

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 17:23:30

Уникальный программный ключ: «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Содержание

Введение

1. **Практическое занятие №1.**
Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе
2. **Практическое занятие №2.**
Работа трансформатора под нагрузкой
3. **Практическое занятие №3.**
Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора
4. **Практическое занятие №4.**
Трансформация трехфазных токов
5. **Практическое занятие №5.**
Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора.
6. **Практическое занятие №6.**
Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока
7. **Практическое занятие №7.**
Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока
8. **Практическое занятие №8.**
Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке
9. **Практическое занятие №9.**
Режимы работы машины постоянного тока

Литература

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.

Описание практических занятий

Практическое занятие №1.

Тема. Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции
- уравнения схемы замещения и характеристики
- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

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 $\dot{U}_1$. Поэтому 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.

Контрольные вопросы и задания:

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?

Задачи

1. Определить номинальный ток вторичной обмотки $I_{2н}$ однофазного трансформатора, если номинальная мощность $S_n = 20$ кВА, номинальное напряжение первичной обмотки $k = 15$. $U_{1н} = 10$ кВ, коэффициент трансформации
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. 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 $W_1 = 100$, $W_2 = 50$.
3. 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 холостого хода $U_{20} = 127$ В, частота напряжения сети $f = 50$ Гц.
4. Трансформатор включен в сеть переменного тока промышленной частоты. Индуктивность рассеяния первичной обмотки $L_{\sigma 1} = 0.001$ Гн. Определить индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки $x_{\sigma 1}$.

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №2.

Тема. Работа трансформатора под нагрузкой

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции
- уравнения схемы замещения и характеристики
- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

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, В•А,

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

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:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1); \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}' - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 \\ &\quad \dot{I}_1 - \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2) \end{aligned} \quad (2.3)$$

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

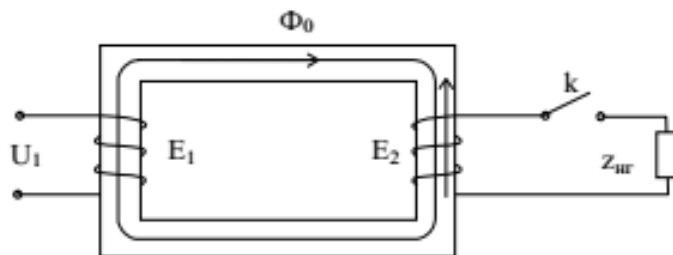


Рисунок 2.1 – Схема замещения трансформатора

Формулы приведения параметров вторичной цепи:

–ток вторичной обмотки

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

–ЭДС и напряжение вторичной

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

–активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки

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

–полное сопротивление вторичной обмотки

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

–полное сопротивление нагрузки

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

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

$$z_k = U_{кф} / I_{кф} \quad (2.11)$$

–активное

$$r_k = P_k/3 * I_k^2 \quad (2.12)$$

—реактивное

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (2.13)$$

Сопротивления первичной обмотки

$$r_1 = r'_2 = r_k/2 \quad (2.14)$$

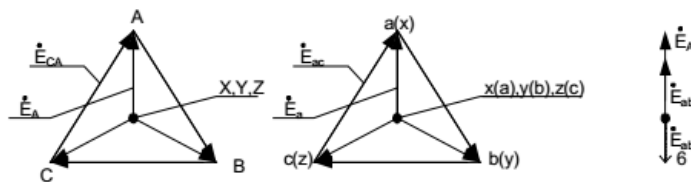
$$x_1 = x'_2 = x_k/2 \quad (2.15)$$

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



$$\quad (2.18)$$

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

Коэффициент мощности короткого замыкания

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

Максимальное значение магнитного потока находится по формуле:

$$\Phi_m = B_m * Q_{ct} * k_c \quad (2.21)$$

где B_m — максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода,

Q_{ct} — площадь поперечного сечения магнитопровода,

k_c — коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением:

$$\eta = \frac{\beta * S_H \cos \varphi_2}{\beta * S_H \cos \varphi_2 + P_{0H} + \beta^2 P_{KH}} \quad (2.21)$$

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

$P_{\text{кн}}$ – 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:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} = mI_1^2 r_1 + mI_2^2 r_2 \quad (2.23)$$

Наибольший КПД соответствует коэффициенту нагрузки:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{кн}}}} \quad (2.24)$$

Тогда формула для КПД принимает вид:

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

Пример 1. Дан масляный трансформатор ТМ-25/10 с номинальными параметрами: номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 25 \text{кВ} \cdot \text{А}$, 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 $U_{\text{ка}}$ и $U_{\text{кр}}$, мощности холостого хода и КЗ $P_0 = 0,13 \text{ кВт}$ и $P_{\text{к}} = 0,6 \text{ кВт}$, ток холостого хода $I_0\% = 3,2$, коэффициенты мощности холостого хода и КЗ $\cos \varphi_{\text{х}}$ и $\cos \varphi_{\text{к}}$, Сопротивление КЗ $Z_{\text{к}}$, и его активная и реактивная части $r_{\text{к}}$ и x , его номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{\text{ном}}\%$ (индуктивный характер). Соединение трансформатора Y/Y. Определить неизвестные параметры трансформатора.

Решение:

- Номинальный ток в первичной обмотке

$$I_{1\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} * U_{1\text{н}}} = \frac{25}{1,73 * 10} = 1,44 \text{ А}$$

- Ток холостого тока

$$I_0 = \frac{i_0}{I_{1\text{н}}} = \left(\frac{3,2}{100} \right) * 1,44 = 0,46 \text{ А}$$

- Коэффициент мощности Холостого тока

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} I_0 * U_{1\text{н}}} = \frac{0,13}{1,73 * 0,46 * 10} = 0,16$$

- Напряжение Короткого замыкания

$$U_{\text{к}} = \frac{\left(\frac{U_{\text{к}}}{100} \right) U_{1\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{\left(\frac{4,5}{100} \right) 10}{1,73} = 0,26 \text{ кВ}$$

- Коэффициент мощности Короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{3 I_{1\text{н}} * U_{\text{к}}} = \frac{0,6}{3 * 1,44 * 0,26} = 0,53$$

$$\sin \varphi_{\text{к}} = 0,85$$

- Активная и реактивная составляющие напряжения Короткого замыкания

$$U_{ка} = U_k \cos \varphi_k = 4,5 * 0,53 = 2,38\%$$

$$U_{кр} = U_k \sin \varphi_k = 4,5 * 0,85 = 3,8\%$$

- Сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1H}} = 0,26 * \frac{10^3}{1,44} = 180 \text{ Ом}$$

- Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k = 180 * 0,53 = 95,4 \text{ Ом}$$

$$x_k = Z_k \sin \varphi_k = 180 * 0,85 = 153 \text{ Ом}$$

- Номинальное изменение напряжения трансформатора при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{H\%} = U_{ка} \cos \varphi_2 + U_{кр} \sin \varphi_2 = 2,38 * 0,8 + 3,8 * 0,6 = 4,18\%$$

Пример 2. Технические данные трехфазного трансформатора ТМ-630/10: номинальная мощность $S_{ном}=630 \text{ кВ*А}$, 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 $P_{кH}=7,6$ 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

$$U_{1K} = 10^2 * U_k * U_{ном} = 10^2 * 5,5 * 10 * 10^3 = 550 \text{ В}$$

- Ток короткого замыкания

$$I_{1K} = I_{ном1} = S_{ном}/(\sqrt{3} * U_{1ном}) = \frac{630 * 10^3}{1,73 * 550 * 36,4} = 36,4 \text{ А}$$

- Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \phi_k = \frac{P_{кH}}{U_{1H} * I_{K1}} = \frac{7600}{1,73 * 550 * 36,4} = 0,22$$

$$\phi_k = 77^\circ; \sin \phi_k = 0,97$$

- Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_{1K}} = \frac{550}{\sqrt{3} * 36,4} = 8,7 \text{ Ом}$$

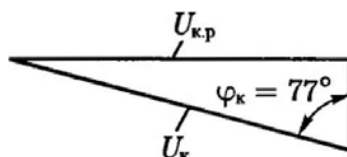
- Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \phi_k = 8,7 * 0,22 = 1,9 \text{ Ом}$$

- Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

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

- Стороны треугольника напряжений короткого замыкания



$$U = I_k Z_k = 36,4 * 8,7 = 317 \text{ В}$$

$$U_{ка} = I_k r_k = 36,4 * 1,9 = 69 \text{ В}$$

$$U_{кр} = I_k x_k = 36,4 * 8,44 = 307 \text{ В}$$

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

$$U_k = \frac{317}{5} = 63 \text{ мм}$$

$$U_{ка} = \frac{69}{5} = 14 \text{ мм}$$

$$U_{кр} = \frac{307}{5} = 61 \text{ мм}$$

Контрольные вопросы и задания:

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?

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 g_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 ($z = r_2'$ и $x = x_2'$), а также фактические значения сопротивлений вторичной обмотки; величины КПД η , соответствующие значениям полной мощности трансформатора $0,25S_{ном}$; $0,5 S_{ном}$; $0,75 S_{ном}$ 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
$S_n, \text{кВ}\cdot\text{А}$	100	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
$U_{1н}, \text{кВ}$	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
$U_{2н}, \text{кВ}$	0,23	0,4	0,4	0,4	3,0	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23
$U_k, \%$	5,5	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5
$I_0, \%$	6,5	5,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,5
$P_{0н}, \text{Вт}$	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5
$P_{кном} > \text{кВт}$	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 номинальная мощность S_n номинальные потери холостого хода $P_{0н}$ и короткого замыкания $P_{кн}$ 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	$S_{ном} \text{кВ}\cdot\text{А}$	$P_{0ном} \text{кВт}$	$P_{кном}, \text{кВт}$	$\cos \varphi_2$
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 $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$ вторичной обмоток; ток холостого хода $I_{0ном}$ напряжение короткого замыкания $U_{кн}$; 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 $U_{1к} = 115$ кВ, $P_{1к} = 81,5$ 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: $S_H = 100$ к В · А, $P_k = 1970$ Вт, $u_k = 4,5\%$.

7. Трансформатор мощностью 63 к В 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 $S_H = 25$ кВ А; напряжение первичной обмотки $U_{1ном} = 10$ кВ; вторичной обмотки $U_{2ном} = 400$ В; потери при холостом ходе $P_x = 125$ Вт; сопротивление первичной обмотки $R_1 = 48,4$ Ом; вторичной обмотки $R_2 = 0,077$ 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 $S_{ном}=600$ кВ·А и номинальным первичным напряжением $U_{ном} = 31,5$ кВ мощностью короткого замыкания $P_{1кн} = 20$ кВт и напряжением короткого замыкания $U_k = 8,5\%$. Рассчитать данные и

построить график зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β , если коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$.

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №.3

Тема. Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции
- уравнения схемы замещения и характеристики
- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

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 X, Y, Z, для обмоток НН эти обозначения соответственно а, b, с, и x, y, z. Если обмотка соединена звездой и у неё выведена нулевая точка, то применяют обозначение. $\uparrow$

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).

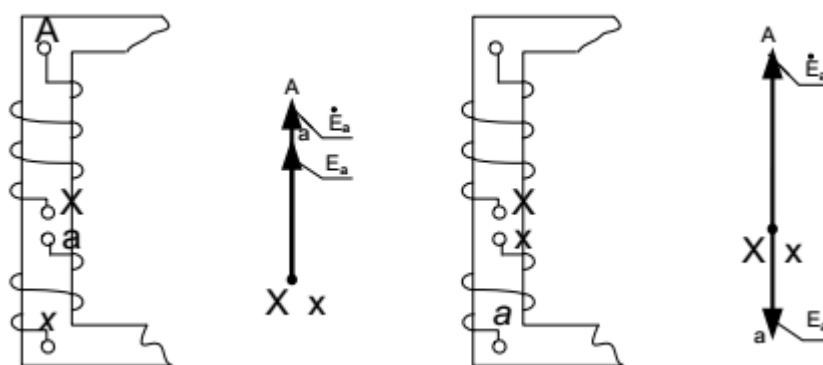


Рисунок 3.1– Группы соединений однофазного трансформатора

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:

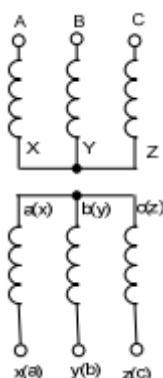


Рисунок 3.2 – Трёхфазный трансформатор со схемой соединения звезда

- 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.

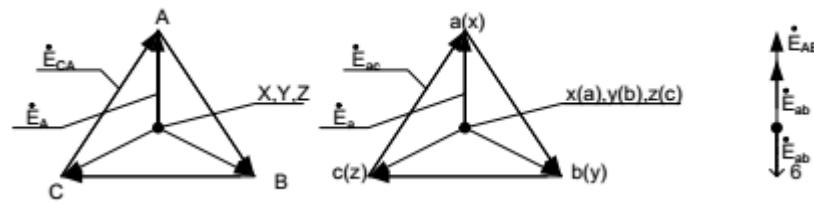


Рисунок 3.3 – Трёхфазный трансформатор с группой соединений Y/Y-0

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

Если теперь в схеме Y/Y поменять местами начала и концы обмоток НН, то в ВД НН вектор 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 .

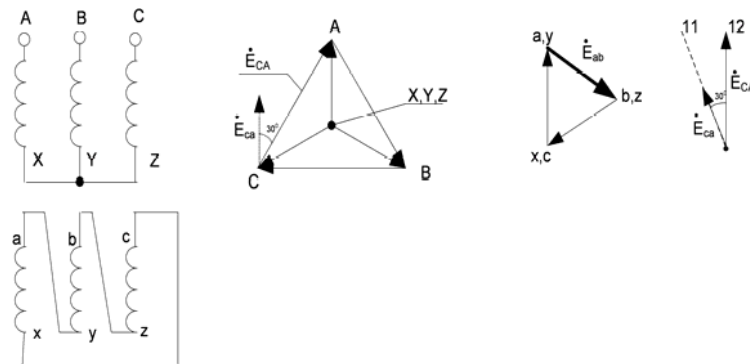


Рисунок 3.4 – Трёхфазный трансформатор со схемой и группой соединений Y/-11

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/Y₀-0; Δ / Y_0 -11, Y₀ / Δ -11, Y / Δ -11; слева от дроби –ВН; справа НН; «0» – вывод наружу нулевой точки. Y/Y₀-0 – применяют на 10/0,4 и 6/0,4 кВ, при неравномерной нагрузке фаз: Y / Δ - 11; 35/10 кВ и 35/6 - Y / Δ -11, при $U_{ЛН} > 110$ кВ – Y₀ / Δ -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.

Контрольные вопросы и задания

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?

Задачи

1. Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом.

2.2 Задания для решения.

Задача 2.1

Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом.

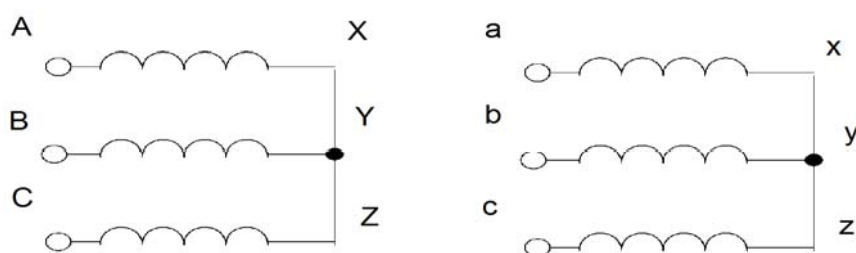


Рисунок 2.5 – Вариант 1

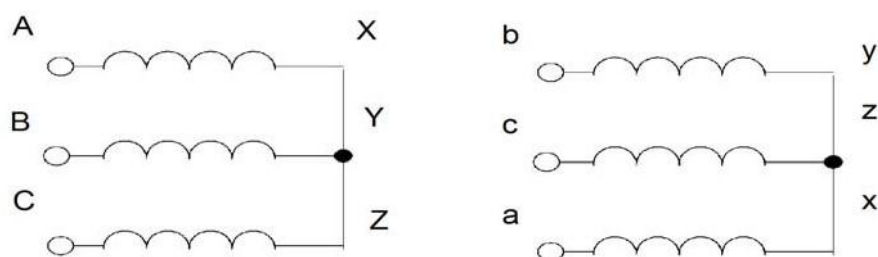


Рисунок 2.6 – Вариант 2

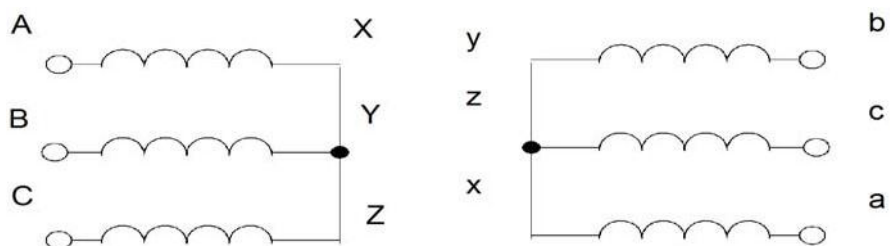


Рисунок 2.7– Вариант 3

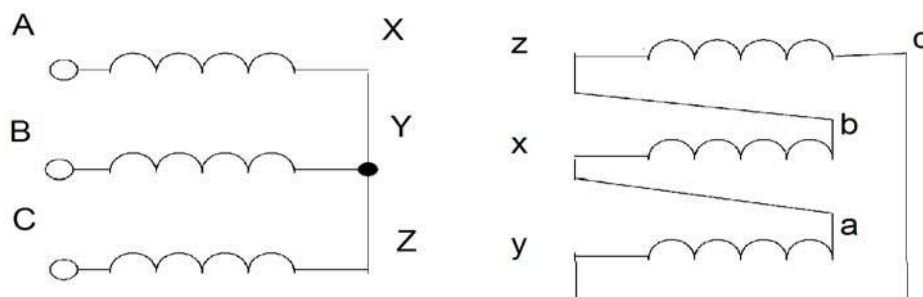


Рисунок 2.8 – Вариант 4

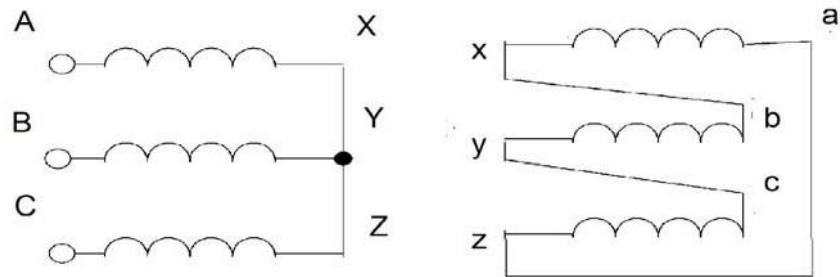


Рисунок 2.9 – Вариант 5

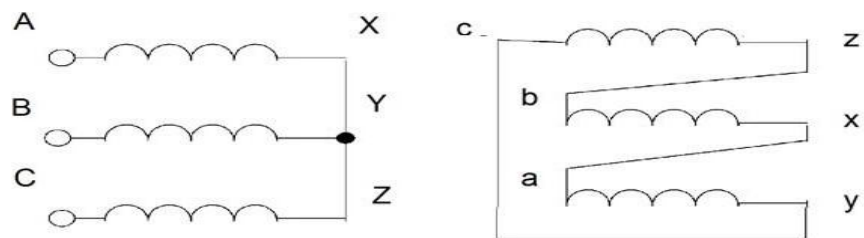


Рисунок 2.10 – Вариант 6

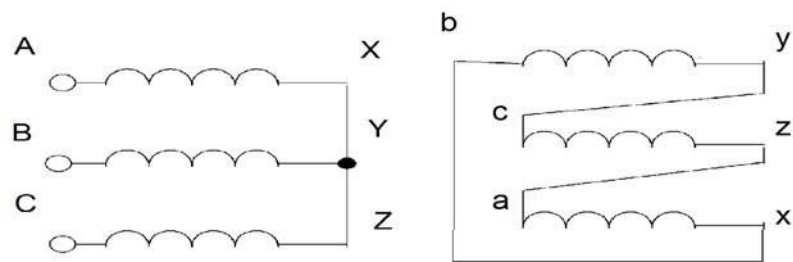


Рисунок 2.11 – Вариант 7

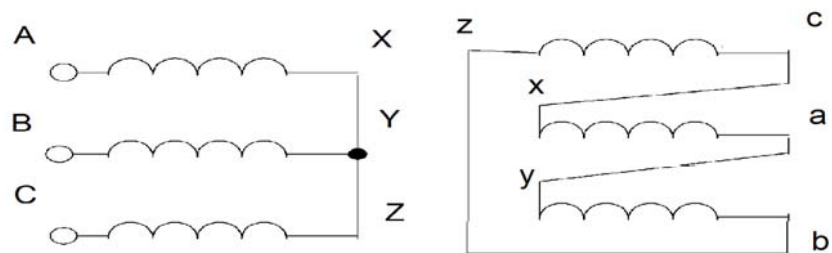


Рисунок 2.12 – Вариант 8

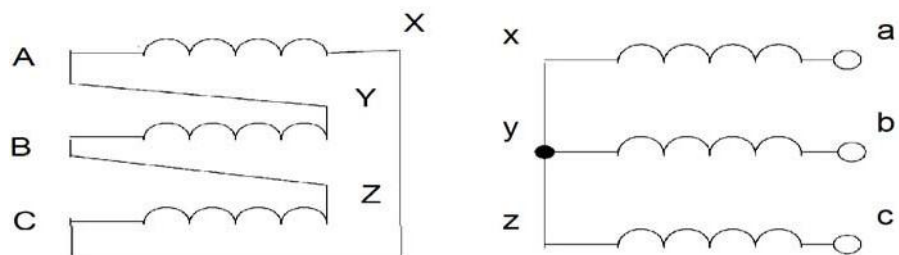


Рисунок 2.13 – Вариант 9

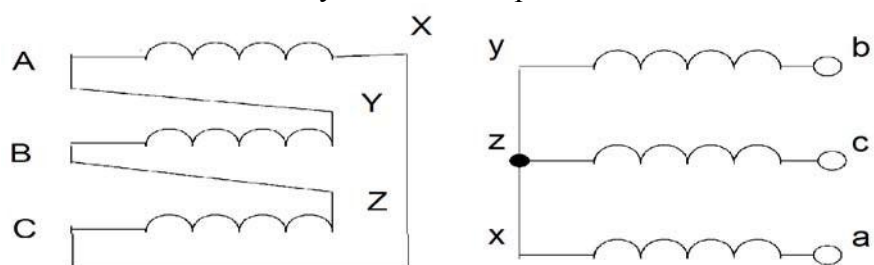


Рисунок 2.14 – Вариант 10

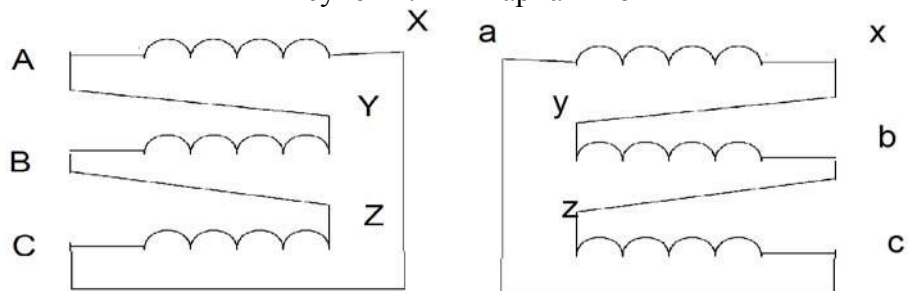


Рисунок 2.15 – Вариант 11

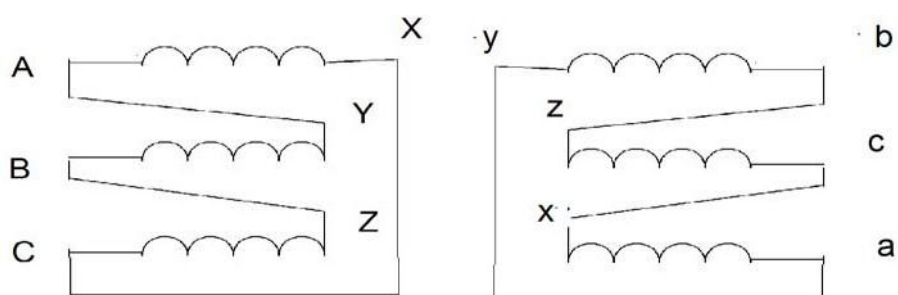


Рисунок 2.16 – Вариант 12

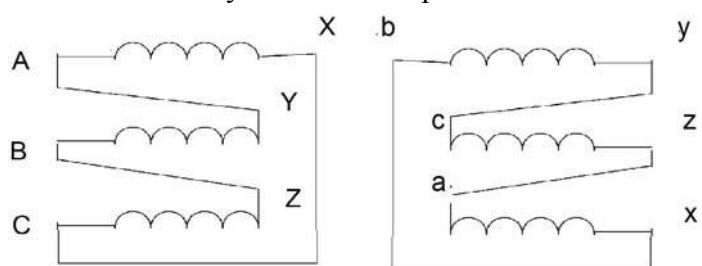


Рисунок 2.17 – Вариант 13

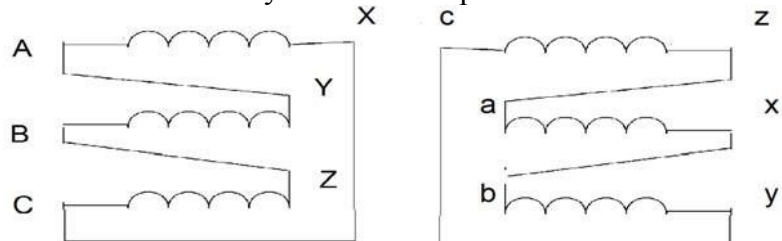


Рисунок 2.18 – Вариант 14

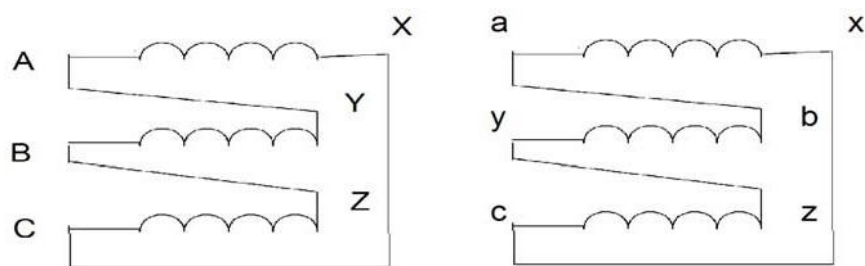


Рисунок 2.19 – Вариант 15

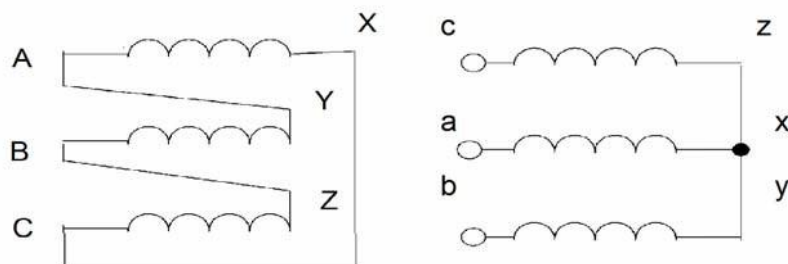


Рисунок 2.20 – Вариант 16

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №.4

Тема. Трансформация трехфазных токов

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции
- уравнения схемы замещения и характеристики
- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

Теоретическая часть.

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

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

Контрольные вопросы и задания

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?

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.

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №.5

Тема. Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции

- уравнения схемы замещения и характеристики

- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

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 $I_{к1}$ 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.

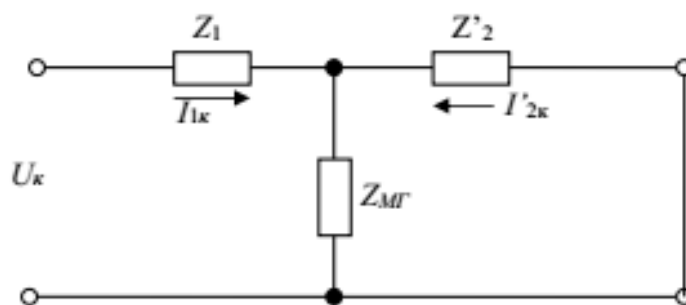


Рисунок 5.1 –Схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Общее сопротивление схемы:

$$Z_k = Z_1 + \frac{Z_{MG} * Z'_2}{Z_{MG} + Z'_2} \quad (5.5)$$

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

$$Z_k \approx Z_1 + Z'_2 \quad (5.6)$$

т.е. упрощенная схема замещения имеет вид:

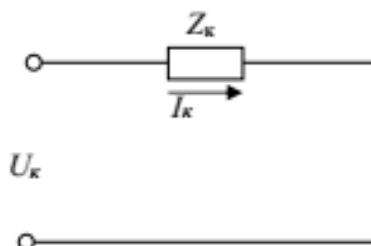


Рисунок 5.2 –Упрощенная схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Напряжение U_k , при котором ток короткого замыкания равен номинальному $I_k = I_n$, называется напряжением короткого замыкания. В относительных единицах:

$$U_{k*} = \frac{I_n Z_k}{U_n} = Z_{k*} \quad (5.7)$$

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

Составляющим напряжения короткого замыкания:

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

$$U_{кт} = U_k * \sin \varphi_k \quad (5.9)$$

Пример 1.

Номинальные данные трехфазного трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда-звезда»: мощность $S_H = 63$ кВА, напряжение на обмотке высокого и

низкого напряжения соответственно $U_{BH} = 21$ кВ и $U_{HH} = 0,4$ кВ. Потери холостого хода – $P_0 = 0,29$ кВт, ток холостого – $I_0 = 0,035I_H$, потери короткого замыкания – $P_K = 1,65$ кВт, напряжение короткого замыкания – $U_K = 4,5$ %, активная составляющая напряжения короткого замыкания – $U_{Ka} = 2,54$ %. 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 $\cos \varphi_1 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0.8$.

Решение:

Номинальные токи, А:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{BH}} = \frac{63 * 10^3}{\sqrt{3} * 21 * 10^3} = 1.73$$

$$I_{2H} = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} * I_{1H} = \frac{63 * 10^3}{\sqrt{3} * 21 * 10^3} = 91$$

Коэффициенты мощности, о.е.:

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

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

Сопротивления короткого замыкания, Ом:

$$r_K = r_1 + r_2' = \frac{P_K}{mI_H^2} = \frac{1650}{3(1.73)^2} = 183$$

$$x_K = x_1 + x_2' = \frac{U_{Kp}[\%] * (U_{1H}/\sqrt{3})}{100I_{1H}} = \frac{\sqrt{U_K^2 - U_{Ka}^2} * U_{1H}}{100\sqrt{3}I_{1H}} = \frac{\sqrt{(4.5)^2 - (2.54)^2} * 21000}{100\sqrt{3} * 1.73} = 260$$

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

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{S_H \cos \varphi_2}{S_H \cos \varphi_2 + P_0 + P_K}$$

при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta_H = \frac{63 * 1}{63 * 1 + 0.29 + 1.65} = 0.97$$

при $\cos \varphi_2 = 0.8$

$$\eta_H = \frac{63 * 0.8}{63 * 0.8 + 0.29 + 1.65} = 0.963$$

Максимальное значение коэффициента полезного действия соответствует условию $P_0 = P_K$. Учитывая, что потери короткого замыкания $P_K = 3I_{1\varphi}^2 r_K$, определяются значения тока

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_K}{3r_K}} = \sqrt{\frac{P_0}{3r_K}} = \sqrt{\frac{290}{3 \cdot 183}} = 0,727 \text{ A}$$

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 $S = 10 \text{ кВт} \cdot \text{А}$:

$$\Sigma \Delta P = P_0 + k_H^2 P_K = P_0 + \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 P_K = 0,29 + \left(\frac{10}{60} \right)^2 1,65 = 0,336 \text{ кВт}$$

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

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

$$\cos \varphi_2 = 1 \quad U'_2 = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1,73 \cdot 183 \cdot 1 = 11820 \text{ В.}$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8 \quad U'_2 = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1,73 \cdot (183 \cdot 1 + 260 \cdot 0,599) = 11630 \text{ В.}$$

Напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке:

$$U_{2HH} = \frac{\sqrt{3}U'_2}{k} = \frac{\sqrt{3}U'_2}{(U_{BH}/U_{HH})}$$

$$\cos \varphi_2 = 1 \quad U_{2HH} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11820}{(21/0,4)} = 390 \text{ В.}$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8 \quad U_{2HH} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11630}{(21/0,4)} = 383 \text{ В.}$$

Контрольные вопросы и задания

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?

Задачи

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

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

4. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_H=10500$ кВ·А, $U_{1H}/U_{2H}=110/6,3$ кВ. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_{1K}=11,5$ кВ, $P_{1K}=81,5$ кВт. Опыт проводился при температуре обмоток 75°C . Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая $R_1=R'_2$ и $X_1=X'_2$. Какое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №.6

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

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции
- уравнения схемы замещения и характеристики
- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

Теоретическая часть.

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

Пространственное распределение МДС в момент времени $t = 0$

$$F = \sum_{v=1}^{\infty} F_{vm} \cos v\alpha \quad (6.1)$$

Амплитуда v -ой гармонической МДС периодической системы катушек

$$F_{kvm} = \frac{4}{\pi v} F_{km} k_{yv} = \frac{4}{\pi v} \sqrt{2} I_a w_k k_{yv} \quad (6.2)$$

где $v = 1 + 2c$, $c = 0, 2, 3 \dots$

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

$$k_{nv} = \sin \frac{vy_k \pi}{2\tau} \quad (6.3)$$

При выборе шага катушки

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

гармонических v -го порядка в МДС содержаться не будет.

Магнитодвижущая сила фазы.

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

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

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

$$F_{\phi\nu m} = 2\sqrt{2}Iw k_{p\nu} k_{y\nu}/(\pi p\nu) \quad (6.6)$$

Где $w = 2 p w_K q / a$ – число витков в параллельной ветви фазы.

Коэффициент распределения обмотки:

$$k_{p\nu} = \frac{\sin[\nu\pi/(2m)]}{q \sin[\nu\pi/(2mq)]} \quad (6.7)$$

Обмоточный коэффициент для основной гармонической МДС

$$k_{об} = k_{y1}k_{p1} \quad (6.8)$$

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

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

где

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

или

$$F_{\nu m} = 6qk_{p\nu}k_{y\nu}\sqrt{2}I_a w_k/(\pi\nu) \quad (6.12)$$

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

Прямая гармоническая МДС трехфазной обмотки вращается с угловой скоростью

$$\Omega = w/p \quad (6.13)$$

в положительном направлении,

ν -я гармоническая МДС вращается с угловой скоростью

$$\Omega_\nu = \pm\Omega_1 * \nu \quad (6.14)$$

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

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

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:

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

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

Для ЭДС любой гармоники (v – номер гармоники)

$$k_{yv} = \sin\left(v\beta * \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.19)$$

Порядок зубцовых высших гармоник

$$v = k * Z / p \pm 1 = 2m * q * k \pm 1 \quad (6.20)$$

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_{yv} в зависимости от относительного шага β

Относительный шаг обмотки β	4/5	6/7	1
Коэффициент укорочения k_{yv}			
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_{2p} по сравнению с ЭДС катушечной группы сосредоточенной обмотки E_{2c} .

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

$$k_{y1} = \sin\left(\beta * \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.21)$$

Коэффициент распределения обмотки для первой гармоники ЭДС

$$k_{p1} = \frac{\sin(0.5 * q_1 * \gamma)}{q_1 \sin(0.5\gamma)} \quad (6.22)$$

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

где Z_1 – число пазов обмотки.

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

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

$$k_{pv} = \frac{\sin(0.5 * v * q_1 * \gamma)}{q_1 * \sin(0.5 * v * \gamma)} \quad (6.24)$$

ЭДС фазной обмотки статора определяется выражением

$$E_{\phi 1} = 4.44 \Phi * f_1 * w_1 * k_{o\phi 1} \quad (6.25)$$

где Φ – основной магнитный поток,

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

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

f_1 – частота переменного тока в обмотке статора, Гц;

w_1 – число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

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

w_k – число витков в катушке обмотки статора;

$k_{o\phi 1}$ – обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшения ЭДС, вызванные укорочением шага катушки и распределенной конструкцией обмотки

$$k_{o\phi 1} = k_{y1} k_{p1}$$

При выборе шага катушки

$$y_1 = \frac{(v - 1)}{v} \quad (6.28)$$

гармонических v -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

$$\tau = \pi * D_1 / (2p) = 3.14 * 0.2 / 4 = 0.157 \text{ м}$$

Основной магнитный поток

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

Число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

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

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2p m_1) = 36 / (4 * 3) = 3 \text{ паза}$$

Коэффициент распределения и обмоточный коэффициент для первой (основной)

гармоники:

$$k_{p1} = 0,96 \quad k_{o61} = k_{p1} = 0,96.$$

ЭДС фазной обмотки

$$E_{\Phi} = 4,44 * \Phi * f_1 * w_1 * k_{o61} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,96 = 153 \text{ В.}$$

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

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

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 ($\nu = 1$)

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

— для пятой гармоники ($\nu = 5$)

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

— для седьмой гармоники ($\nu = 7$)

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

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

$$k_{o61} = 0,985 * 0,96 = 0,946$$

$$k_{065} = 0,649 * 0,217 = 0,14$$

$$k_{067} = -0,353 * (-0,178) = 0,062$$

ЭДС фазы основной гармоник

$$E_{\phi 1y} = 4,44 * \Phi * f_1 * w_1 * k_{061} = 4.44 * 0.015 * 50 * 48 * 0.946 = 151 \text{ В}$$

Таким образом, укорочение шага обмотки на один паз привело к уменьшению ЭДС основной гармоник 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 гармоник уменьшится на 35 %, в седьмой гармоник – 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.

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

Контрольные вопросы и задания

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?

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 восьмиполусной 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 шестиполусной 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 шестиполусная 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. Четырехполусная 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 восьмиполусной 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 шестиполусной 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 многополусная $2p = 8$

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №.7

Тема. Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции
- уравнения схемы замещения и характеристики
- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

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 токосяема 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. Своё 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

$$Z_{\partial} = Z^* u_n, \quad (18.1)$$

где u_n – число секционных сторон в одном слое паза;

Z – действительное число пазов.

Полное число элементарных пазов

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

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 $\tau = Z_{\partial}/2p$, то есть

$$y = \frac{Z_{\partial}}{2p} \pm \varepsilon \quad (18.4)$$

где ε – укорочение или удлинение шага обмотки.

Величина является дробной частью отношения $Z_{\partial}/2p$, которая при знаке минус уменьшает его, а при знаке плюс дополняет до ближайшего целого числа

Шаг по пазам равен:

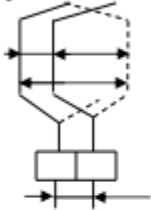
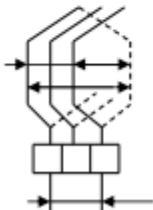
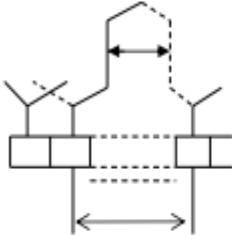
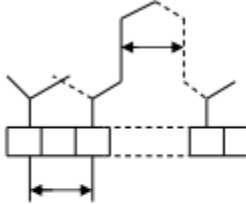
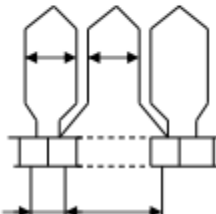
$$y_z = y_1 / u_n \quad (18.5)$$

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 уравнивающих 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 уравнительных 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
Простая волновая 	$2a = 2$	$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p}$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	
Сложная волновая многоходовая 	$2a = 2m$	$y = y_k = \frac{K \pm m}{p}$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	m
Лягушачья 	$2a = 2p \cdot 2m$	$y_{kn} + y_{kn} = \frac{K}{p}$	$y_{1n} + y_{1n} = \frac{K}{p}$ $y_{2n} \pm y_{2n}$	—

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.

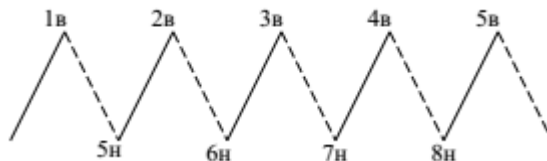


Рисунок 18.1 – Таблица соединения секционных сторон обмотки

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

$$\tau = \frac{Z_{\Sigma}}{2p} \quad (18.5)$$

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 $y_y = Z/p$.

Контрольные вопросы и задания

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?

Задачи

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

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №.8

Тема. Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции

- уравнения схемы замещения и характеристики

- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

Теоретическая часть.

ЭДС параллельной ветви обмотки якоря

$$E_a = 4f\omega\Phi = C_0 * \omega * \Phi \quad (19.1)$$

где f – частота ЭДС обмотки якоря;

w – число витков в параллельной ветви обмотки якоря

$$w = \frac{N}{4a} \quad (19.2)$$

C_0 – постоянный коэффициент

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

Φ – магнитный поток на один полюс

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

где B_δ – магнитная индукция в зазоре;

l_δ – расчетная длина якоря;

b_δ – расчетная полюсная дуга.

Магнитный поток при холостом ходе

$$\Phi_v = a_\delta * \tau * l_\delta * B_\delta \quad (19.5)$$

где a_δ – коэффициент полюсного перекрытия

$$a_{\delta} = b_{\delta} / \tau \quad (19.6)$$

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

$$U_{\Gamma} = E - I_a R_a \quad (19.8)$$

– для двигателя постоянного тока

$$U_{\text{д}} = E + I_a R_a \quad (19.9)$$

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 $I_{\text{в}} = 0,02 I_{\text{ан}}$, 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 $w_{\text{в}}$, необходимое для компенсации реакции якоря по поперечной оси при номинальной нагрузке двигателя.

Решение:

Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме

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

Ток в обмотке возбуждения

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

Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

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

Магнитное напряжение воздушного зазора

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

МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

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

МДС якоря на пару полюсов в режиме номинальной нагрузки

Коэффициент реакции якоря по поперечной оси при $B_z = 2,2 \text{ Тл}$ и $F_a/F_{B0} = 8750/4590 = 1,9$ коэффициент $k_{pa} = 0,22$.

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

$$F_{qa} = k_{pa} * F_{aH} = 0,22 \cdot 8750 = 1925 \text{ А.}$$

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

$$F_{BH} = F_{B0} + F_{qa} = 4590 + 1925 = 6515 \text{ А.}$$

Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения

$$W = \frac{F_{BH}}{2I_B} = \frac{6515}{2 \cdot 5} = 651 \text{ виток}$$

Контрольные вопросы и задания

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?

Задачи

1. Определить ЭДС параллельной ветви простой волновой обмотки якоря четырехполюсной машины постоянного тока, если число эффективных проводников якоря $N = 920$, частота вращения $n = 1500 \text{ об/мин}$, магнитный поток на полюс $\Phi = 0,425 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$.
2. При частоте вращения якоря $n = 1500 \text{ об/мин}$ ЭДС машины постоянного тока равна 115 Вт. 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 $E = 225 \text{ В}$. Определить напряжение для режима генератора и двигателя при токе якоря $I_a = 500 \text{ А}$, если сопротивление цепи якоря $R_a = 0,01 \text{ Ом}$.

4. Магнитный поток на полюс машины постоянного тока при номинальном возбуждении $\Phi = 1,29 \cdot 10^{-2}$ 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 $R_n = 0,44$ 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.

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Практическое занятие №.9

Тема. Режимы работы машины постоянного тока

Цель занятия. формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

Знания:

- принципов действия современных типов электрических машин, особенностей их конструкции
- уравнения схемы замещения и характеристики
- методы анализа и моделирования электрических машин

Умения:

- анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин

Владения:

- навыками определения основных параметров электрических машин

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:

$$P_1 = M_1 * \omega \quad (20.1)$$

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:

$$P_{\text{ЭМ}} = c_0 * I_{\text{я}} * \Phi * \omega = E * I_{\text{я}} \quad (20.3)$$

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 $P_B = R_B \cdot I_B^2$ мощность, расходуемая на питание обмотки независимого (параллельного) возбуждения.

Коэффициент полезного действия:

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

где $\Sigma P = p_T + p_d + p_{\Sigma} + p_B$ сумма потерь.

В режиме двигателя $U > E$, ток $I_A < 0$, поэтому мощность $P_1, P_{мех}, P_{ЭМ}, P$ 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 $P_n = 25$ кВт, напряжение питания цепи якоря $U_n = 440$ В, напряжение питания цепи возбуждения $U_{\epsilon} = 220$ В, частота вращения якоря в номинальном режиме $n_n = 2200$ об/мин, сопротивление цепи якоря $\Sigma r = 0,3$ Ом, цепи возбуждения $r_{\epsilon} = 60$ Ом, падение напряжения в щеточном контакте при номинальном токе $\Delta U_{щ} = 2$ В, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{щ} = 2$ В, ток якоря в режиме холостого хода $I_0 = 6$ А.

Решение:

Частота вращения в режиме холостого хода

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

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

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

Момент в режиме холостого хода

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

Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

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

Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке:

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

Электромагнитная мощность двигателя в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{ЭМ.Н} = 0,105 M_H \cdot n_n = 0,105 \cdot 119 \cdot 2200 = 17490 \text{ Вт.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода:

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

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

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

определим значение тока якоря в режиме номинальной нагрузки:

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

Сумма магнитных и механических потерь двигателя пропорциональна моменту холостого хода:

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

Электрические потери в цепи обмотки якоря:

$$p_{aэ} = I_{aH}^2 * \Sigma_r = 67^2 * 0,3 = 1347 \text{ Вт}.$$

Электрические потери в щеточном контакте якоря:

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

Мощность, подводимая к цепи якоря, в номинальном режиме:

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

Ток в обмотке возбуждения:

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

Мощность в цепи возбуждения

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

Мощность, потребляемая двигателем в режиме номинальной нагрузки:

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

КПД двигателя в номинальном режиме:

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

Контрольные вопросы и задания

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?

Задачи

1. Генератор постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением $U_H = 230$ В и номинальной частотой вращения $n_H = 1500$ 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_{aH} , ток нагрузки I_{aH} , электромагнитную мощность $P_{эм}$ и электромагнитный момент $M_{эм}$. Размагничивающим действием реакции якоря пренебречь.
2. В шестиполюсной машине постоянного тока поток возбуждения $\Phi_B = 0,01$ Вб, якорь вращается с частотой $n = 60$ об/мин. Определить среднее значение ЭДС, индуцируемой в проводнике обмотки якоря.
3. ЭДС генератора независимого возбуждения $E_a = 240$ В, сопротивление якорной обмотки $r = 0,1$ Ом. Определить напряжение на щетках генератора при токе нагрузки $I_H = 100$ 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 $= 0,865$. 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 $r_n = 1,2$ Ом. Определить: ток нагрузки генератора, ток в цепи возбуждения, ток якоря, ЭДС генератора, полезную мощность

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>