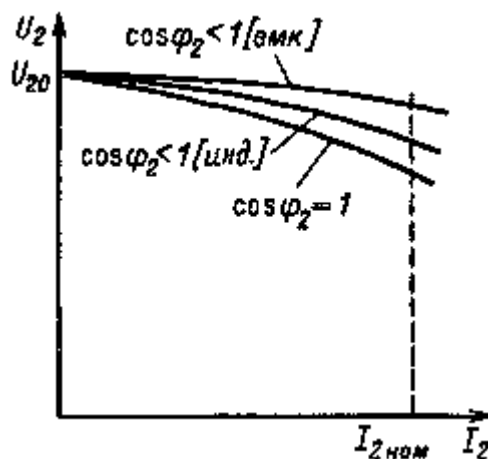


Рисунок 2.3 – Внешние характеристики трансформатора малой мощности

Аппаратура и материалы

- 1) Разделительный трансформатор, трехфазный, мощностью 1 кВА;
- 2) трехфазный измерительный прибор;
- 3) анализатор качества электрической энергии;
- 4) силовой выключатель;
- 5) регулируемый блок питания трехфазного тока.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.

2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.

3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.

4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.

5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.

6. Все необходимые переключения производить при выключенном напряжении. Любое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем.

7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. При неисправности в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателю.

9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. Омическая нагрузка трансформатора.

1.1 Проведение опыта.

Опыт проводится при номинальном напряжении первичной обмотки $U_1 = 400 \text{ В}$.

Выполнить измерения и заполнить таблицу 2.1.

Таблица 1.1 – Омическая нагрузка трансформатора

Измерено					Вычислено			
$I_1 \text{ (A)}$	$P_1 \text{ (Вт)}$	$U_2 \text{ (В)}$	$I_2 \text{ (A)}$	$P_2 \text{ (Вт)}$	β	η	$\cos \varphi$	$\Delta U \%$
0,3								
0,4								
0,6								
0,8								
1,0								
1,2								
1,4								
1,6								

1.2 Обработка результатов.

Рассчитать следующие параметры трансформатора:

а) коэффициент полезного действия (КПД) η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.6)$$

б) коэффициент загрузки трансформатора β :

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}, \quad (2.7)$$

в) коэффициент мощности $\cos \varphi$,

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2}, \quad (2.8)$$

г) изменение напряжения:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%. \quad (2.9)$$

Результаты расчетов занести в таблицу 2.1

По результатам измерений и расчетов построить:

а) зависимость $P_2, \eta, \cos \varphi_2 = f(I_2)$;

б) внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$

2. Индуктивная нагрузка трансформатора

2.1 Проведение опыта.

Опыт проводится при номинальном напряжении первичной обмотки $U_1 = 400$ В.

Выбрать на катушке индуктивности поочередно указанные в таблице 2.2. значения, выполнить измерения, результаты занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Индуктивная нагрузка трансформатора

L (Гн)	I_1 (А)	U_2 (В)	I_2 (А)
3,2			
2,8			
2,4			
2,0			
1,6			
1,2			

2.2 Обработка результатов.

По результатам измерений построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$.

3. Емкостная нагрузка трансформатора

3.1 Проведение опыта.

Опыт проводится при номинальном напряжении первичной обмотки $U_1 = 400$ В.

Выбрать поочередно указанные в таблице 2.3 значение емкости, выполнить измерения, результаты занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Емкостная нагрузка трансформатора

C (μФ)	I_1 (А)	U_2 (В)	I_2 (А)
2			
3			
8			
12			
14			
30			

3.2 Обработка результатов.

По результатам измерений построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.
5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Чем определяется напряжение на вторичной обмотке трансформатора?
2. Дать определение внешней характеристике трансформатора.
3. Как изменяется напряжение на вторичной стороне трансформатора при омической нагрузке?
4. При какой нагрузке с возрастанием тока нагрузки напряжение на вторичной стороне увеличивается?

3 Расчет обмотки статора машины переменного тока

Цель работы: Выполнение развернутой схемы обмотки статора машины переменного тока

Актуальность: изучение конструкции обмоток машин переменного тока, формирование компетенций ПК-3, ПК-4

Для достижения поставленной задачи необходимо:

1. Изучить конструкцию обмоток машин переменного тока.
2. Выполнить расчет трехфазной двухслойной обмотки статора.
3. Выполнить таблицу заполнения пазовых сторон обмотки.
4. Выполнить развернутую схему обмотки.
5. Построить звезды пазовых ЭДС и векторные диаграммы фазных ЭДС.

Теоретическое обоснование

Обмотки статора машин переменного тока являются важнейшей частью их конструкции, определяющей длительную работоспособность машины и условия ее применения. В техническом отношении обмотки должны удовлетворять определенным требованиям по нагревостойкости и электрической прочности их изоляции как относительно корпуса машины, так и между отдельными витками и элементами обмотки. Вместе с этим при работе синхронной машины в режиме генератора конструкция обмотки ее должна обеспечивать кривую выходного напряжения во времени по возможности синусоидальной формы. Наконец, в крупных машинах обмотка статора должна обладать достаточной механической прочностью, предохраняющей ее от возможного разрушения при аварийных режимах работы машины под действием значительных электродинамических сил.

Расчет обмотки.

Число пазов на полюс и фазу вычисляется по формуле:

$$q = \frac{Z}{2pt}, \quad (3.1)$$

где $m = 3$ – число фаз.

Угол электрического сдвига соседних пазов:

$$\gamma = \frac{360p}{Z}, \text{ эл. град.} \quad (3.2)$$

Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p}. \quad (3.3)$$

Относительный шаг обмотки

$$\beta = \frac{y}{\tau}. \quad (3.4)$$

Угол фазной зоны

$$\alpha = q\gamma \text{ эл. град.} \quad (3.5)$$

Обмоточный коэффициент по основной гармонике:

$$k_{об.1} = k_{y1} \cdot k_{p1}, \quad (3.6)$$

где k_{y1} – коэффициент укорочения

$$k_{y1} = \sin \frac{\beta\pi}{2}, \quad (3.7)$$

k_{p1} – коэффициент распределения.

Построение таблицы заполнения пазовых сторон.

Таблица должна содержать 2 строки, так как обмотка двухслойная и Z столбцов. Строки соответствуют сторонам (слоям) обмотки (верхний и нижний слой), столбцы – пазам.

Сначала распределяются верхние слои (стороны) катушек (пазов) по полюсам и фазным зонам. На каждый полюс приходится τ пазов, из них на каждую фазу $q = \frac{\tau}{m}$ пазов.

Таким образом, в первых q пазах (от паза 1 до паза q) находятся верхние стороны катушечной группы фазы A . Поскольку фаза B должна быть сдвинута относительно фазы A на 120 эл. град., то верхние стороны

катушечной группы фазы B распределяются в пазах от $2q + 1$ до $3q$. Соответственно верхние стороны фазы C находятся в пазах от $4q + 1$ до $5q$.

Таким образом распределяется половина фазных зон и пазов верхнего слоя в пределах двух полюсных делений 2τ (на 1-й паре полюсов). На остальных полюсных делениях распределение фазных зон выполняется аналогично.

Оставшаяся половина фазных зон также распределяется по фазам A , B и C и обозначается соответственно X , Y и Z .

При этом для зон X , принадлежащих фазе A , отводятся пазы, сдвинутые относительно зон A на τ пазов, т. е. на 180 эл. град. На первых двух τ это пазы от $3q + 1$ до $4q$. Аналогично для фазной зоны Y отводятся пазы от $5q + 1$ до $6q$, для фазной зоны Z – пазы от $q + 1$ до $2q$.

Далее следует распределить нижние стороны катушек (пазов) по фазным зонам и полюсам. Для этого индексацию элементов (распределение по фазам) нижней строки необходимо выполнить так же, как индексацию элементов верхней строки, но со сдвигом влево на величину укорочения шага $\Delta y = \tau - y$.

Выполнение развернутой схемы обмотки.

Развернутая схема строится в соответствии с таблицей заполнения пазовых сторон. При этом необходимо соблюдение следующих правил:

1. Пазовая часть обмотки якоря изображается в виде двух линий (на каждый паз) – сплошной и штриховой, соответствующих верхнему и нижнему слою (стороне) паза. Линии располагаются под центрами ячеек таблицы распределения пазов и нумеруются в соответствии с номером паза.

2. Каждая катушка укладывается одной стороной в верхний слой паза, другой – в нижний слой через шаг, равный y .

3. Укладка (или намотка) катушек при вычерчивании схемы обмотки осуществляется снизу вверх в пазах, соответствующих обозначениям A , B и C и сверху вниз – в пазах X , Y и Z .

4. Катушки одной фазы в пределах одной фазной зоны соединяются последовательно в катушечные группы, число которых в каждой фазе при двухслойной обмотке равно числу полюсов. Катушечные группы каждой фазы соединяются последовательно, параллельно или по смешанной схеме в зависимости от числа параллельных ветвей обмотки.

На рисунках 3.1 – 3.3 показано соединение катушечных групп фазы A для различных значений числа полюсов и числа параллельных ветвей.

В соответствии с заданием фазные обмотки соединяются в звезду или треугольник.

Построение звезды пазовых ЭДС и векторной диаграммы фазных ЭДС

Звезда пазовых ЭДС представляет собой векторную диаграмму ЭДС проводников, лежащих в пазах. Звезда имеет $\frac{Z}{p}$ векторов, сдвинутых друг относительно друга на угол γ и пронумерованных в соответствии номерам пазов.

Каждый вектор будет пронумерован p раз, т. к. после обхода векторов пазовых ЭДС на протяжении 2τ звезда этих ЭДС будет повторяться, поскольку ЭДС пазов, расположенных идентично на различных парах полюсов, совпадают по фазе.

Векторная диаграмма фазной ЭДС строится в соответствии со звездой пазовых ЭДС с учетом соединения катушечных групп в пределах одной параллельной ветви.

Так как ЭДС всех параллельных ветвей одной фазной обмотки равны, то достаточно построить векторную диаграмму ЭДС одной ветви. При этом

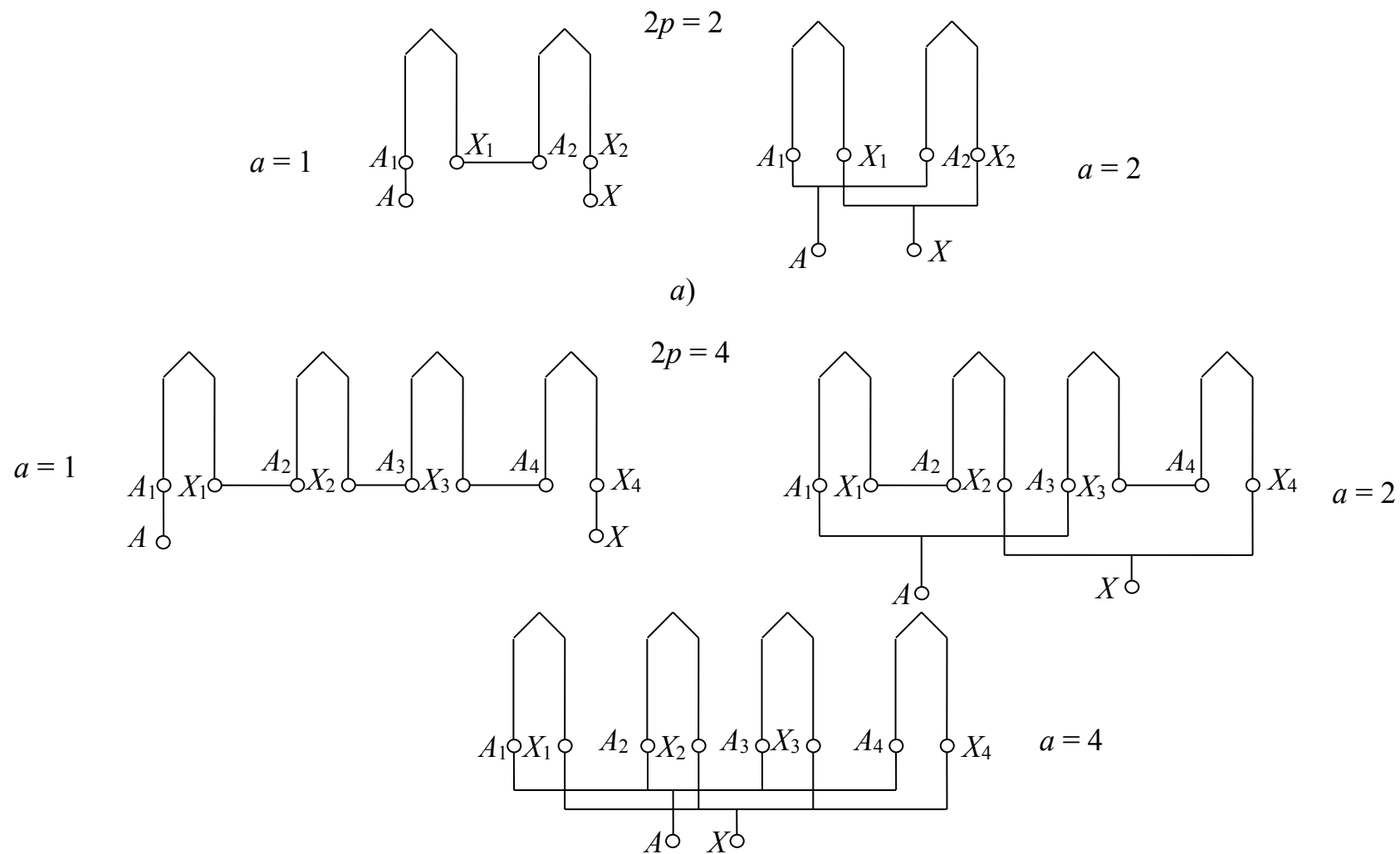


Рисунок 3.1 – Соединение катушечных групп фазы A для различного числа параллельных ветвей обмотки a и числа полюсов а) $2p = 2$; б) $2p = 4$

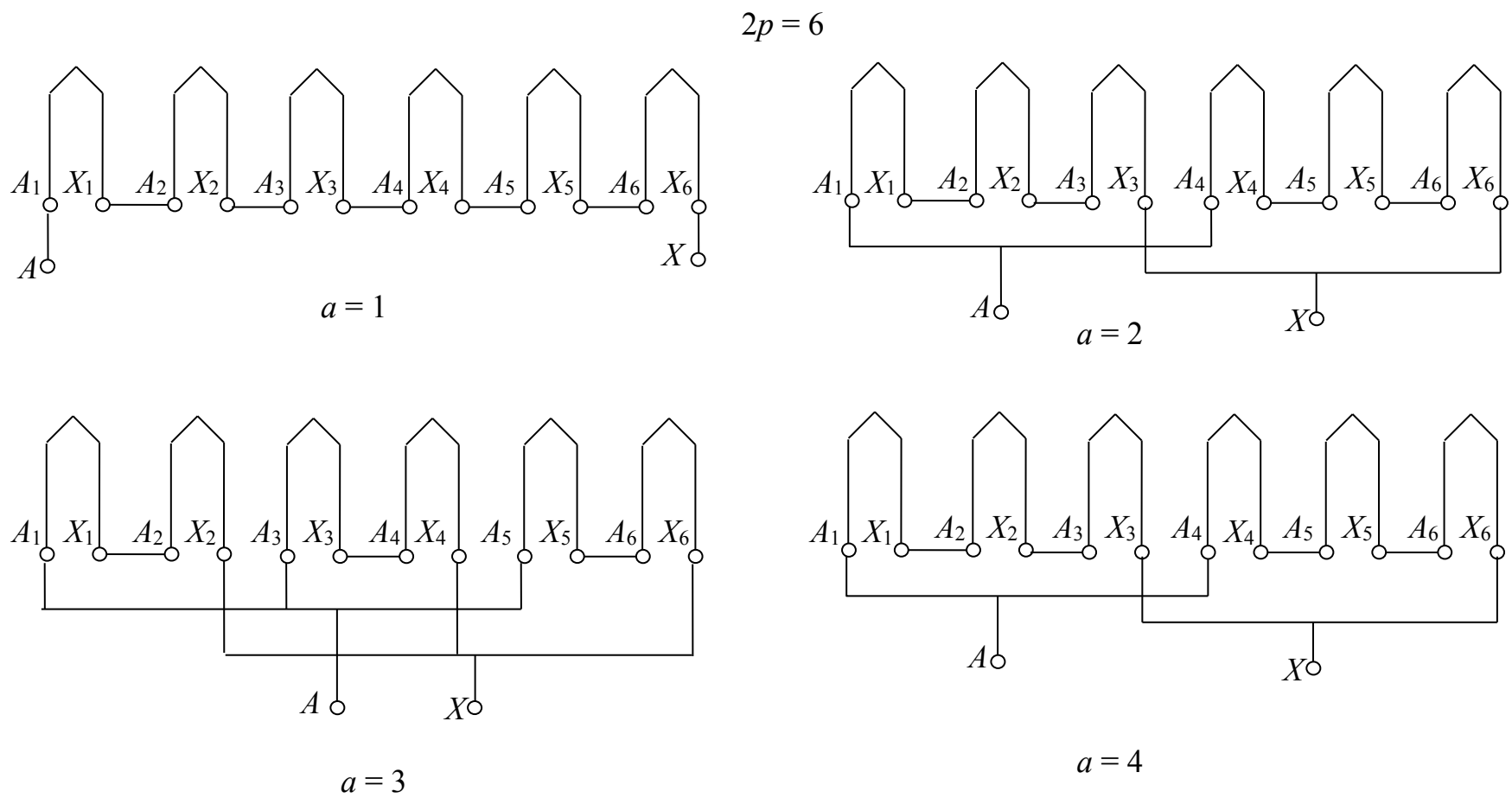


Рисунок 3.2 – Соединение катушечных групп фазы A для различного числа параллельных ветвей обмотки a и числа полюсов $2p = 6$

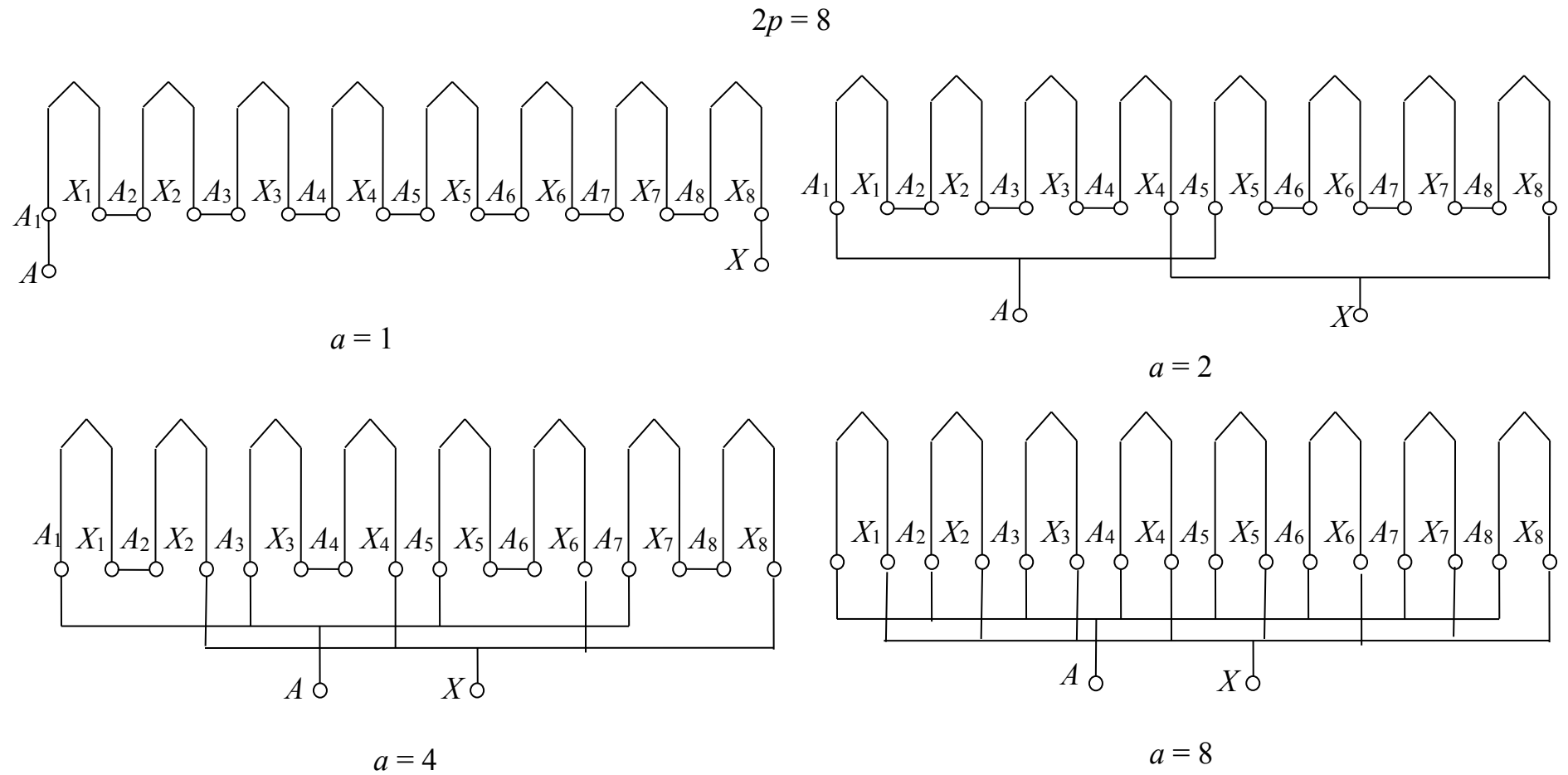


Рисунок 3.3 – Соединение катушечных групп фазы A для различного числа параллельных ветвей обмотки a и числа полюсов $2p = 8$

необходимо учитывать, что ЭДС фазы определяется векторной суммой ЭДС катушек, которые совпадают по фазе с пазовой ЭДС соответствующего паза.

Вектора катушек, входящих в фазные зоны с обозначениями A , B и C принимаются со знаком «+», а фазным зонам X , Y и Z – со знаком «-».

Векторная диаграмма ЭДС трехфазной обмотки строится согласно схеме ее соединения (звезда или треугольник).

Построение кривых распределения намагничивающих сил обмотки.

Распределив пазы по фазам необходим вычертить проводники обмотки в разрезе и поменять в них направление токов, т. е. установить токораспределение в верхнем и нижнем слоях обмотки с учетом положения звезды векторов тока фаз A , B и C для каждого из моментов времени t_1 и t_2 .

Векторная диаграмма для момента времени t_1 (ток в фазе A максимален) показана на рисунке 3., а. При этом мгновенные значения токов катушек в зонах A , B и C равны:

$$i_A = \frac{I_m}{a_1}; i_B = i_C = -\frac{I_m}{a_1}, \quad (3.8)$$

а в зонах X , Y и Z они равны этим величинам с обратным знаком, т. е.

$$i_X = -\frac{I_m}{a_1}; i_Y = i_Z = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m}{a_1}. \quad (3.9)$$

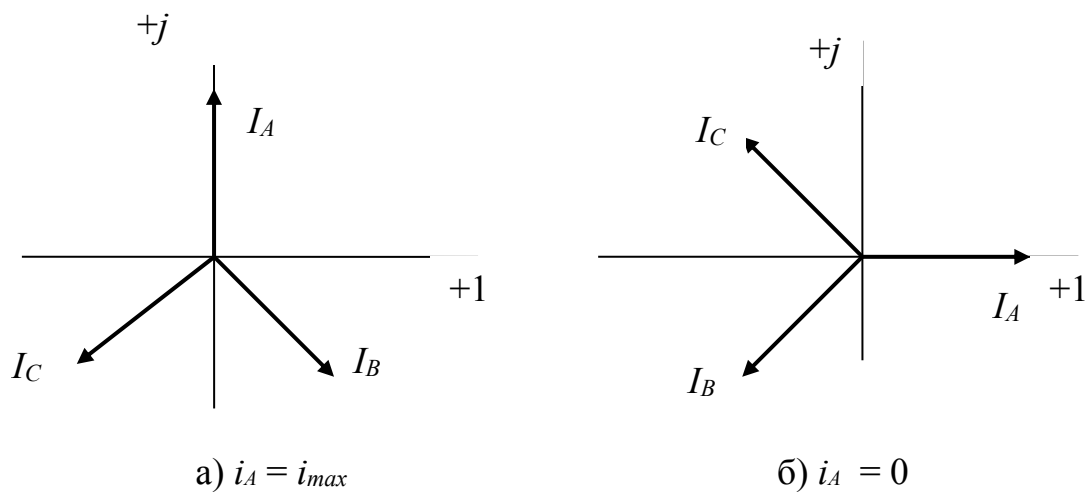


Рисунок 3.4 – Векторная диаграмма намагничивающих сил

Аналогично для момента времени t_2 (ток в фазе A равен нулю), показанного на рисунке 3.4, б.

$$i_A = 0; \quad i_B = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_m}{a_1}; \quad i_C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_m}{a_1}; \quad (3.10)$$

$$i_X = 0; \quad i_Y = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_m}{a_1}; \quad i_Z = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_m}{a_1}. \quad (3.11)$$

При вычерчивании кривой распределения намагничивающей силы вдоль окружности якоря откладываются в соответствующих направлениях ступеньки, равные величинам полных токов пазов с учетом нижнего и верхнего слоя паза и знаков протекающих токов.

Полученную кривую намагничивающей силы разделяют осью абсцисс таким образом, чтобы сумма площадей положительных полувольт (полюсов) равнялась сумме площадей отрицательных полувольт (полюсов), т. к. из-за непрерывности магнитных линий суммы потоков противоположных полярностей должны быть равны.

Аппаратура и материалы

Лабораторная работа выполняется без проведения экспериментов.

По таблице 3.1 студент получает вариант задания и выполняет лабораторную работу.

Методика и порядок выполнения работы

1. Выполнить расчет трехфазной двухслойной обмотки статора машины переменного тока.

В качестве исходных данных, согласно таблице 3.1, принять:

Z – число пазов;

$2p$ – число пар полюсов;

a_1 – число параллельных ветвей;

y – шаг обмотки;

схема соединения – звезда (Y) или треугольник (Δ).

Пример:

– число пазов $Z = 24$;

– число полюсов $2p = 4$;

– шаг обмотки $y = 5$;

– число параллельных ветвей $a = 2$;

– схема соединения – треугольник.

Обмотка распределенная, петлевая, с укороченным шагом, с целым числом пазов на полюс и фазу.

Определяем расчетные параметры:

а) полюсное деление τ и относительный шаг β :

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6,$$

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6} = 0,83;$$

б) число пазов на полюс и фазу q :

$$q = \frac{Z}{2pt} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2;$$

в) угол электрического сдвига соседних пазов:

$$\gamma = \frac{360 \cdot p}{Z} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30 \text{ эл. град.};$$

г) угол фазной зоны:

$$\alpha = q \cdot \gamma = 2 \cdot 30 = 60 \text{ эл. град.};$$

д) коэффициент укорочения:

Таблица 3.1 – Данные для расчета обмотки статора машины переменного тока

Последняя цифра шифра	Число пазов z	Предпоследняя цифра шифра																										
		0			1			2			3			4			5			6			7			8		
		$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y	$2p$	a_1	y
0, 1	36	2	2	14	2	2	13	4	4	7	4	4	6	6	3	5	6	3	4	4	2	7	4	2	6	6	3	5
2, 3	48	2	1	19	2	1	17	4	1	10	4	1	9	8	2	5	8	2	4	4	2	10	4	2	9	8	8	5
4, 5	54	2	1	20	2	1	19	6	2	7	6	2	6	2	2	21	2	2	20	6	3	7	6	3	6	6	6	7
6, 7	60	2	1	24	2	1	22	4	1	12	4	1	11	2	2	24	2	2	22	4	2	12	4	2	11	4	4	12
8	72	2	2	27	2	2	25	4	2	14	4	2	13	6	3	10	6	3	9	8	2	7	8	2	6	8	4	7

$$k_y = \sin \frac{\beta \cdot \pi}{2} = \sin \frac{0,83 \cdot \pi}{2} = 0,966;$$

е) коэффициент распределения:

$$k_p = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\gamma}{2}} = \frac{\sin \frac{60}{2}}{2 \sin \frac{30}{2}} = 0,966;$$

ж) обмоточный коэффициент:

$$k_{об} = k_p \cdot k_y = 0,966 \cdot 0,966 = 0,93.$$

2. Построить таблицу заполнения пазовых сторон.

Таблица содержит 2 строки (2 слоя) и 24 столбца (24 паза).

На каждый полюс приходится 6 пазов, на каждую фазу под одним полюсом – 2 паза.

Для обеспечения электрического сдвига 120 эл. град. между фазными обмотками, верхний слой (первая строка таблицы) распределяется в следующем порядке:

$$AA - ZZ - BB - XX - CC - YY - \text{и т. д.}$$

Распределение пазов нижнего слоя (2-я строка таблицы) выполняется аналогично, но со сдвигом влево (в сторону укорочения шага) относительно верхнего слоя на $\tau - y = 6 - 5 = 1$ паз.

3. Выполняем развернутую схему обмотки (рис. 3.5)

Пазы развернутой схемы располагаются снизу под соответствующими ячейками таблицы распределения пазовых сторон и нумеруются от 1 до 24.

Каждая фазная обмотка имеет 4 катушечные группы. Например, для фазы A : $A_1 X_1$, $A_2 X_2$, $A_3 X_3$ и $A_4 X_4$. Так как обмотка состоит из 2-х параллельных ветвей ($a = 2$), то катушечные группы в пределах одной фазы

соединяются согласно рисунку 1 а: $A_1 X_1$ и $A_2 X_2$, а также $A_3 X_3$ и $A_4 X_4$ – последовательно, а между собой – параллельно ($A_1 X_1 A_2 X_2$ и $A_3 X_3 A_4 X_4$).

Аналогично соединяются катушечные группы других фаз.

В соответствии со схемой соединения фазных обмоток (треугольник), фазные зажимы соединяются: A с Z ; B с X ; C с Y .

<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>	<i>Y</i>
<i>A</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>	<i>Y</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Z</i>	<i>Z</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>	<i>Y</i>	<i>A</i>

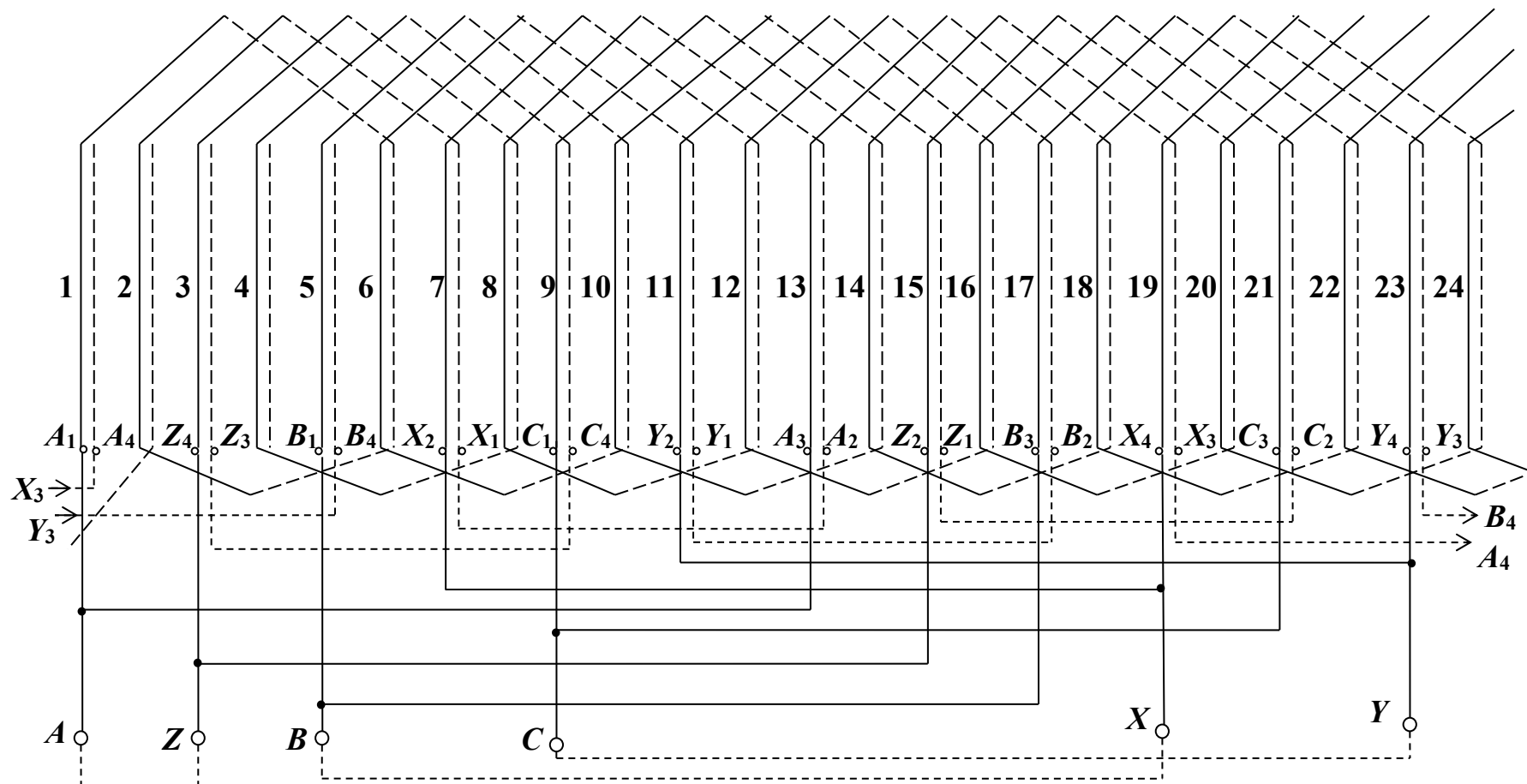


Рисунок 3.5 – Таблица распределения пазовых сторон

В соответствии со схемой соединения фазных обмоток (треугольник), фазные зажимы соединяются: A с Z ; B с X ; C с Y .

4 Построить звезду пазовых ЭДС и векторную диаграмму фазных ЭДС.

На рисунке 3.6 показана векторная диаграмма катушечных сторон, лежащих в пазах с 1 по 24. Для простоты вектора пронумерованы без указания ЭДС, то есть $\dot{E}_1 = 1$ и т. п. Вектора сдвинуты друг относительно друга на угол $\gamma = 30$ эл. град. Поскольку $2p = 4$, то каждый вектор имеет два обозначения, соответствующие ЭДС катушечных сторон, лежащих под разными парами полюсов (1 и 13, 2 и 14 и т. п.).

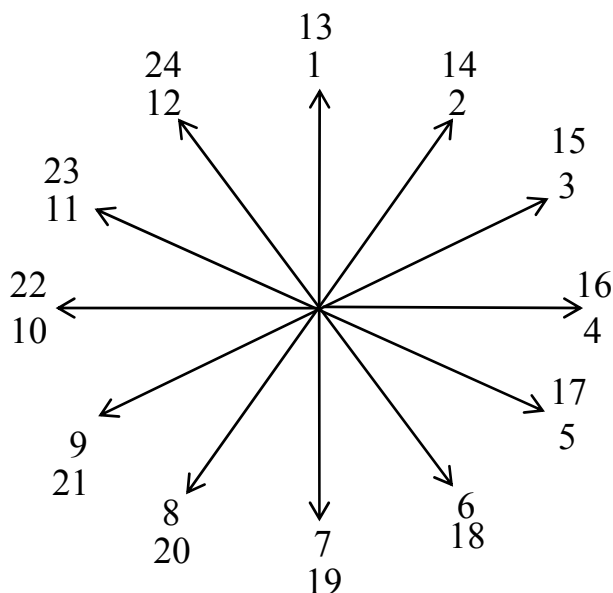


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма ЭДС катушечных сторон

5. Построение векторной диаграммы фазных ЭДС (рисунок 3.7).

Вектор ЭДС каждой фазы строится согласно звезде пазовых ЭДС и схеме обмотки. ЭДС каждой фазы определяется величиной ЭДС параллельной ветви (любой).

Таким образом,

$$\dot{E}_A = \dot{E}_{A1X1} + \dot{E}_{A2X2} = \dot{E}_1 - \dot{E}_6 + \dot{E}_2 - \dot{E}_7 + \dot{E}_{13} - \dot{E}_8 + \dot{E}_{12} - \dot{E}_7;$$

$$\dot{E}_B = \dot{E}_{B1X1} + \dot{E}_{B2X2} = \dot{E}_5 - \dot{E}_{10} + \dot{E}_6 - \dot{E}_{11} + \dot{E}_{17} - \dot{E}_{12} + \dot{E}_{16} - \dot{E}_{11};$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_{C1X1} + \dot{E}_{C2X2} = \dot{E}_9 - \dot{E}_{14} + \dot{E}_{10} - \dot{E}_{14} + \dot{E}_{21} - \dot{E}_{16} + \dot{E}_{20} - \dot{E}_{15}.$$

Вектора пазов, соответствующих зажимам A , B и C берутся со знаком «+», зажимам X , Y и Z – со знаком «-».

На рисунке 3.7 размеры векторов для удобства построения уменьшены в 3 раза по сравнению с рисунком 3.6.

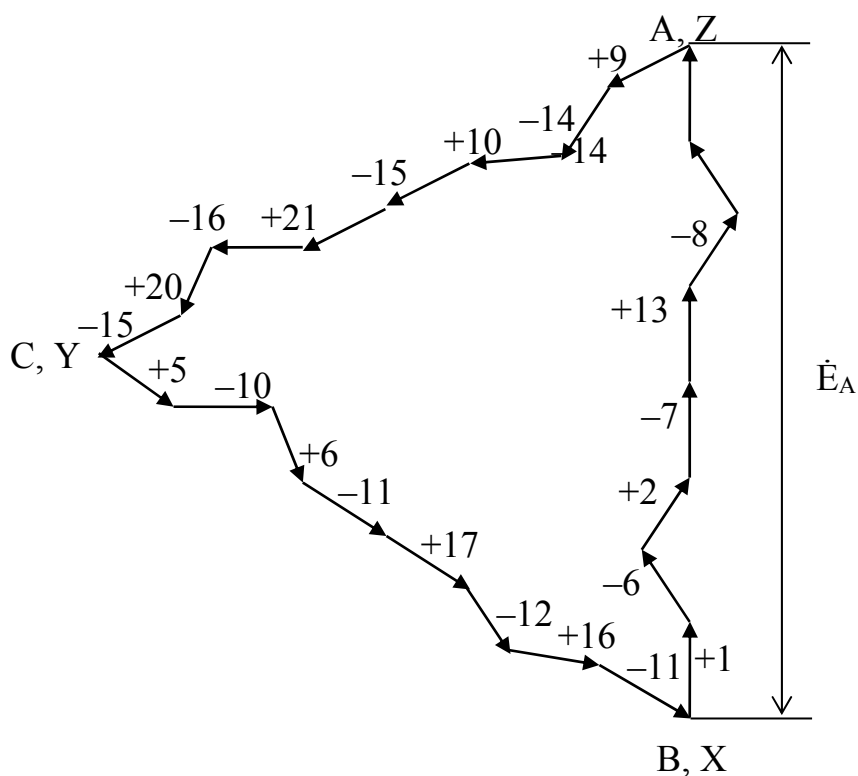


Рисунок 3.7 – Векторная диаграмма фазных ЭДС

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Структура отчета по лабораторной работе должна соответствовать пунктам задания. Отдельные части должны иметь заголовки, комментарии и выводы.

3. Развернутая схема обмотки должна быть выполнена на миллиметровой бумаге.

4. Звезда пазовых ЭДС и векторные диаграммы фазных ЭДС выполняются в произвольном масштабе.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

гармонике:

Вопросы для защиты работы

1. Какие типы обмоток статора машин переменного тока вы знаете?
2. Каковы основные расчетные элементы обмотки статора?
3. Объясните смысл обмоточного коэффициента.
4. Как выполнить таблицу заполнения пазовых сторон обмотки?
5. Как построить векторную диаграмму фазных ЭДС обмотки?

4 Исследование трехфазного синхронного генератора

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в синхронном генераторе при различных режимах его работы, освоение способов опытного определения характеристик генератора.

Актуальность: формирование компетенций ПК-3, ПК-4, ПК-5

Содержание работы:

Снятие и построение:

- а) характеристики холостого хода;
- б) внешней характеристики генератора.

Теоретическое обоснование

Характеристики синхронного генератора определяют зависимость между напряжением на зажимах якоря U , током якоря I и током возбуждения I_e при $f = f_n$ или $n = n_n$ и $\varphi = const$ в установившемся режиме

работы. Эти характеристики дают наглядное представление о ряде основных свойств синхронных генераторов.

Характеристики могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм, и по данным соответствующих опытов. Характеристики явнополюсных и неявнополюсных генераторов в основном одинаковы.

Характеристика холостого хода представляет зависимость ЭДС E_0 , наводимой в обмотках якоря генератора при холостом ходе, от тока возбуждения I_e при постоянной частоте вращения ротора:

$$E_0 = f(I_e), \text{ при } I_a = 0, n = \text{const}.$$

Внешняя характеристика представляет зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянных значениях $\cos \varphi$ (в работе он принимается равным 1), тока возбуждения и частоты вращения

$$U = f(I_a), \text{ при } \cos \varphi = 1, I_e = \text{const}, n = \text{const}.$$

Регулировочная характеристика представляет зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянных значениях напряжения на зажимах генератора, частоты вращения ротора, $\cos \varphi = 1$:

$$I_e = f(I_a), U = U_n = \text{const}, \cos \varphi = 1, n = \text{const}.$$

Индукционная характеристика представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора U от тока возбуждения I_e при постоянных токе статора I_a , частоте вращения n и коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi$, т.е.:

$$U = f(I_e), \text{ при } I_a = \text{const}, \cos \varphi = 0, n = \text{const}.$$

Аппаратура и материалы

1. Испытательный стенд серво-двигателя.
2. Трехфазная многофункциональная машина 1 кВт.
3. Выключатель четырехполюсный.
4. Вольтметр.

5. Частотомер.
6. Аналого-цифровой мультиметр.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.
2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.
3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.
4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.
5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.
6. Все необходимые переключения производить при выключенном напряжении. Любое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем.
7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.
8. При неисправности в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателю.
9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. Опыт снятия характеристики холостого хода синхронного генератора.
- Собрать схему для пуска синхронного генератора.

Запустите тормозное устройство и установите частоту вращения его вала, необходимую для синхронного генератора (1400 об/мин).

Устанавливая токи возбуждения, указанные в таблице 4.1, измерить напряжение холостого хода генератора U_2 .

Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4. 1 – Характеристика холостого хода

I_e, A	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
U_2, B								

По данным таблицы 4.2 построить характеристику холостого хода генератора.

2. Зависимость напряжения генератора от частоты вращения при постоянном токе возбуждения

Запустить тормоз и установить частоту вращения, указанную в таблице 4.2.

Величину тока возбуждения взять из таблицы 4.2.

Снять показания напряжения U_2 . Результаты измерений занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Зависимость напряжения от частоты вращения

$I_e = 3 A$	$n, \text{ об/мин}$	500	750	1000	1250	1400
	U_2, B					
$I_e = 4 A$	$n, \text{ об/мин}$					
	U_2, B					
$I_e = 5 A$	$n, \text{ об/мин}$					
	U_2, B					

По результатам таблицы 4.2 построить зависимости $U_2 = f(n)$ при различных значениях тока возбуждения.

3. Снятие внешней характеристики синхронного генератора.

Запустить тормозное устройство и установить частоту вращения синхронного генератора 1400 об/мин и ток возбуждения $I_e = 4 A$, а затем $I_e = 5 A$.

Меняя сопротивление, измерить ток I , напряжение U , и мощность S генератора, результаты измерений занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Внешняя характеристика генератора

Ток возбуждения	№ опыта	I , А	U , В	S , ВА
$I_{\phi} = 4$ А	1...6			
$I_{\phi} = 5$ А				

По результатам таблицы 4.3 построить внешние характеристики генератора при различных значениях тока возбуждения.

Вопросы для защиты работы

1. Поясните физический смысл коэффициента насыщения магнитной системы ГПТ.
2. Почему характеристика холостого хода ГПТ имеет нелинейный характер, а характеристика короткого замыкания – прямая линия?
3. Поясните физический смысл внешней характеристики.
4. Поясните физический смысл регулировочной характеристики.
5. В чем физический смысл реакции якоря генератора постоянного тока и каким образом можно оценить ее количественное значение по характеристикам генератора?

5 Исследование трехфазного синхронного двигателя

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в синхронном двигателе при различных режимах его работы, построение V-образных характеристик.

Актуальность: формирование компетенций ПК-3, ПК-4, ПК-5., ПК-6.

Содержание работы:

- а) подключение и запуск синхронного двигателя;

- б) нагрузочные характеристики синхронного двигателя;
- в) V- образные характеристики.

Теоретическое обоснование

Рабочими характеристиками синхронного двигателя (СД) называется зависимость $M_{эм}$, P_1 , I , $\cos\varphi$ и η от P_2 – мощности на валу СД.

Рабочие характеристики снимаются при $\omega_1 = \text{const}$ ($n_2 = \text{const}$), $U_1 = \text{const}$, $i_x = \text{const}$.

Момент на валу двигателя $M = P_2 / \Omega_1$ – меняется прямо пропорционально полезной мощности P_2 , т.к. $\Omega_1 = \text{const}$.

Потребляемая двигателем мощность

$$P_1 = P_2 + \Sigma p, \quad (5.1)$$

где Σp – суммарные потери в двигателе, которые состоят из постоянных (механические, магнитные, на возбуждение) и переменных потерь. С ростом P_2 растут переменные потери, поэтому мощность P_2 растет не по прямой, а быстрее.

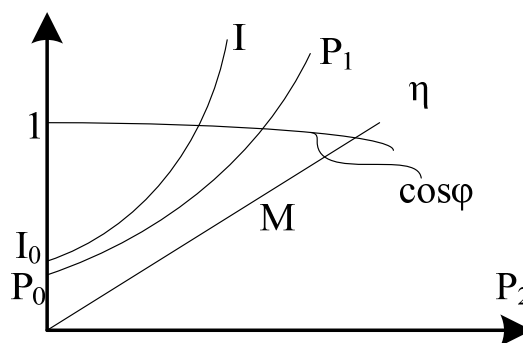


Рисунок 5.1 – Рабочие характеристики СД

Зависимость КПД $\eta = f(P_2)$ – имеет вид, как у трансформатора. Максимальное значение η определяется равенством постоянных и переменных потерь.

С ростом мощности P_2 несколько падает коэффициент мощности $\cos\varphi$, т.к. растет ЭДС рассеяния $E_{\sigma a}$ при постоянном токе возбуждения i_f .

Ток статорной обмотки

$$I = \frac{P_1}{mU \cos \varphi}. \quad (5.2)$$

Так как $\cos \varphi$ падает, то I растет быстрее, чем потребляемая мощность P_1 .

V-образные кривые СД строятся также, как и для СГ и представляют собой зависимость $I = f(i_f)$ при $P = \text{const}$.

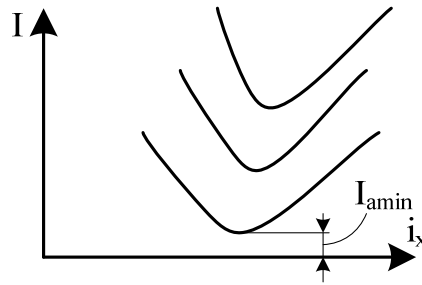


Рисунок 5.2 – V-образные кривые СД

Минимум каждой кривой соответствуют $I = I_a$; в отличие от СГ V-образная кривая СД не может коснуться оси i_f и I_{0min} соответствует мощности сети P_1 , идущей на покрытие потерь холостого хода.

Форма V-образных кривых зависит от продольного реактивного сопротивления x_d . Чем меньше x_d , тем острее V-образная кривая, т.е. тем больший ток течет в ОЯ при одном и том же Δi_f

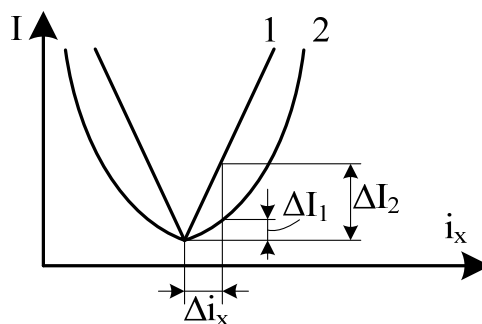


Рисунок 5.3 – Зависимость V-образных кривых от X_d

$$x_{d1} < x_{d2}; \quad (5.3)$$

$$I = \frac{\Delta U}{jx_d}; \quad (5.4)$$

$$\Delta U = E - U . \quad (5.5)$$

$$I_a = const, \cos \varphi = 0, n = const .$$

Аппаратура и материалы

1. Испытательный стенд серво-двигателя.
2. Трехфазная многофункциональная машина 1 кВт.
3. Выключатель четырехполюсный.
4. Вольтметр.
5. Частотомер.
6. Аналого-цифровой мультиметр.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.
2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.
3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.
4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.
5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.
6. Все необходимые переключения производить при выключенном напряжении. Любое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем.
7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. При неисправности в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателя.

9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. Подключение и запуск:

а) собрать схему, представленную на рисунке 5.1. Монтажный план представлен в компьютерной программе;

б) установить на тормозном устройстве "Torque Control". Подать напряжение на обмотку статора синхронного двигателя, не включая возбуждения. Когда двигатель начнет вращаться, подать возбуждение на обмотку ротора.

2. Нагрузочные характеристики синхронного двигателя.

а) нагрузить двигатель тормозом в соответствии с величинами моментов, указанных в таблице 5.1;

б) для трех значений тока возбуждения (4 А, 6 А, 8А) снять значения тока и частоты вращения двигателя, записать их в таблицу 5.1.

г) при надписи на измерительном приборе «ausser Tritt» двигатель отключить;

в) по результатам измерений построить зависимости $I = f(M)$ и $n = f(M)$.

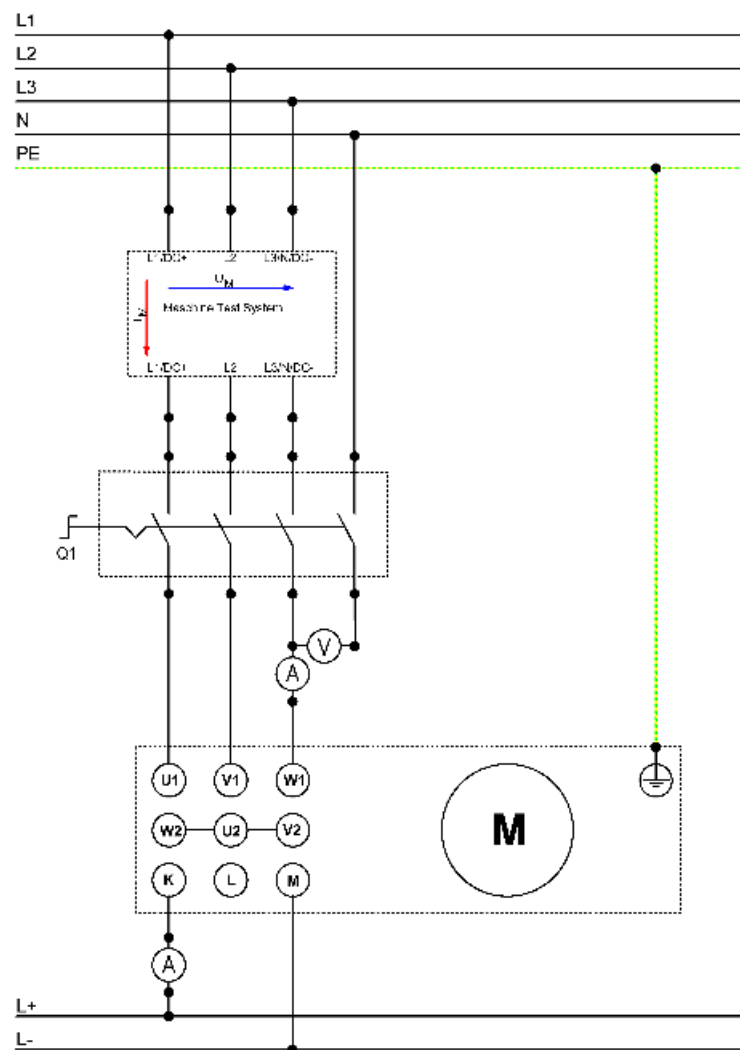


Рисунок 5.1 – Схема запуска синхронного двигателя

Таблица 5.1 – Нагрузочные характеристики синхронного двигателя

$I_g = 4A$	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	3	3,5	4	4,5	5
	$I, \text{А}$					
	$n, \text{об/мин}$					
$I_g = 6A$	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	3	3,5	4	4,5	5
	$I, \text{А}$					
	$n, \text{об/мин}$					
$I_g = 8A$	$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	3	3,5	4	4,5	5
	$I, \text{А}$					
	$n, \text{об/мин}$					

3. V-образные характеристики:

а) собрать схему, представленную на рисунке 5.1. Монтажный план представлен в компьютерной программе;

б) установить на тормозном устройстве "Torque Control". Подать напряжение на обмотку статора синхронного двигателя, не включая возбуждения. Когда двигатель начнет вращаться, подать возбуждение на обмотку ротора.

в) нагрузить двигатель с помощью тормозного устройства в соответствии со значениями тормозного момента, указанного в таблице 5.2.

г) измерить ток двигателя при различных токах возбуждения, указанных в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – V-образные характеристики

$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	$I_{\text{в}}, \text{А}$	2	3	4	5	6
0,6	$I, \text{А}$					
1,2	$I, \text{А}$					
1,8	$I, \text{А}$					

Построить V-образные характеристики: $I = f(I_{\text{в}})$ при различных значениях тормозного момента.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.

4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.

5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Поясните принцип действия двигателя постоянного тока.
2. Объясните порядок пуска двигателя постоянного тока.
3. Почему нельзя допускать обрыва цепи возбуждения двигателя?
4. Поясните физический смысл рабочих характеристик двигателя.
5. Изложите методику построения V-образных характеристик синхронных двигателей.

6 Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором (подключение звездой и треугольником)

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в асинхронном двигателе в нормальных режимах его работы, построение рабочих характеристик двигателя.

Актуальность: формирование компетенций ПК-5, ПК-6.

Содержание работы:

1. Запись паспортных данных асинхронного двигателя (АД).
2. Выполнение опыта холостого хода.
5. Испытание работы АД под нагрузкой. Расчет рабочих характеристик

АД

Теоретическое обоснование

Схема замещения АД отражает все основные процессы, происходящие в нем, и представляет собой основу для изучения режимов работы АД.

Т-образная схема замещения АД представлена на рисунке 6.1

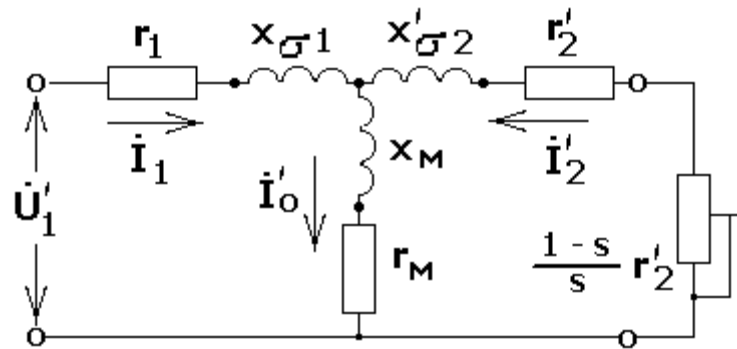


Рисунок 6.1 – Т-образная схема замещения АД

Для определения параметров схемы замещения с АД проводятся опыты холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ).

По результатам опыта холостого хода определяются следующие величины:

- а) ток холостого хода
- б) напряжение холостого хода
- в) мощность холостого хода
- г) коэффициент мощности холостого хода.

Испытание АД под нагрузкой производится в целях определения рабочих характеристик двигателя. По результатам опыта определяются следующие величины:

- а) ток статора I_1 ;
- б) напряжение, подводимое к статору U_1 ;
- в) подводимая мощность P_1 ;
- г) частота вращения ротора n ;
- д) вращающий момент на валу двигателя M_2 .

Скольжение вычисляется по формуле:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\%, \quad (6.1)$$

где n_1 – частота вращения поля статора;

... n – частота вращения ротора.

Частота вращения поля статора:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \text{ об/мин}, \quad (6.2)$$

где p – число пар полюсов.

Полезная мощность на валу двигателя определяется по формуле:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega, \text{ Вт} \quad (6.3)$$

где ω – угловая скорость ротора, которая вычисляется по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f}{60}, \text{ рад/с}. \quad (6.4)$$

Коэффициент полезного действия двигателя определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%. \quad (6.5)$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}. \quad (6.6)$$

Аппаратура и материалы

1. Сервомотор мощностью 1000 В.
2. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 1000 Вт – CE2672-5G.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.

2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.

3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.

4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.

7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. При неисправностях в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателя.

9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. Запуск асинхронного двигателя, подключенного по схеме звезда.

1.1 Установить тормозное устройство в положение «Регулирование крутящего момента».

1.2 Собрать схему подключения двигателя, представленную на рис. 6.2.

1.3 Включить напряжение питания и запустить двигатель.

1.4 С помощью тормозного устройства установить номинальную частоту вращения двигателя.

1.5 Измерить напряжение холостого хода U_0 и ток I_0 .

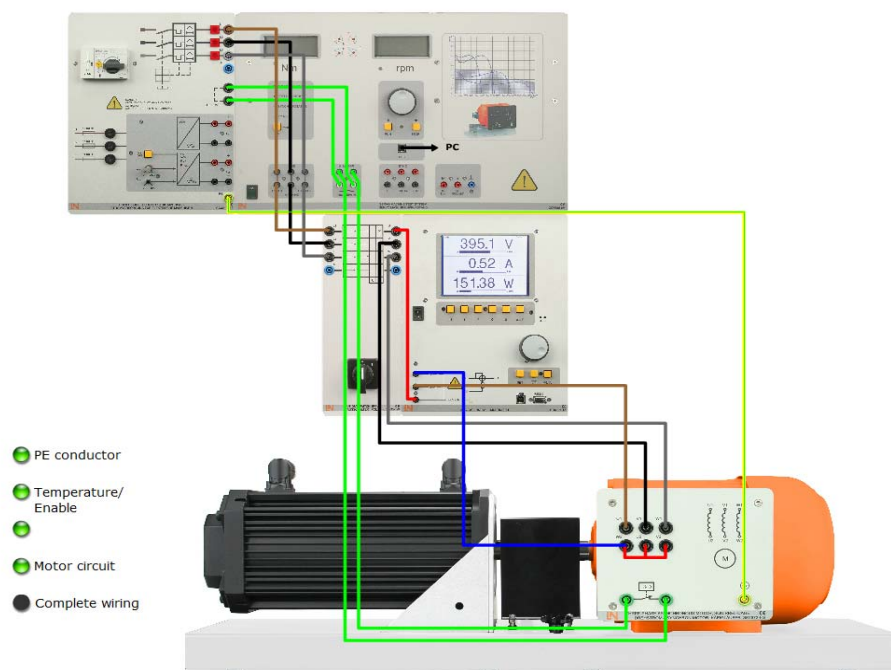


Рисунок 6.2 – Монтажный план подключения асинхронного двигателя по схеме «звезда»

2. Рабочие характеристики.

Изменяя частоту вращения асинхронного двигателя от 0 до n_H с помощью тормозного двигателя, измерить ток обмотки статора I_1 , напряжение обмотки статора U_1 , мощность, потребляемую двигателем P_1 , момент на валу двигателя M_2 и занести в таблицу 1.

Рассчитать мощность на валу двигателя P_2 , коэффициент мощности $\cos\varphi$, КПД η , скольжение s . Занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и расчетов

Частота вращения ротора n , об/мин	Измеренные величины				Рассчитанные величины			
	I_1 , А	U_1 , В	P_1 , Вт	M_2 , Н·м	s , о.е.	$\cos\varphi$	η , %	P_2 , Вт
1-6								

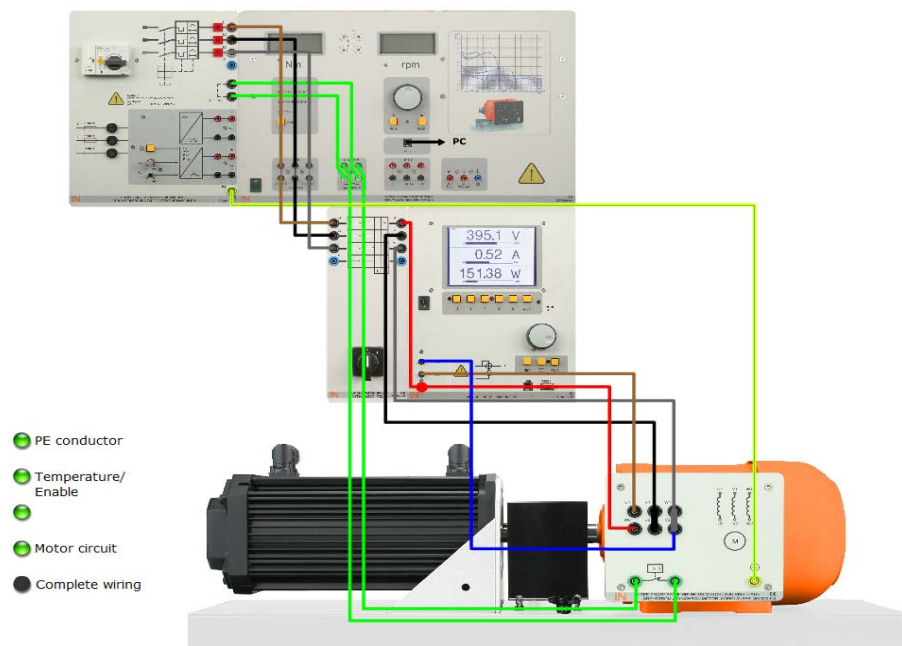


Рисунок 6.4 – Монтажный план подключения асинхронного двигателя по схеме «треугольник»

3 Выполнить выше описанные опыты с асинхронным двигателем, подключенным по схеме «треугольник».

Для проведения опытов собрать схему, представленную на рисунке 6.4.

По результатам таблицы 6.1 построить рабочие характеристики двигателя: $s = f(P_2)$; $n = f(P_2)$; $P_1 = f(P_2)$; $\cos \varphi = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$; $I_1 = f(P_2)$; $M_2 = f(P_2)$ для схемы подключения обмотки двигателя «звезда» и «треугольник».

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.

4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.

5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Принцип действия асинхронного двигателя. Понятие скольжения.
2. Методика проведения опыта холостого хода. Характеристики холостого хода.
4. Определение параметров Т-образной схемы замещения АД по данным опытов ХХ и КЗ. Физический смысл параметров схемы замещения.
5. Физический смысл рабочих характеристик АД.
6. Методика снятия опытным путем рабочих характеристик двигателя

7 Исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя с помощью программного обеспечения «ActiveDrive/Active ASM»

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в асинхронном двигателе в нормальных режимах его работы, построение рабочих характеристик двигателя с помощью программного обеспечения «ActiveDrive/Active ASM»

Актуальность: формирование компетенций ПК-5, ПК-6.

Аппаратура и материалы

1. Сервомотор мощностью 1000 В.
2. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 1000 Вт – CE2672-5G.

3. Программное обеспечение «ActiveDrive/Active ASM»

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.
2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.
3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.
4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.
5. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.
8. При неисправностях в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателя.
9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Методика и порядок выполнения работы

1. Собрать схему, представленную на рисунке 7.1
2. Установить тормозное устройство в положение «PC mode»
3. Запустить программное обеспечение «ActiveServo».
4. Выбрать режим работы «Automatic speed control». Момент, развиваемый тормозным устройством, будет изменяться скачками на протяжении 20 шагов до тех пор, пока скорость вращения не снизится до 1200 об/мин.

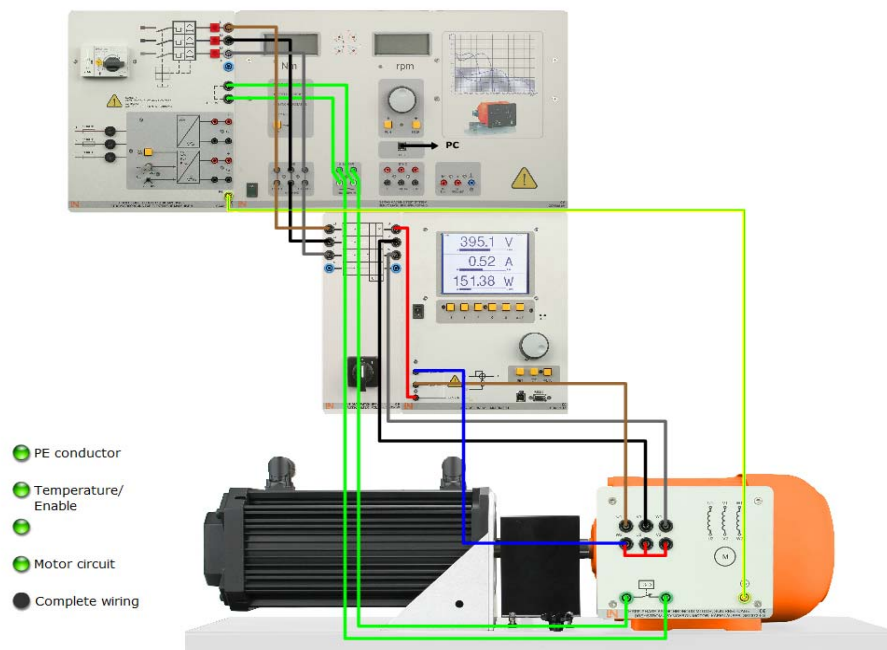


Рисунок 7.1 – Монтажный план подключения асинхронного двигателя по схеме «звезда»

5. Снять нагрузочные характеристики двигателя, подключенного звездой и треугольником.

6. Шкалу графиков установить так, как приведено в шаблонах на рисунке 7.2 и 7.3.

Для того чтобы изменить число шагов, нужно заранее в окне программы «ActiveServo» зайти в подменю «Setting» – «Presets» – «Ramp».

2.6 После завершения измерений экспортировать полученные данные и скопировать в соответствующий шаблон.

2.7 Используя график, определить максимальный коэффициент полезного действия.

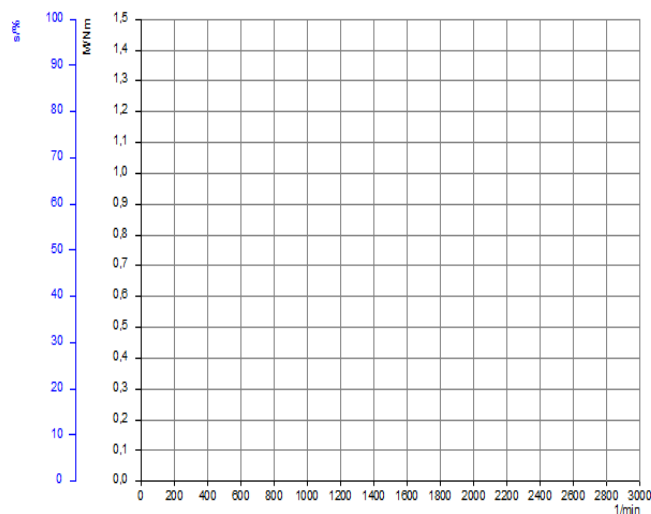
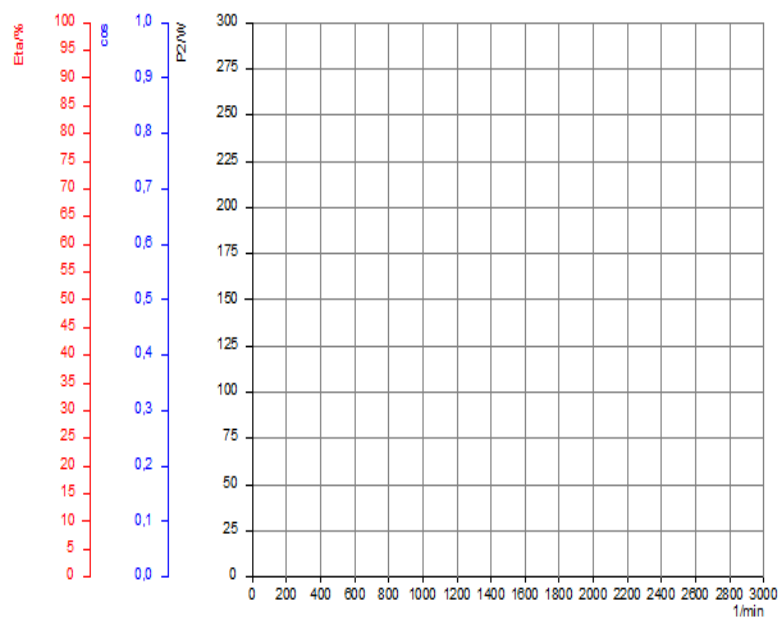


Рисунок 7.2 – Шаблон графика зависимости $M=f(n)$ и $s=f(n)$



7.3 Шаблон графика зависимости $P_2=f(n)$; $\eta=f(n)$; $\cos\varphi=f(n)$

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.
5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Какая характеристика асинхронного двигателя называется скоростной ?
2. Физический смысл скоростной характеристики.
3. Объяснить зависимость $\eta = f(n)$. При каких условиях получается максимальный КПД?

8 Исследование генератора постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в генераторе постоянного тока независимого возбуждения, овладение методами испытаний генератора и обработки полученных данных, оценка испытуемого генератора в отношении его эксплуатационных характеристик.

Актуальность: формирование компетенций ПК-5, ПК-6.

Содержание работы:

1. Опыт холостого хода (опыт ХХ), построение соответствующей характеристики, по которой определяется степень насыщения магнитной системы машины.

2.Снятие опытным путем и построение внешней характеристики генератора.

3.Снятие опытным путем и построение регулировочной характеристику генератора.

Теоретическая часть

Генератор постоянного тока имеет независимое возбуждение, т.е. его обмотка возбуждения электрически не соединена с обмоткой якоря и подключена к постороннему источнику постоянного тока.

Свойства генератора анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают зависимость между основными величинами, определяющими работу генератора. Такими основными величинами являются: напряжение на зажимах U , ток возбуждения $I_{\text{в}}$, ток якоря или ток нагрузки I_a .

Основные характеристики генератора определяются при $n = n_n = \text{const}$.

Существует пять основных характеристик генератора: холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ), внешняя, регулировочная, нагрузочная.

Характеристика холостого хода позволяет судить о насыщении магнитной цепи машины при номинальном напряжении.

Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения – зависимость напряжения генератора от тока якоря $U = f(I_a)$ при $I_{\text{в}} = \text{const}$. При увеличении I_a напряжение U несколько падает по двум причинам: вследствие падения напряжения в цепи якоря $I_a \cdot R_a$ и уменьшения ЭДС E_a ввиду уменьшения потока под воздействием поперечной реакции якоря. При дальнейшем увеличении I_a напряжение начинает падать быстрее, так как под воздействием реакции якоря поток уменьшается и рабочая точка смещается на более круто падающий участок кривой намагничивания.

Регулировочная характеристика, $I_{\text{в}} = f(I_a)$ при $U = \text{const}$, показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора не менялось. С увеличением I_a ток $I_{\text{в}}$ необходимо

несколько увеличивать, чтобы компенсировать влияние падения напряжения $I_a \cdot R_a$ и реакции якоря.

Все характеристики генератора, изображенные в относительных единицах, являются более наглядными, чем изображенные в абсолютных единицах.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.

2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.

3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.

4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.

5. При работе с регулируемым источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.

6. Все необходимые переключения производить при выключенном напряжении. Любое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем.

7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. При неисправностях в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателя.

9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Аппаратура для исследования

1. Источник питания (цепь возбуждения) 220 В.
2. Тормозное устройство – серводвигатель «Speed Control».
3. Регулятор возбуждения.
4. Генератор постоянного тока независимого возбуждения.

Методика и порядок выполнения работы

1. Опыт холостого хода

В опыте холостого хода снимается характеристика холостого хода, которая представляет собой зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при разомкнутой обмотке якоря Я1-Я2. При этом ЭДС генератора равна напряжению на якоре.

Порядок снятия характеристики ХХ следующий:

- 1.1 Собрать схему, представленную на рисунке 8.1.
- 1.2 Запустить генератор.
- 1.3 Запустить тормозное устройство (привод) с частотой 2000 об/мин.
- 1.4 Регулятором возбуждения изменять ток возбуждения, устанавливая указанные в таблице 8.1 значения.
- 1.5 Измерить значение напряжения генератора U_e при каждом значении скорости вращения, указанного в таблице 8.1, при различных значениях тока возбуждения.

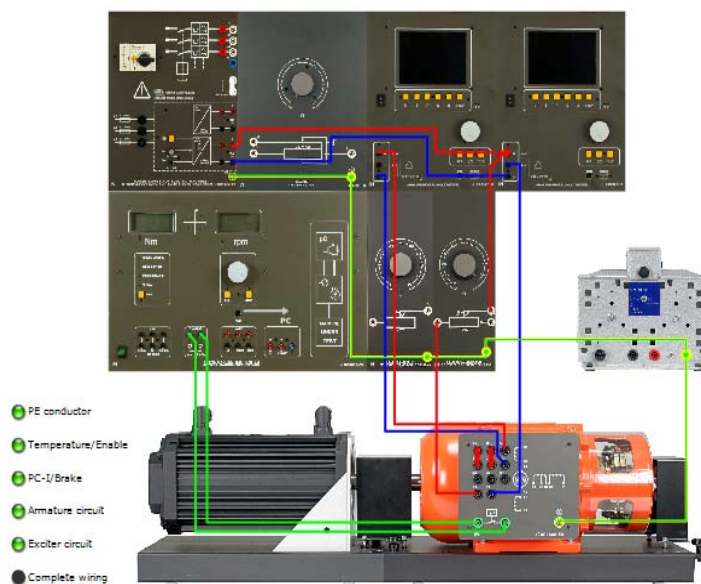


Рисунок 8.1 – Монтажная схема для снятия опыта холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения

При пересчете именованных величин в относительные необходимо принять:

- за единицу напряжения – номинальное напряжение U_n .
- за единицу тока возбуждения – ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению в режиме холостого хода I_{60} .
- за единицу тока якоря – номинальный ток $I_{ан}$.

Таблица 8.1 – Характеристика холостого хода

	$I_B = 0$ мА	$I_B = 50$ мА	$I_e = 70$ мА	$I_e = 90$ мА	$I_e = 120$ мА	$I_e = 160$ мА	$I_e = 180$ мА
n , об/мин	U_e , В	U_e , В	U_e , В	U_e , В	U_e , В	U_e , В	U_e , В
2000							
1800							
1600							
1400							
1200							

Таким образом

$$E_0^* = E_0 / U_n \text{ о.е.}$$

$$I_e^* = I_e / I_{e0} \text{ о.е.}$$

По данным таблицы 8.1 строится характеристика холостого хода в относительных единицах.

2. Снятие внешней характеристики

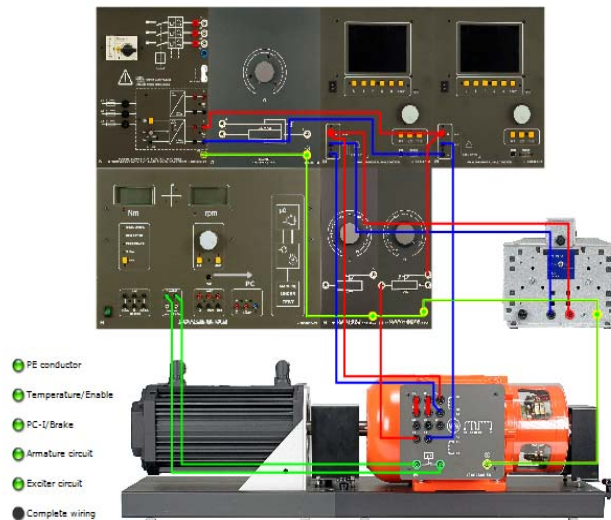


Рисунок 8.2 – Монтажная схема для снятия внешней характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на якоре от тока якоря при постоянном токе возбуждения и постоянной частоте вращения. Характеристика снимается следующим образом:

- 2.1 Собрать схему, представленную на рисунке 8.2.
- 2.2 Запустить приводной двигатель с частотой 2000 об/мин.
- 2.3 Изменяя сопротивление нагрузки, снять значения тока якоря I_a и напряжения U_a при постоянном токе возбуждения: 50 % $I_{вн}$; 100 % $I_{вн}$.

Полученные значения занести в таблицы 8.2 и 8.3 соответственно.

Рассчитать мощность на выходе генератора и занести в таблицы 8.2 и 8.3.

$$P_2 = I_a \cdot U_\Gamma$$

Таблица 8.2 – Внешняя характеристика при $I_e = 90$ мА

I_a , А	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
U_z , В						
P_2 , Вт						

Таблица 8.3 – Внешняя характеристика при $I_e = 180$ мА

I_a , А	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
U_z , В						
P_2 , Вт						

По данным таблиц 8.2 и 8.3 строится внешняя характеристика генератора $U_G = f(I_a)$.

3. Снятие регулировочной характеристики

Регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от якоря при постоянном значении напряжения и постоянной частоте вращения.

Порядок снятия характеристики:

а) при номинальной частоте вращения в режиме холостого хода генератор возбуждается до некоторого значения напряжения, которое задается преподавателем. Ток якоря увеличивается до номинального значения. При каждом конкретном значении I_a ток возбуждения с помощью регулятора возбуждения изменяется таким образом, чтобы напряжение оставалось постоянным и равным заданному значению. Величины I_e и I_a заносятся в таблицу 4

Таблица 8.4 – Регулировочная характеристика

Измеряемые величины	№ опытных точек					
	1	2	3	4	5	6
I_e , мА						
I_a , А						

По данным таблицы 8.4 строится график регулировочной характеристики.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.
5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Поясните физический смысл коэффициента насыщения магнитной системы ГПТ.
2. Почему характеристика холостого хода ГПТ имеет нелинейный характер.
3. Поясните физический смысл внешней характеристики.
4. Поясните физический смысл регулировочной характеристики.
5. В чем физический смысл реакции якоря генератора постоянного тока, и каким образом можно оценить ее количественное значение по характеристикам генератора?

9 Исследование двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в двигателе постоянного тока, освоение методов его испытаний и обработки полученных данных, оценка эксплуатационных характеристик испытуемого двигателя.

Актуальность: формирование компетенций ПК-5, ПК-6.

Содержание работы:

1. Измерение сопротивления цепи якоря и обмотки возбуждения.
2. Снятие и построение нагрузочных характеристик двигателя.
3. Определение коэффициента полезного действия двигателя.
4. Построение рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения с применением программного обеспечения «ActiveDrive/DCMA».

Теоретическое обоснование

По способу возбуждения двигателя постоянного тока подразделяются на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. В данной работе рассматриваются процессы, происходящие в двигателях постоянного тока параллельного возбуждения, где ток нагрузки I равен сумме тока якоря I_a и тока обмотки возбуждения I_g :

$$I = I_a + I_g.$$

Рабочие свойства двигателя определяются рабочими и регулировочными характеристиками.

Рабочие характеристики представляют собой зависимость потребляемой мощности P_1 , тока якоря I_{ad} , частоты вращения n , вращающего момента M , КПД η от полезной мощности на валу

$$n, I_{ad}, M, P_1, \eta = f(P_2).$$

Рабочие характеристики снимаются при $U = const$ и неизменных положениях регулирующих реостатов.

В процессе проведения опыта определяются следующие величины:

а) подведенная к двигателю мощность

$$P_1 = U \cdot I ; \quad (9.1)$$

б) полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = M \cdot \omega ; \quad (9.2)$$

в) угловая частота вращения двигателя, рад/с

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} . \quad (9.3)$$

г) коэффициент полезного действия

$$\eta = P_2 / P_1 . \quad (9.4)$$

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.

2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.

3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.

4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.

5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.

6. Все необходимые переключения производить при выключенном напряжении. Любое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем.

7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. При неисправностях в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателя.

9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Аппаратура для исследования

1. Источник питания (цепь возбуждения) 220 В.
2. Тормозное устройство – серводвигатель «Speed Control».
3. Регулятор возбуждения.
4. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

Методика и порядок выполнения работы

1. Подключение и запуск двигателя.
 - 1.1 Собрать схему, представленную на рисунке 9.1, 9.2.
 - 1.2 Включить амперметр в цепь якоря и возбуждения.
 - 1.3 Подключить тормозное устройство. Режим работы тормозного устройства – «Контроль момента».
 - 1.4 При помощи тормозного устройства добиться снижения частоты вращения двигателя до номинальной.
 - 1.5 Измерить величину тока якоря в процессе торможения двигателя.
16. Нельзя допускать полной остановки двигателя!

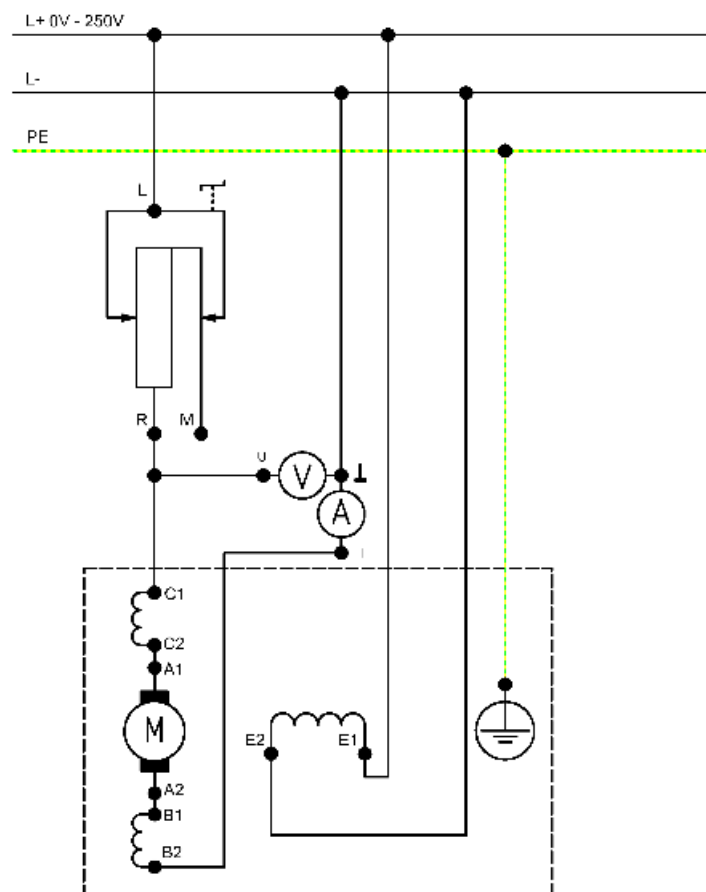


Рисунок 9.1 – Схема подключения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

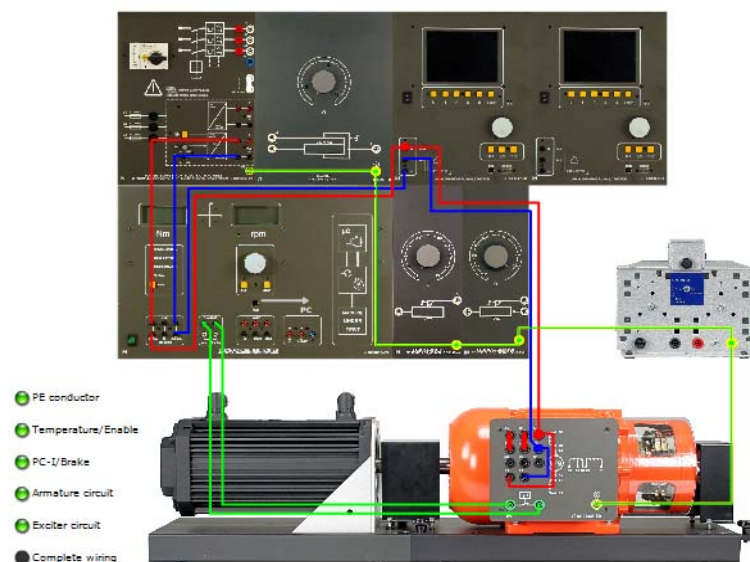


Рисунок 9.2 – Монтажная схема подключения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

2. Испытание двигателя постоянного тока в режиме нагрузки.

2.1 Собрать схему, представленную на рисунке 9.2

2.2 Изменяя момент нагрузки на валу, измерить частоту вращения двигателя, ток якоря и напряжение на якоре, результаты измерений записать в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Нагрузочные характеристики двигателя постоянного тока

Измерено				Вычислено			
M , Н/м	n , об/мин	I , А	U , В	P_1 , Вт	P_2 , Вт	ω , рад/с	η , %
0,5							
1,0							
1,5							
2,0							
2,5							
3,0							
3,5							
4,0							

2.3 По полученным данным рассчитать полезную мощность на валу двигателя, мощность, потребляемую двигателем, коэффициент полезного действия двигателя.

2.4 По результатам таблицы 9.1 построить зависимости $n = f(M)$, $I = f(M)$, $U = f(M)$.

3. Снятие рабочих характеристик двигателя с помощью программного обеспечения «ActiveDrive/DCMA».

3.1 При запуске двигателя необходимо выбрать режим тормозного устройства «Application Mode».

3.2 Запустить программное обеспечение.

3.3 Установить нагрузку двигателя $M_{нг} = 1,5 M_n$.

3.4 Выбрать диаграмму, согласно шаблону 9.3.

3.5 Снять зависимости $\eta = f(M)$; $P_2 = f(M)$; $I = f(M)$; $n = f(M)$.

3.6 По полученной диаграмме определить максимальный КПД.

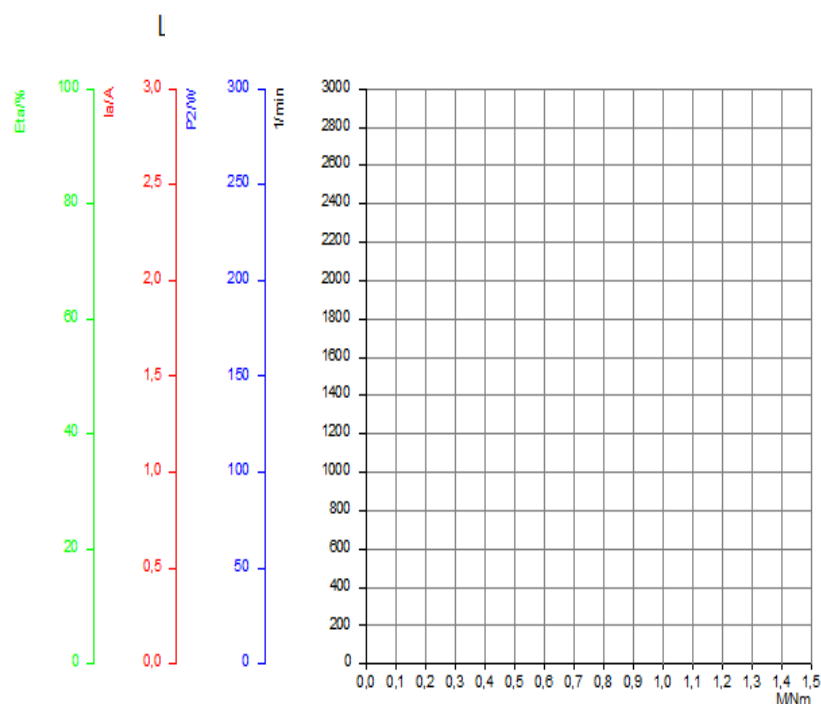


Рисунок 9.3 – Шаблон для построения рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.
5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Поясните принцип действия двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
2. Объясните порядок пуска двигателя постоянного тока.
3. Почему нельзя допускать обрыва цепи возбуждения двигателя?
4. Поясните физический смысл рабочих характеристик двигателя.

10 Исследование двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в двигателе постоянного тока, освоение методов его испытаний и обработки полученных данных, оценка эксплуатационных характеристик испытуемого двигателя.

Актуальность: формирование компетенций ПК-5, ПК-6.

Содержание работы:

1. Измерение сопротивления цепи якоря и обмотки возбуждения.
2. Снятие и построение нагрузочных характеристик двигателя.
3. Определение коэффициента полезного действия двигателя.
4. Построение рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения с применением программного обеспечения «ActiveDrive/DCMA».

Теоретическое обоснование

Принципиальная схема электродвигателя смешанного возбуждения приведена на рис. 10.1. В этом двигателе имеются две обмотки возбуждения – параллельная (шунтовая, ШО), подключенная параллельно цепи якоря, и последовательная (сериесная, СО), подключенная последовательно цепи

якоря. Эти обмотки по магнитному потоку могут быть включены согласно или встречно.

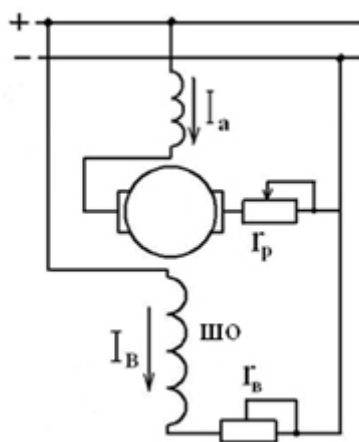


Рис. 10.1 – Схема электродвигателя смешанного возбуждения

При согласном включении обмоток возбуждения их МДС складываются и результирующий поток Φ примерно равен сумме потоков, создаваемых обеими обмотками. При встречном включении результирующий поток равен разности потоков параллельной и последовательной обмоток. В соответствии с этим, свойства и характеристики электродвигателя смешанного возбуждения зависят от способа включения обмоток и от соотношения их МДС.

Скоростная характеристика $n = f(I_a)$ при $U = U_n$ и $I_{\phi} = \text{const}$ (здесь I_{ϕ} — ток в параллельной обмотке).

С увеличением нагрузки результирующий магнитный поток при согласном включении обмоток возрастает, но в меньшей степени, чем у двигателя последовательного возбуждения, поэтому скоростная характеристика в этом случае оказывается более мягкой, чем у двигателя параллельного возбуждения, но более жесткой, чем у двигателя последовательного возбуждения.

Соотношение между МДС обмоток может меняться в широких пределах. Двигатели со слабой последовательной обмоткой имеют слабо падающую скоростную характеристику (кривая 1, рис. 10.2).

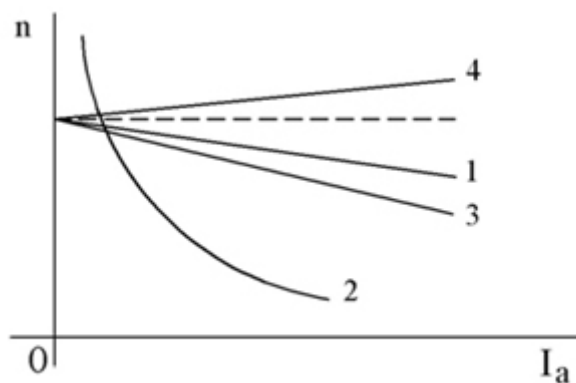


Рисунок 10.2 — Скоростные характеристики двигателя смешанного возбуждения

Чем больше доля последовательной обмотки в создании МДС, тем ближе скоростная характеристика приближается к характеристике двигателя последовательного возбуждения. На рис.2 линия 3 изображает одну из промежуточных характеристик двигателя смешанного возбуждения и для сравнения дана характеристика двигателя последовательного возбуждения (кривая 2).

При встречном включении последовательной обмотки с увеличением нагрузки результирующий магнитный поток уменьшается, что приводит к увеличению скорости двигателя (кривая 4). При такой скоростной характеристике работа двигателя может оказаться неустойчивой, т.к. поток последовательной обмотки может значительно уменьшить результирующий магнитный поток. Поэтому двигатели со встречным включением обмоток не применяются.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стенде допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа фиксируется в специальном журнале.
2. Работы на установках должны выполняться не менее чем двумя лицами.

3. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.

4. Собранная цепь должна быть проверена преподавателем и может включаться только по его разрешению.

5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.

6. Все необходимые переключения производить при выключенном напряжении. Любое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем.

7. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. При неисправностях в аппаратах, приборах, проводах схему отключить и известить об этом преподавателя.

9. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Аппаратура для исследования

1. Источник питания (цепь возбуждения) 220 В.
2. Тормозное устройство – серводвигатель «Speed Control».
3. Регулятор возбуждения.
4. Двигатель постоянного тока.

Методика и порядок выполнения работы

1. Снятие рабочих характеристик двигателя с помощью программного обеспечения «ActiveDrive/DCMA».

- 1.1 Собрать схему, представленную на рисунке 10.1.

1.9 По полученным диаграммам определить максимальный КПД.

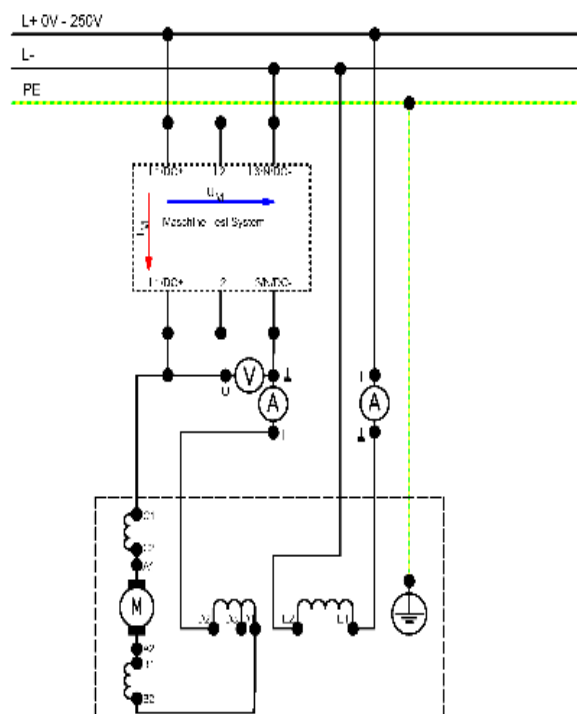


Рисунок 10.1 – Схема подключения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

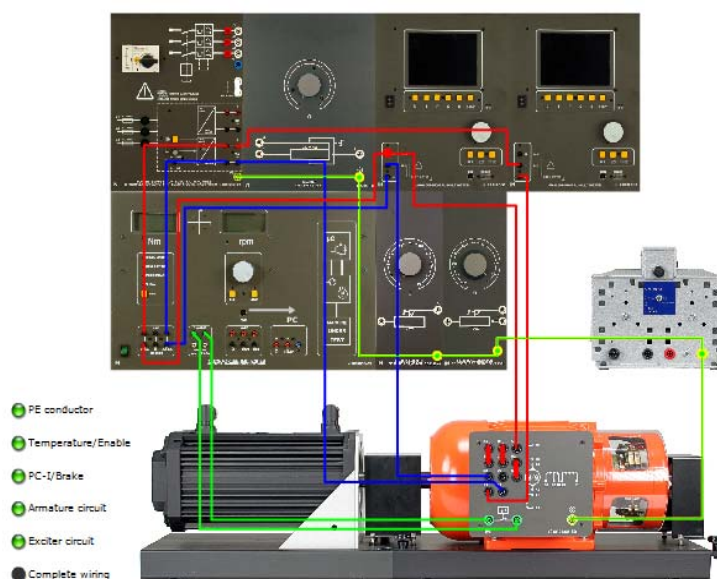


Рисунок 10.2 – Монтажная схема подключения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения

Содержание, форма и правила оформления отчета по лабораторной работе

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчетов.
5. Выводы по результатам работы, в которых отражается оценка исследуемых явлений, объяснение характера полученных зависимостей.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием дисциплины, ФИО студента, номера группы и даты выполнения работы.

Вопросы для защиты работы

1. Поясните принцип действия двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.
2. Объясните порядок пуска двигателя постоянного тока.
3. Почему нельзя допускать обрыва цепи возбуждения двигателя?
4. Поясните физический смысл рабочих характеристик двигателя.
5. Сравните рабочие характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения и смешанного возбуждения.

Список рекомендуемой литературы

Основная:

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для ВУЗов. – Спб.: Питер, 2008. – 320 с.

2. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для ВУЗов. – Спб: Питер, 2010. – 350 с.

Дополнительная:

1. Кацман М. М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу – М. : Высшая школа, 2000. 215 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к курсовому проекту

по дисциплине «Электрические машины»

Направление подготовки 13.03.02

«Электроэнергетика и электротехника»

Профиль подготовки:

Электроэнергетические системы и сети

Электроснабжение

Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

Менеджмент в электроэнергетике

Ставрополь 2015

Методические указания являются руководством при курсовом проектировании основных видов электрических машин.

Приводятся варианты заданий, формулируются требования к содержанию и оформлению расчетно-пояснительной записки и графической части. Дается список необходимой литературы.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями рабочего учебного плана и программы дисциплины «Электрические машины» для студентов подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Составители: к.т.н., доцент Юдина О.И.

Рецензент: к. т. н., доцент Данилов М.И.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель дисциплины «Электрические машины» – формирование базовых знаний в области теории электромеханического преобразования энергии, принципов действия основных видов электрических машин и особенностей их применения на электрических станциях и подстанциях, предприятиях промышленности и транспорта.

Цель курсового проектирования: формирование знаний в области электромагнитного и теплового расчета при проектировании основных видов электрических машин.

Задача курсового проектирования: получение теоретических знаний и приобретение практических навыков проектно-конструкторской деятельности, связанной с проектными и поверочными расчетами электрических машин, формирование компетенций ПК-3, ПК-4.

1 Формулировка задания и его объем

Задание включает в себя:

- 1) тему проекта;
- 2) исходные расчетные данные;
- 3) содержание расчетно-пояснительной записки;
- 4) конструирование.

Проект может быть выполнен по одной из шести тем:

1. Расчет силового трансформатора.
2. Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
3. Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором.
4. Расчет синхронного генератора.
5. Расчет двигателя постоянного тока.
6. Расчет генератора постоянного тока.

Исходные расчетные данные для перечисленных тем курсового проекта имеют вид:

Тема 1: Расчет силового трансформатора.

S_n – полная мощность, кВА;

m – число фаз, принимается равным 3;

f – частота, Гц, принимается равной 50 Гц;

U_{BH}/U_{HH} – соответственно высшее и низшее напряжение, кВ;

– схема и группа соединений;

– способ охлаждения, как правило, естественный масляный;

u_k – напряжение короткого замыкания, %;

P_k – потери короткого замыкания, Вт;

P_x – потери холостого хода, Вт;

i_x – ток холостого хода, %;

– материал обмоточных проводов (медь или алюминий).

Тема 2: Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

P_k – номинальная мощность, кВт;

n_1 – синхронная частота вращения, об/мин;

U_n – номинальное напряжение, В;

– схема соединения обмотки статора;

m_1 – число фаз статора, принимается равным 3;

f – частота тока статора, Гц, принимается равной 50 Гц;

– исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды.

Тема 3: Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором.

P_k – номинальная мощность, кВт;

$2p$ – число полюсов обмотки статора;

m_1 – число фаз статора и ротора, принимается равным 3;

f – частота тока статора, Гц, принимается равной 50 Гц;

U_n – номинальное напряжение;

– схема соединения обмотки статора;

– исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды.

Тема 4: Расчет синхронного генератора.

S_n – номинальная мощность, кВА;

U_n – номинальное линейное напряжение обмотки статора, В;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности при отстающем токе;

f – частота тока статора, Гц, принимается равной 50 Гц;

n_n – частота вращения ротора, об/мин;

m_1 – число фаз статора, принимается равным 3;

η – коэффициент полезного действия, %;

– режим работы;

– исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды.

Тема 5: Расчет двигателя постоянного тока.

P_n – номинальная мощность, кВт;

U_n – номинальное напряжение, В;

n_n – номинальная частота вращения ротора, об/мин;

– режим работы;

– класс нагревостойкости изоляции;

Возбуждение параллельное:

а) со стабилизирующей обмоткой;

б) без стабилизирующей обмотки;

– исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды.

Тема 6: Расчет генератора постоянного тока.

P_n – номинальная мощность, кВт;

U_n – номинальное напряжение, В;

n_n – номинальная частота вращения ротора, об/мин;

– режим работы;

– класс нагревостойкости изоляции;

– возбуждение независимое;

– исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды.

Тема курсового проекта, а также исходные расчетные данные определяются преподавателем. Содержание расчетно-пояснительной записки отражает перечень подлежащих разработке вопросов и также зависит от темы курсового проекта, а именно:

Тема 1:

Введение; расчет номинальных величин; выбор главных размеров обобщенным методом, за критерий оптимальности принять минимум стоимости активной части трансформатора; выбор и расчет обмоток; расчет параметров к.з.; расчет магнитной системы; расчет потерь и тока холостого хода; тепловой расчет; характеристики конструктивных элементов; выводы; список используемой литературы.

Тема 2:

Введение; выбор главных размеров; расчет геометрии зубцовой зоны и обмотки статора; расчет обмотки ротора; расчет магнитной цепи; расчет па-

раметров; расчет потерь и КПД; расчет рабочих и пусковых характеристик; выводы; список используемой литературы.

Тема 3:

Введение; выбор главных размеров; расчет геометрии зубцовой зоны и обмотки статора; расчет обмотки ротора; расчет магнитной цепи; расчет параметров; расчет потерь; расчет рабочих характеристик; выводы; список используемой литературы

Тема 4:

Введение; расчет номинальных величин и выбор главных размеров; расчет обмотки, пазов и ярма статора; расчет обмотки ротора; расчет воздушного зазора, полюсов и ярма ротора, расчет демпферной обмотки, расчет магнитной цепи машины; расчет обмотки возбуждения, расчет потерь и КПД, расчет характеристик генератора; выводы; список используемой литературы.

Тема 5:

Введение; выбор главных размеров; выбор обмотки якоря; расчет геометрии зубцовой зоны; расчет обмотки якоря; расчет магнитной цепи; расчет обмотки возбуждения; расчет коммутации; расчет добавочных обмотки полюсов; расчет потерь и КПД; расчет рабочих характеристик; тепловой расчет; выводы; список используемой литературы.

Тема 6:

Введение; выбор главных размеров; выбор обмотки якоря; расчет геометрии зубцовой зоны; расчет обмотки якоря; расчет магнитной цепи; расчет обмотки возбуждения; расчет коммутации; расчет добавочных обмотки полюсов; расчет потерь и КПД; расчет характеристик генератора (внешней, регулировочной, нагрузочной); тепловой расчет; выводы; список используемой литературы.

Конструирование в проектном задании определяет перечень графического материала с точным указанием обязательных чертежей.

Выполняется на листе формата А1 и содержит чертеж:

– для темы 1: активная часть трансформатора;
для тем 2-6: проектный чертеж машины в двух проекциях с продольным и поперечным разрезами.

2 Основное содержание курсового проекта

Расчетная часть проекта выполняется с использованием литературы: книги Тихомирова П.М. [1] для темы 1 и книги Копылова И.П. [2] или Гольдберга О.Д. [3] для тем 2-6.

В процессе выполнения расчета необходимо предварительно изучить соответствующие разделы рекомендованных источников и ориентироваться на примеры расчетов, приведенные в конце каждого раздела.

При этом следует учитывать, что требуемые инженерные решения могут отличаться от тех, которые используются в примерах в зависимости и в соответствии со своими исходными данными. Контроль правильности расчетов осуществляется с помощью промежуточных проверок, в рамках которых отдельные показатели проектируемой машины сравниваются с аналогичными показателями машин общепромышленного исполнения.

Весь необходимый справочный материал (таблицы, графики, диаграммы) также имеется в рекомендованной литературе.

Во введении определяется актуальность темы, ставится цель проектирования.

Выводы должны оценивать спроектированную машину с точки зрения ее выходных характеристик, технико-экономических и энергетических показателей.

При конструировании машины следует в качестве базовых использовать проектные чертежи, приведенные в [1-4].

3 Общие требования к курсовому проекту

1. Расчетно-пояснительная записка должна быть напечатана на белых стандартных листах формата А4 без рамки.
2. Каждый раздел рекомендуется начинать с новой страницы.
3. Разделам присваиваются порядковые номера; названия разделов должны повторять соответствующие пункты задания.
4. Все иллюстрации в пояснительной записке (эскизы, схемы, графики) нумеруются и располагаются при первом упоминании по ходу текста.
5. Условные буквенные обозначения физических величин должны соответствовать общепринятым.
6. Ссылки на литературу приводятся в тексте в квадратных скобках в порядке их расположения, например [2].
7. Страницы нумеруются, начиная с титульного листа, который имеет стандартное оформление. Номер страницы, кроме титульного листа, ставится в правом нижнем углу.
8. Чертежи должны быть выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ и ЕСКД.
9. Проектный чертеж должен иметь спецификацию, которая подшивается к расчетно-пояснительной записке.
10. Оформление графического материала подробно описано в [5].
11. Защита курсового проекта осуществляется в комиссии преподавателей, состоящей из 2-3 человек. Проверку проекта и допуск его к защите выполняет руководитель проекта. Все замечания указываются в расчетно-пояснительной записке.

4 Рекомендации по организации работ над проектом, примерный календарный план его выполнения

Задание на проектирование выдается преподавателем каждому студенту индивидуально в течение первой недели семестра. Успешная работа над проектом предполагает систематическое и планомерное выполнение графика календарного плана (таблицы 1-6)

В специально отведенное для консультаций время студент представляет преподавателю выполненные разделы и получает необходимые консультации. После завершения работы над проектом студент сдает его на проверку руководителю. После исправления указанных недостатков проекта студент допускается к защите.

Таблица 1 – Календарный план выполнения КП (тема №1)

Разделы задания	Наименование раздела в задании	Объем раздела в %	Срок выполнения. (недели)
1	Выдача задания	–	1
2	Выбор главных размеров обобщенным методом	10	3
3	Расчет обмоток	20	5
4	Расчет параметров короткого замыкания	15	7
5	Расчет магнитной системы	15	9
6	Расчет параметров холостого хода	10	10
7	Тепловой расчет	15	11
8	Выполнение чертежей и расчетно-пояснительной записки	15	12
9	Защита курсового проекта	–	13-15

Таблица 2 – Календарный план выполнения КП (тема №2)

Разделы задания	Наименование раздела в задании	Объем раздела в %	Срок выполнения. (недели)
1	Выдача задания	–	1
2	Выбор главных размеров	10	3
3	Расчет геометрии зубцовой зоны, обмотки статора и ротора	20	6
4	Расчет магнитной цепи и намагничивающего тока	15	8
5	Расчет параметров, потерь и КПД	15	9
6	Расчет рабочих и пусковых характеристик	25	11
7	Выполнение чертежей и расчетно-пояснительной записки	15	12
8	Защита курсового проекта	–	13-15

Таблица 3 – Календарный план выполнения КП (тема №3)

Разделы задания	Наименование раздела в задании	Объем раздела в %	Срок выполнения. (недели)
1	Выдача задания	–	1
2	Выбор главных размеров	10	3
3	Расчет геометрии зубцовой зоны и обмотки статора	20	5
4	Расчет обмотки ротора	10	7
5	Расчет магнитной цепи	15	8
6	Расчет параметров рабочего режима и потерь	10	9
7	Расчет рабочих характеристик	20	11
8	Выполнение чертежей и расчетно-пояснительной записки	15	12
9	Защита курсового проекта	–	13-15

Таблица 4 – Календарный план выполнения КП (тема №4)

Разделы задания	Наименование раздела в задании	Объем раздела в %	Срок выполнения. (недели)
1	Выдача задания	–	1
2	Расчет номинальных величин и выбор главных размеров	10	3
3	Расчет обмотки, пазов и ярма статора	20	5
4	Расчет обмотки ротора, воздушного зазора, полюсов и ярма ротора	10	7
5	Расчет демпферной обмотки	10	8
6	Расчет магнитной цепи и обмотки возбуждения	15	9
7	Расчет потерь и КПД	10	10
8	Расчет характеристик генератора	10	11
9	Выполнение чертежей и расчетно-пояснительной записки	15	12
10	Защита курсового проекта	–	13-15

Таблица 5 – Календарный план выполнения КП (тема №5)

Разделы задания	Наименование раздела в задании	Объем раздела в %	Срок выполнения. (недели)
1	Выдача задания	–	1
2	Выбор главных размеров	10	3
3	Расчет геометрии зубцовой зоны и обмотки якоря	20	5
4	Расчет магнитной цепи и обмотки возбуждения	10	7
5	Расчет коммутации и обмотки добавочных полюсов	10	8
6	Расчет потерь и КПД	10	9
7	Расчет рабочих характеристик	15	10
8	Тепловой расчет	10	11
9	Выполнение чертежей и расчетно-пояснительной записки	15	12
10	Защита курсового проекта	–	13-15

Таблица 6-Календарный план выполнения КП (тема №6)

Разделы задания	Наименование раздела в задании	Объем раздела в %	Срок выполнения. (недели)
1	Выдача задания	–	1
2	Выбор главных размеров	10	3
3	Расчет геометрии зубцовой зоны и обмотки якоря	20	5
4	Расчет магнитной цепи и обмотки возбуждения	10	7
5	Расчет коммутации и обмотки добавочных полюсов	10	8
6	Расчет потерь и КПД	10	9
7	Расчет внешней, нагрузочной и регулировочной характеристик	15	10
8	Тепловой расчет	10	11
9	Выполнение чертежей и расчетно-пояснительной записки	15	12
10	Защита курсового проекта	–	13-15

5 Порядок защиты и ответственность студента за выполнение задания по курсовому проекту

Защита курсового проекта осуществляется в устной форме в присутствии членов комиссии. Студент должен кратко изложить цель курсового проекта и способы ее достижения, дать оценку полученным в проекте результатам. В процессе дискуссии с членами комиссии необходимо ответить на вопросы членов комиссии.

В случае, если тема курсового проекта не раскрыта, списана или самостоятельно заменена, расчеты выполнены не верно, то курсовой проект получает оценку «неудовлетворительно» и студент не допускается к сдаче экзамена по дисциплине.

6 Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1976. — 544 с. Проектирование электрических машин. / Под ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. школа, 2002.
2. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко ; под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Высшая школа, 1984. – 431 с. 7.
3. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / [И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин и др.] ; под ред. И. П. Копылова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2002. – 757с.

Дополнительная литература

1. Вольдек, А. И. Электрические машины: Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. [и др.] : Питер, 2008. - 320 с.
2. Токарев Б. Н. Электрические машины. – М.; Энергоатомиздат , 1990.
3. Сергинков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины. Трансформаторы. – М. : ВШ, 1989.
4. Брускин Д.Э., Зарахович А.Э. Электрические машины. Ч.1. – М.: ВШ, 1987.
5. Вольдек, А. И. Электрические машины: машины переменного тока: учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. [и др.] : Питер, 2008. – 349 с. :

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к самостоятельной работе

по дисциплине «Электрические машины»

Направление подготовки 13.03.02

«Электроэнергетика и электротехника»

Профиль подготовки:

Электроэнергетические системы и сети

Электроснабжение

Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем

Менеджмент в электроэнергетике

Ставрополь 2015

Методические указания являются руководством при выполнении всех видов самостоятельной работы по дисциплине «Электрические машины».

Приводится содержание всех видов самостоятельной работы и рекомендации по их выполнению.

Дается список необходимой литературы.

Составители: к.т.н., доцент Юдина О.И.

Рецензент : к.т.н., доцент Гринь А.И.

1 Содержание самостоятельной работы

Согласно рабочей программе дисциплины «Электрические машины» для студентов специальности 13.03.02 самостоятельная работа включает в себя следующие пункты:

1. Подготовка к лекционным занятиям.
2. Подготовка к практическим занятиям.
3. Подготовка к лабораторным занятиям.
4. Подготовка курсового проекта.
5. Самостоятельное изучение тем:
 - потери мощности в асинхронном двигателе;
 - изменение направления вращения и торможение АД.:
 - специальные виды и режимы работы асинхронных машин:

Особенности работы автономного асинхронного генератора;

- особенности конструкции якорных обмоток машин постоянного тока и машин переменного тока.
- устройство и принцип работы исполнительных двигателей и тахогенераторов.

2 Подготовка к лекционным занятиям

Осуществляется студентом самостоятельно с использованием списка литературы, а также электронного курса лекций, разработанного на кафедре АЭСиЭ.

3 Подготовка к практическим занятиям

Осуществляется студентом с помощью методических указаний.

4 Подготовка к курсовому проекту.

Темы курсового проекта

- 1) Расчет силового трансформатора;
- 2) Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;
- 3) Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором;
- 4) Расчет синхронного генератора;
- 5) Расчет синхронного генератора;

6) Расчет генератора постоянного тока;

7) Расчет двигателя постоянного тока.

Исходные данные для расчета каждый студент получает индивидуально.

При выполнении проекта использует рекомендованную литературу и методические указания к курсовому проектированию.

5 Самостоятельное изучение тем

Осуществляется студентом самостоятельно с использованием списка литературы, а также электронного курса лекций, разработанного на кафедре АЭСиЭ.

6 Вопросы к экзамену

1. Основные законы электромеханики. Электрический генератор. Электрический двигатель.
2. Принцип действия и основные элементы конструкции трансформатора. Коэффициент трансформации.
3. Конструкция обмоток трансформатора.
4. Режим холостого хода трансформатора.
5. Индуктивные параметры обмоток трансформатора.
6. Схемы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.
7. Приведенный трансформатор. Уравнения и схемы замещения трансформатора.
8. Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора.
9. Работа трансформаторов в режиме нагрузки.
10. Изменение вторичного напряжения. Внешняя характеристика трансформатора.
11. Способы регулирования напряжения в трансформаторах.
12. Энергетическая диаграмма трансформатора. Коэффициент полезного действия.

13. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.
Условия равенства коэффициентов трансформации.
14. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.
Условие одинаковости групп соединений обмоток.
15. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.
Условие равенства напряжений короткого замыкания.
16. Применение метода симметричных составляющих при расчете несимметричных режимов работы трансформаторов.
17. Схемы замещения трансформатора для токов нулевой последовательности при
различных схемах соединения обмоток.
18. Особенности конструкции и работы трехобмоточных трансформаторов.
19. Особенности конструкции и работы автотрансформаторов.
20. Переходные процессы в трансформаторе при включении его под напряжение на холостом ходу.
21. Переходные процессы в трансформаторе при внезапном коротком замыкании.
22. Системы охлаждения трансформаторов
23. Устройство синхронных машин. Принцип действия синхронного генератора и синхронного двигателя.
24. Электродвижущая сила фазы обмотки статора машины переменного тока. Обмоточный коэффициент.
25. ЭДС от высших гармоник поля и способы их подавления.
26. Конструкция обмоток статора синхронных машин. Классификация.
Область применения.
27. Намагничивающая сила фазы и трехфазной обмотки статора машины переменного тока.
28. Магнитные поля машин переменного тока.
29. Индуктивные сопротивления машин переменного тока

30. Физический смысл реакции якоря синхронного генератора.
31. Характеристики синхронного генератора.
32. Векторная диаграмма Blondеля синхронного генератора.
33. Векторная диаграмма Потье синхронного генератора.
34. Векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора.
35. Условия и способы включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью бесконечной мощности.
36. Синхронные режимы и энергетические диаграммы синхронных машин.
37. Угловые характеристики синхронных машин. Понятие статической устойчивости.
38. V-образные кривые синхронного генератора.
39. Способы пуска в ход синхронных двигателей.
40. Характеристики синхронных двигателей. Синхронный компенсатор.
41. Внезапное короткое замыкание синхронного генератора. Действие токов короткого замыкания.
42. Конструктивные особенности асинхронных машин.
43. Принцип действия асинхронного двигателя.
44. Электрические процессы в АМ с неподвижным ротором (характеристики холостого хода и короткого замыкания)
45. Приведение вращающейся асинхронной машины к машине с неподвижным ротором.
46. Уравнения намагничивающих сил и напряжений асинхронной машины.
47. T-образная схема замещения асинхронной машины и ее параметры.
48. Г-образная схемы замещения асинхронной машины и ее параметры.
49. Двигательный режим работы асинхронной машины.
50. Генераторный режим работы асинхронной машины.
51. Режим противовключения асинхронной машины.
52. Понятие об асинхронных машинах систем автоматики.

53. Способы пуска в ход асинхронных двигателей. Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами.
54. Способы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей.
55. Основные характеристики однофазного асинхронного двигателя.
56. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя.
57. Построение круговой диаграммы асинхронного двигателя.
58. Механическая характеристика асинхронного двигателя.
59. Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока.
60. Устройство машин постоянного тока. Способы возбуждения.
61. Якорные обмотки машины постоянного тока. Устройство. Классификация. Область применения.
62. ЭДС и электромагнитный момент машины постоянного тока.
63. Реакция якоря машины постоянного тока. Количественный учет реакции якоря.
64. Понятие коммутации машин постоянного тока. Причины искрения. Виды искрения.
65. Прямолинейная коммутация. Способы улучшения коммутации.
66. Замедленная коммутация. Способы улучшения коммутации.
67. Ускоренная коммутация в машинах постоянного тока.
68. Энергетическая диаграмма машины генератора постоянного тока.
69. Характеристики генераторов постоянного тока с независимым возбуждением.
70. Характеристики генераторов постоянного тока с самовозбуждением.
71. Энергетическая диаграмма и уравнение напряжения двигателя постоянного тока.
72. Скоростные и механические характеристики двигателя постоянного тока.
73. Способы пуска в ход двигателей постоянного тока.
74. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

7 Рекомендуемая литература.

7.1 Основная литература:

- Копылов, И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. - 3-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2002. - 607 с. : ил. - Библиогр.: с. 596. - ISBN 5-06-003841-6
- Вольдек, А. И. Электрические машины : машины переменного тока : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. [и др.] : Питер, 2008. - 349 с. : ил., табл. - (Учебник для вузов). - Библиогр.: с. 341-343. - Алф. указ.: с. 344-349. - ISBN 978-5-469-01381-5
- Вольдек, А. И. Электрические машины : Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. [и др.] : Питер, 2008. - 320 с. : ил., табл. - (Учебник для вузов). - Библиогр.: с. 315-316. - Алф.
- Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И. П. Копылов. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 2001. - 327 с. : ил. - Библиогр.: с. 319. - Предм. указ.: с. 320-324. - ISBN 5-06-003861-0

7.2 Дополнительная литература:

- Токарев, Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие / Б. Ф. Токарев. - М. : Энергоатомиздат, 1990. - 624 с. : ил. - Гриф: Доп. МО для электротехнич. и энерг. спец. - Библиогр.: с. 614. - Предм. указ.: с. 615-616. - ISBN 5-283-00595-X
- Проектирование электрических машин : учебник для вузов / [И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин и др.] ; под ред. И. П. Копылова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 2002. - 757с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 746. - ISBN 5-06
- Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : учебник для втузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко ; под ред. О. Д.

Гольдберга. - М. : Высшая школа, 1984. - 431 с. : ил., рис. - Прил.: с. 384-427. - Библиогр.: с.428-429

– Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - М. : Энергия, 1976. - 544 с. : ил. - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 536

– Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова, Т. 1. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 456 с. : ил. - Библиогр.: с. 446. - ISBN 5-283-00500-3 (т. 1). - ISBN 5-283-00555-0

– Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова, Т. 2. - М. : Энергоатомиздат, 1989. - 688 с. : ил. - Библиогр.: с. 678. - ISBN 5-283-00531-3 (т. 2). - ISBN 5-283-00555-0

7.3. Методическая литература:

– Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине "Электрические машины" для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника.

– Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине "Электрические машины" для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника.

– Юдина О.И. Электрические машины: Электронный курс лекций.

7.4. Интернет-ресурсы:

–ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА [Электронный ресурс]: научный журнал. - Режим доступа <http://www.elibrary.ru>

–ЭЛЕКТРИЧЕСТВО [Электронный ресурс]: научный журнал. - Режим доступа <http://www.elibrary.ru>

–ЭЛЕКТРОТЕХНИКА [Электронный ресурс]: научный журнал. - Режим доступа <http://www.elibrary.ru>

–Finite Element Method Magnetics [Электронный ресурс]. - Режим доступа <http://www.femm.info>

