

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

Электрические машины

**Методические указания
по выполнению лабораторных работ**
для студентов направления подготовки 13.03.02
Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) Цифровые
технологии в электроэнергетике
Изучается в 4, 5 семестре

Оглавление

Введение.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1	6
Исследование трехфазного двухобмоточного трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания.....	6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2	24
Исследование нагрузочных режимов трансформатора.....	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3	38
Исследование трехфазного синхронного генератора независимого возбуждения.....	38
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4	54
Исследование трехфазного синхронного двигателя.....	54
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5	67
Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	67
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6	81
Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.....	81
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7	93
Исследование генератора постоянного тока с независимым	93
возбуждением	93
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8	110
Исследование двигателя постоянного тока с параллельным	110
возбуждением	110
Литература	123
Приложение 1	124

Введение

Настоящее учебное пособие предназначено для проведения лабораторного практикума по дисциплине «Электрические машины» у студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Электрические машины» является базовой, призванной формировать профессиональные компетенции бакалавров – электроэнергетиков. Лабораторный практикум рассчитан на закрепление и расширение знаний, полученных при изучении наиболее трудоёмких и сложных теоретических разделов дисциплины. Целью выполнения лабораторных работ является исследование характеристик электрических машин, определение параметров их схем замещения, получение энергетических параметров различных режимов их работы. Учебное пособие разработано в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования, рабочим учебным планом и рабочей программой дисциплины «Электрические машины». Практикум направлен на формирование следующих профессиональных компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования; способность проводить обоснование проектных решений; готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности; способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 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.

В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Снять и построить характеристику холостого хода.
2. Снять и построить характеристику короткого замыкания.
3. Определить паспортные данные трансформатора.
4. На основании данных опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитать параметры Т-образной схемы замещения трансформатора.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Трансформатор представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Основными элементами трансформатора являются обмотки и магнитопровод (сердечник), выполняемый из шихтованной

электротехнической стали (рисунок 1.1). Трансформатор имеет первичную обмотку, к которой подводится электрическая энергия, и вторичную, к которой подключается нагрузка (потребитель). Передача энергии из одной обмотки в другую осуществляется путем электромагнитной индукции.

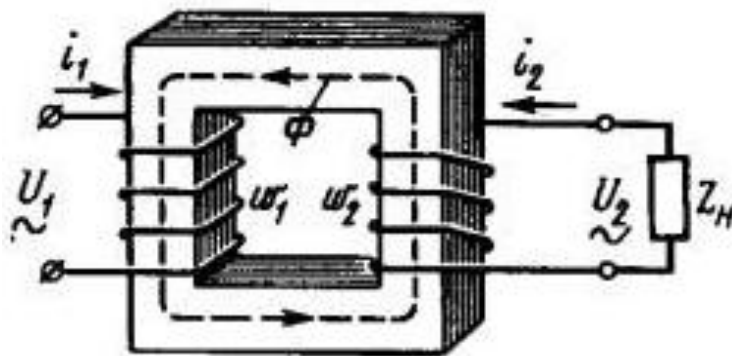


Рисунок 1.1 – Устройство простейшего трансформатора

При подаче синусоидального напряжения U_1 на первичную обмотку по ней начинает протекать ток i_1 , вызывающий магнитный поток, замыкающийся по сердечнику. Этот поток индуцирует ЭДС в первичной и вторичной обмотках, амплитуда которых пропорциональна числу витков в этих обмотках (ω_1 и ω_2 , соответственно). При подключении нагрузки (Z_H) ко вторичной обмотке в ней возникает ток i_2 и на ее зажимах устанавливается вторичное напряжение U_2 . Результирующий магнитный поток Φ создается током обеих обмоток.

На рисунке 1.2 представлена Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь.

На рисунке 1.2 приняты следующие обозначения: R_1 , X_1 – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки; R'_2 , X'_2 – активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной; R_M , X_M – активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания; U_1 – первичное напряжение; U'_2 – вторичное напряжение, приведенное к первичному; I_1 , I'_2 , I_M – токи в соответствующих ветвях.

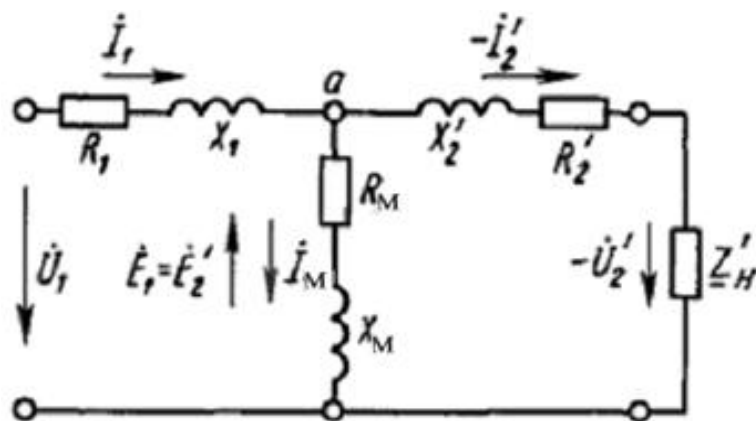


Рисунок 1.2 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь

Для определения параметров схемы замещения трансформатора производятся опыты холостого хода и короткого замыкания.

Для трехфазного двухобмоточного трансформатора по результатам опыта холостого хода определяются следующие величины:

а) среднее значение линейного тока холостого хода

$$I_0 = (I_A + I_B + I_C) / 3; \quad (1.1)$$

б) среднее значение фазного напряжения холостого хода первичной обмотки

$$U_{01} = (U_A + U_B + U_C) / 3; \quad (1.2)$$

в) среднее значение фазного напряжения холостого хода вторичной обмотки

$$U_{02} = (U_a + U_\phi + U_c) / 3; \quad (1.3)$$

г) мощность холостого хода

$$P_0 = (P_A + P_B + P_C); \quad (1.4)$$

д) коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{01} \cdot I_0}; \quad (1.5)$$

е) коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{01}}{U_{02}}. \quad (1.6)$$

По результатам опытов холостого хода можно определить параметры ветви намагничивания.

При параллельном соединении сопротивлений r_m и x_m :

$$r_m = \frac{3 \cdot U_{01}^2}{P_0}; \quad (1.7)$$

$$x_m = \frac{3 \cdot U_{01}^2}{Q_0}. \quad (1.8)$$

При последовательном соединении

$$R_m = \frac{x_m^2}{r_m}; \quad X_m = x_m. \quad (1.9)$$

Характеристики холостого хода представляют собой зависимости I_0 , P_0 , X_m , R_m , $\cos \varphi_0$ от U_{01} (рисунок 1.3).

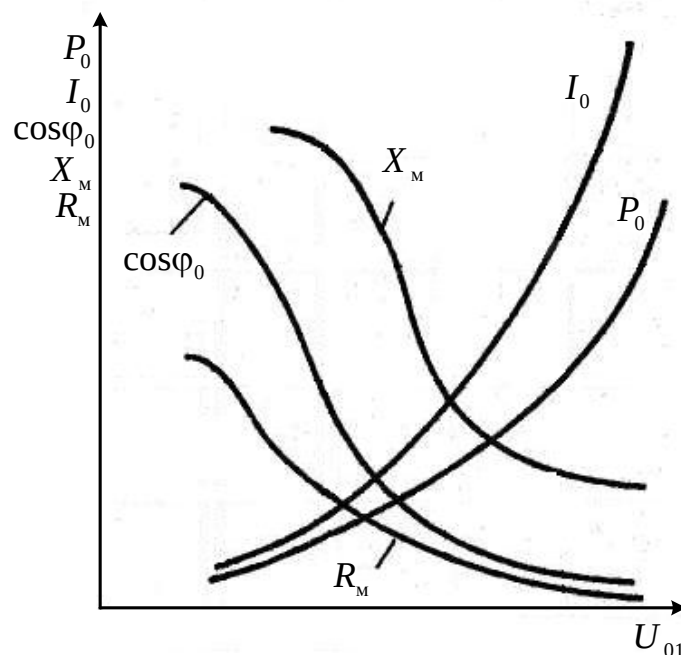


Рисунок 1.3 – Характеристики холостого хода

По результатам опыта короткого замыкания определяются следующие величины:

а) среднее значение линейного тока короткого замыкания

$$I_{\kappa} = (I_A + I_B + I_C) / 3; \quad (1.10)$$

б) среднее значение фазного напряжения короткого замыкания

$$U_{\kappa} = (U_A + U_B + U_C) / 3; \quad (1.11)$$

в) мощность короткого замыкания

$$P_{\kappa} = (P_A + P_B + P_C); \quad (1.12)$$

г) коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{\sqrt{3} \cdot U_{\kappa} \cdot I_{\kappa}}. \quad (1.13)$$

д) сопротивление короткого замыкания (при соединении первичной обмотки треугольником)

$$Z_{\kappa} = \sqrt{3} U_{\kappa} / I_{\kappa}; \quad (1.14)$$

е) активное сопротивление короткого замыкания (при соединении первичной обмотки треугольником)

$$R_{\kappa} = P_{\kappa} / I_{\kappa}^2; \quad (1.15)$$

ж) индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \quad (1.16)$$

Далее можно определить активные и индуктивные сопротивления обмоток трансформатора:

$$R_{\kappa} = R_1 + R'_2; \quad R_1 = R'_2 = R_{\kappa} / 2; \quad (1.17)$$

$$X_{\kappa} = X_1 + X'_2; \quad X_1 = X'_2 = X_{\kappa} / 2. \quad (1.18)$$

Характеристики короткого замыкания представляют собой зависимости I_{κ} , P_{κ} , $\cos \varphi_{\kappa}$ от U_{κ} (рисунок 1.4).

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.

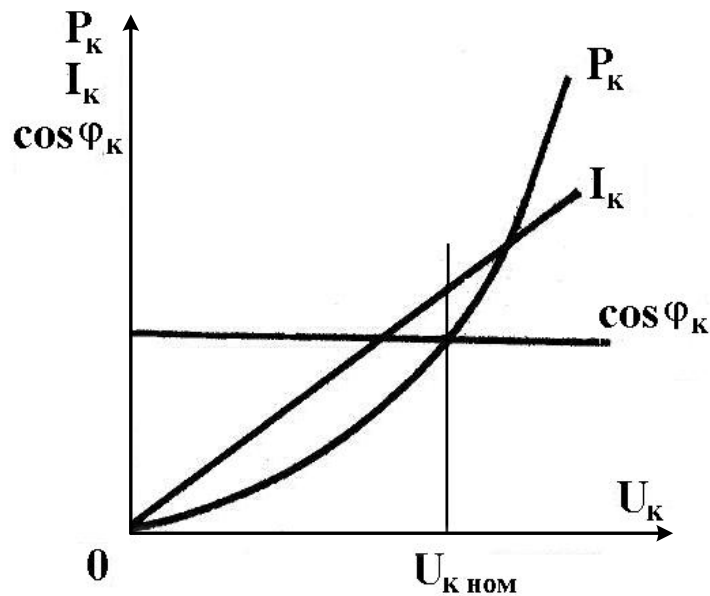


Рисунок 1.4 – Характеристики короткого замыкания

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:

$$I_{нВН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{нВН}}; \quad (1.19)$$

$$I_{нНН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{нНН}}; \quad (1.20)$$

- 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:

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_{нВН}} \cdot 100\%; \quad (1.21)$$

- 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 75°C по следующим формулам:

$$R_{K75^\circ} = R_{K\theta} [1 + \alpha(75^\circ C - \theta)], \quad (1.22)$$

где $\alpha = \frac{1}{235 + \Theta}$ – температурный коэффициент сопротивления,

Θ – температура окружающей среды;

д) полное сопротивление короткого замыкания:

$$Z_{\kappa 75^\circ} = \sqrt{R_{\kappa 75^\circ}^2 + X_{\kappa}^2}; \quad (1.23)$$

е) напряжение короткого замыкания:

$$u_{\kappa} \% = \frac{Z_{\kappa 75^\circ} \cdot I_{нВНф}}{U_{нВНф}} 100 \%. \quad (1.24)$$

При этом составляющие напряжения короткого замыкания:

активная

$$u_{\kappa а} \% = \frac{R_{\kappa 75^\circ} \cdot I_{нВНф}}{U_{нВНф}} 100 \%; \quad (1.24)$$

реактивная

$$u_{\kappa р} \% = \frac{X_{\kappa} \cdot I_{нВНф}}{U_{нВНф}} 100 \%; \quad (1.25)$$

ж) мощность короткого замыкания

$$P_{\kappa 75^\circ} = 3 \cdot I_{нф}^2 \cdot R_{\kappa 75^\circ}. \quad (1.26)$$

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «EUT – Исследование трансформаторов» фирмы LUCAS-NÜLLE. Стенд включает в себя следующие элементы (рисунок 1.5 – 1.11): трехфазный трансформатор 800 В·А, омическая нагрузка, емкостная трехфазная нагрузка, индуктивная трехфазная нагрузка, трехфазный измерительный прибор, блок силового выключателя, регулируемый блок питания.

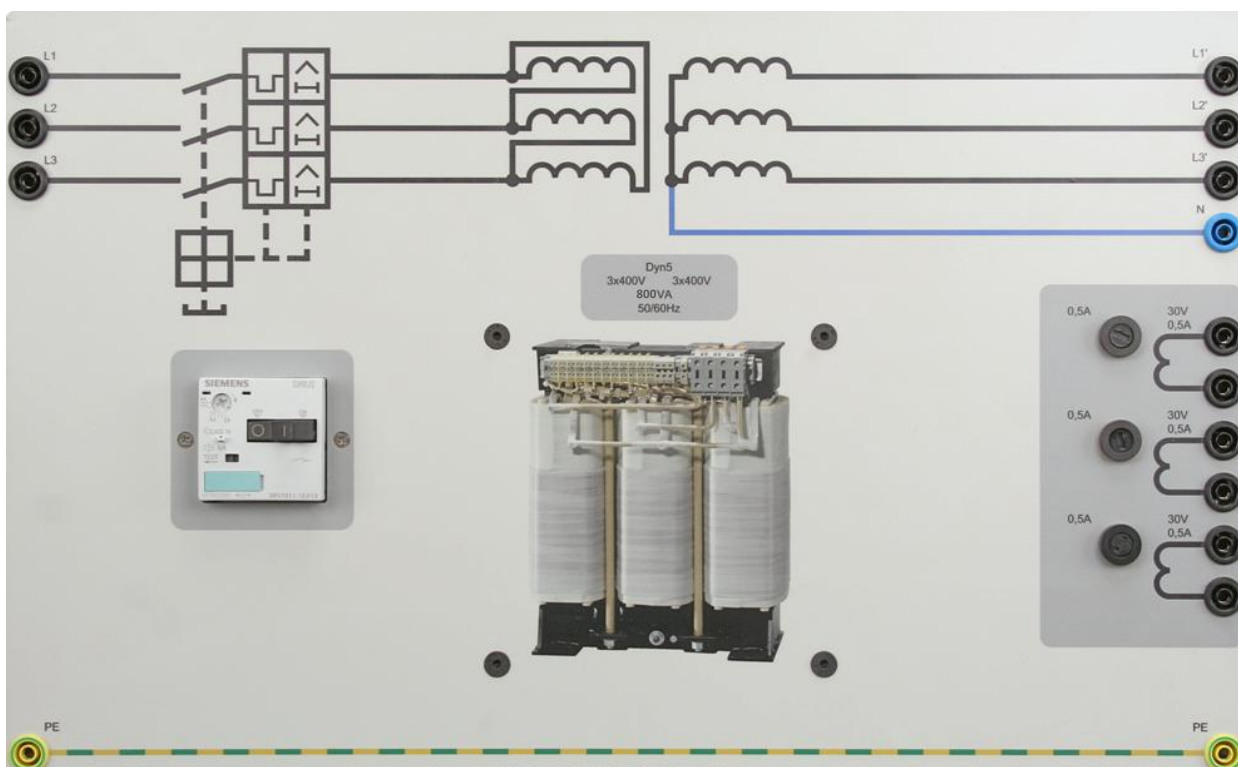


Рисунок 1.5 – Трехфазный трансформатор

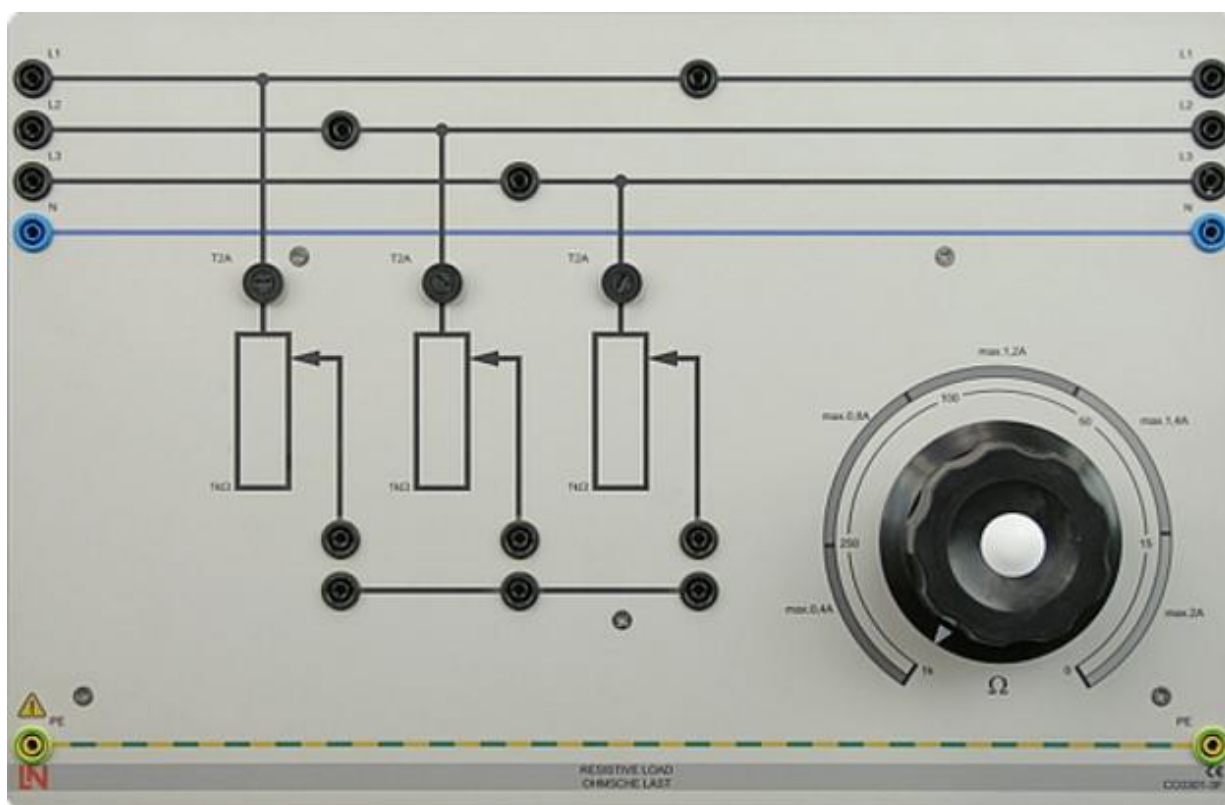


Рисунок 1.6 – Омическая нагрузка

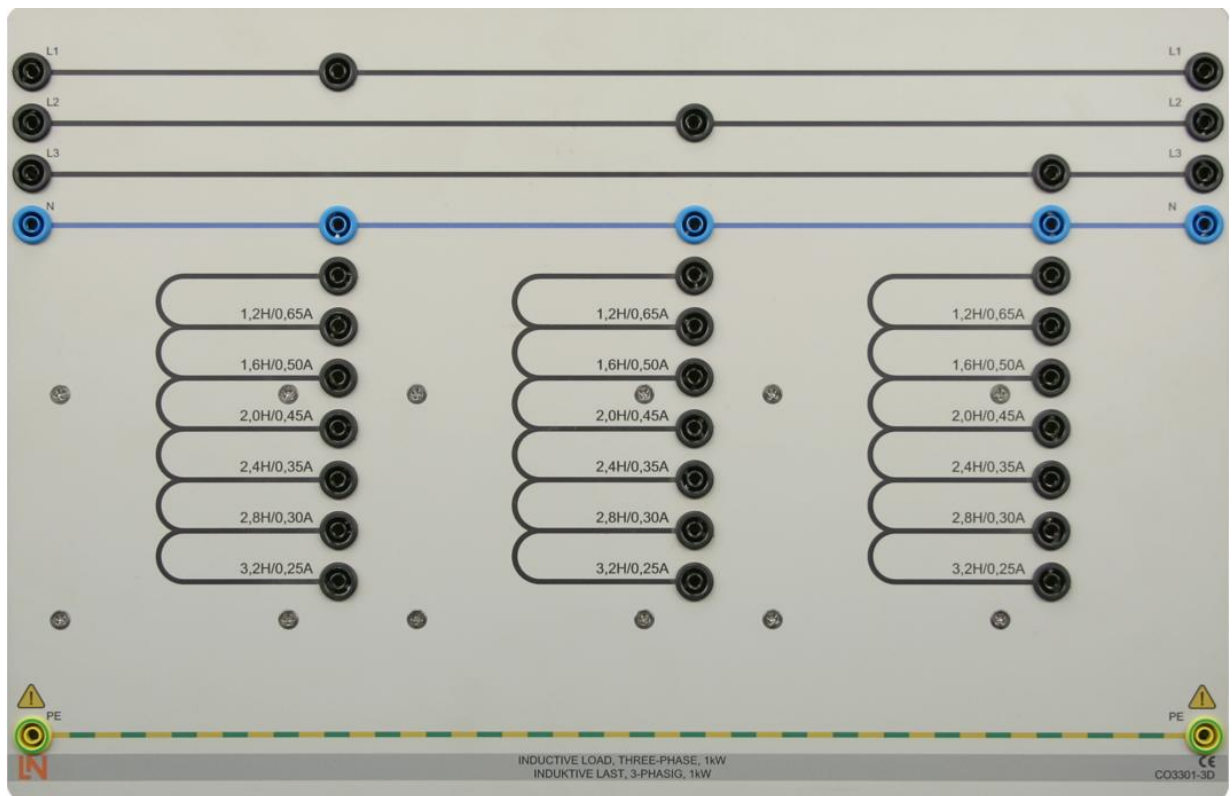


Рисунок 1.7 – Индуктивная нагрузка

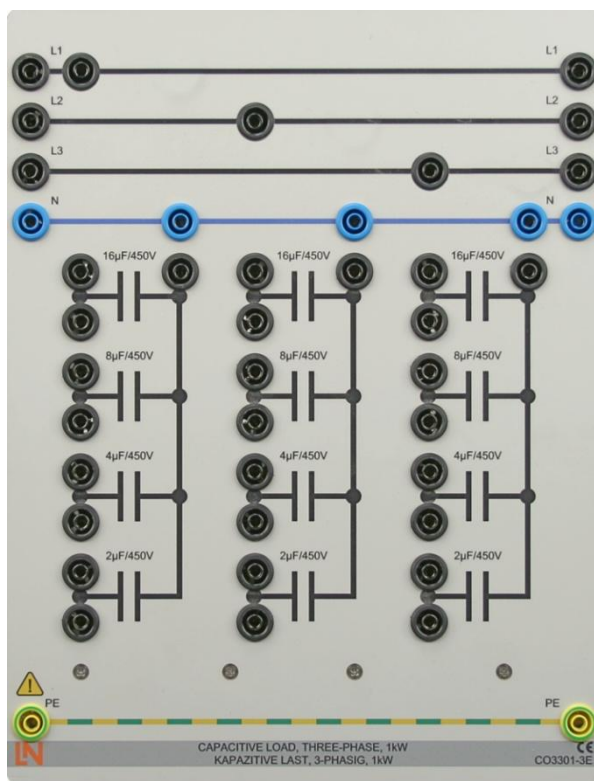


Рисунок 1.8 – Емкостная нагрузка

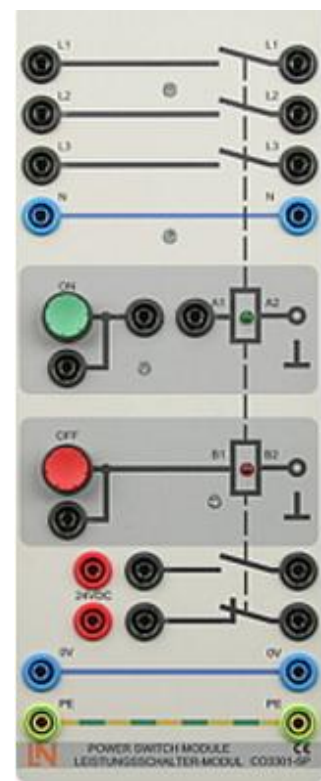


Рисунок 1.9 – Блок силового выключателя

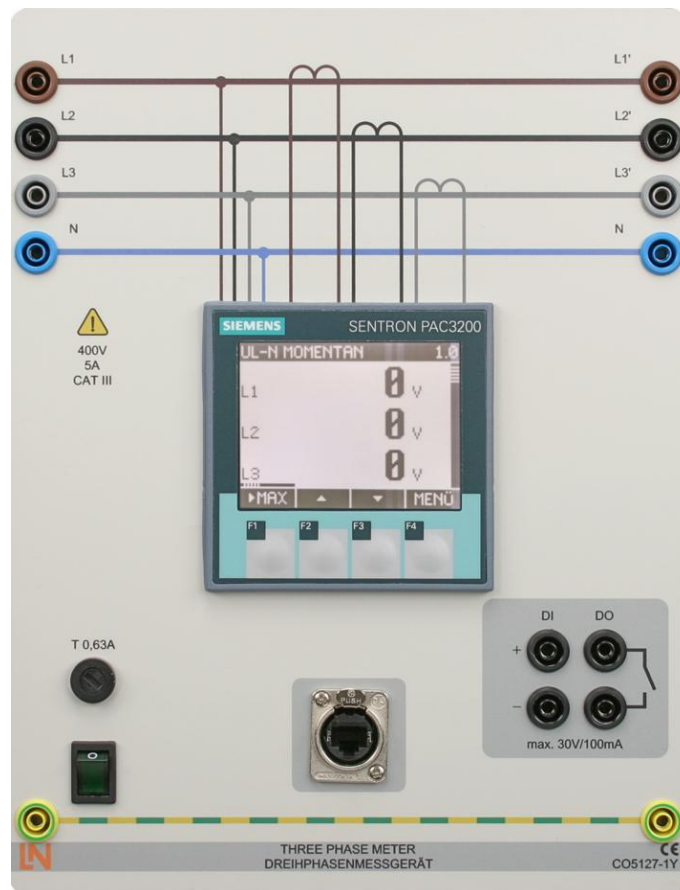


Рисунок 1.10 – Трехфазный измерительный прибор



Рисунок 1.11 – Регулируемый блок питания

В стандартной комплектации лабораторного стенда имеются соединительные провода.

Указания по технике безопасности

К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по

технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

Опыт холостого хода

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 1.12. При выполнении опыта холостого хода первичная обмотка трансформатора соединяется по схеме «треугольник», вторичная обмотка – по схеме «звезда». Вторичная обмотка разомкнута. В процессе опыта снимаются характеристики холостого хода, представляющие зависимости тока, потребляемой мощности и коэффициента мощности от напряжения первичной обмотки при разомкнутой вторичной: $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_{10})$ при $f = \text{const}, I_2 = 0$.

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Включить силовой выключатель (кнопка ON, рисунок 1.9). Включить тумблеры на измерительных приборах (рисунок 1.10). Включить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока.

3. На измерительном приборе (рисунок 1.10), расположенном в первичной цепи трансформатора, используя кнопки на его панели, выбрать режим измерения напряжения «V_{ph-ph}», т.к. первичная обмотка соединена по схеме «треугольник». На измерительном приборе (рисунок 1.10), расположенном во вторичной цепи трансформатора, выставить режим измерения напряжения «V_{ph-n}», т.к. вторичная обмотка соединена по схеме «звезда».

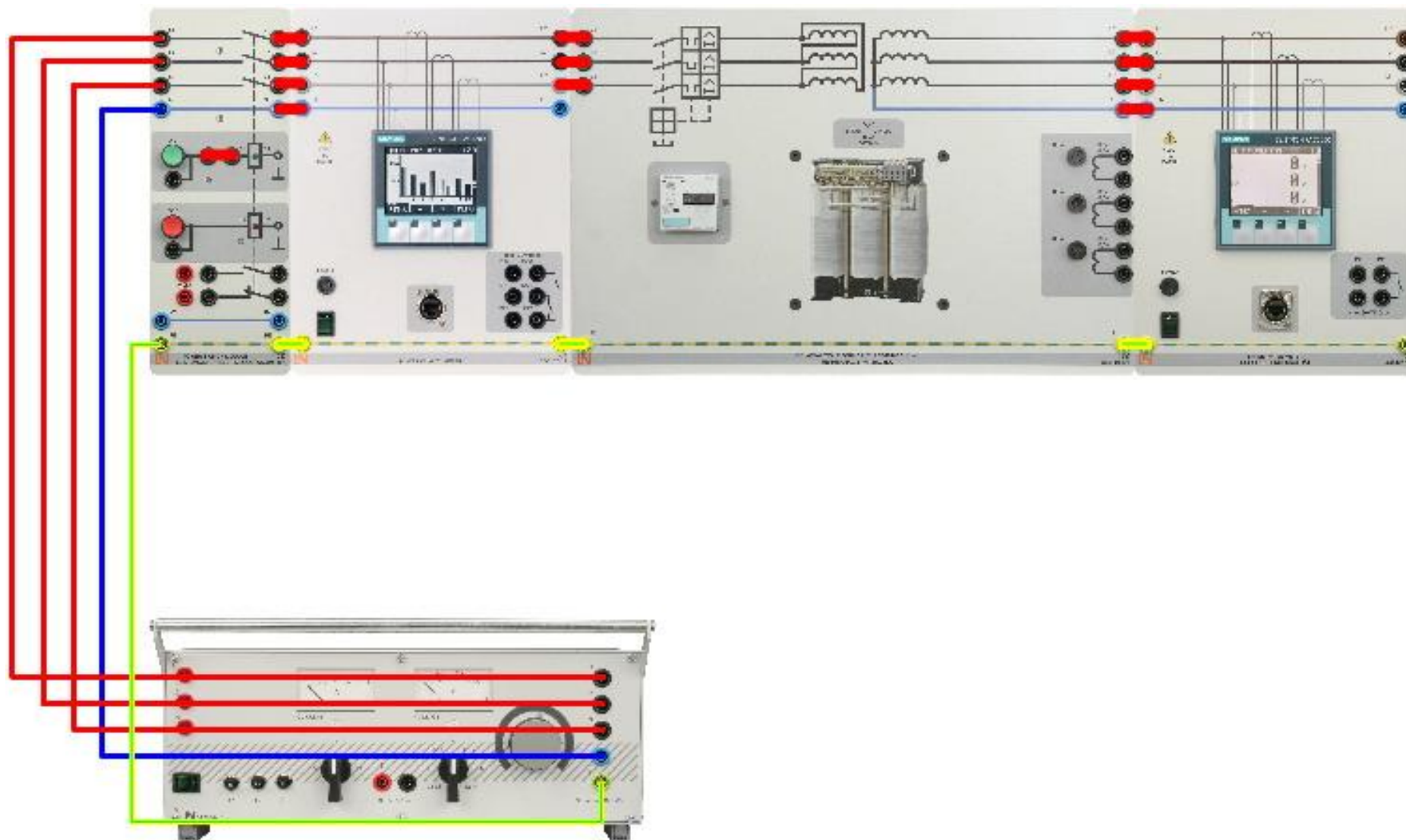


Рисунок 1.12 – Схема установки при опыте холостого хода

4. Вращая ручку регулятора блока питания (рисунок 1.11), увеличивать напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора, пока измерительный прибор в первичной цепи (рисунок 1.10) не покажет напряжение, равное $0,6U_n$. Номинальные значения параметров трансформатора указаны на стенде. Измерительный прибор показывает значение напряжения в каждой фазе (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), поэтому при подаче напряжения следует ориентироваться на среднее значение трех фаз. Записать показания приборов (рисунок 1.10) в таблицу 1.1, учитывая, что измерительный прибор, расположенный во вторичной цепи трансформатора, показывает напряжение в фазах вторичной обмотки (U_a, U_b, U_c).

5. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10), используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока «AMPS». Результаты записать в таблицу 1.1 (столбцы 2–4).

6. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10) выбрать режим измерения активной мощности «P». Результаты записать в таблицу 1.1 (столбцы 11–13).

7. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10), используя кнопки на панели, выбрать режим измерения реактивной мощности «Q». Результаты записать в таблицу 1.1 (столбцы 14–16).

8. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10) выбрать режим измерения напряжения «Vph-ph». Увеличить подводимое напряжение с помощью регулятора блока питания (рисунок 1.12) до значения $0,7U_n$. Повторить опыты (п. 5 – 7) для диапазона значений напряжения от $0,7U_n$ до U_n . Результаты занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений опыта холостого хода

Измеренные величины															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№	I_A , А	I_B , А	I_C , А	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , 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															
...															
5															

9. По завершении опыта выкрутить ручку регулятора напряжения (рисунок 1.12) в положение, соответствующее напряжению 0 В. Выключить силовой выключатель (кнопка OFF, рисунок 1.9). Выключить тумблеры на измерительных приборах (рисунок 1.10). Выключить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока. Разобрать схему.

10. Рассчитать сопротивления цепи намагничивания R_m и X_m . Результаты расчета занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Рассчитанные величины опыта холостого хода

Рассчитанные величины									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№	I_0 , А	U_{01} , В	U_{02} , В	P_0 , Вт	Q_0 , Вар	r_m , кОм	X_m , кОм	R_m , Ом	$\cos \varphi_0$
1									
...									
5									

11. По данным таблиц 1.1, 1.2 построить графики характеристик холостого хода (рисунок 1.3).

Опыт короткого замыкания

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 1.13. При выполнении опыта короткого замыкания первичная обмотка трансформатора соединяется по схеме «треугольник», вторичная обмотка – по схеме «звезда». При этом выводы вторичной обмотки замыкаются накоротко. Опыт проводится при **пониженном** первичном напряжении, чтобы ток не превышал номинального значения.

В ходе опыта снимаются характеристики короткого замыкания, которые представляют собой зависимость тока, потребляемой мощности и коэффициента мощности от подводимого напряжения при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора: $I_K, P_K, \cos \varphi_K = f(U_K)$ при $f = \text{const}, U_2 = 0$.

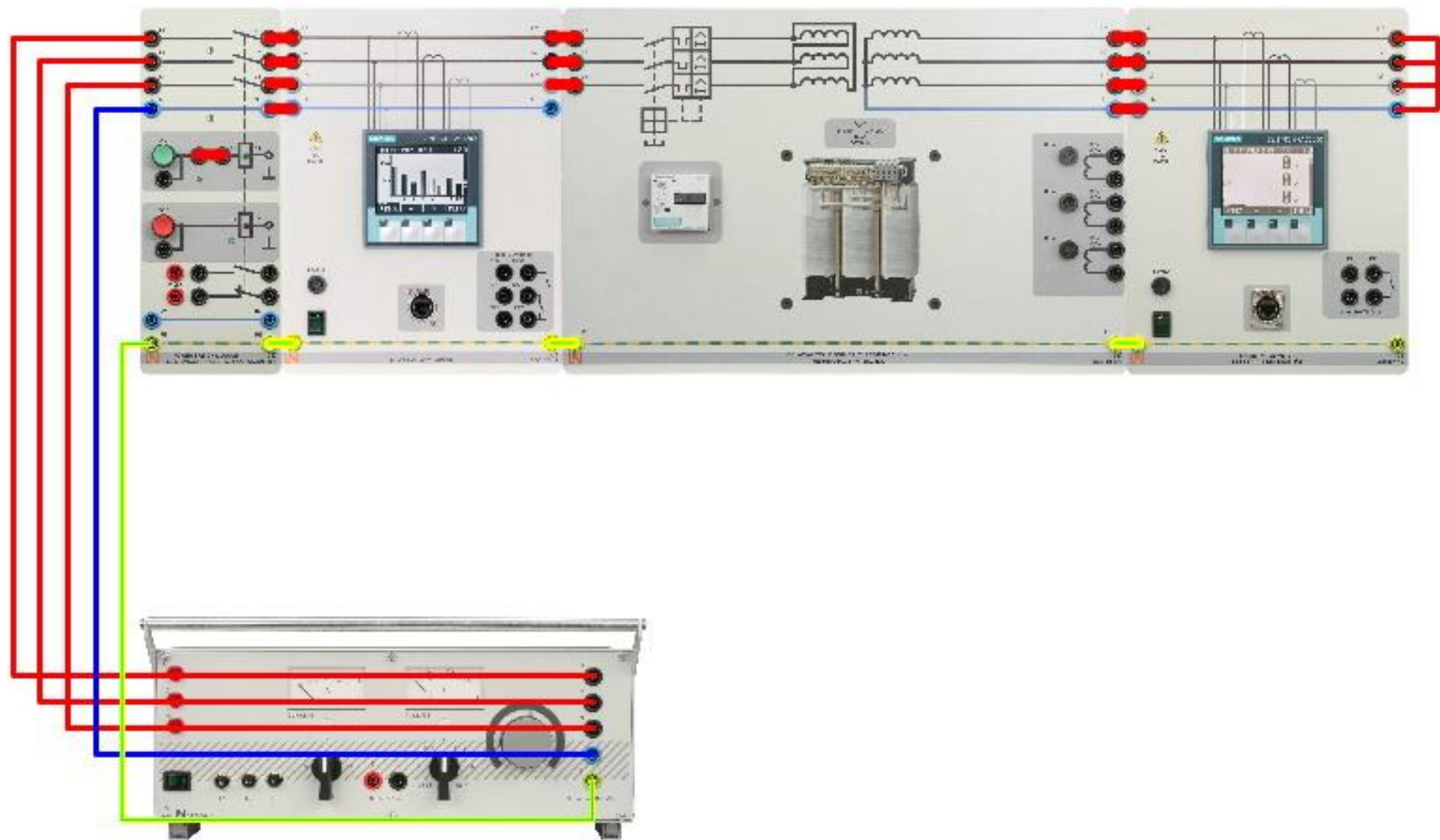


Рисунок 1.13 – Схема установки при опыте короткого замыкания

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Включить силовой выключатель (кнопка ON, рисунок 1.9). Включить тумблеры на измерительных приборах (рисунок 1.10). Включить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока.

3. На измерительном приборе (рисунок 1.10), используя кнопки на его панели, выбрать режим измерения напряжения «V_{ph-ph}».

4. Вращая ручку регулятора блока питания (рисунок 1.11), увеличивать напряжение, подаваемое на первичную обмотку трансформатора, пока измерительный прибор первичной цепи (рисунок 1.10) не покажет напряжение, равное **20 В**. Измерительный прибор показывает значение напряжения в каждой фазе (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), поэтому при подаче напряжения следует ориентироваться на среднее значение трех фаз. Записать показания приборов (рисунок 1.10) в таблицу 1.3.

5. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10), используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока «AMPS». Результаты записать в таблицу 1.3 (столбцы 2–4).

6. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10) выбрать режим измерения активной мощности «P». Результаты записать в таблицу 1.3 (столбцы 8–10).

7. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10), используя кнопки на панели, выбрать режим измерения реактивной мощности «Q». Результаты записать в таблицу 1.3 (столбцы 11–13).

Таблица 1.3 – Результаты измерений опыта короткого замыкания

Рассчитанные величины												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
№	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	$Q_A,$ Вар	$Q_B,$ Вар	$Q_C,$ Вар
1												
...												
5												

8. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.10), выбрать режим измерения напряжения «Vph-ph». Уменьшить подводимое напряжение на 4 В с помощью регулятора блока питания (рисунок 1.11). Повторить опыты (п. 6 – 8) снижая каждый раз напряжение. Результаты занести в таблицу 1.3.

9. По завершении опыта выкрутить ручку регулятора напряжения (рисунок 1.11) в положение, соответствующее напряжению 0 В. Выключить силовой выключатель (кнопка OFF, рисунок 1.9). Выключить тумблеры на измерительных приборах (рисунок 1.10). Выключить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока. Разобрать схему.

10. Заполнить таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Рассчитанные величины опыта короткого замыкания

Рассчитанные величины							
1	2	3	4	5	6	7	8
№	I_k, A	U_k, B	$P_k, Bт$	$\cos \varphi_k$	$Z_k, Ом$	$R_k, Ом$	$X_k, Ом$
1							
...							
5							

11. По данным таблиц 1.3, 1.4 построить графики характеристик короткого замыкания (рисунок 1.4).

Определение каталожных данных трансформатора

В настоящей работе следует определить некоторые каталожные данные и занести их в таблицу 1.5. Порядок определения каталожных данных представлен в разделе «Теоретическая часть» данных методических указаний.

Таблица 1.5 – Каталожные данные трансформатора

$S_n,$ кВА	$U_{нВН},$ В	$U_{нНН},$ В	$I_{нВН},$ А	$I_{нНН},$ А	$P_{к75},$ Вт	$P_0,$ Вт	$u_k,$ %	$u_{ка},$ %	$u_{кр},$ %	$I_0,$ %	k	Схема соединения

Содержание отчета

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 расчета.
5. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы:

1. Приведите уравнения напряжений двухобмоточного трансформатора.
 2. Для чего делается приведение параметров вторичной обмотки к первичной?
 3. Что такое коэффициент трансформации?
 4. Что такое «идеализированный трансформатор»?
 5. Для чего проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания?
 6. Порядок выполнения опыта холостого хода.
 7. Порядок выполнения опыта короткого замыкания.
 8. Физический смысл параметров схемы замещения?
 9. Из каких опытов определяются параметры схемы замещения?
- Пояснить алгоритм.

Литература: 1, 2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Исследование нагрузочных режимов трансформатора

Цель работы: исследование влияния величины и характера нагрузки на основные физические параметры трансформатора. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Снять и построить внешнюю характеристику трансформатора при активной нагрузке. Измерить, рассчитать и построить зависимости напряжения, мощности вторичной обмотки и КПД от тока нагрузки. Рассчитать изменения напряжения.

2. Снять и построить внешнюю характеристику трансформатора при индуктивной нагрузке.

3. Снять и построить внешнюю характеристику трансформатора при емкостной нагрузке.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

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 (рисунок 2.1 б) 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 (отрезок AB'):

$$\Delta U'_2 = U_1 - U_2. \quad (2.2)$$

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 диаграммы упрощенной схемы замещения трансформатора (рисунок 2.1).

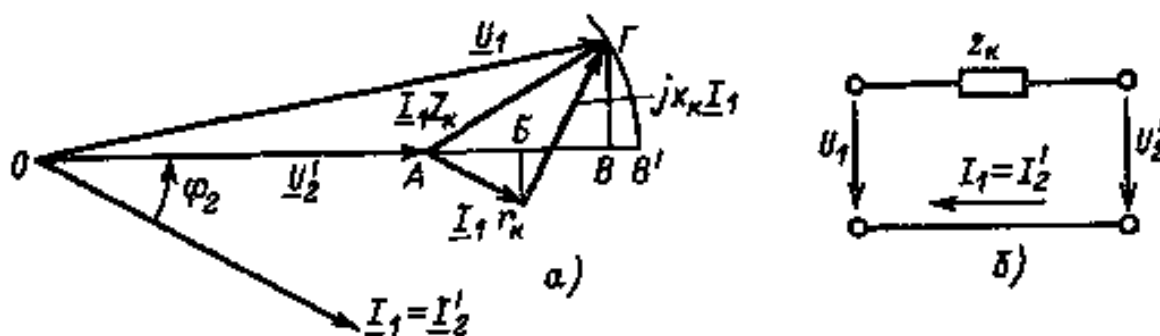


Рисунок 2.1 – Векторная диаграмма (а) упрощенной схемы замещения трансформатора (б)

На рисунке 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 (рисунок 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.

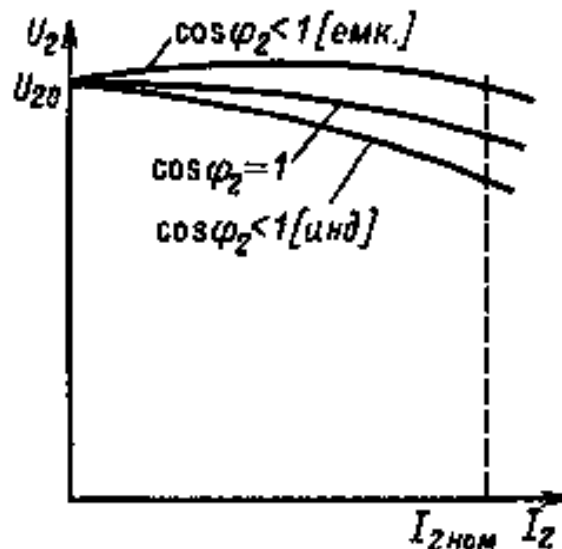


Рисунок 2.2 – Внешние характеристики трансформаторов средней и большой мощности

Примерные внешние характеристики трансформаторов малой мощности при различных значениях $\cos \varphi_2$ изображены на рисунке 2.3.

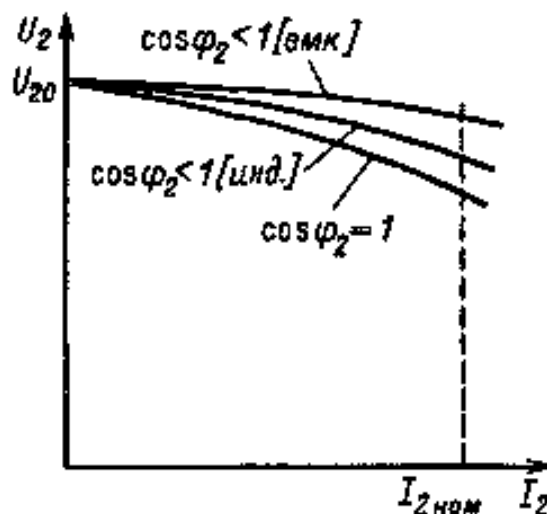


Рисунок 2.3 – Внешние характеристики трансформатора малой мощности

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «EUT – Исследование трансформаторов» фирмы LUCAS-NÜLLE. Оборудование, входящее в лабораторный стенд, описано выше (лабораторная работа 1).

Указания по технике безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

Активная нагрузка трансформатора

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 2.4. Установить ручку регулятора сопротивлений на указателе, соответствующем максимальному значению сопротивления реостатов (данный режим соответствует 1 строчке таблицы 2.1).

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Включить выключатель (кнопка ON на блоке силового выключателя). Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока.

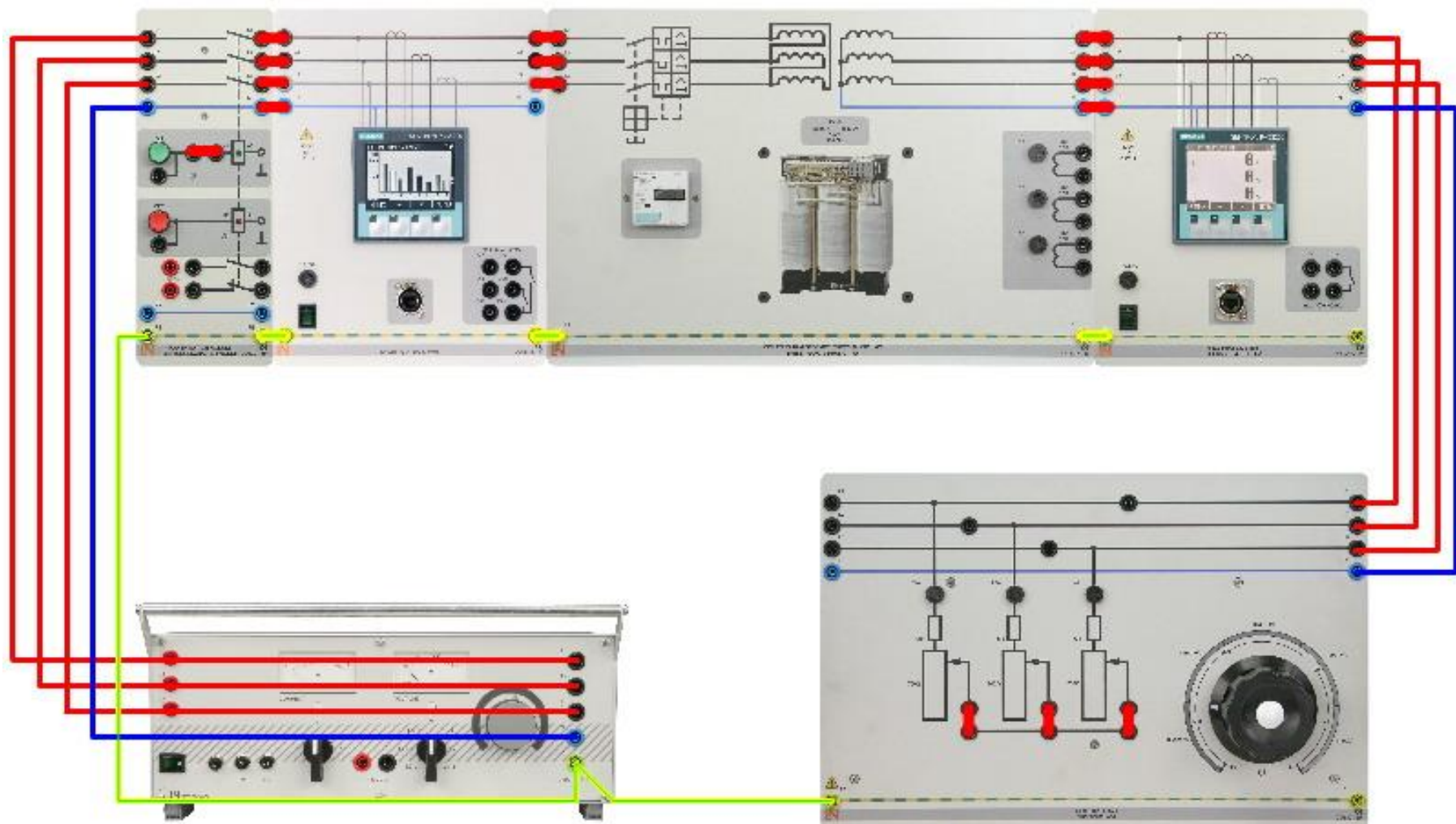


Рисунок 2.4 – Схема установки при опыте с активной нагрузкой трансформатора

3. На измерительном приборе первичной цепи, используя кнопки на его панели, выбрать режим измерения напряжения «V_{ph-ph}». Вращая ручку регулятора блока питания, подать на первичную обмотку трансформатора напряжение $U_1 = 400$ В (за величиной подаваемого напряжения следить по измерительному прибору). Измерительный прибор показывает значение напряжения в каждой фазе, поэтому при подаче напряжения следует ориентироваться на среднее значение трех фаз.

4. На измерительном приборе вторичной цепи выставить режим измерения напряжения U_2 «V_{ph-n}». Записать показания приборов (рисунок 1.6) в таблицу 2.1. В таблицу необходимо занести среднее значение.

5. На измерительном приборе вторичной цепи, используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока I_2 «AMPS». Результаты записать в таблицу 2.1.

6. На измерительном приборе вторичной цепи выбрать режим измерения активной мощности P_2 «P». Результаты записать в таблицу 2.1.

7. На измерительном приборе первичной цепи, используя кнопки на панели, выбрать режим измерения активной мощности P_1 «P». Результаты записать в таблицу 2.1.

8. На измерительном приборе первичной цепи, используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока I_1 «AMPS». Результаты записать в таблицу 2.1.

9. Изменяя сопротивление реостатов, увеличить ток на первичной обмотке I_1 . Повторить опыты (п. 4 – 8) для значений тока, представленных в таблице 2.1. Результаты занести в таблицу 2.1.

10. По завершении опыта выкрутить ручку регулятора сопротивления против часовой стрелки до упора. Ручку регулятора напряжения выкрутить в положение, соответствующее напряжению 0 В. Выключить выключатель на блоке силового выключателя (кнопка OFF). Выключить тумблеры на измерительных приборах. Выключить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока. Разобрать схему.

Таблица 2.1 – Результаты измерений при активной нагрузке

Измерено					Вычислено			
I_1, A	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	β	η	$\cos \varphi_2$	$\Delta U \%$
0,4								
0,6								
0,8								
1,0								
1,2								
1,4								
1,6								

11. Рассчитать необходимые параметры и занести в таблицу 2.1, используя представленные ниже формулы.

Коэффициент полезного действия (КПД) η :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.6)$$

Коэффициент загрузки трансформатора β :

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}, \quad (2.7)$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi$,

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2}, \quad (2.8)$$

Изменение напряжения:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%. \quad (2.9)$$

12. По результатам измерений и расчетов построить:

а) зависимость $P_2, \eta, \cos \varphi_2 = f(I_2)$;

б) внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$

Индуктивная нагрузка трансформатора

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 2.5. С помощью соединительных проводов установить индуктивность значением 3,2 Гн (1 строчка таблицы 2.2).

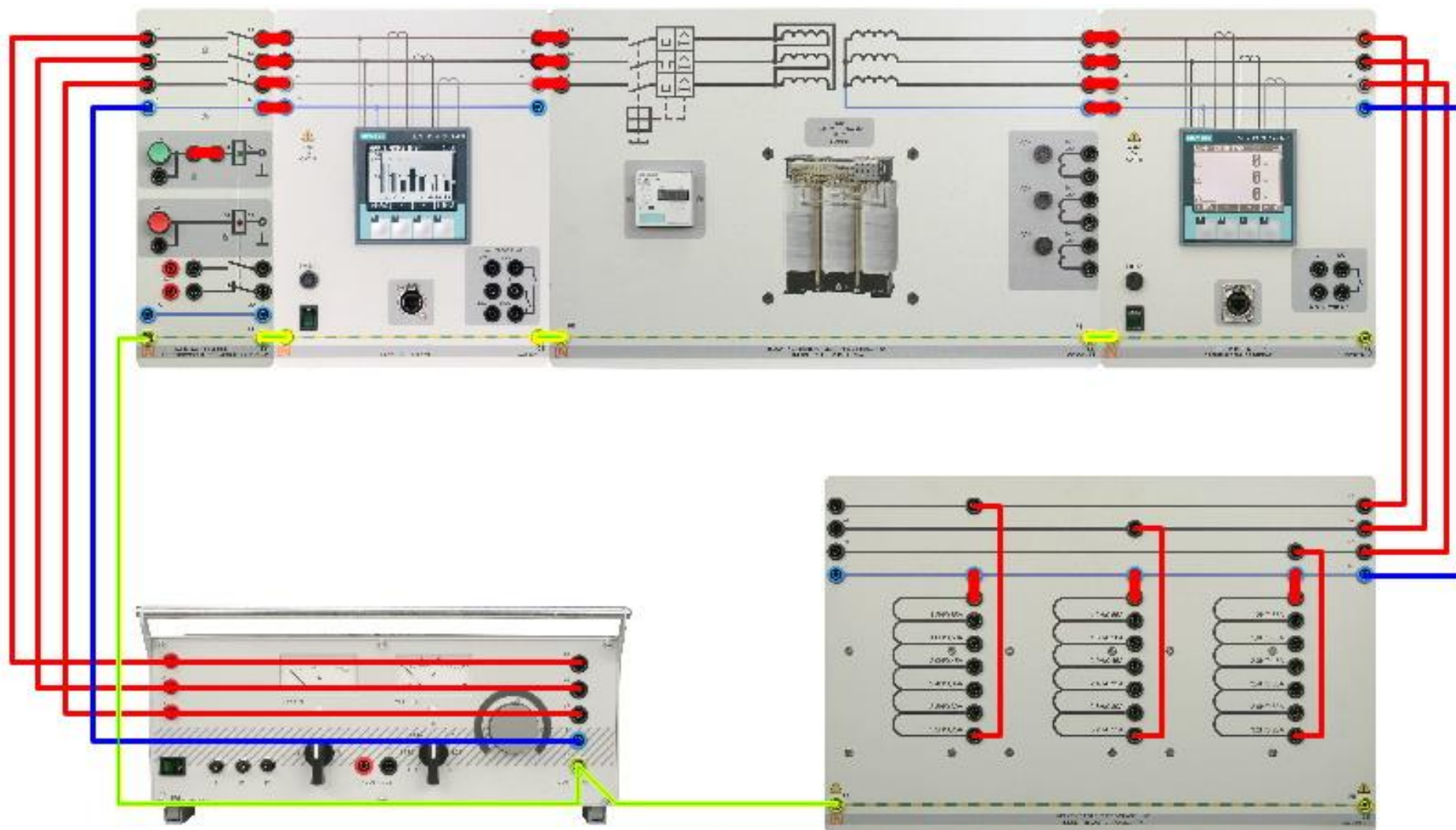


Рисунок 2.5 – Схема установки при опыте с индуктивной нагрузкой трансформатора

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Включить выключатель (кнопка ON). Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока.

3. На измерительном приборе первичной цепи (рисунок 1.6), используя кнопки на его панели, выбрать режим измерения напряжения «V_{ph-ph}». Вращая ручку регулятора блока питания, подать на первичную обмотку трансформатора напряжение $U_1 = 400$ В (за величиной подаваемого напряжения следить по измерительному прибору первичной цепи). Измерительный прибор показывает значение напряжения в каждой фазе, поэтому при подаче напряжения следует ориентироваться на среднее значение трех фаз.

4. На измерительном приборе вторичной цепи выставить режим измерения напряжения U_2 «V_{ph-n}». Записать показания приборов в таблицу 2.2. В таблицу необходимо занести среднее значение

5. На измерительном приборе вторичной цепи, используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока I_2 «AMPS». Результаты записать в таблицу 2.2.

6. На измерительном приборе первичной цепи, используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока I_1 «AMPS». Результаты записать в таблицу 2.2.

7. Выкрутить ручку регулятора напряжения в положение, соответствующее напряжению 0 В. Выключить выключатель на блоке силового выключателя (кнопка OFF,). Выключить тумблеры на измерительных приборах. Выключить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока.

8. Изменить схему, изменив номинал индуктивности согласно следующему значению, указанному в таблице 2.2. Повторить опыты (п. 2 – 7) для всех значений индуктивностей, представленных в таблице 2.2.

10. По завершении опыта выкрутить ручку регулятора напряжения в положение, соответствующее напряжению 0 В. Отключить блок силового выключателя (кнопка OFF). Выключить тумблеры на измерительных приборах. Выключить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока. Разобрать схему.

Таблица 2.2 – Результаты измерений при индуктивной нагрузке трансформатора

$L, \text{ Гн}$	$I_1, \text{ А}$	$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ А}$
3,2			
2,8			
2,4			
2,0			
1,6			

11. По результатам измерений построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$.

Емкостная нагрузка трансформатора

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 2.6. С помощью соединительных проводов установить емкость 2 мкФ (1 строчка таблицы 2.3).

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Включить выключатель на блоке силового выключателя (кнопка ON). Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока.

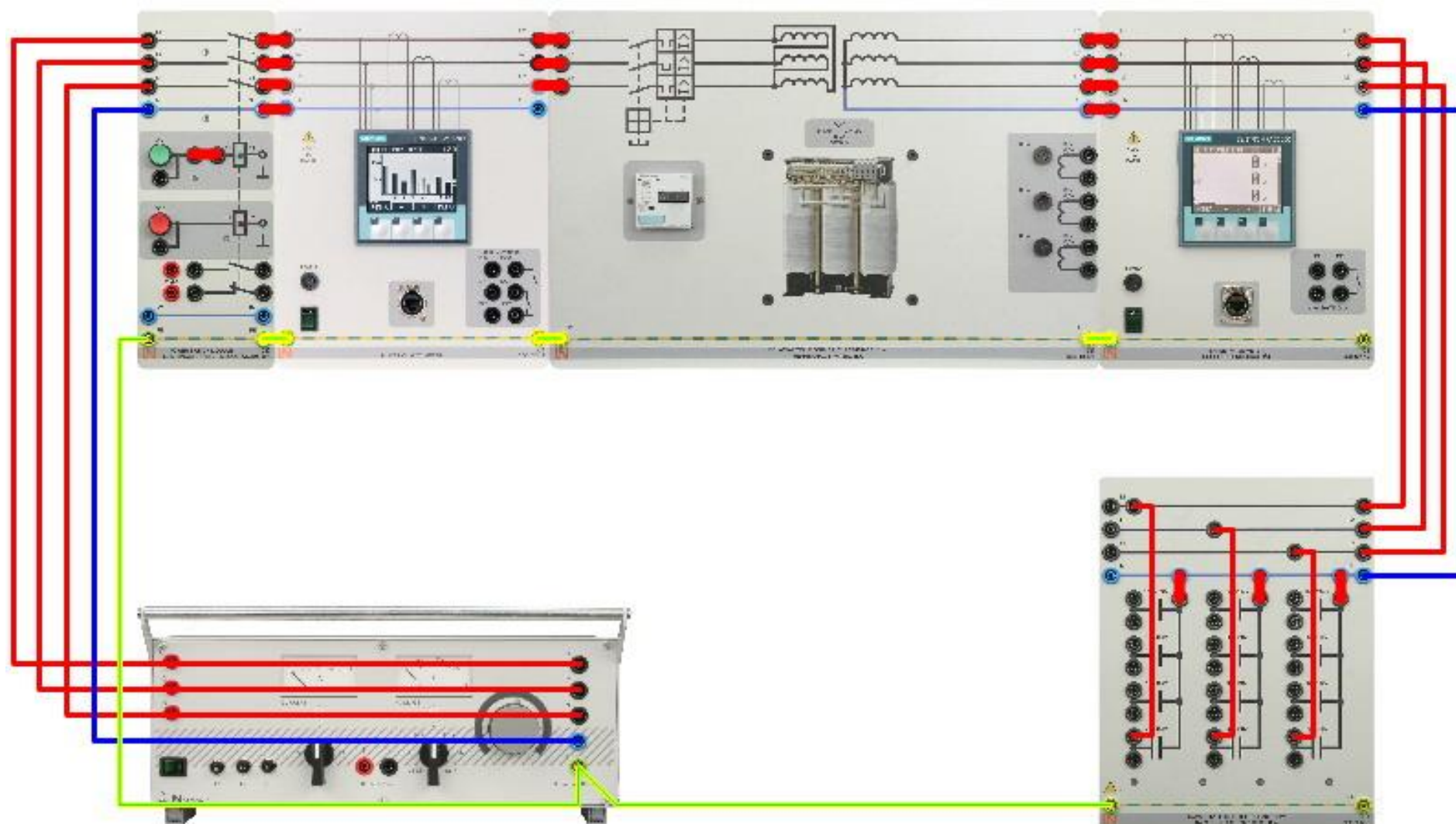


Рисунок 2.6 – Схема установки при опыте с емкостной нагрузкой трансформатора

3. На измерительном приборе первичной цепи, используя кнопки на его панели, выбрать режим измерения напряжения «V_{ph-ph}». Вращая ручку регулятора блока питания (рисунок 1.7), подать на первичную обмотку трансформатора напряжение $U_1 = 400 \text{ В}$ (за величиной подаваемого напряжения следить по измерительному прибору). Измерительный прибор показывает значение напряжения в каждой фазе, поэтому при подаче напряжения следует ориентироваться на среднее значение трех фаз.

4. На измерительном приборе вторичной цепи выставить режим измерения напряжения U_2 «V_{ph-n}». Записать показания приборов в таблицу 2.3. В таблицу необходимо занести среднее значение.

5. На измерительном приборе вторичной цепи, используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока I_2 «AMPS». Результаты записать в таблицу 2.3.

6. На измерительном приборе первичной цепи, используя кнопки на панели, выбрать режим измерения тока I_1 «AMPS». Результаты записать в таблицу 2.3.

7. Выкрутить ручку регулятора напряжения в положение, соответствующее напряжению 0 В. Выключить выключатель на блоке силового выключателя (кнопка OFF). Выключить тумблеры на измерительных приборах. Выключить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока.

8. Изменить схему, изменив номинал емкости согласно следующему значению, указанному в таблице 2.3. Повторить опыты (п. 2 – 7) для значений всех значений емкости, представленных в таблице 2.3.

Примечание. Емкость 12 мкФ установить, соединив параллельно емкости номиналом в 8 мкФ и 4 мкФ.

10. По завершении опыта выкрутить ручку регулятора напряжения в положение, соответствующее напряжению 0 В. Выключить выключатель на блоке силового выключателя (кнопка OFF). Выключить тумблеры на

измерительных приборах. Выключить тумблер регулируемого блока питания трехфазного тока. Разобрать схему.

Таблица 2.3 – Результаты измерений при емкостной нагрузке трансформатора

$C, \mu\text{F}$	I_1, A	U_2, V	I_2, A
2			
4			
8			
12			
14			

11. По результатам измерений построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$.

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется напряжение на вторичной обмотке трансформатора?
2. Дать определение внешней характеристике трансформатора.
3. Как изменяется напряжение на вторичной стороне трансформатора при активной нагрузке?
4. При какой нагрузке с возрастанием тока нагрузки напряжение на вторичной стороне увеличивается?
5. Что такое коэффициент загрузки трансформатора?
6. На какие потери мощности влияет коэффициент загрузки трансформатора?
7. Что такое коэффициент полезного действия трансформатора?
8. Для чего параметры вторичной обмотки приводят к первичной обмотке?

9. Когда коэффициент полезного действия трансформатора имеет наибольшее значение?

10. Поясните физический смысл параметров Т-образной схемы замещения трансформатора.

Литература: 1, 2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

Исследование трехфазного синхронного генератора независимого возбуждения

Цель работы: Изучить физические процессы, происходящие в синхронном генераторе при различных режимах его работы, опытным путем получить его характеристики. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Снять и построить характеристику холостого хода генератора.
2. Снять и построить зависимость напряжения генератора от частоты вращения при различных токах возбуждения.
3. Снять и построить внешнюю характеристику генератора при активной нагрузке.
4. Снять и построить регулировочную характеристику генератора при активной нагрузке.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электроэнергии и устанавливают на электростанциях. Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода. В зависимости от типа привода различают турбогенераторы

(приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами), гидрогенераторы (приводятся во вращение гидротурбинами) и дизель-генераторы (приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания).

Синхронная машина (рисунок 3.1) состоит из неподвижной части – статора (1) и подвижной части – ротора (2). Сердечник статора собирается из изолированных листов электротехнической стали и закрепляется в корпусе. На внутренней поверхности статора в пазах размещаются проводники обмотки статора (3). Обмотка выполняется трехфазной, соединенной по схеме «звезда» или «треугольник».

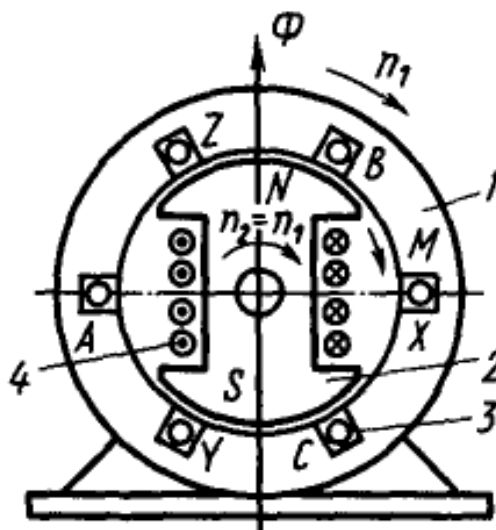


Рисунок 3.1 – Схема синхронной машины

Ротор (2) имеет обмотку возбуждения (4), питаемую через два контактных кольца и щетки постоянным током от постороннего источника. В качестве источника чаще всего служит генератор постоянного тока относительно небольшой мощности, который называется возбудителем и устанавливается обычно на одном валу с синхронной машиной. Назначение обмотки возбуждения – создание в машине первичного магнитного поля.

Если ротор привести во вращение с некоторой скоростью n_2 и возбудить его, то поток возбуждения Φ будет пересекать проводники обмотки статора, и в фазах последней будут индуцироваться ЭДС с частотой

$$f_1 = \frac{p \cdot n_2}{60}, \quad (3.1)$$

где p – число пар полюсов.

При нагрузке обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. Это поле статора вращается в направлении вращения ротора со скоростью

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}. \quad (3.2)$$

Из (3.1) и (3.2) следует

$$n_1 = n_2. \quad (3.3)$$

Поля статора и ротора вращаются с одинаковой скоростью, т.е. *синхронно*, и образуют, таким образом, общее вращающееся поле.

Синхронная машина может работать автономно в качестве генератора, питающего подключенную к нему нагрузку, и параллельно с сетью, к которой подключены другие генераторы. Во втором случае она может работать как двигателем, так и генератором.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения различают машины с независимым и самовозбуждением. В первом случае питание обмотки осуществляется от возбудителя (например, генератора постоянного тока), установленного на валу ротора синхронной машины, или от отдельного вспомогательного генератора. При самовозбуждении обмотка возбуждения питается от обмотки якоря через выпрямитель (чаще полупроводниковый).

Характеристики синхронного генератора определяют зависимость между напряжением на зажимах якоря U_{Γ} , током якоря I_{Γ} и током возбуждения I_B при $f_1 = f_{\text{ном}}$ или $n_2 = n_{\text{ном}}$ и $\varphi = \text{const}$ 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 собой зависимость ЭДС E_0 , наводимой в обмотках якоря генератора при холостом ходе, от тока

возбуждения I_B при постоянной частоте вращения ротора: $E_0 = f(I_B)$, при $I_A = 0$, $n_2 = n_{\text{ном}}$ (рисунок 3.1).

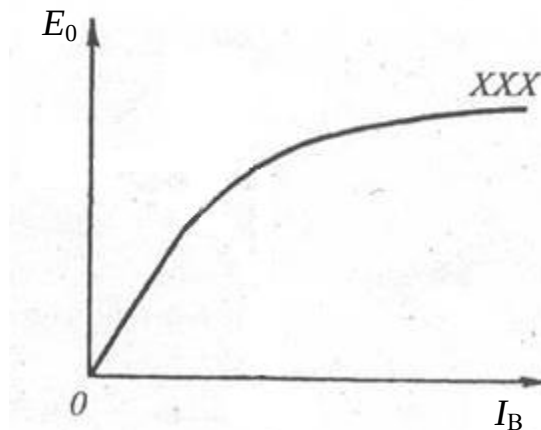


Рисунок 3.1 – Характеристика холостого хода синхронного генератора

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянных значениях коэффициента мощности, тока возбуждения и частоты вращения: $U_G = f(I_A)$, при $I_B = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$, $n_2 = n_{\text{ном}}$ (рисунок 3.2).

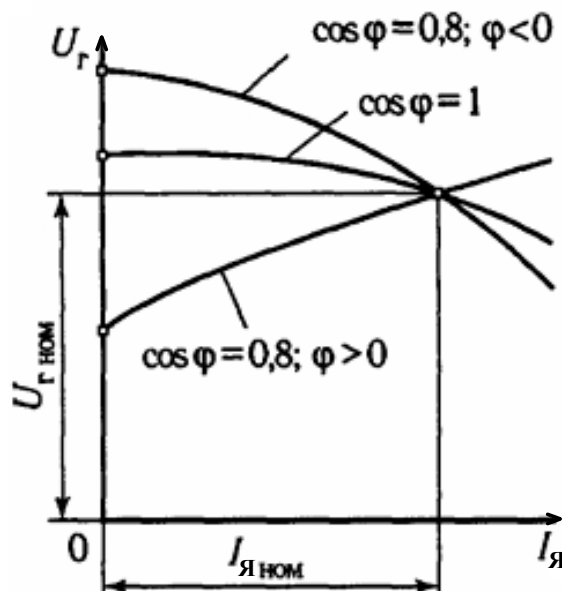


Рисунок 3.2 – Внешняя характеристика синхронного генератора при различном значении коэффициента мощности

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянных значениях напряжения на

зажимах генератора, частоты вращения ротора и коэффициенте мощности: $I_B = f(I_A)$, при $U_{\Gamma} = const$, $\varphi = const$, $n_2 = n_{ном}$ (рисунок 3.3). Она показывает, как нужно регулировать ток возбуждения синхронного генератора, чтобы при изменении нагрузки его напряжение оставалось неизменным.

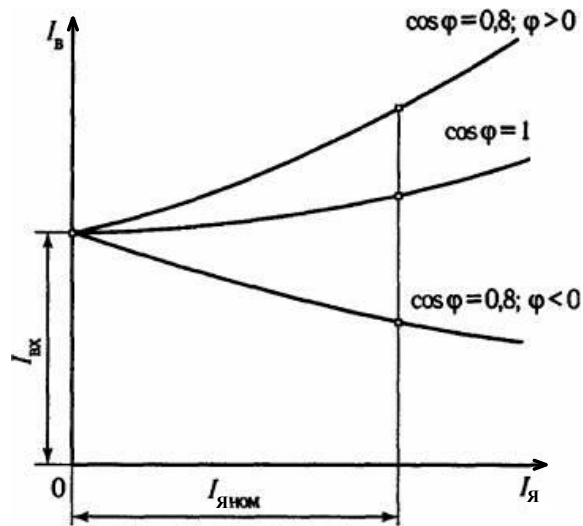


Рисунок 3.3 – Регулировочная характеристика синхронного генератора при различном значении коэффициента мощности

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «ЕЕМ5 3-х фазные многофункциональные электрические машины» фирмы LUCAS-NÜLLE. Стенд включает в себя необходимые для выполнения данной лабораторной работы элементы (рисунок 3.4 – 3.9): испытательный стенд серво-двигателя 1 кВт; трехфазную многофункциональную машину; блок питания для электрических машин; блок управления частотой вращения и моментом машины; регулируемый возбудитель; аналого-цифровой мультиметр; нагрузочное сопротивление.

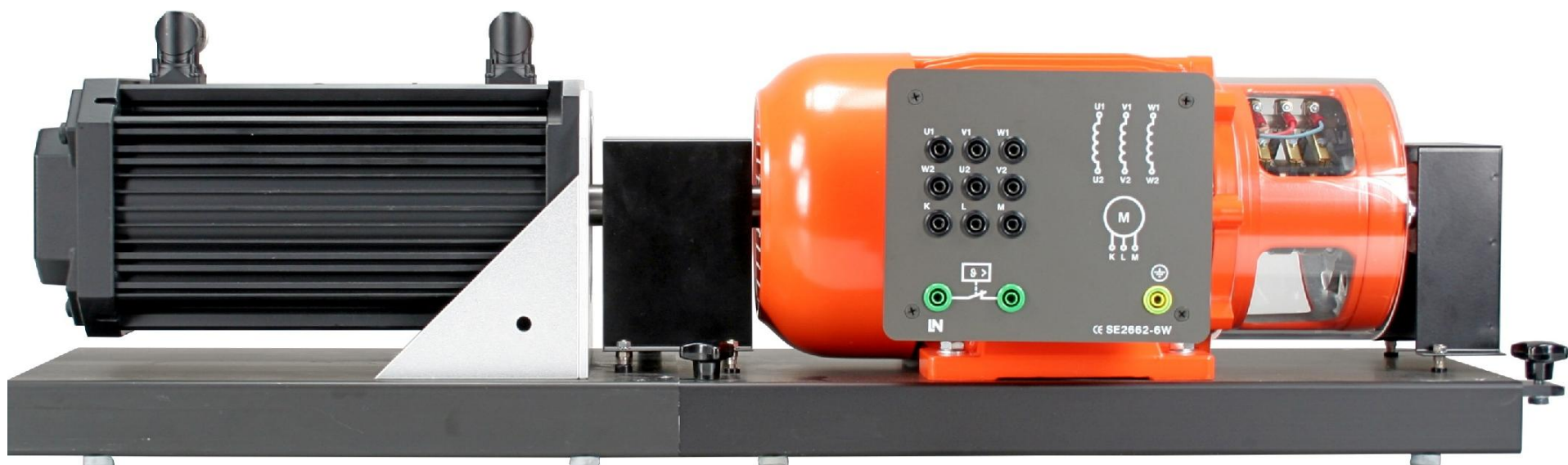


Рисунок 3.4 – Испытательный стенд серво-двигателя (слева), соединенный с трехфазной многофункциональной машиной (справа)



Рисунок 3.5 – Нагрузочное сопротивление для синхронного генератора

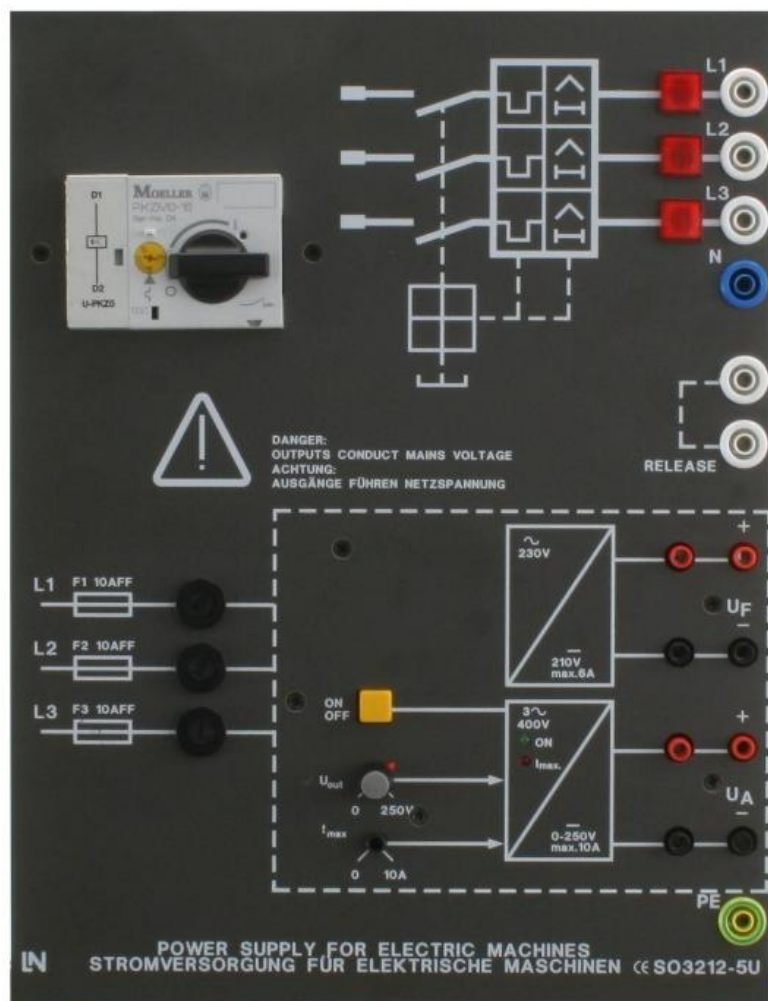


Рисунок 3.6 – Блок питания для электрических машин

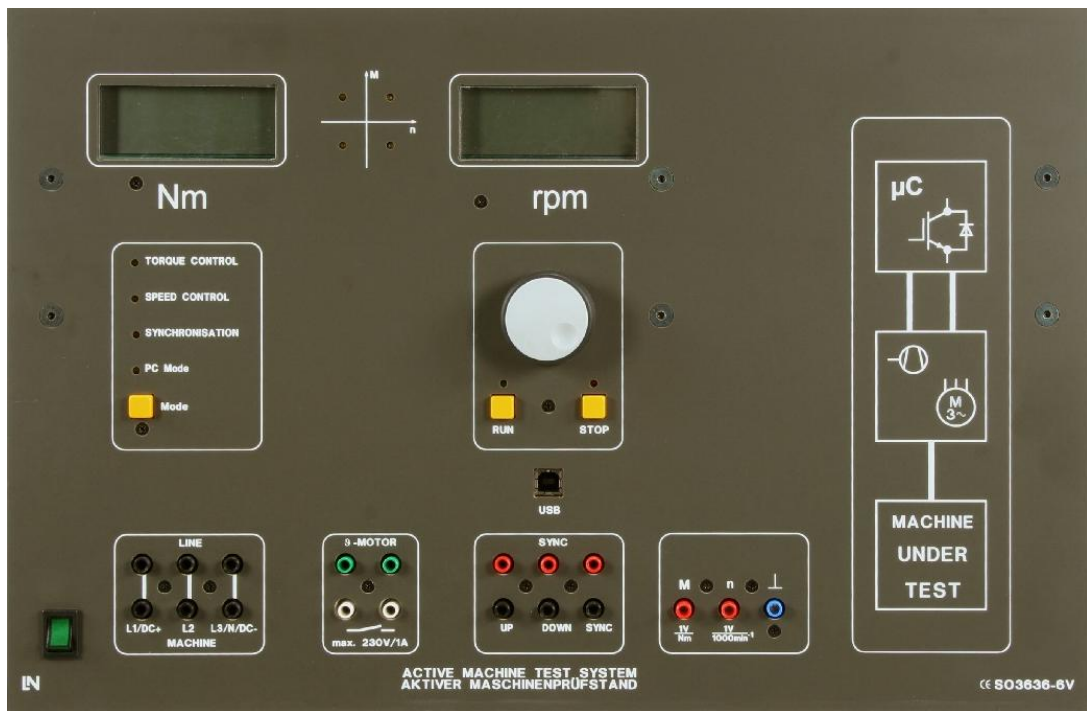


Рисунок 3.7 – Блок управления частотой вращения и моментом машины

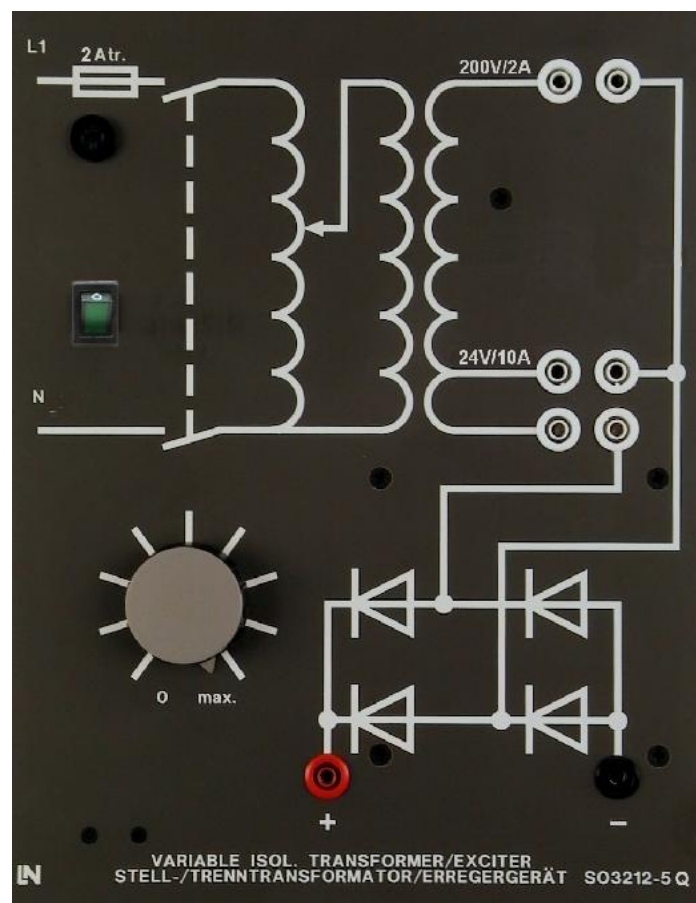


Рисунок 3.8 – Регулировочный / разделительный трансформатор, возбудитель 0-230 В



Рисунок 3.9 – Аналого-цифровой мультиметр, измеритель мощности и коэффициента мощности

Номинальные параметры генератора:

Номинальное напряжение: 400/230 В, 50 Гц

Номинальный ток: 2,0 А / 3,5 А

Номинальное число оборотов: 1400 / 1500 об/мин

Номинальная мощность: 0,8 кВт

$\cos \varphi = 0,75$

напряжение возбуждения: 130 В ~ / 24 В –

ток возбуждения: 4 А ~ / 11 А –

Указания по технике безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

Характеристика холостого хода

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 3.10.

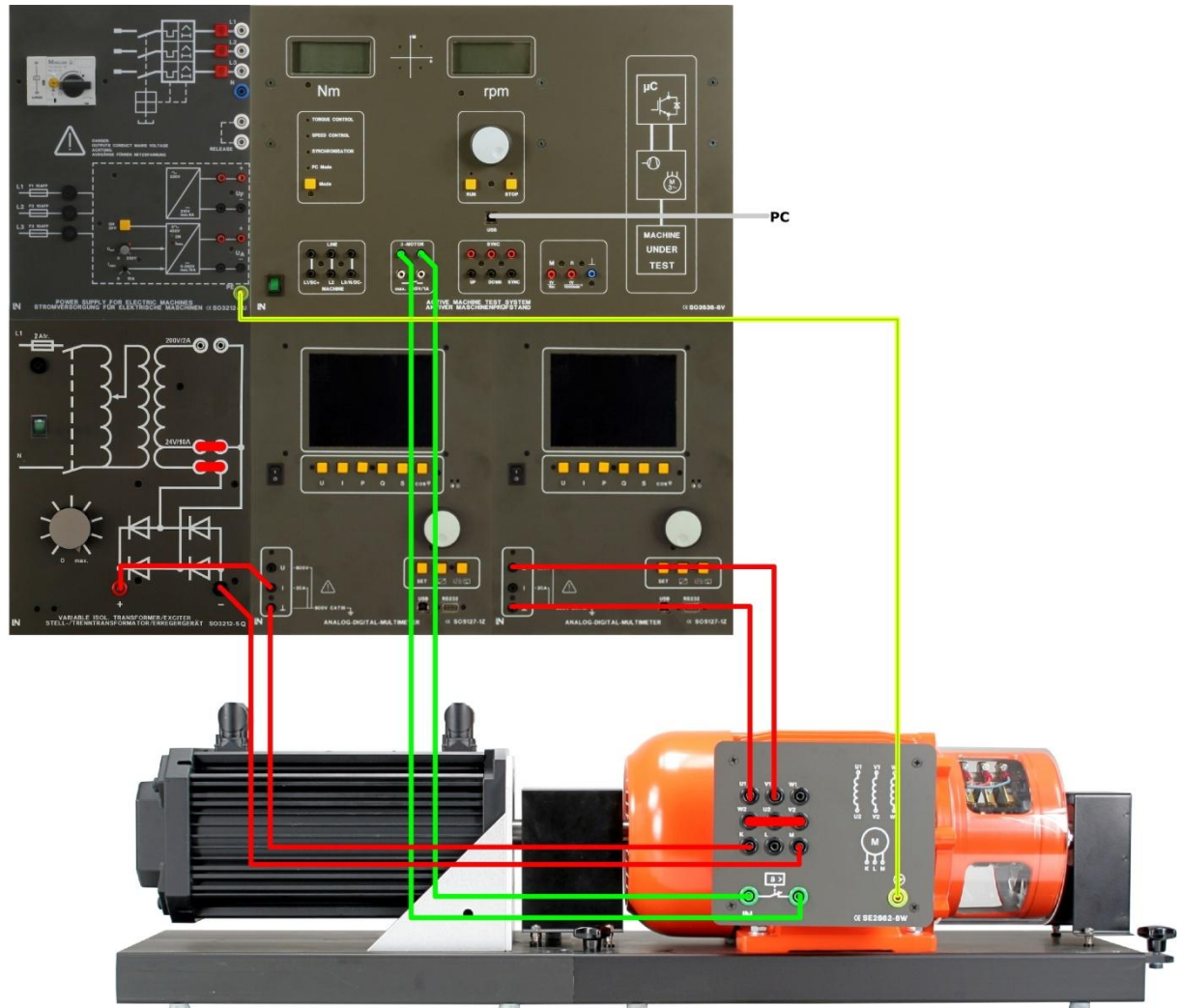


Рисунок 3.10 – Схема установки для проведения опыта холостого хода синхронного генератора

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Включить тумблеры на измерительных приборах и блок управления частотой вращения. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблер на блоке возбуждения (рисунок 3.8).

3. В качестве привода для синхронного генератора используется сервопривод. На блоке управления частотой вращения (рисунок 3.7) установить режим «Speed Control». Запустить сервопривод (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить частоту вращения синхронного генератора 1400 об/мин. Следить за положительным направлением вращения сервопривода (поворачивать ручку регулятора частоты в сторону, соответствующую положительному значению момента на измерительном приборе).

4. На мультиметре, соединенном с блоком управления возбуждения (левый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения тока (кнопка «I»), на мультиметре, подключенном к выводам U1-V1 генератора, (правый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения напряжения (кнопка «U»). С помощью ручки регулятора на блоке управления возбуждением (рисунок 3.8) задать ток возбуждения величиной $I_B=0,5$ А. Значение контролировать на мультиметре (левый на рисунке 3.10). Измерить напряжение генератора U_G (значение на мультиметре справа – рисунок 3.10). Показания приборов занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерения характеристики холостого хода

$I_B, \text{ A}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$U_G, \text{ В}$								

5. По завершении опыта отключить сервопривод (кнопка «Stop»), выкрутить ручку регулятора тока возбуждения (рисунок 3.8) против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ А). Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено» (рисунок 3.6). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Схему не разбирать.

6. По результатам таблицы 3.1 построить характеристику холостого хода синхронного генератора $U_G = f(I_B)$.

Зависимость напряжения генератора от частоты вращения при постоянном токе возбуждения

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Опыты проводятся для схемы, собранной ранее (рисунок 3.10).
2. Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер на блоках управления. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора.
3. На блоке управления частотой вращения установить режим «Speed Control». Запустить сервопривод (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить частоту вращения синхронного генератора, указанную в таблице 3.2. Следить за положительным направлением вращения сервопривода.
4. На мультиметре, соединенном с блоком управления возбуждения (левый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения тока (кнопка «I»), на мультиметре, подключенном к выводам U1-V1 генератора, (правый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения напряжения (кнопка «U»). С помощью ручки регулятора на блоке управления возбуждением задать ток возбуждения величиной $I_B=1$ А. Измерить напряжение генератора U_G для каждого значения частоты, указанного в таблице 3.2. Показания приборов занести в таблицу 3.2.
5. Повторить опыты п. 4 для значений тока возбуждения $I_B=2$ А и $I_B=4$ А. Показания приборов занести в таблицу 3.2.
6. По завершении опытов отключить сервопривод (кнопка «Stop»), выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ А). Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено» (рисунок 3.6). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Схему разобрать.
7. По результатам таблицы 3.2 построить зависимости $U_G = f(n)$ при различных значениях тока возбуждения.

Таблица 3.2 – Зависимость напряжения генератора от частоты вращения

	n , об/мин	500	750	1000	1250	1400
$I_B=1$ A	U_{Γ} , В					
$I_B=2$ A	U_{Γ} , В					
$I_B=4$ A	U_{Γ} , В					

Внешняя характеристика

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 3.11.

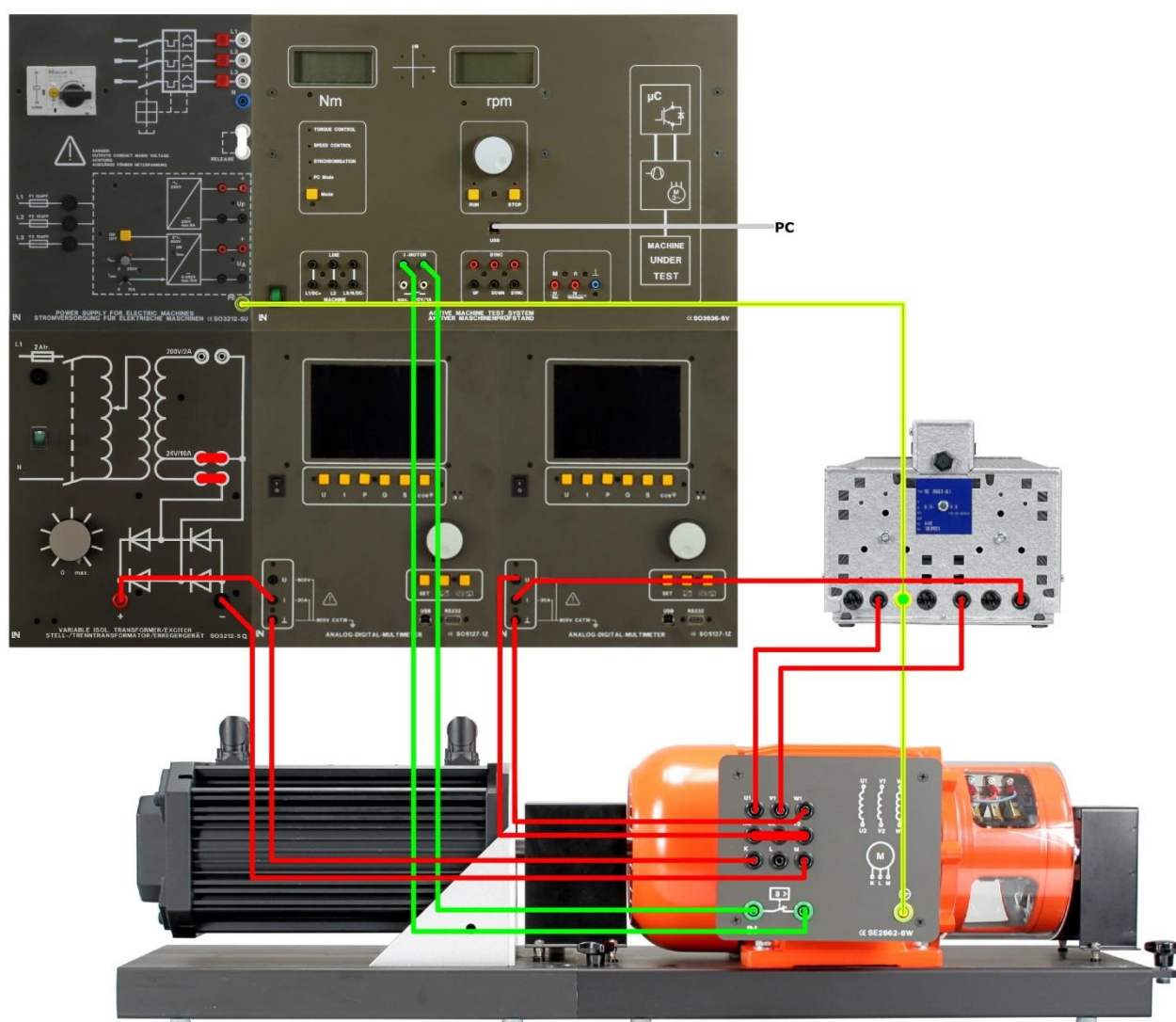


Рисунок 3.11 – Схема установки для снятия внешней характеристики синхронного генератора

2. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер на блоках управления, убедиться, что движок реостата находится в крайнем положении, соответствующем максимальному значению сопротивления.

3. На блоке управления частотой вращения установить режим «Speed Control». Запустить сервопривод (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить частоту вращения синхронного генератора 1400 об/мин. Следить за положительным направлением вращения сервопривода.

4. На мультиметре, соединенном с блоком управления возбуждения (левый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения тока (кнопка «I»), на мультиметре, подключенном к выводам генератора (правый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения тока, напряжения и полной мощности (кнопки «I», «U», «S»).

5. С помощью ручки регулятора на блоке управления возбуждением задать ток возбуждения величиной $I_B = 2$ А. Изменяя сопротивление реостата, по показаниям мультиметра (крайний правый на рисунке 3.11) выставить значения тока якоря, указанные в таблице 3.3. Измерить напряжение U_{Γ} и мощность S генератора. Показания приборов занести в таблицу 3.3.

6. По завершении опытов установить движок реостата в крайнее положение, соответствующее максимальному значению сопротивления, выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ А), отключить сервопривод (кнопка «Stop»). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено» (рисунок 3.6). Схему не разбирать.

Таблица 3.3 – Внешняя характеристика синхронного генератора

$I_{\text{я}}, \text{A}$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
$U_{\Gamma}, \text{В}$								
$S, \text{В} \cdot \text{А}$								

7. По данным таблицы 3.3 построить следующие зависимости $U_{\Gamma} = f(I_{\text{я}})$, $S = f(I_{\text{я}})$.

Регулировочная характеристика

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Опыты проводятся для схемы, собранной ранее (рисунок 3.11).
2. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер на блоках управления.
3. На блоке управления частотой вращения установить режим «Speed Control». Запустить сервопривод (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить частоту вращения синхронного генератора 1400 об/мин. Следить за положительным направлением вращения сервопривода.
4. На мультиметре, соединенном с блоком управления возбуждения (левый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения тока (кнопка «I»), на мультиметре, подключенном к выводам генератора (правый на рисунке 3.10), выбрать режим измерения тока и напряжения (кнопки «I», «U»).
5. С помощью ручки регулятора на блоке управления возбуждением задать ток возбуждения величиной $I_{\text{В}}=2$ А. Измерить ток якоря и записать значения обоих токов в таблицу 3.4.
6. Уменьшить сопротивление реостата, перемещая движок вниз, таким образом, чтобы напряжение уменьшилось на 5 В. Увеличить ток возбуждения до такого значения, чтобы напряжение приняло исходное значение (до уменьшения). Записать в таблицу 3.4 значения токов.
7. Повторять п. 6, поддерживая напряжение постоянным, как указано в опыте, до тех пор, пока движок реостата не переместится в крайнее нижнее положение. Результаты записывать в таблицу 3.4.
8. По завершении опытов установить движок реостата в крайнее верхнее положение, соответствующее максимальному значению

сопротивления. Выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ А), отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено» (рисунок 3.6). Схему разобрать.

9. По результатам таблицы 3.4 построить зависимость $I_B = f(I_A)$.

Таблица 3.4 – Регулировочная характеристика синхронного генератора

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
I_A , А								
I_B , А								

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить конструкцию синхронной машины.
2. Что называют турбогенератором и гидрогенератором?
3. Пояснить методику проведения опыта холостого хода синхронного генератора. Дать понятие насыщенной, спрямленной насыщенной и ненасыщенной характеристик холостого хода.
4. Объяснить методику снятия и физический смысл характеристик синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку.
5. В чем заключается методика снятия регулировочных характеристик.
6. Пояснить физический смысл реакции якоря синхронного генератора: продольная, поперечная и намагничивающая реакция якоря.

Литература: 3, 4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

Исследование трехфазного синхронного двигателя

Цель работы: Изучить физические процессы, происходящие в синхронном двигателе при различных режимах его работы, опытным путем получить его характеристики, изучить режим пуска синхронного двигателя. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Произвести асинхронный запуск синхронного двигателя.
2. Снять и построить зависимости $I = f(M)$, $n = f(M)$.
3. Провести опыт использования синхронного двигателя в качестве фазосдвигающего устройства. Снять и построить зависимость $\cos\varphi = f(I_B)$.
4. Снять и построить V -образную характеристику.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Синхронные двигатели по сравнению с асинхронными имеют ряд преимуществ:

1. Благодаря возбуждению постоянным током синхронные двигатели могут работать с коэффициентом мощности, равным единице. При этом они не потребляют из сети реактивной мощности, а в режиме перевозбуждения даже отдают ее в сеть.

2. При пониженном напряжении синхронный двигатель обладает большей перегрузочной способностью, т.к. его максимальный момент пропорционален напряжению, а максимальный момент асинхронного двигателя – квадрату напряжения.

3. Скорость вращения синхронного двигателя остается неизменной при любой нагрузке на валу в пределах его перегрузочной способности.

4. Обычно в синхронных двигателях КПД выше, чем в асинхронных.

Однако синхронные двигатели имеют и недостатки по сравнению с асинхронными. К ним можно отнести сложную конструкцию и необходимость наличия возбудителя или иного устройства для питания обмотки возбуждения, что приводит к удорожанию их стоимости. Кроме того, пуск и регулирование скорости вращения синхронных двигателей значительно сложнее.

Тем не менее, применение синхронных двигателей целесообразно в установках, где не требуются частые пуски и остановки, регулирование частоты вращения (мощные насосы, компрессоры, мельницы и т.д.).

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Если его подключить к сети переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения проходит постоянный ток, то за один период изменения тока электромагнитный момент будет дважды изменять свое направление, т. е. средний момент за период равняется нулю. При этих условиях двигатель не сможет прийти во вращение, так как его ротор, обладающий определенной инерцией, не может быть в течение одного полупериода разогнан до синхронной частоты вращения. Следовательно, для пуска синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной.

Способы пуска:

1. Асинхронный пуск.
2. Пуск с помощью вспомогательного двигателя.
3. Частотный пуск.

В большинстве случаев применяется асинхронный пуск (рисунок 4.1). Он включает в себя два этапа. На первом этапе двигатель запускается аналогично асинхронному, без питания обмотки возбуждения (ОВ) постоянным током, при этом частота вращения ротора меньше синхронной. Обмотка возбуждения при этом отключается от источника питания и замыкается на активное сопротивление (R), которое во много раз превышает активное сопротивление обмотки возбуждения (положение 1 переключателя). Нельзя оставлять обмотку возбуждения разомкнутой, потому что вращающееся поле способно индуцировать в ней большую ЭДС, которая опасна для целостности изоляции.

На втором этапе на обмотку возбуждения подается постоянный ток (положение 2 переключателя), и двигатель втягивается в синхронизм, частота вращения ротора равна синхронной.

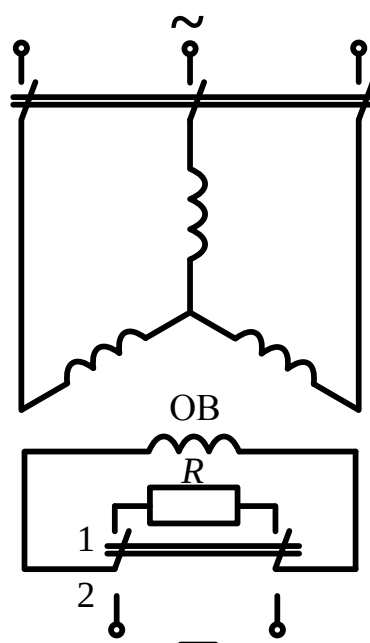


Рисунок 4.1 – Схема асинхронного пуска синхронного двигателя

Для реализации первого этапа запуска в полюсных наконечниках синхронных двигателей укладывают пусковую обмотку, представляющую собой стержни, замкнутые кольцами, и напоминающую «беличью клетку» в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором.

При пуске с помощью вспомогательного двигателя (рисунок 4.2) ротор синхронного двигателя (1) на холостом ходу раскручивается другим, вспомогательным двигателем (2) до скорости вращения поля статора, обмотка статора синхронного двигателя при этом отключена от сети. Далее, используя известные методы синхронизации, обмотку статора подключают к сети, вспомогательный двигатель отсоединяют от вала синхронной машины, и последняя переходит в двигательный режим.

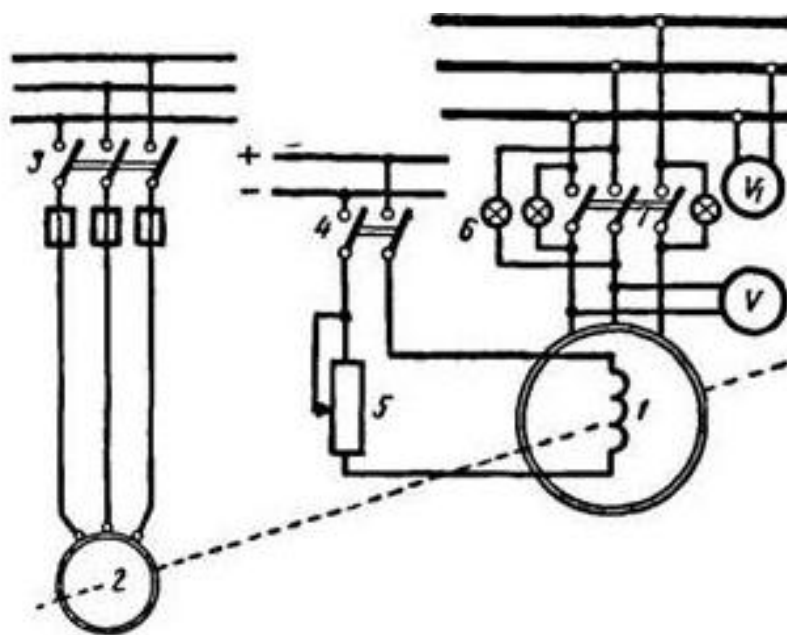


Рисунок 4.2 – Схема пуска синхронного двигателя с помощью вспомогательного двигателя

Для осуществления пуска необходимо, чтобы число пар полюсов асинхронного двигателя было меньше числа пар полюсов синхронного двигателя, т.к. только в этом случае вспомогательный асинхронный двигатель сможет разогнать ротор синхронного двигателя до синхронной скорости.

Порядок пуска синхронного двигателя следующий. Включая рубильник (3), пускают вспомогательный асинхронный двигатель (2), который разгоняет ротор синхронного двигателя (1) до скорости, соответствующей скорости поля статора. Скорость вращения вспомогательного двигателя определяется по тахометру. Затем, включая

рубильник (4) для питания обмотки возбуждения постоянным током, возбуждают полюсы ротора. Чтобы включить синхронный двигатель в сеть трехфазного тока, его нужно синхронизировать так же, как и при включении синхронного генератора на параллельную работу. Для этого реостатом (5) устанавливают такое возбуждение, чтобы напряжение обмотки статора по вольтметру V было равно напряжению сети, указываемому вольтметром $V1$.

Лампы синхроскопа (6), включенные параллельно ножам рубильника (7) трехфазной сети, при разомкнутом рубильнике будут мигать. Изменением частоты вращения вспомогательного двигателя добиваются минимальной частоты мигания ламп и, когда лампы потухнут, одновременно замыкают выключатель (7). Ротор двигателя при этом входит в синхронизм и далее вращается самостоятельно, вспомогательный двигатель рубильником (3) можно отключить от сети.

Частотный пуск применяется в том случае, если синхронный двигатель подключен к источнику напряжения с плавно регулируемой частотой, изменяющейся от нуля до номинального значения. При плавном повышении частоты питающего напряжения будет увеличиваться частота вращения магнитного поля, а, следовательно, и частота вращения ротора. При этом одновременно с регулированием частоты должно изменяться и напряжение питания двигателя. При таком пуске синхронный двигатель все время работает в синхронном режиме.

Основными характеристиками синхронных двигателей являются рабочие, V -образная и угловая.

Угловые характеристики (рисунок 4.3) представляют собой зависимость активной мощности P или момента M от угла нагрузки θ : $P = f(\theta)$ при $U = U_{\text{ном}}$ и $E_0 = \text{const}$. Угол θ является углом между осями полюсов и результирующего магнитного поля или между векторами ЭДС $\dot{E}_0$ и напряжения $\dot{U}$.

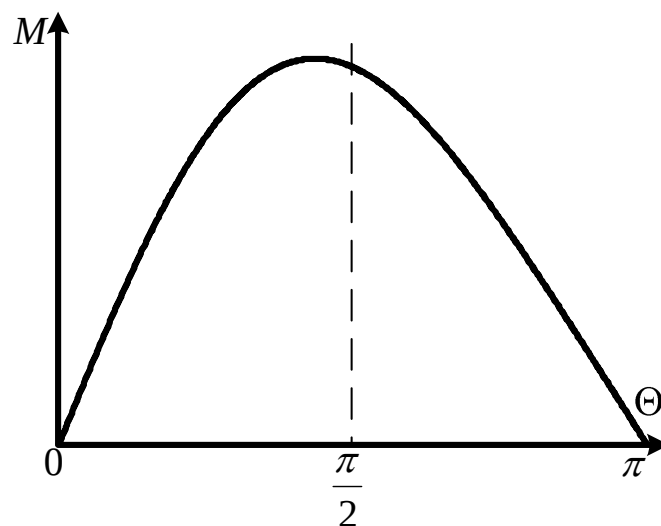


Рисунок 4.3 – Угловая характеристика синхронного двигателя

V-образные характеристики представляют собой зависимости тока двигателя от тока возбуждения $I = f(I_B)$ при $P = const$ и $f = const$ (рисунок 4.4). На рисунке I_{B0} значение тока возбуждения соответствует $E=U$. Правые части кривых соответствуют режиму перевозбуждения и отдаче в сеть реактивной мощности, левые – режиму недовозбуждения и потреблению реактивной мощности из сети. При уменьшении тока возбуждения на границе предела устойчивости машина выпадает из синхронизма.

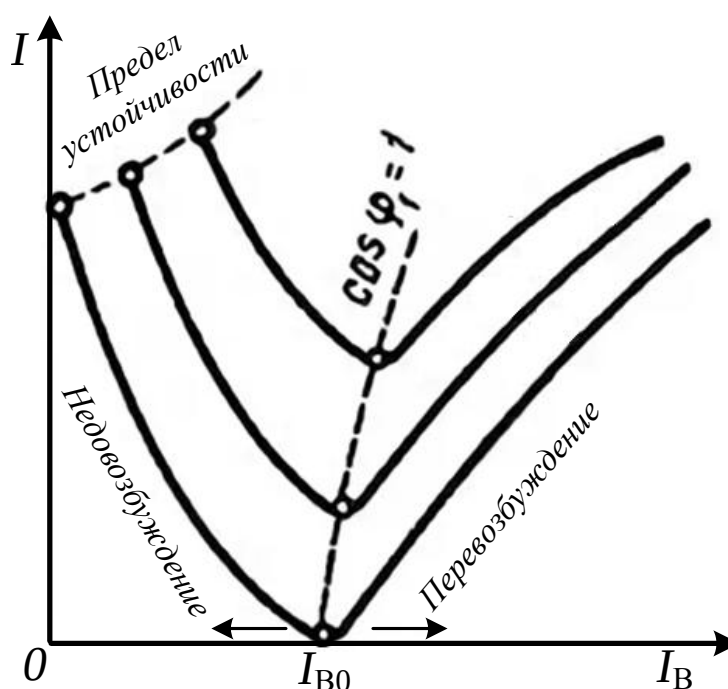


Рисунок 4.4 – V-образная характеристика синхронного двигателя

Рабочие характеристики представляют собой зависимости потребляемой мощности P_1 , полезного момента M_2 , коэффициента мощности $\cos\varphi$, тока двигателя I и КПД η от полезной мощности P_2 при номинальном напряжении, номинальной частоте вращения и номинальном токе возбуждения (рисунок 4.5).

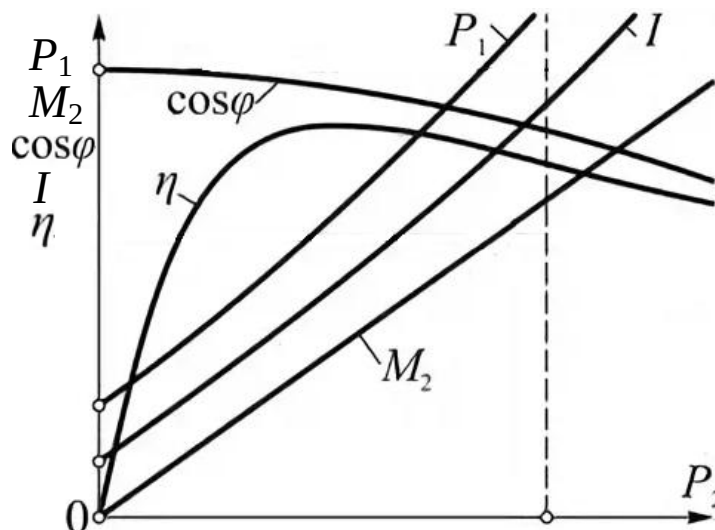


Рисунок 4.5 – Рабочие характеристики синхронного двигателя

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «EEM5 3-х фазные многофункциональные электрические машины» фирмы LUCAS-NÜLLE. Стенд включает в себя блоки, используемые в лабораторной работе № 3, а также два четырехполюсных выключателя (рисунок 4.6).

Номинальные параметры двигателя:

Номинальное напряжение: 400/230 В, 50 Гц

Номинальный ток: 2,0 А / 3,5 А

Номинальное число оборотов: 1400 / 1500 об/мин

Номинальная мощность: 0,8 кВт

$\cos \varphi = 0,75$

напряжение возбуждения: 130 В ~ / 24 В –

ток возбуждения: 4 А ~ / 11 А –

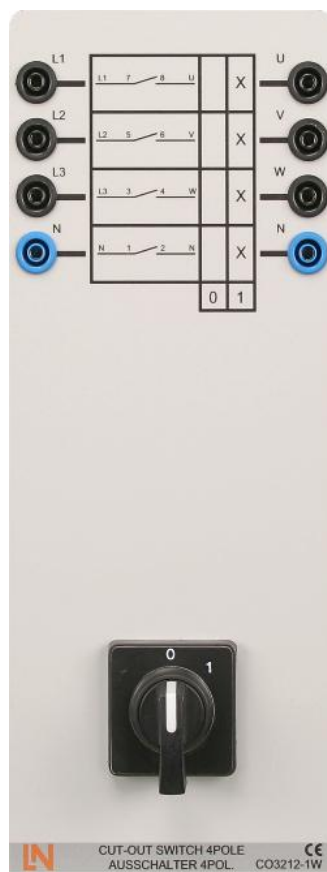


Рисунок 4.6 – Четырехполюсный выключатель

Указания по технике безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

До выполнения данной лабораторной работы следует внимательно прочитать каждый опыт. Все опыты проводятся под строгим контролем преподавателя!

Асинхронный пуск синхронного двигателя

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 4.7.

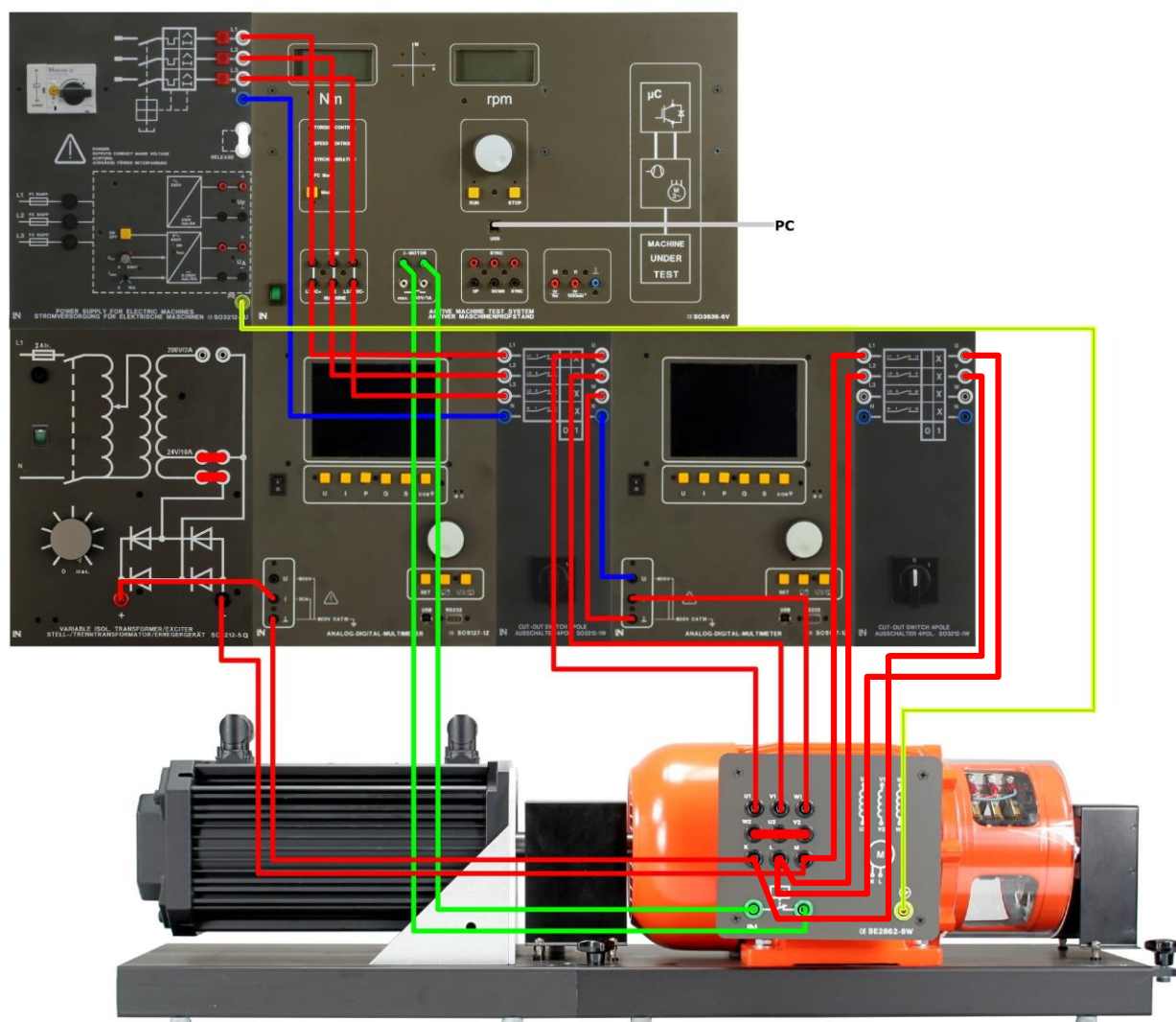


Рисунок 4.7 – Схема асинхронного пуска синхронного двигателя

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер на блоке возбудителя (рисунок 3.8). Проверить, что ток возбуждения равен нулю (выкрутить ручку против часовой стрелки до упора). Положение четырехполюсного выключателя, подключенного к ротору (правый блок), должно быть **«включено»**. На мультиметрах выбрать режим измерения тока (кнопка «I»).

3. В качестве нагрузки для синхронного двигателя используется тормозное устройство (сервопривод). На блоке управления частотой и моментом установить режим «Torque Control». Запустить тормозное устройство (кнопка «RUN»).

4. Произвести асинхронный запуск синхронного двигателя. Для этого включить выключатель, подключенный к фазам статора двигателя (блок между двумя мультиметрами). Двигатель при этом разгонится до скорости, близкой к номинальной ($n_{\text{ном}}=1500$ об/мин). После этого разомкнуть выключатель, замыкающий обмотку ротора, и сразу же подать возбуждение на ротор, быстро увеличив регулятором ток возбуждения до $I_B=4$ А (за значением тока следить по мультиметру слева). Двигатель втянется в синхронизм и скорость вращения станет равной номинальному значению.

5. Установить значение момента согласно таблице 4.1, измерить ток статора и частоту вращения, значения записать в таблицу. Повторить опыт для всех значений момента, указанных в таблице 4.1. Измеренные величины записать в таблицу.

Таблица 4.1 – Изменение нагрузки синхронного двигателя

$I_B=4$ А								
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$I, \text{А}$								
$n, \text{об/мин}$								
$I_B=6$ А								
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	1	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$I, \text{А}$								
$n, \text{об/мин}$								

6. Увеличить значение тока возбуждения до $I_B=6$ А. Повторить опыты п. 6. Измеренные величины записать в таблицу 4.1.

7. По завершении опыта отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»), снять питание с обмотки статора, отключив 4-х полюсный выключатель, выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B=0$ А) и отключить тумблер на блоке возбуждения.

Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему не разбирать.

8. По результатам таблицы 4.1 построить зависимости $I = f(M)$, $n = f(M)$, при различных значениях тока возбуждения I_B .

Использование синхронного двигателя в качестве устройства для сдвига фаз

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Опыты проводятся для схемы, собранной ранее (рисунок 4.7).
2. Повторить пункты 2 – 4 предыдущего опыта. Ток возбуждения установить при этом $I_B = 2$ А. На мультиметре, подключенном к статору, выбрать режим измерения коэффициента мощности (кнопка «cosφ»).
3. Установить значение момента $M = 1$ Н·м. Измерить коэффициент мощности и записать в таблицу 4.2. Повторить опыт для всех значений тока возбуждения, указанных в таблице 4.2.
4. Установить значение тока возбуждения $I_B = 3$ А. Установить значение момента $M = 3$ Н·м. Измерить коэффициент мощности и записать в таблицу 4.2. Повторить опыт для всех значений тока возбуждения, указанных в таблице 4.2, для соответствующего момента.
5. Установить значение тока возбуждения $I_B = 5$ А. Установить значение момента $M = 5$ Н·м. Измерить коэффициент мощности и записать в таблицу 4.2. Повторить опыт для всех значений тока возбуждения, указанных в таблице 4.2 для соответствующего момента.
6. По завершении опыта отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»), снять питание с обмотки статора, отключив 4-х полюсный выключатель, выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ А) и отключить тумблер на блоке возбуждения. Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления.

Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему не разбирать.

Таблица 4.2 – Использование синхронного двигателя для сдвига фаз

$M=1 \text{ Н}\cdot\text{м}$						
$I_B, \text{ А}$	2	3	4	5	6	7
$\cos\varphi$						
$M=3 \text{ Н}\cdot\text{м}$						
$I_B, \text{ А}$	3	4	5	6	7	8
$\cos\varphi$						
$M=5 \text{ Н}\cdot\text{м}$						
$I_B, \text{ А}$	5	5,5	6	6,5	7	8
$\cos\varphi$						

7. По результатам таблицы 4.2 построить зависимости $\cos\varphi = f(I_B)$ при различных значениях момента.

V-образная характеристика синхронного двигателя

Подготовка к проведению эксперимента.

- Опыты проводятся для схемы, собранной ранее (рисунок 4.7).
- Повторить пункты 2 – 4 первого опыта. Ток возбуждения установить при этом $I_B = 3 \text{ А}$. На мультиметре, подключенном к статору, выбрать режим измерения тока (кнопка «I»).
- Установить значение момента $M=0,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Измерить ток статора и записать в таблицу 4.3. Повторить опыт для всех значений тока возбуждения, указанных в таблице 4.3.
- Повторить п.3 для значений моментов $M=1,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M=1,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Показания приборов занести в таблицу 4.3.
- По завершении опыта отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»), снять питание с обмотки статора, отключив 4-х полюсный выключатель, выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0 \text{ А}$) и отключить тумблер на блоке возбуждения. Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления.

Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему разобрать.

Таблица 4.3 – Получение V-образной характеристики синхронного двигателя

$M=0,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$							
$I_B, \text{ А}$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$I, \text{ А}$							
$M=1,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$							
$I, \text{ А}$							
$M=1,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$							
$I, \text{ А}$							

7. По результатам таблицы 4.3 построить V-образные характеристики, представляющие собой зависимости $I = f(I_B)$ при различных значениях момента.

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Способы и схемы пуска синхронного двигателя.
2. Перечислить достоинства и недостатки синхронного двигателя по сравнению с асинхронным.
3. Перечислить и изобразить основные характеристики синхронного двигателя.
4. Поясните смысл явления «выпадение из синхронизма». Когда это случается и чем опасен такой режим?
5. Что такое статическая перегружаемость?
6. В чем заключается методика снятия V-образных характеристик? Пояснить их смысл.

Литература: 3, 4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в асинхронном двигателе в нормальных режимах его работы, построение рабочих характеристик двигателя. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Выполнить опыт холостого хода.
2. Снять и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Асинхронные машины – наиболее распространенные электрические машины. В основном их используют в качестве электрических двигателей. Благодаря простоте устройства и высокой надежности их широко применяют для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов, и т.д.

Асинхронная машина состоит из подвижной и неподвижной части (рисунок 5.1). Неподвижная часть машины переменного тока называется статором (1), а подвижная часть — ротором (2).

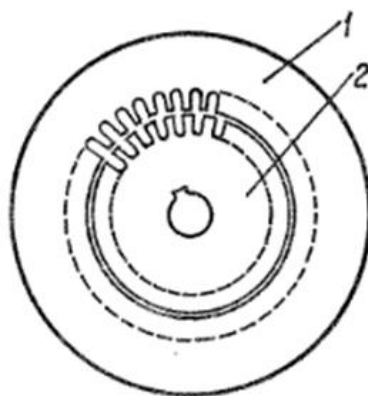


Рисунок 5.1 – Схема асинхронной машины

Сердечники статора и ротора асинхронных машин собираются из листов электротехнической стали, покрытых изоляционным лаком. Ротор асинхронных машин вращается несинхронно, или асинхронно, по отношению к вращающемуся магнитному полю, чем и обусловлено название этих машин.

На внутренней поверхности статора располагаются пазы, в которые укладывается обмотка статора, обычно выполняемая трехфазной. Она может соединяться по схеме «звезда» или «треугольник». На обмотку статора, называемую также первичной, подается синусоидальное трехфазное напряжение питания от сети.

На внешней поверхности ротора располагаются пазы, в которых размещается обмотка ротора.

По конструкции ротора асинхронные двигатели делятся на двигатели с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором.

В двигателях с фазным ротором обмотка ротора выполняется трехфазной. Концы ее фаз соединяются в звезду, а начала выводятся наружу через контактные кольца и щетки. К контактным кольцам может подключаться регулировочный или пусковой реостат. Число полюсов обмотки фазного ротора такое же, как в статоре.

Обмотка ротора двигателя с короткозамкнутым ротором выполняется в виде беличьей клетки (рисунок 5.2). В пазах располагаются стержни из меди или алюминия, концы которых с обоих торцов замыкаются накоротко

медными или алюминиевыми кольцами. Большинство выпускаемых асинхронных машин имеют короткозамкнутый ротор.

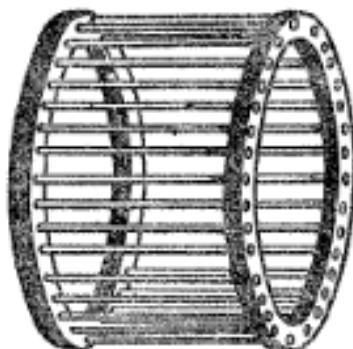


Рисунок 5.2 – Обмотка ротора в виде беличьей клетки

В электрическом отношении «беличья клетка» представляет собой многофазную обмотку, соединенную звездой и замкнутую накоротко. Число фаз обмотки равно числу пазов ротора, причем в каждую фазу входят один стрежень и прилегающие к нему участки короткозамыкающих колец.

Конструкция ротора таких двигателей проще, чем у двигателей с фазным ротором, т.к. они не имеют щеток и колец. В связи с этим такие двигатели более надежные, дешевые и удобные в эксплуатации. Их недостатком является небольшой пусковой момент и значительный пусковой ток. В двигателях с фазным ротором благодаря возможности регулировать сопротивление пускового реостата можно увеличивать пусковой момент и уменьшать пусковой ток. В связи с этим, в отличие от двигателей с короткозамкнутым ротором, их можно применять для привода механизмов, обладающих большим пусковым моментом.

Рассмотрим принцип действия асинхронного двигателя на примере двухполюсного двигателя.

Токи обмотки статора двухполюсной машины создают двухполюсный магнитный поток, проходящий через статор (1), ротор (3) и зазор между ними (рисунок 5.3).

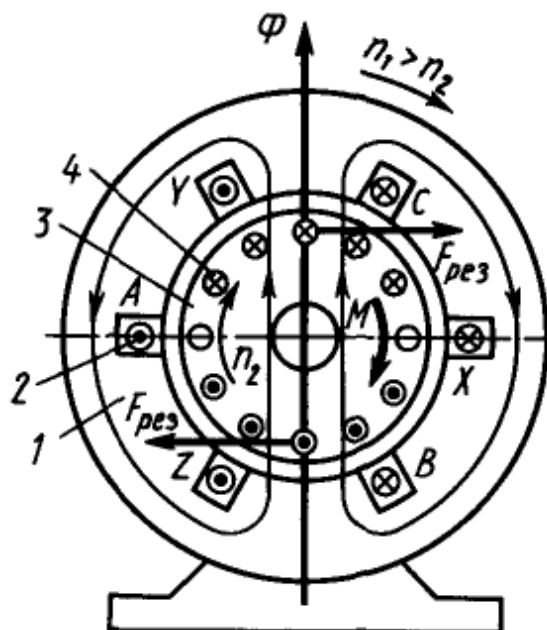


Рисунок 5.3 – Электромагнитная схема асинхронной машины

Обмотка статора (2) создает магнитное поле, вращающееся с частотой (синхронной)

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \text{ об/сек,} \quad (5.1)$$

где f_1 – частота тока статора, p – число пар полюсов.

Магнитное поле вращается в направлении чередования фаз A , B , C обмотки статора.

Магнитный поток Φ_1 , создаваемый обмоткой статора (рисунок 5.3), при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора (4), индуцирует в них ЭДС. Если обмотка ротора замкнута, то в ней начинают протекать токи i_2 с частотой f_2 , равной при неподвижном роторе ($n = 0$) первичной частоте f_1 .

Если ротор имеет трехфазную обмотку, то индуцируемый в ней ток также трехфазный. Под действием этого тока возникает вращающийся поток ротора Φ_2 . При $n = 0$ его число полюсов $2p$, направление вращения и скорость

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1 \quad (5.2)$$

такие же, как и у потока статора. Поэтому потоки Φ_1 и Φ_2 вращаются синхронно и образуют общий вращающийся поток двигателя Φ .

Магнитный Φ поток взаимодействует с токами проводников ротора, в результате чего возникают механические силы F , действующие на проводники ротора, и вращающий электромагнитный момент M .

Если развиваемый момент больше статического тормозного момента на валу, то ротор двигателя придет во вращение в направлении вращения поля с некоторой скоростью $n < n_1$, т. е. будет вращаться с некоторым отставанием, или скольжением, относительно поля статора.

Скольжением называется относительная разность скоростей вращения поля статора и ротора:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}. \quad (5.3)$$

При пуске двигателя ($n = 0$) согласно (5.3) $s = 1$, этот режим называют режимом короткого замыкания. При вращении ротора синхронно с полем статора, т.е. с синхронной скоростью ($n = n_1$) $s = 0$, этот режим называется режимом идеального холостого хода. При $n = n_1$ магнитное поле статора относительно ротора неподвижно и токи в роторе индуцироваться не будут, т.е. $M = 0$, следовательно, двигатель не может достичь такой скорости вращения. Таким образом, на практике режим идеального холостого хода недостижим. В режиме реального холостого хода значение скольжения отличается от нуля.

По результатам опыта холостого хода определяются следующие величины:

- а) ток холостого хода I_{10} ;
- б) напряжение холостого хода U_{10} ;
- в) мощность холостого хода P_{10} ;
- г) коэффициент мощности холостого хода $\cos\varphi_0$.

Испытание АД под нагрузкой производится в целях определения рабочих характеристик двигателя. По результатам опыта определяются следующие величины:

- а) ток статора I_1 ;
- б) напряжение на фазе статора U_1 ;
- в) подводимая мощность P_1 ;
- г) частота вращения ротора n ;
- д) вращающий момент на валу двигателя M_2 .

Полезная мощность на валу двигателя определяется по формуле:

$$P_2 = M_2 \cdot \Omega, \quad (5.4)$$

где Ω – механическая угловая скорость вращения ротора, которая вычисляется по формуле:

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}, \quad (5.5)$$

значение частоты вращения n подставляется в формулу в об/мин.

Коэффициент полезного действия двигателя определяется по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%. \quad (5.6)$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{3 \cdot U_1 \cdot I_1}. \quad (5.7)$$

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости потребляемой мощности P_1 , первичного тока I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, скольжения s и КПД η от полезной мощности P_2 при работе с номинальным напряжением и частотой. Рабочие характеристики позволяют находить все основные величины, определяющие режим работы двигателя при различных нагрузках (рисунок 5.4).

При пуске в ход асинхронных двигателей необходимо учитывать:

– двигатель должен развивать при пуске достаточно большой пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной скорости вращения;

– пусковой ток должен быть ограничен таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети;

– схема пуска должна быть по возможности простой, а число и стоимость пусковых устройств – малыми.

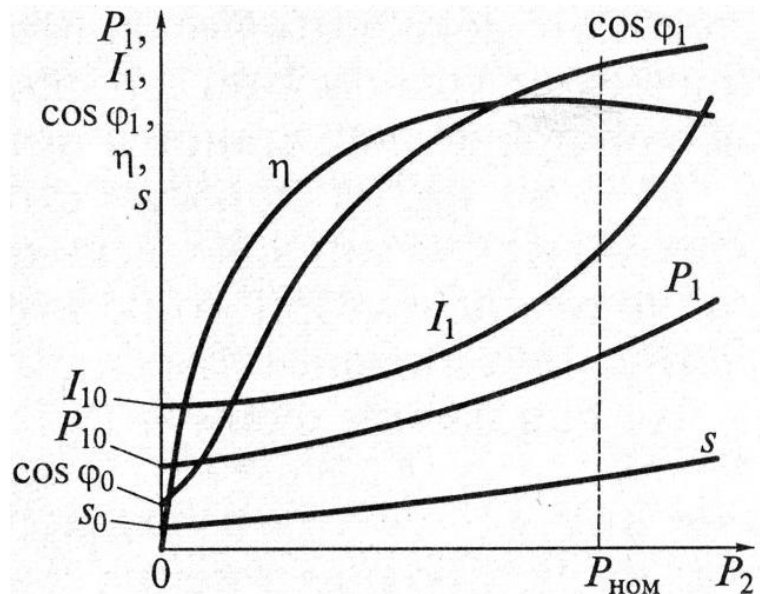


Рисунок 5.4 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Для пуска двигателя с короткозамкнутым ротором на практике используют следующие способы пуска:

1) *Прямой пуск* – включение обмотки его статора непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора. При этом пусковой ток двигателя $I_{\Pi} = (4 \div 7) I_{\text{н}}$.

Современные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируются таким образом, чтобы для них был возможен прямой пуск.

Если по условиям падения напряжения прямой пуск недопустим, то применяют следующие виды.

2) *Реакторный пуск*. При включении в сеть сначала двигатель получает питание через реактор, ограничивающий пусковой ток. При достижении нормальной скорости реактор шунтируется и на двигатель подается напряжение сети.

3) *Автотрансформаторный пуск.* Сначала на двигатель через автотрансформатор подается пониженное напряжение. После достижения двигателем определенной скорости посредством выключателя двигатель получает питание через часть обмотки автотрансформатора, который в этом случае работает как реактор. Затем двигатель получает полное напряжение. Недостатком является усложнение и удорожание пусковой аппаратуры.

4) *Пуск переключением «звезда — треугольник»* может применяться в случаях, когда выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель нормально работает с соединением обмотки статора в треугольник, например, когда двигатель на 380/220 В и с соединением обмоток Y/Δ работает от сети 220 В. В этом случае при пуске обмотка статора включается в звезду, а при достижении нормальной скорости вращения переключается в треугольник. При таком способе пуска по сравнению с прямым пуском при соединении обмотки в треугольник напряжение фаз обмоток уменьшается в $\sqrt{3}$ раз.

Недостатком этого способа пуска по сравнению с реакторным и автотрансформаторным является то, что при пусковых переключениях цепь двигателя разрывается, что связано с возникновением коммутационных перенапряжений. В настоящее время используется сравнительно редко.

Последние три способа осуществляют пуск двигателя на пониженном напряжении, что ведет к снижению пускового и максимального моментов двигателя, которые, т.к. они пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому их можно использовать при пуске без нагрузки или незначительной нагрузке.

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» фирмы LUCAS-NÜLLE. Стенд включает в себя необходимые для выполнения данной лабораторной работы элементы: испытательный стенд серво-двигателя 1 кВт (рисунок 5.5); трехфазный

асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (рисунок 5.6); блок питания для электрических машин (рисунок 3.6); блок управления частотой вращения и моментом машины (рисунок 3.7); аналого-цифровой мультиметр (рисунок 3.9); нагрузочное сопротивление (рисунок 3.5), четырехполюсный выключатель (рисунок 5.7).



Рисунок 5.5 – Испытательный стенд серво-двигателя 1 кВт



Рисунок 5.6 – Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

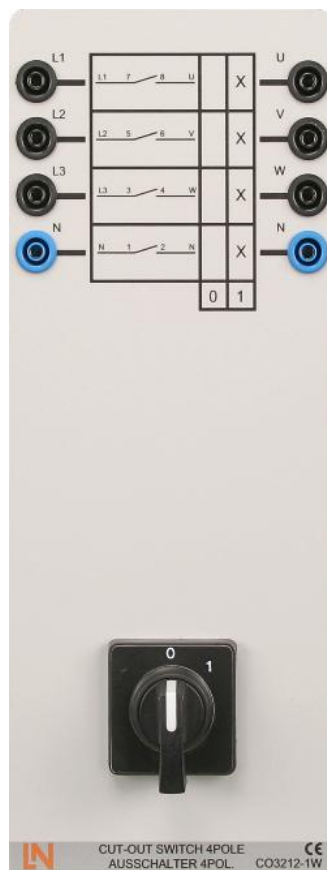


Рисунок 5.7 – Четырехполюсный выключатель

Номинальные параметры двигателя:

Номинальное напряжение: 690/400В, 50 Гц

Номинальный ток: 1,2 А / 2,1 А

Номинальное число оборотов: 2900 об/мин

Номинальная мощность: 1 кВт

$\cos\varphi = 0,83$

Указания по технике безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

Характеристика холостого хода

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 5.8.

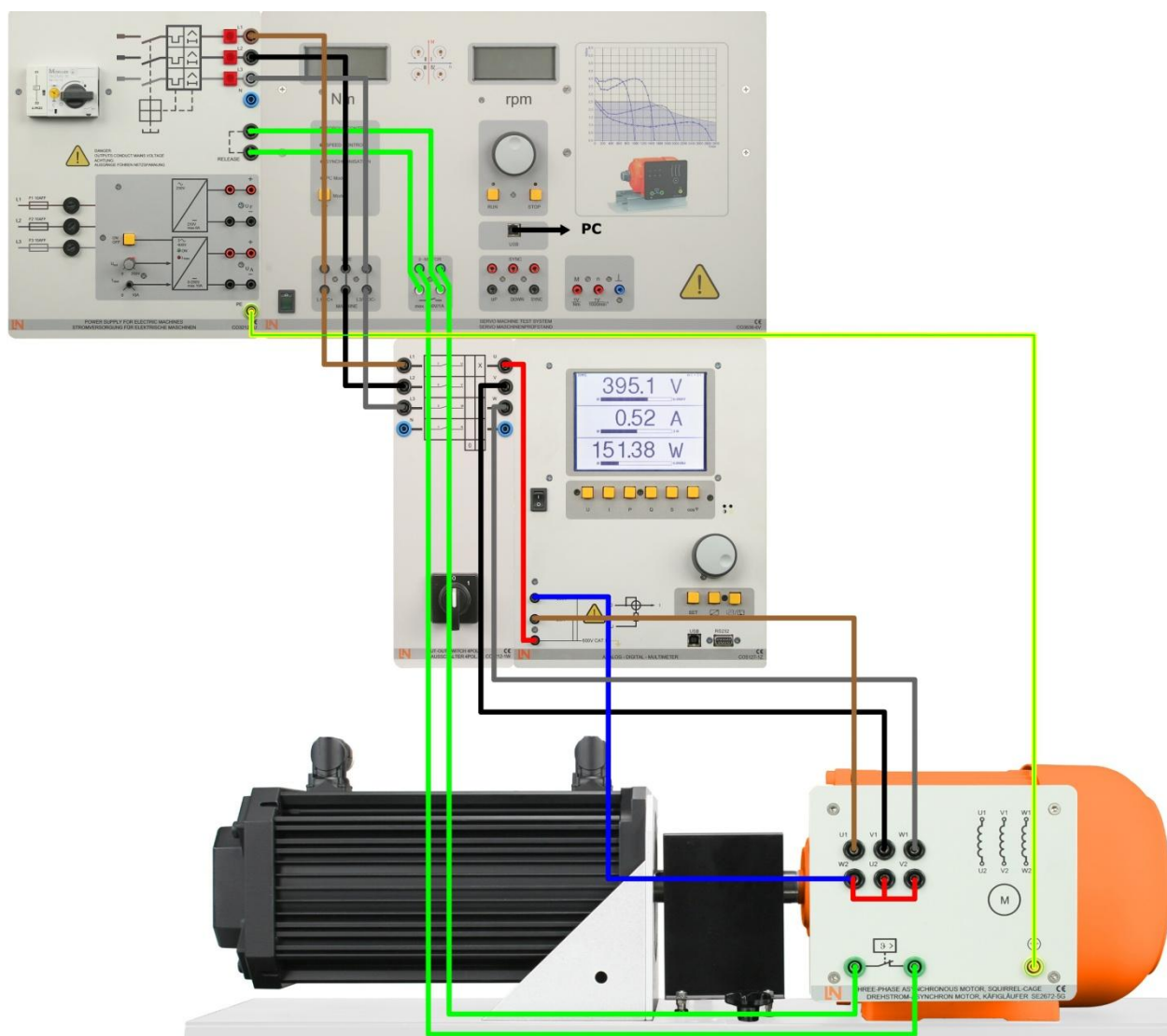


Рисунок 5.8 – Схема установки опыта холостого хода асинхронного двигателя

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер на блоке управления. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. На мультиметре выбрать режим

измерения тока, напряжения и активной мощности (кнопка «I», «U», «P»). На блоке управления установить режим «Torque control».

3. Запустить двигатель, повернув ручку четырехполюсного выключателя (рисунок 5.2) в положение «включено». Измерить напряжение холостого хода U_{10} , ток I_{10} и активную мощность P_{10} . Записать измеренные значения.

4. По завершении опыта отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»). Остановить двигатель, повернув четырехполюсный выключатель в положение «выключено». Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель на входе схемы в положение «выключено». Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоке управления. Схему не разбирать.

Снятие рабочих характеристик

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Опыты проводятся для схемы, собранной ранее (рисунок 5.8).

2. Включить тумблеры на измерительных приборах. Включить тумблер на блоке управления. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. На мультиметре выбрать режим измерения тока, напряжения и активной мощности (кнопка «I», «U», «P»). На блоке управления установить режим «Torque control».

3. Запустить двигатель, повернув ручку четырехполюсного выключателя (рисунок 5.7) в положение «включено».

4. Запустить тормозное устройство (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить частоту вращения асинхронного двигателя, указанную в таблице 5.1. Записать показания приборов в таблицу 5.1: ток обмотки статора I_1 , напряжение обмотки статора U_1 , мощность, потребляемую фазой двигателя P_{W1} , момент на валу двигателя M_2 .

4. Повторить опыты п. 4 для всех значений частоты вращения, представленных в таблице 5.1. Показания приборов занести в таблицу 5.1.

5. По завершении опыта отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»). Остановить двигатель, повернув четырехполюсный выключатель в положение «выключено». Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоке управления. Снять напряжение со стенда, повернув против часовой стрелки силовой выключатель на входе схемы в положение «выключено». Схему разобрать.

6. По измеренным величинам таблицы 5.1 рассчитать параметры, необходимые для построения рабочих характеристик: мощность на валу двигателя P_2 , коэффициент мощности $\cos\varphi_1$, КПД η , скольжение s . Записать их в таблицу 5.1 в графу «Рассчитанные величины».

6. По результатам таблицы 5.1 построить рабочие характеристики:
 $s = f(P_2)$; $n = f(P_2)$; $P_1 = f(P_2)$; $\cos\varphi = f(P_2)$; $\eta = f(P_2)$; $I_1 = f(P_2)$;
 $M_2 = f(P_2)$.

Таблица 5.1 – Снятие рабочих характеристик

Частота вращения ротора n , об/мин	Измеренные величины				Рассчитанные величины				
	I_1 , А	U_1 , В	P_{W1} , Вт	M_2 , Н·м	s , о.е.	$\cos\varphi$	$P_1 = 3 \cdot P_{W1}$, Вт	P_2 , Вт	η , %
2950									
2930									
2910									
2880									
2850									
2820									
2800									

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить конструкцию асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2. Что называется скольжением?
3. Какие потери в асинхронном двигателе бывают, какими из них можно пренебречь и почему?
4. При каком условии достигается максимальный КПД асинхронного двигателя?
5. Какие способы пуска асинхронного двигателя вы знаете? Кратко охарактеризовать каждый из них.
6. Какой двигатель называется асинхронным?
7. Что представляют собой рабочие характеристики асинхронного двигателя? Изобразить их схематично.

Литература: 3, 4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в асинхронном двигателе с фазным ротором при нагрузке, построение механической характеристики двигателя; изучение условий изменения направления вращения ротора. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Снять и построить механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором на участке, приемлемом для работы двигателя по условиям нагрева.

2. Выполнить реверс асинхронного двигателя с фазным ротором.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Анализ основных процессов, происходящих в асинхронной машине, удобно производить с помощью схемы замещения (рисунок 6.1).

Схема замещения асинхронной машины отражает все основные процессы, происходящие в ней, и представляет собой основу для изучения режимов работы АД (рисунок 6.1). На схеме приняты следующие обозначения: $\dot{U}_1$ – первичное фазное напряжение; $\dot{I}_1$, $\dot{I}'_2$ – первичный и

приведенный вторичный фазные токи; $\dot{I}_m$ – намагничивающий ток; r_1, r_2' – первичное и приведенное вторичное активные сопротивления; $x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}'$ – первичное и вторичное индуктивные сопротивления рассеяния, включающие в себя пазовое, лобовое, дифференциальное рассеяние и рассеяние по коронкам зубцов; x_m – индуктивное сопротивление намагничивающей цепи, равное главному индуктивному сопротивлению первичной обмотки; r_m – активное сопротивление, соответствующее магнитным потерям в статоре.

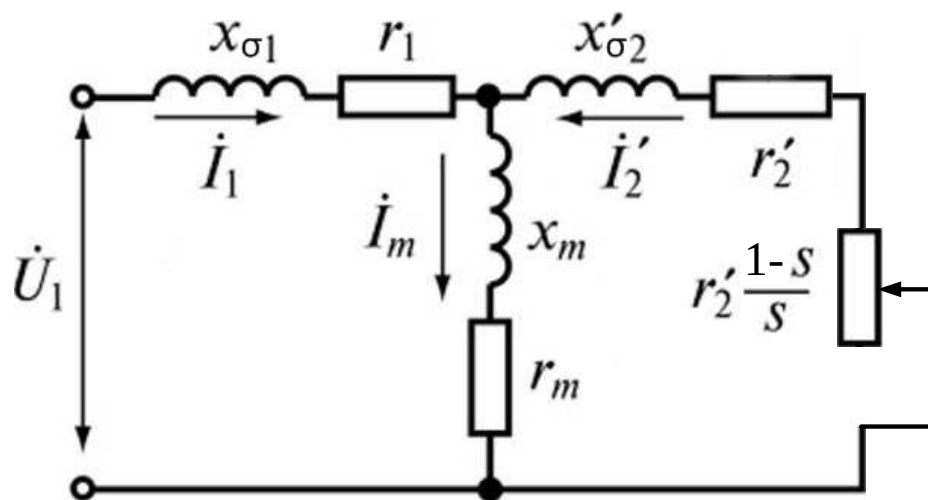


Рисунок 6.1 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Кроме режима короткого замыкания и холостого хода асинхронная машина может работать в режиме двигателя, генератора и противовключения (электромагнитного торможения). Механическая характеристика асинхронной машины, работающей в различных режимах, представлена на рисунке 6.2. Механическая характеристика представляет собой зависимость скорости вращения n от электромагнитного момента M при $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$: $n = f(M)$ или, наоборот $M = f(n)$. Механическая характеристика может быть также построена как зависимость электромагнитного момента от скольжения $M = f(s)$. На рисунке 6.2 приняты следующие обозначения: $s_{\text{кр}}$ – критическое скольжение, $M_{\text{МД}}$, $M_{\text{МГ}}$ – критический момент двигателя и генератора, соответственно, $M_{\text{П}}$ – пусковой момент.

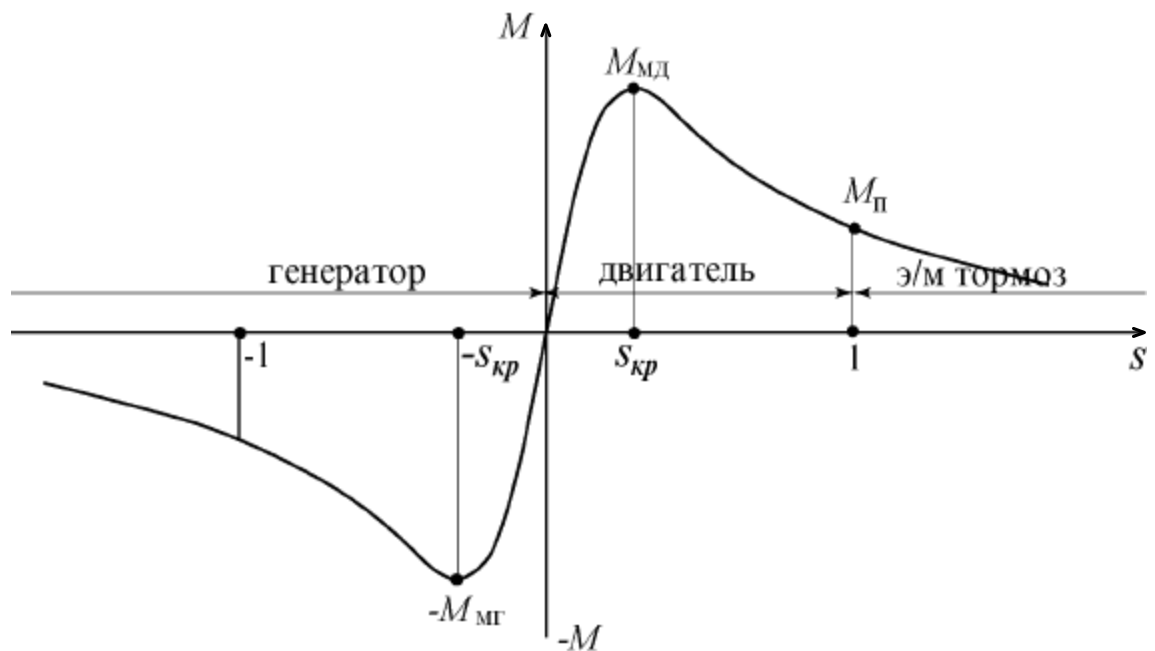


Рисунок 6.2 – Механическая характеристика асинхронной машины

В двигательном режиме скольжение находится в диапазоне $0 < s < 1$, скорость двигателя $n < n_1$. Асинхронный двигатель потребляет из сети активную мощность P_1 , часть которой теряется в виде электрических потерь в обмотках статора $p_{эл1}$ и ротора $p_{эл2}$, магнитных потерь в сердечнике статора $p_{мг}$, механических потерь на трение и вентиляцию $p_{мех}$ и добавочных потерь $p_{доб}$, вызванных высшими гармониками магнитных полей:

$$\Sigma p = p_{эл1} + p_{эл2} + p_{мг} + p_{мех} + p_{доб}. \quad (6.1)$$

Оставшаяся мощность P_2 (полезная) передается на вал двигателя:

$$P_2 = P_1 - \Sigma p. \quad (6.2)$$

Тогда КПД двигателя η можно определить по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%. \quad (6.3)$$

Электромагнитный момент, развиваемый электромагнитными силами на роторе асинхронного двигателя, Н·м:

$$M = \frac{P_{мех}}{\Omega}, \quad (6.4)$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность на роторе;

Ω – механическая угловая скорость вращения ротора.

Из механических характеристик асинхронного двигателя (рисунок 6.3) можно сделать следующие выводы:

1. Максимальный момент (M_{max}) не зависит от сопротивления цепи ротора (r'_2);
2. Увеличение сопротивления цепи ротора ведет к увеличению величины критического скольжения;
3. Увеличивая сопротивления цепи ротора, можно увеличить пусковой момент ($M_{\text{п}}$).
4. Номинальный режим работы соответствует скольжению, находящемуся на интервале $0 < s < s_{\text{кр}}$.

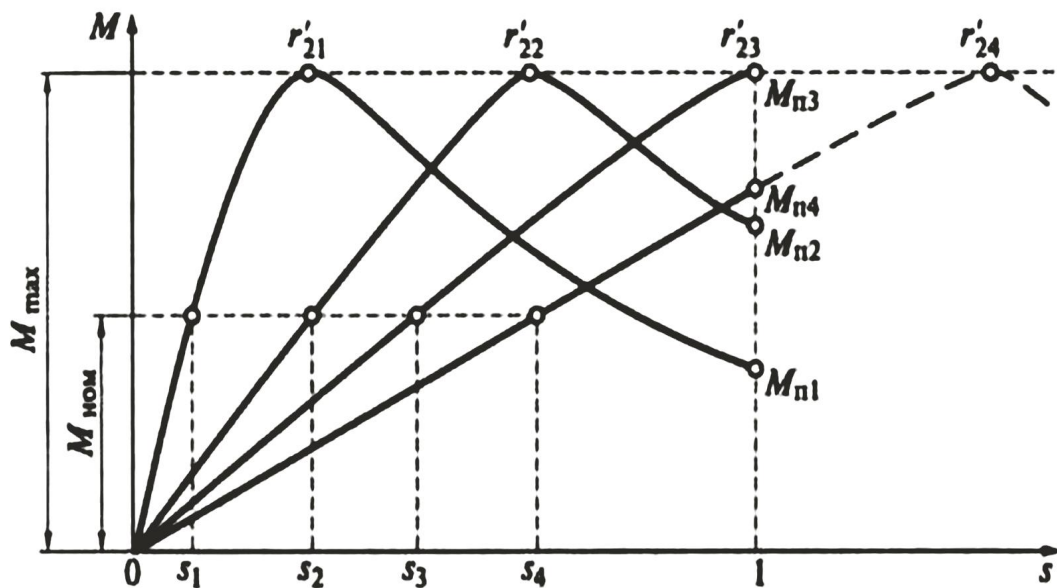


Рисунок 6.3 – Семейство механических характеристик асинхронного двигателя: естественная (r'_{21}) и искусственные (r'_{22} , r'_{23} , r'_{24}),
причем $r'_{22} < r'_{23} < r'_{24}$

В генераторном режиме скольжение $s < 0$, скорость $n > n_1$. Для осуществления генераторного режима работы асинхронную машину нужно включить в сеть переменного тока и вращать с помощью вспомогательного двигателя в сторону вращения магнитного поля со скоростью, превышающей синхронную скорость. Отличительной особенностью асинхронного

генератора является то, что в этом режиме машина потребляет из сети реактивную мощность. В связи с этим асинхронный генератор может работать только на сеть, к которой подключены машины и устройства, которые могут являться источниками реактивной мощности для питания асинхронных генераторов.

В режиме противовключения скольжение $s > 1$. Данный режим можно получить, поменяв у работающего двигателя порядок чередования фаз обмотки статора. В этом режиме электромагнитный момент, развиваемый машиной, будет направлен в сторону вращения поля, и, следовательно, против вращения ротора ($n < 0$), т.е. будет тормозящим. Таким образом, частота вращения ротора будет снижаться и если при $n \approx 0$ машину не отключить от сети, ротор начнет вращаться в противоположную сторону и машина станет работать в двигательном режиме. Основная часть мощности в режиме противовключения тратится на потери в виде тепла на статоре и роторе. В энергетическом отношении он является наиболее тяжелым и эквивалентен двойному короткому замыканию. Однако его используют для быстрой остановки асинхронного двигателя и приводимых им в движение производственных механизмов.

Пуск двигателя с фазным ротором осуществляют с помощью реостата в цепи ротора. При этом максимальный момент не снижается, а пусковой увеличивается. Подбрав сопротивление реостата можно добиться равенства пускового и максимального моментов. Включение сопротивления также снижает пусковой ток двигателя. Обычно реостат имеет от трех до шести ступеней, позволяя в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение пускового момента. Недостатком такого пуска является его относительная сложность и необходимость применения более дорогих двигателей с фазным ротором. В связи с этим двигатели с фазным ротором применяют только при тяжелых условиях пуска, когда необходимо развивать максимально возможный пусковой момент.

Скорость вращения ротора асинхронного двигателя

$$n = n_1 \cdot (1 - s) = (1 - s) \cdot \frac{f_1}{p}.$$

В связи с этим возможны 3 способа регулирования скорости вращения асинхронных двигателей:

1) Регулирование скорости изменением первичной частоты – частотное регулирование. Такой способ требует применения источников питания с регулируемой частотой, поэтому он используется главным образом в случаях, когда для целых групп двигателей необходимо повышать или одновременно плавно регулировать скорость вращения. Недостатком способа является громоздкость аппаратуры и высокая стоимость.

2) Регулирование скорости изменением числа пар полюсов. Изменять p можно двумя способами: а) применением на статоре нескольких обмоток, которые уложены в общих пазах и имеют разные числа пар полюсов p , б) применением обмотки специального типа, которая позволяет получить различные значения p путем изменения (переключения) схемы соединений обмотки. Использование обмоток с переключением числа пар полюсов вызывает усложнение коммутационной аппаратуры, в особенности, если с помощью одной обмотки желают получить более двух скоростей вращения. Несколько ухудшаются также энергетические показатели двигателей.

3) Регулирование скорости изменением скольжения. Можно реализовать несколькими путями:

а) уменьшением первичного напряжения.

При уменьшении U_1 момент двигателя изменяется пропорционально U_1^2 , и, соответственно, изменяются механические характеристики, в результате чего изменяются также значения рабочих скольжений $s_1, s_2, s_3, \dots$ при данном виде зависимости $M_{\text{СТ}} = f(s)$. Очевидно, что регулирование s в этом случае возможно в пределах $0 < s < s_{\text{кр}}$. Для получения достаточно большого диапазона регулирования скорости необходимо, чтобы активное

сопротивление цепи ротора и соответственно $s_{кр}$ были достаточно велики. В связи с пониженным КПД применяется для двигателей малой мощности.

б) импульсное регулирование скорости.

Производится путем периодического включения двигателя в сеть и отключения его от сети либо путем периодического шунтирования с помощью контактора или полупроводниковых вентилей сопротивлений, включенных последовательно в цепь статора. При этом двигатель непрерывно находится в переходном режиме ускорения или замедления скорости вращения ротора и в зависимости от частоты и продолжительности импульсов работает с некоторой, приблизительно постоянной скоростью вращения. Подобное регулирование скорости применяется только для двигателей весьма малой мощности.

в) включением реостата в цепь ротора.

В этом случае изменяется форма зависимости $M = f(s)$ и механической характеристики $n = f(M)$. При этом некоторому нагрузочному моменту M_H соответствуют скольжения $s_1, s_2, s_3, \dots$, большие, чем при естественной характеристике (при отсутствии реостата). Этот метод может быть использован только для двигателей с фазным ротором и позволяет плавно изменять частоту вращения в широких пределах. Недостатком является снижение КПД за счет потерь в реостате.

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «ЕЕМ 5 3-х фазные многофункциональные электрические машины» фирмы LUCAS-NÜLLE. Стенд включает в себя компоненты, используемые в лабораторной работе 4.

Номинальные параметры двигателя:

Номинальное напряжение: 400/230 В, 50 Гц

Номинальный ток: 2,0 А / 3,5 А

Номинальное число оборотов: 1400 / 1500 об/мин

Номинальная мощность: 0,8 кВт

$\cos \varphi = 0,75$.

Указания по технике безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

Подключение и запуск

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 6.4.

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. На мультиметре выбрать режим измерения тока (кнопка «I»). Установить на пусковом реостате сопротивление $R = 0$ Ом. Включить тумблер на блоке управления, установить режим «Torque control».

3. Запустить двигатель, повернув ручку четырехполюсного выключателя в положение «включено».

4. Запустить тормозное устройство (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить значение момента, указанное в таблице 6.1. Записать показания приборов в таблицу 6.1: ток обмотки статора I_1 , частоту вращения ротора n .

5. Повторить опыт п.4 для всех значений момента, представленных в таблице 6.1.

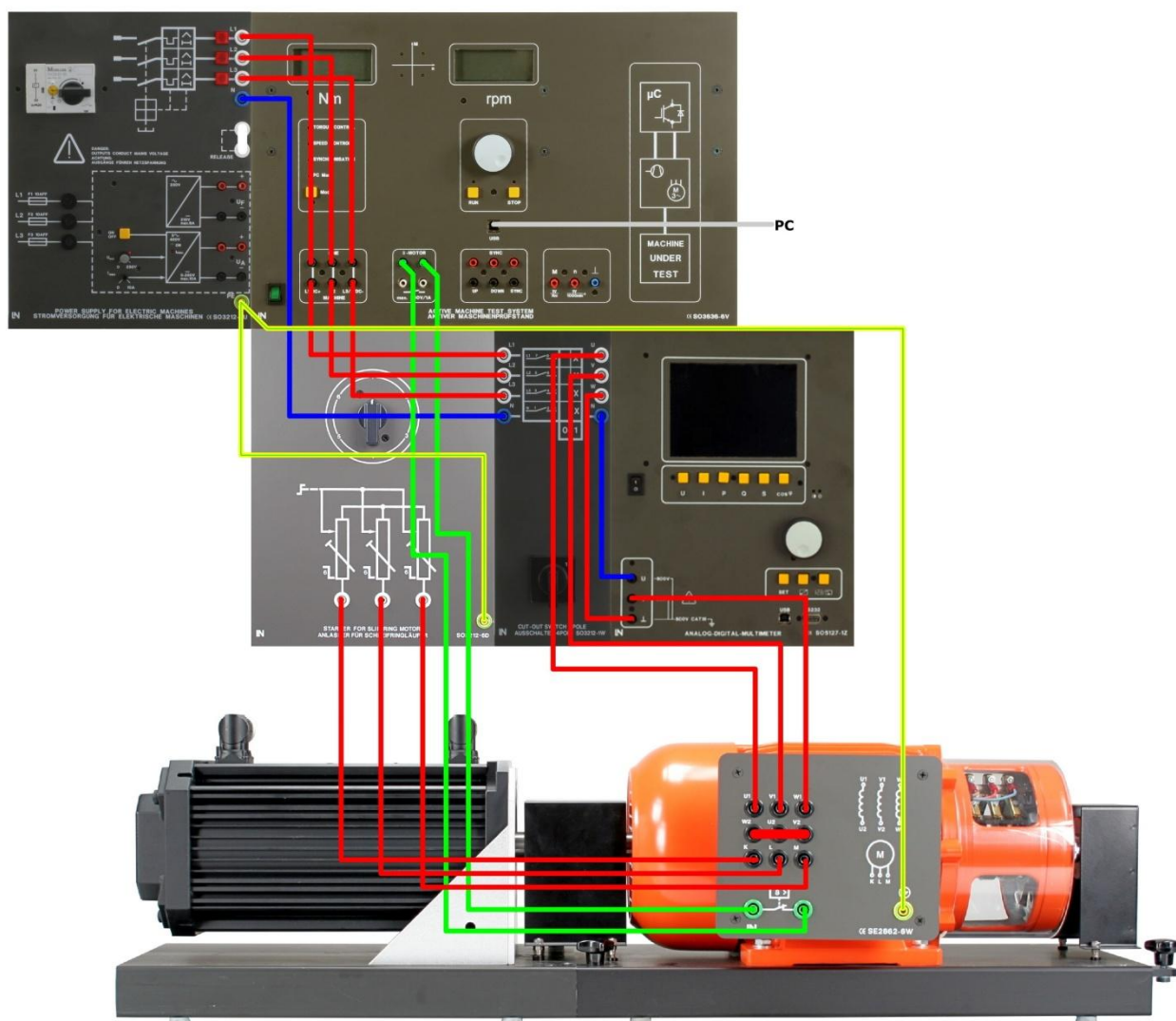


Рисунок 6.4 – Схема подключения асинхронного двигателя с фазным ротором

6. По завершении опыта отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»). Остановить двигатель, повернув четырехполюсный выключатель в положение «выключено». Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоке управления. Снять напряжение со стенда, повернув против часовой стрелки силовой выключатель на блоке питания в положение «выключено». Схему не разбирать.

7. По результатам таблицы 6.1 рассчитать скольжение s (5.3) для каждого измерения и записать в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Нагрузочные характеристики

M_2 , Н·м	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
I_1 , А											
n , об/мин											
s											

8. По результатам таблицы 6.1 построить зависимость $I_1=f(s)$ и механическую характеристику $M_2=f(s)$. На графике пунктиром достроить возможную траекторию механической характеристики до скольжения $s=1$.

Изменение направления вращения

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Опыты проводятся для схемы, собранной ранее (рисунок 6.4).
2. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблер на блоке управления. На блоке управления установить режим «Torque control».
3. Запустить двигатель, повернув ручку четырехполюсного выключателя в положение «включено».
4. Отметить направление вращения ротора.
5. По завершении опыта остановить двигатель, повернув четырехполюсный выключатель в положение «выключено». Выключить тумблер на блоке управления. Снять напряжение со стенда, повернув против часовой стрелки силовой выключатель блока питания в положение «выключено».
6. Поменять местами провода фазы А и В, подходящие к четырехполюсному выключателю (выводы L1 и L2).
7. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблер на блоке управления. На блоке управления установить режим «Torque control».
8. Запустить двигатель, повернув ручку четырехполюсного выключателя в положение «включено».

9. Отметить направление вращения ротора.

10. По завершении опыта остановить двигатель, повернув четырехполюсный выключатель в положение «выключено». Выключить тумблер на блоке управления. Снять напряжение со стенда, повернув против часовой стрелки силовой выключатель блока питания в положение «выключено». Схему разобрать.

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить конструкцию асинхронного двигателя с фазным ротором.
2. Провести сравнительную характеристику асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором, назвать их преимущества и недостатки.
3. В каких режимах может работать асинхронная машина? Дать характеристику области значений скольжения и частоты вращения для каждого из режимов
4. Что понимается под устойчивой работой двигателя?
5. Привести условие устойчивой работы асинхронного двигателя.
6. Изобразить механическую характеристику асинхронной машины, отметить на ней зоны, соответствующие различным режимам работы, и скольжения, формирующие эти зоны.
7. Изобразить механическую характеристику асинхронного двигателя и статического момента нагрузки, отметить на графике устойчивые и неустойчивые точки. Пояснить.
8. Какие существуют способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя? Кратко охарактеризовать каждый из них.

9. Изобразить механическую характеристику при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью пускового реостата.

10. Пояснить физический смысл параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя.

Литература: 3, 4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

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.

В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Выполнить опыт холостого хода, построить характеристику холостого хода.
2. Снять опытным путем и построить внешнюю характеристику генератора.
3. Снять опытным путем и построить регулировочную характеристику генератора.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Устройство и принцип действия машины постоянного тока (МПТ).
На рисунке 7.1 представлено устройство простейшей машины постоянного тока.

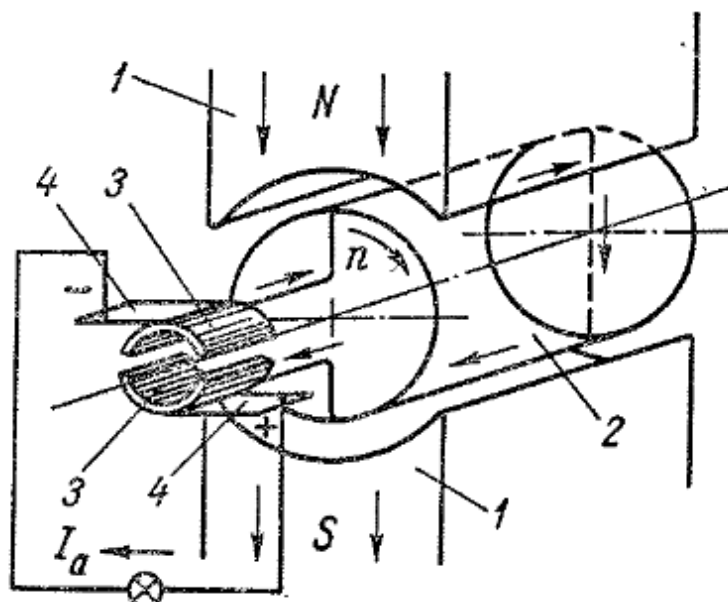


Рисунок 7.1 – Устройство простейшей машины постоянного тока

Неподвижная часть МПТ называется индуктором и состоит из стального ярма и прикрепленных к нему полюсов. Индуктор предназначен для создания основного магнитного потока. Индуктор простейшей машины имеет два полюса (1) (рисунок 7.1). Вращающаяся часть МПТ называется ротором и состоит из цилиндрического якоря (2) и коллектора (3), укрепленных на валу машины. Сердечник якоря набирается из листов электротехнической стали, сажаемых на вал. На внешней поверхности якоря расположены пазы, в которые укладываются катушки обмотки якоря. К концам витка обмотки крепятся медные пластины, изолированные от вала. Совокупность пластин образует кольцо, называемое коллектором. Для отвода/подвода тока к вращающемуся коллектору на него нажимают две неподвижные щетки (4), соединяющие обмотку якоря с внешней цепью.

Для создания основного магнитного потока в машинах постоянного тока предназначена обмотка возбуждения. Катушки обмотки возбуждения располагаются на сердечниках главных полюсов (рисунок 7.2) и питаются постоянным током. Главные полюса состоят из ферромагнитного сердечника и расширенной части – полюсного наконечника, часто называемого «башмаком». Для лучшего охлаждения обмотки возбуждения ее обычно разбивают на 2 – 4 катушки.

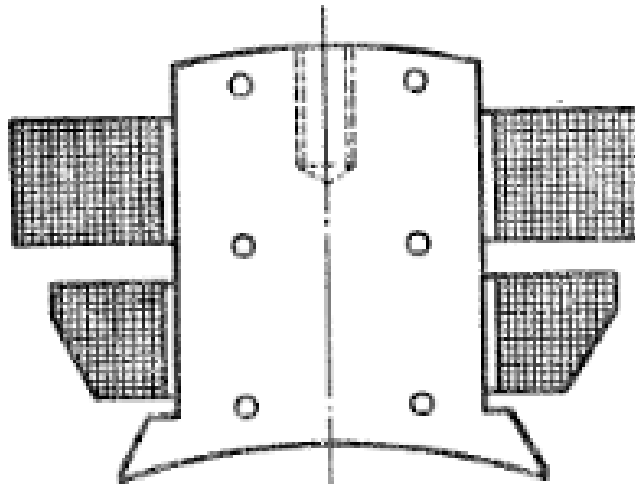


Рисунок 7.2 – Главный полюс машины постоянного тока

Магнитный поток проходит от северного полюса N через якорь к южному полюсу S и от него через ярмо снова к северному полюсу. Число главных полюсов всегда четное, северный полюс чередуется с южным. Для этого последовательно соединяются катушки соответствующих полюсов.

Для улучшения процесса токобъема с коллектора в машинах большой мощностью устанавливаются дополнительные полюсы. Они располагаются между главными полюсами и крепятся болтами к ярму. Для изготовления сердечников дополнительных полюсов обычно применяют конструкционную сталь, ярмо выполняется из литой стали.

МПТ может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Генераторы постоянного тока широко используются в промышленности, транспорте (для питания электроприводов с широким регулированием скорости вращения).

Режим генератора. Если вращать якорь машины по часовой стрелке, в проводниках его обмотки будет индуцироваться ЭДС, называемая ЭДС вращения. Для определения ее направления используется правило правой руки (рисунок 7.3 а).

Вследствие симметрии в обоих проводниках обмотки якоря будут индуцироваться равные ЭДС, суммируемые по контуру витка, тогда полная ЭДС якоря простейшей машины будет равна $E_a = 2e_{пр}$.

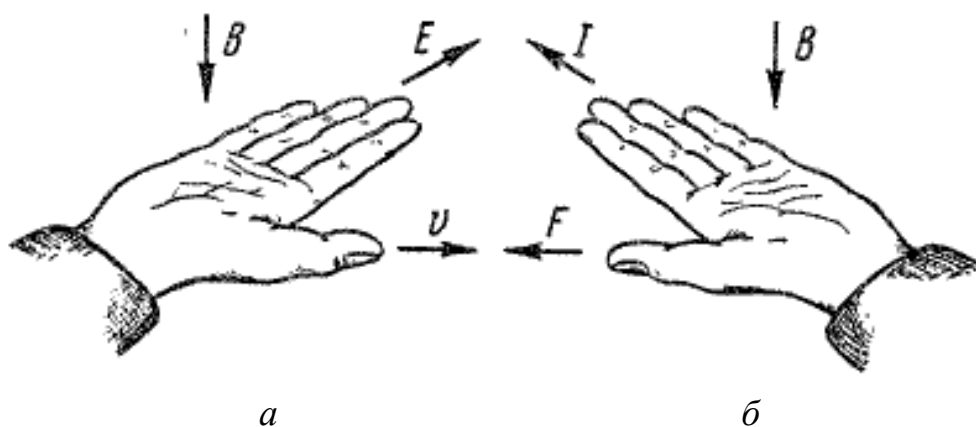


Рисунок 7.3 – Правила правой (а) и левой (б) руки

Так как проводники попеременно оказываются то под южным, то под северным полюсами, направление ЭДС, индуцируемой в проводниках, изменяется (рисунок 7.4, а).

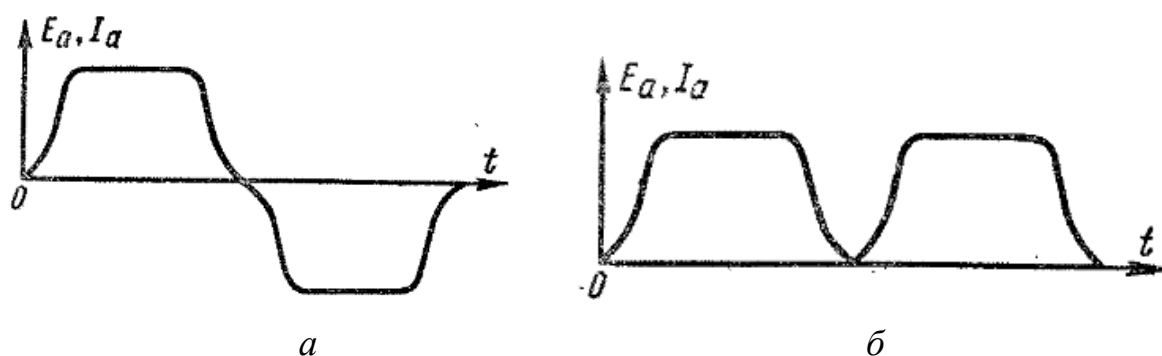


Рисунок 7.4– Кривые ЭДС и тока простейшей МПТ в якоре (а) и во внешней цепи (б)

Если обмотка якоря подключена ко внешней цепи, то по обмотке якоря и во внешней цепи начинает протекать ток. При этом ток в обмотке якоря переменный I_a , и его кривая повторяет форму кривой ЭДС (рисунок 7.4, а). Направление тока, протекающего во внешней цепи, будет постоянным, благодаря действию коллектора. При повороте якоря с коллектором на 90° , проводники оказываются под другими полюсами и направления ЭДС в них изменяется. Одновременно происходит также смена коллекторных пластин под щетками. Так, нижняя щетка всегда будет контактировать с коллекторной пластиной, проводник которой располагается под южным полюсом, а нижняя щетка – с пластиной, проводник которой расположен под

северным полюсом. Следовательно, полярность щеток, как и направление тока во внешней цепи, всегда будут оставаться неизменными.

Таким образом, коллектор в генераторе преобразует переменный ток обмотки якоря в постоянный ток во внешней цепи, выполняя функцию механического выпрямителя (рисунок 7.4 б).

Образуемый во внешней цепи пульсирующий по значению ток мало пригоден для практических целей. В связи с этим на практике не применяют такие простейшие машины, как рассмотренная выше, для уменьшения пульсаций применяют более сложные по устройству обмотку якоря и коллектор.

Напряжение на зажимах якоря генератора равно:

$$U_a = E_a - I_a \cdot r_a, \quad (7.1)$$

где r_a – сопротивление обмотки якоря.

На проводники обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле, будут действовать электромагнитные силы $F_{\text{пр}}$. Их направление можно определить по правилу левой руки (рисунок 7.3 б). Эти силы создают электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, направленный в режиме генератора против вращения якоря и являющийся, таким образом, тормозящим.

В генераторе при установившемся режиме работы электромагнитный момент равен:

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{в}} - M_{\text{тр}} - M_{\text{с}}, \quad (7.2)$$

где $M_{\text{в}}$ – момент на валу генератора, развиваемый первичным двигателем;

$M_{\text{тр}}$ – момент сил трения;

$M_{\text{с}}$ – тормозной момент, вызываемый потерями на гистерезис и вихревые токи в сердечнике якоря.

Мощность, развиваемая электромагнитным моментом, называется электромагнитной мощностью $P_{\text{эм}}$:

$$P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}} \cdot \Omega, \quad (7.3)$$

где $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ – представляет собой угловую скорость вращения.

По способу возбуждения машины постоянного тока классифицируют на машины независимого возбуждения и машины с самовозбуждением (рисунок 7.5). В первую группу входят машины с электромагнитным возбуждением, в которых обмотка возбуждения питается постоянным током от вспомогательного источника, и магнитоэлектрические машины с полюсами в виде постоянных магнитов. Машины второй группы в зависимости от способа включения обмоток возбуждения делятся на шунтовые (параллельное включение обмотки возбуждения с обмоткой якоря), серийные (последовательное) и компаундные (смешанное).

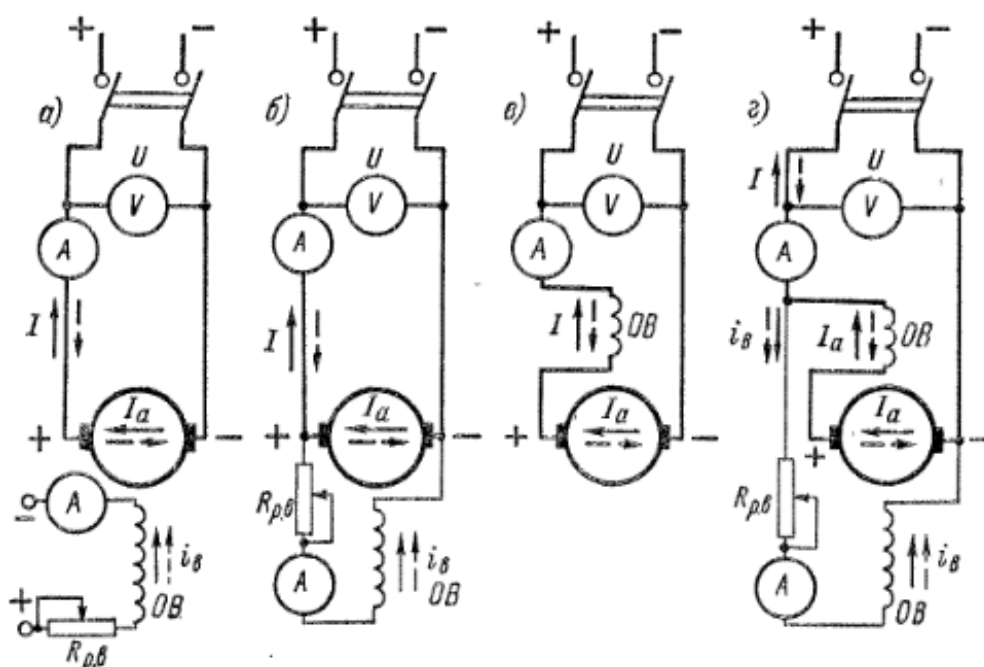


Рисунок 7.5 – Способы возбуждения ГПТ: *а* – независимое, *б* – параллельное, *в* – последовательное, *г* – смешанное

Для самовозбуждения генераторов необходимо выполнение следующих условий:

- 1) Для начала процесса самовозбуждения необходимо наличие остаточной ЭДС;
- 2) При прохождении тока по обмотке возбуждения ее магнитодвижущая сила (МДС) должна быть направлена согласно МДС

остаточного потока, в ином случае машина будет размагничиваться, и процесс самовозбуждения не начнется;

3) Сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического значения.

Свойства генераторов можно анализировать с помощью характеристик, которые устанавливают зависимости между основными величинами, определяющими работу генераторов. Такими величинами являются: напряжение на зажимах U , ток возбуждения I_B , ток якоря I_a или ток нагрузки I , скорость вращения n .

Обычно генераторы работают при $n=\text{const}$. Поэтому основные характеристики генераторов определяются при $n=n_{\text{ном}}=\text{const}$.

Существует пять основных характеристик генераторов: 1) холостого хода; 2) короткого замыкания; 3) внешняя, 4) регулировочная; 5) нагрузочная.

Характеристика холостого хода (рисунок 7.6) представляет собой зависимость напряжения или ЭДС якоря от тока возбуждения при холостом ходе: $U=f(I_B)$ при $I=0$ и $n=\text{const}$. Она позволяет судить о насыщении магнитной цепи машины при номинальном напряжении.

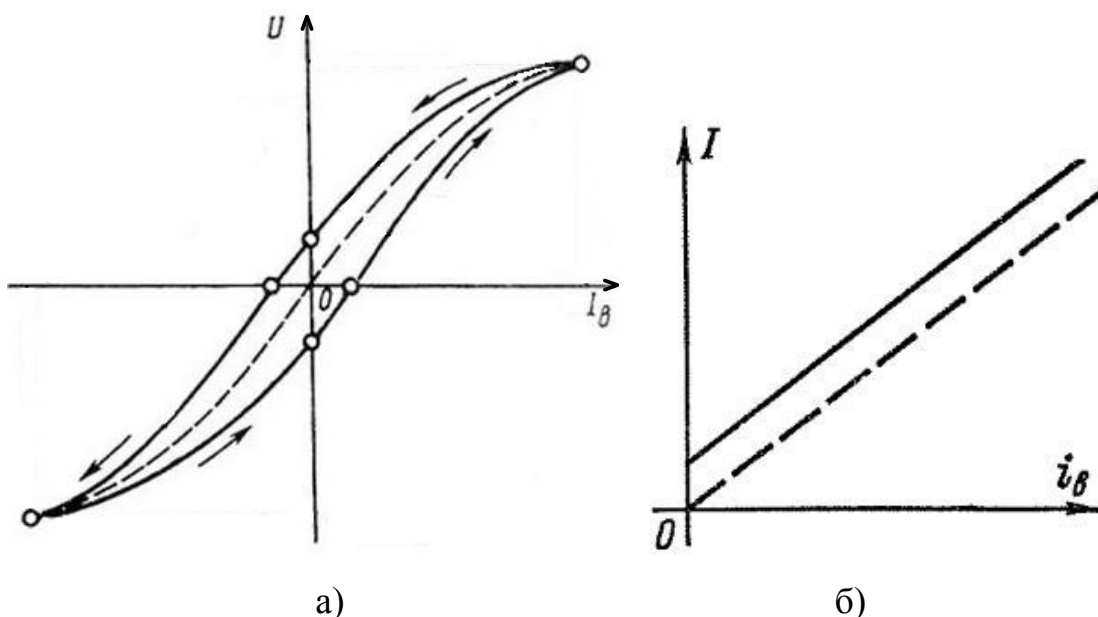


Рисунок 7.6 – Характеристика холостого хода (а) и короткого замыкания (б) генератора постоянного тока независимого возбуждения

Характеристика короткого замыкания (рисунок 7.6) снимается при замыкании выходных контактов цепи якоря генератора накоротко и представляет собой зависимость тока якоря от тока возбуждения: $I_a = f(I_B)$ при $U=0$ и $n=\text{const}$. При проведении опыта следует проявлять осторожность, чтобы ток якоря не получил недопустимо большого значения. Обычно снимают характеристику до $I_a = (1,25 - 1,5)I_{\text{ном}}$.

Внешняя характеристика (рисунок 7.7) представляет собой зависимость напряжения генератора от тока якоря при постоянном токе возбуждения: $U = f(I_a)$ при $I_B = \text{const}$, $n = \text{const}$. При увеличении тока якоря напряжение падает по двум причинам: вследствие падения напряжения в цепи якоря и из-за уменьшения ЭДС ввиду уменьшения потока под воздействием поперечной реакции якоря.

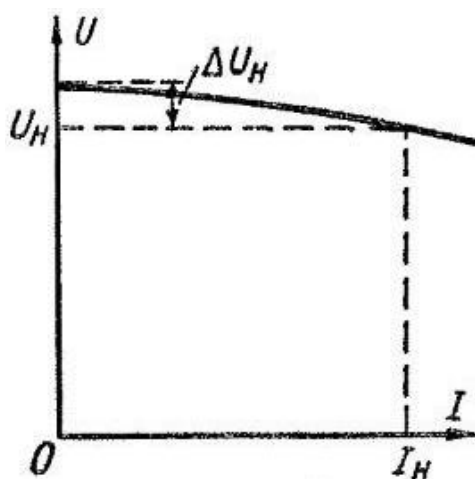


Рисунок 7.7 – Внешняя характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения

Регулировочная характеристика (рисунок 7.8 а) показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора не менялось, и представляет собой зависимость тока возбуждения от тока якоря при постоянном напряжении: $I_B = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$. С увеличением тока якоря ток возбуждения необходимо увеличивать, чтобы компенсировать влияние падения напряжения и реакции якоря.

Нагрузочная характеристика (рисунок 7.8 б) представляет собой зависимость напряжения или ЭДС якоря от тока возбуждения при нагрузке:

$U=f(I_B)$ при $I=\text{const}$ и $n=\text{const}$. Она по виду схожа с характеристикой холостого хода и проходит ниже ее вследствие падения напряжения в цепи якоря и влияния реакции якоря.

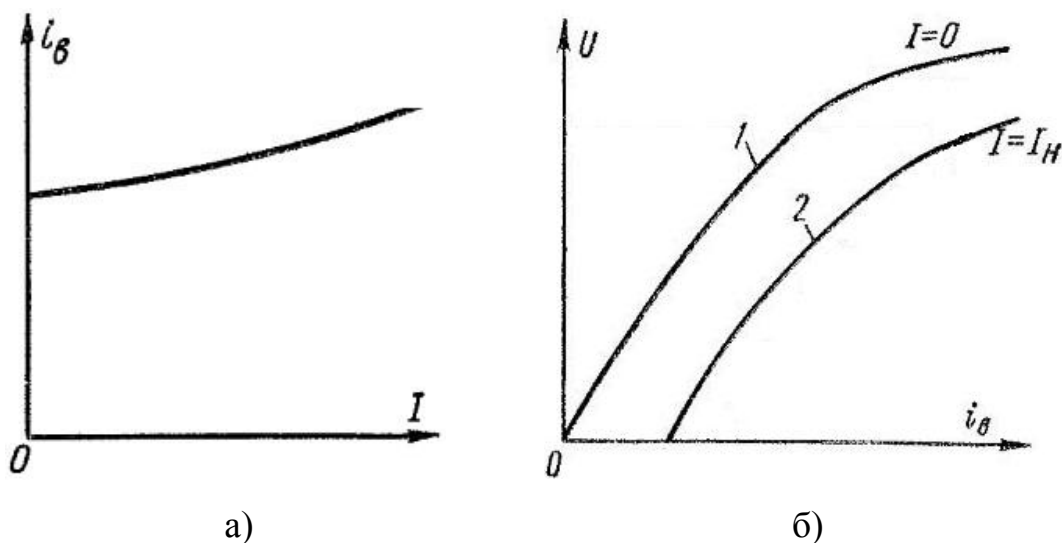


Рисунок 7.8 – Регулировочная (а) и нагрузочная (б) характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения (кривая 1 – характеристика холостого хода, кривая 2 – нагрузочная характеристика)

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «ЕЕМ 2 Машины постоянного тока» фирмы LUCAS-NÜLLE. Стенд включает в себя необходимые для выполнения данной лабораторной работы элементы: испытательный стенд серво-двигателя 1 кВт (рисунок 7.9); многофункциональную машину постоянного тока (рисунок 7.9); блок питания для электрических машин (рисунок 3.6); блок управления частотой вращения и моментом машины (рисунок 3.7); регулятор возбуждения (рисунок 7.10); аналого-цифровой мультиметр (рисунок 3.9).



Рисунок 7.9 – Испытательный стенд серво-двигателя (слева), соединенный с многофункциональной машиной постоянного тока (справа)



Рисунок 7.10 – Регулятор возбуждения

Номинальные параметры машины:

Двигатель / генератор параллельного возбуждения

Двигатель / генератор смешанного возбуждения

Двигатель / генератор последовательного возбуждения

Номинальное напряжение: 220 В

Номинальный ток: 5,4/4,8/5,6А

Номинальное число оборотов: 2060 / 1700 / 1700 об/мин

Номинальная мощность: 0,8 кВт

Указания по технике безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

Опыт холостого хода

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 7.11.

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Подать питание на обмотку возбуждения (желтая кнопка на блоке питания). О наличии напряжения на обмотке возбуждения будет свидетельствовать работающий рядом с кнопкой зеленый светодиод. Включить тумблеры на измерительных приборах. На мультиметре, подключенном к регулятору тока возбуждения, выбрать режим измерения тока (кнопка «I»), на другом мультиметре выбрать режим измерения напряжения (кнопка «U»).

3. Включить тумблер на блоке управления, установить режим «Speed Control». Запустить сервопривод (кнопка «RUN»).

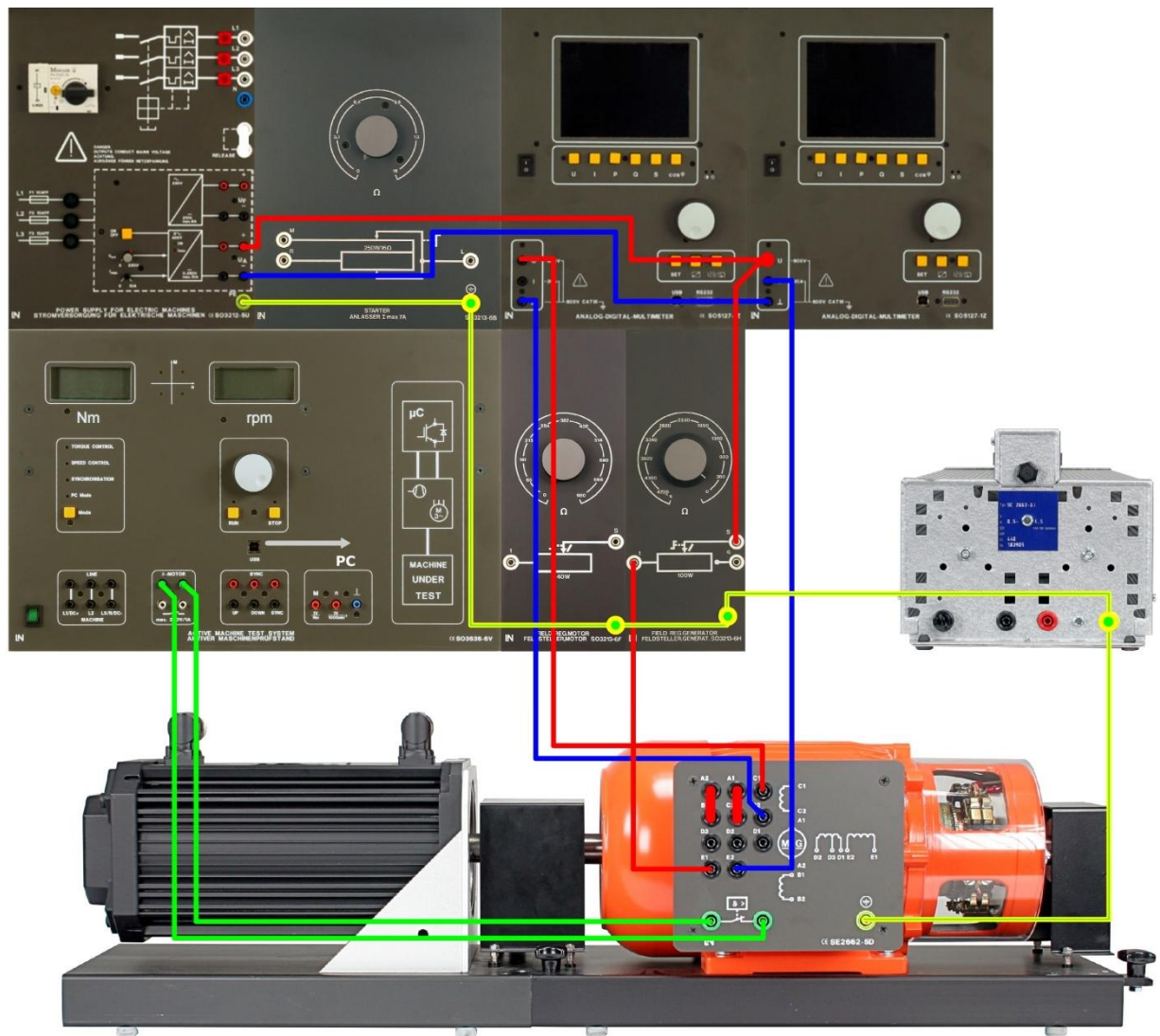


Рисунок 7.11 – Схема опыта холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения

4. С помощью ручки регулятора установить частоту вращения 2000 об/мин. Регулятором на блоке управления возбуждением изменять ток возбуждения, устанавливая значения, указанные в таблице 7.1. Измерить напряжение генератора U_G для каждого значения тока возбуждения. Показания приборов занести в таблицу 7.1.

5. Повторить опыты п. 4 для значений частоты вращения, указанных в таблице 7.1 Показания приборов занести в таблицу 7.1.

6. По завершении опытов выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ A), отключить сервопривод (кнопка «Stop»). Выключить тумблеры на измерительных

приборах и блоках управления. Снять напряжение с обмотки возбуждения (желтая кнопка на блоке питания). Повернуть против часовой стрелки выключатель на входе схемы в положение «выключено». Схему разобрать.

7. По результатам таблицы 7.1 построить характеристики холостого хода $U=f(I_B)$ при различных значениях скорости вращения.

Таблица 7.1 – Характеристика холостого хода

n, об/мин	U_{Γ} , В при						
	$I_B=0$, мА	$I_B=50$, мА	$I_B=70$, мА	$I_B=90$, мА	$I_B=120$, мА	$I_B=160$, мА	$I_B=180$, мА
2000							
1800							
1600							
1400							
1200							

Внешняя характеристика

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 7.12. Проверить, что движок реостата установлен в крайнее верхнее положение, соответствующее максимальному значению сопротивления.

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Подать питание на обмотку возбуждения (желтая кнопка на блоке питания). О наличии напряжения на обмотке возбуждения будет свидетельствовать работающий рядом с кнопкой зеленый светодиод. Включить тумблеры на измерительных приборах. На мультиметре, подключенном к регулятору тока возбуждения, выбрать режим измерения тока (кнопка «I»), на другом мультиметре выбрать режим измерения напряжения, тока и активной мощности (кнопка «U», «I», «P»).

3. Включить тумблер на блоке управления, установить режим «Speed Control». Запустить сервопривод (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить частоту вращения 2000 об/мин.

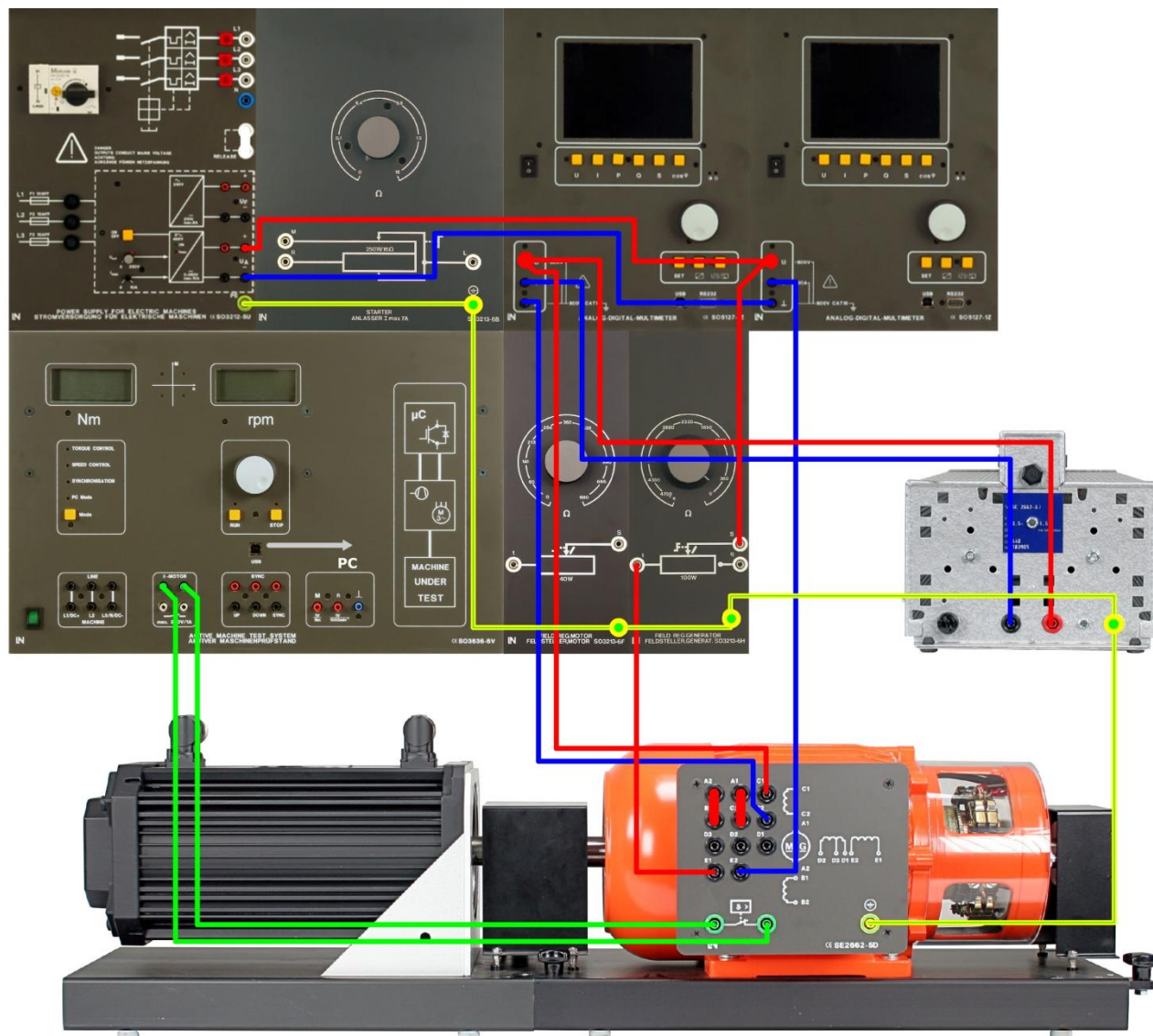


Рисунок 7.12 – Схема установки для снятия внешней характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения

4. Регулятором на блоке управления возбуждением установить ток возбуждения $I_B = 90$ мА. Измерить напряжение генератора U_G , мощность P_2 и ток якоря I_a . Показания приборов занести в таблицу 7.2. Изменяя сопротивление реостата, по показаниям мультиметра установить значения тока якоря, указанные в таблице 7.2. Измерить напряжение U_G и мощность P_2 генератора. Показания приборов занести в таблицу 7.2. По завершении опытов установить движок реостата в крайнее верхнее положение, соответствующее максимальному значению сопротивления.

5. Повторить опыты п. 4 для тока возбуждения $I_B=180$ мА. Показания приборов занести в таблицу 7.2.

6. По завершении опытов установить движок реостата в крайнее верхнее положение, соответствующее максимальному значению сопротивления, выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ А), отключить сервопривод (кнопка «Stop»). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему не разбирать.

7. По результатам таблицы 7.2 построить зависимости $U_{\Gamma} = f(I_a)$, $P_2 = f(I_a)$.

Таблица 7.2 – Внешняя характеристика генератора

$I_B=90$ мА							
I_a , А	0	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3
U_{Γ} , В							
P_2 , В·А							
$I_B=180$ мА							
I_a , А	0	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3
U_{Γ} , В							
P_2 , В·А							

Регулировочная характеристика

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Опыты проводятся для схемы, собранной ранее (рисунок 7.12).
2. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. На мультиметре, подключенном к регулятору тока возбуждения, выбрать режим измерения тока (кнопка «I»), на другом мультиметре выбрать режим измерения напряжения и тока (кнопка «U», «I»).
3. Включить тумблер на блоках управления. На блоке управления частотой вращения установить режим «Speed Control». Запустить сервопривод (кнопка «RUN»). С помощью ручки регулятора установить частоту вращения синхронного генератора 2000 об/мин.

4. С помощью ручки регулятора на блоке управления возбуждением, изменяя ток возбуждения, установить напряжения якоря величиной 105 В. Измерить ток якоря и записать значения обоих токов в таблицу 7.3.

5. Уменьшить сопротивление реостата, перемещая движок вниз, таким образом, чтобы напряжение на якоре уменьшилось на 5 В. Увеличить ток возбуждения до такого значения, чтобы напряжение приняло исходное значение (105 В) Записать в таблицу 7.3 значения токов.

6. Повторять п. 5, поддерживая напряжение постоянным, как указано в опыте, до тех пор, пока движок реостата не переместится в крайнее нижнее положение. Результаты записывать в таблицу 7.3.

7. По завершении опытов установить движок реостата в крайнее верхнее положение, соответствующее максимальному значению сопротивления. Выкрутить ручку регулятора тока возбуждения против часовой стрелки до упора ($I_B = 0$ А), отключить сервопривод (кнопка «Stop»). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Снять питание с обмотки возбуждения (желтая кнопка на блоке питания) Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему разобрать.

8. По результатам таблицы 7.3 построить зависимость $I_B = f(I_a)$.

Таблица 7.3 – Регулировочная характеристика генератора постоянного тока

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
I_a , А								
I_B , А								

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Что называется машиной постоянного тока? Пояснить принцип действия.

2. Устройство машины постоянного тока
3. Как классифицируют машины постоянного тока по способу возбуждения?
4. Основные характеристики генераторов постоянного тока независимого возбуждения.
5. Что такое реакция якоря?
6. Каково назначение щеточно-коллекторного узла?
7. Почему на выходе генератора имеется небольшое напряжение при значении тока возбуждения $I_B = 0$ А?

Литература: 1, 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

Исследование двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Цель работы: изучение физических процессов, происходящих в двигателе постоянного тока параллельного возбуждения, овладение методами испытаний двигателя и обработки полученных данных, оценка испытуемого двигателя в отношении его эксплуатационных характеристик. В связи с этим необходимо выполнить следующие задачи:

1. Снять скоростную и механическую характеристику двигателя
2. Выполнить опыт регулирования частоты вращения изменением напряжения якоря.
3. Выполнить опыт регулирования частоты вращения изменением тока возбуждения.

Формируемые компетенции: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность проводить обоснование проектных решений (ПК-4); готовность определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Если к обмотке якоря машины постоянного тока подвести постоянный ток, она будет работать в режиме двигателя. При этом на проводники будут действовать электромагнитные силы $F_{\text{пр}}$ и возникнет электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$. При достаточном значении $M_{\text{эм}}$ якорь придет во вращение,

момент $M_{\text{ЭМ}}$ при этом является движущим и действует в направлении вращения. В двигательном режиме коллектор является механическим инвертором, преобразуя постоянный ток, потребляемый из внешней цепи, в переменный ток обмотки якоря. Напряжение, приложенное к якору машины в режиме двигателя равно:

$$U_a = E_a + I_a \cdot r_a. \quad (8.1)$$

В двигателе при установившемся режиме работы электромагнитный момент равен:

$$M_{\text{ЭМ}} = M_{\text{В}} + M_{\text{ТР}} + M_{\text{С}}, \quad (8.2)$$

где $M_{\text{В}}$ – тормозной момент на валу двигателя, развиваемый рабочей машиной.

ЭДС якоря можно определить как

$$E_a = C_e \cdot \Phi_{\delta} \cdot n, \quad (8.3)$$

где C_e – конструктивный коэффициент, постоянный для конкретного типа машины;

Φ_{δ} – основной намагничивающий поток.

Электромагнитный момент также может быть найден через намагничивающий поток:

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M \Phi_{\delta} I_a, \quad (8.4)$$

где $C_M = C_e / 2\pi$.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяются аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Для двигателя постоянного тока могут быть применены три способа пуска:

1) прямой, при котором обмотка якоря подключается непосредственно к сети;

2) реостатный, при котором в цепь якоря включается пусковой реостат для ограничения тока;

3) путем плавного повышения питающего напряжения, которое подается на обмотку якоря.

Ток в двигателе равен

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{r_a}. \quad (8.5)$$

При пуске двигателя $n = 0$ и $E_a = 0$, тогда $I_a = U_a / r_a$. В нормальных машинах r_a очень мало и в связи с этим ток якоря при пуске может в десятки раз превышать номинальное значение. В связи с этим прямой пуск применим только для маломощных двигателей, в которых $I_{\Pi} = (4 \div 6) \cdot I_{\text{ном}}$.

Для снижения пускового тока в двигателях большой и средней мощности применяют реостатный пуск, включая в цепь якоря реостат. В этом случае ток якоря равен:

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{r_a + r_p}, \quad (8.6)$$

где r_p – сопротивление пускового реостата.

При пуске двигателя сопротивление реостата максимально, его подбирают таким образом, чтобы $I_{\Pi} = (1,4 \div 1,8) \cdot I_{\text{ном}}$ для машин большой и средней мощности и $I_{\Pi} = (2 \div 2,5) I_{\text{ном}}$ для машин малой мощности. При разгоне двигателя сопротивление пускового реостата постепенно уменьшают, в конце концов, полностью исключая его из цепи якоря.

Недостатком реостатного регулирования являются значительные потери энергии в пусковом реостате. Для его устранения используют пуск на пониженном напряжении с последующим плавным его повышением. Но в этом случае требуется отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением.

Остановка двигателя производится путем его отключения от сети с помощью выключателя. При этом нельзя допускать разрыва цепи параллельного возбуждения, т.к.

$$n = \frac{E_a}{c_e \cdot \Phi_{\delta}} = \frac{U_a - I_a \cdot r_a}{c_e \cdot \Phi_{\delta}}. \quad (8.7)$$

Поток будет резко уменьшаться, а скорость – увеличиваться и двигатель пойдет в «разнос». В результате ток якоря значительно возрастет и может возникнуть круговой огонь на коллекторе.

Возможны 3 способа регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока:

1. Наиболее удобным, распространенным и экономичным является способ регулирования скорости путем изменения потока Φ_δ .

С уменьшением Φ_δ , согласно выражению (8.7), скорость возрастает. Этот способ позволяет регулировать скорость вверх от номинальной. Поток определяется током возбуждения, регулировка которого может осуществляться введением добавочных реостатов в цепь возбуждения. При таком регулировании КПД двигателя остается высоким, так как мощность возбуждения мала, т.к. мала мощность реостатов для регулирования тока возбуждения. Верхний предел регулирования скорости вращения ограничивается механической прочностью машины и условиями ее коммутации.

2. Способ регулирования скорости заключается во включении последовательно в цепь якоря реостата или регулируемого сопротивления R_{Pa}

$$n = \frac{U_a - I_a \cdot (r_a + R_{Pa})}{c_e \cdot \Phi_\delta}. \quad (8.8)$$

Этот способ дает возможность регулировать скорость вниз от номинальной и связан со значительными потерями в сопротивлении R_{Pa} и понижением КПД.

В реостате может теряться 50% приложенного напряжения и столько же мощности, подводимой к цепи якоря. По этой причине данный способ применяется в основном для двигателей небольшой мощности, а для более мощных двигателей используется редко и только кратковременно (пуско-наладочные режимы и т.д.).

3. Регулирование скорости осуществляется также путем регулирования напряжения цепи якоря. Так как работа двигателя при $U_a > U_{a\text{ ном}}$ недопустима, то данный способ дает возможность регулировать скорость вниз от номинальной. КПД двигателя при этом остается высоким, так как никаких добавочных источников потерь в схему двигателя не вносится.

К основным характеристикам, определяющим работу двигателя постоянного тока, относят механическую, скоростную и рабочие характеристики.

Скоростная характеристика представляет собой зависимость частоты вращения n от тока якоря I_a при постоянном напряжении U_a и токе возбуждения I_B (8.7).

Механическая характеристика представляет собой зависимость частоты вращения n от электромагнитного момента M при постоянном напряжении U_a и токе возбуждения I_B :

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi_\delta} - \frac{r_a M}{C_e C_M \Phi_\delta^2}. \quad (8.9)$$

Ввиду того, что изменение магнитного потока относительно мало, механические характеристики двигателя параллельного возбуждения совпадают по виду со скоростными (рисунок 8.1).

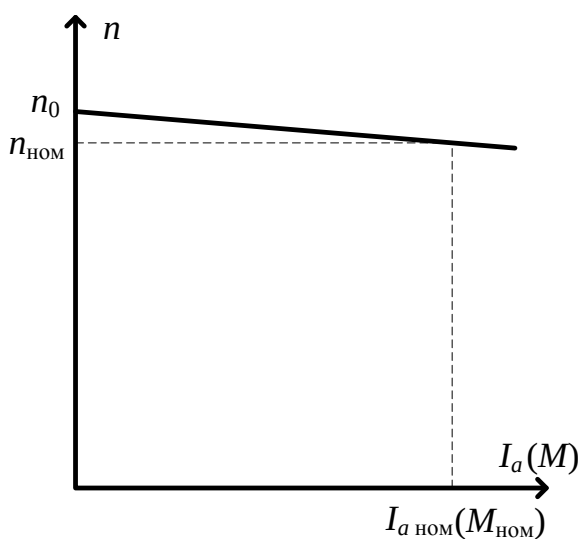


Рисунок 8.1 – Скоростные и механические характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Рабочие характеристики представляют собой зависимости потребляемой мощности P_1 , потребляемого тока I (или тока якоря I_a), скорости n , момента M и КПД η от полезной мощности P_2 при $U_a = \text{const}$ и неизменных положениях регулировочных реостатов (рисунок 8.2).

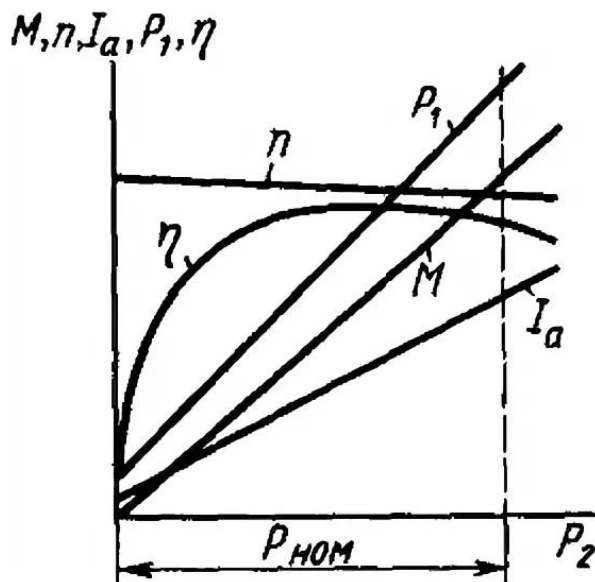


Рисунок 8.2 – Рабочие характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Оборудование и материалы

Лабораторная работа выполняется на стенде «ЕЕМ 2 Машины постоянного тока» фирмы LUCAS-NÜLLE. Стенд включает в себя необходимые для выполнения данной лабораторной работы элементы, аналогичные лабораторной работе 7, а также пусковое устройство (рисунок 8.3).

Номинальные параметры машины:

Двигатель / генератор параллельного возбуждения

Двигатель / генератор смешанного возбуждения

Двигатель / генератор последовательного возбуждения

Номинальное напряжение: 220 В

Номинальный ток: 5,4/4,8/5,6А

Номинальное число оборотов: 2060 / 1700 / 1700 об/мин

Номинальная мощность: 0,8 кВт

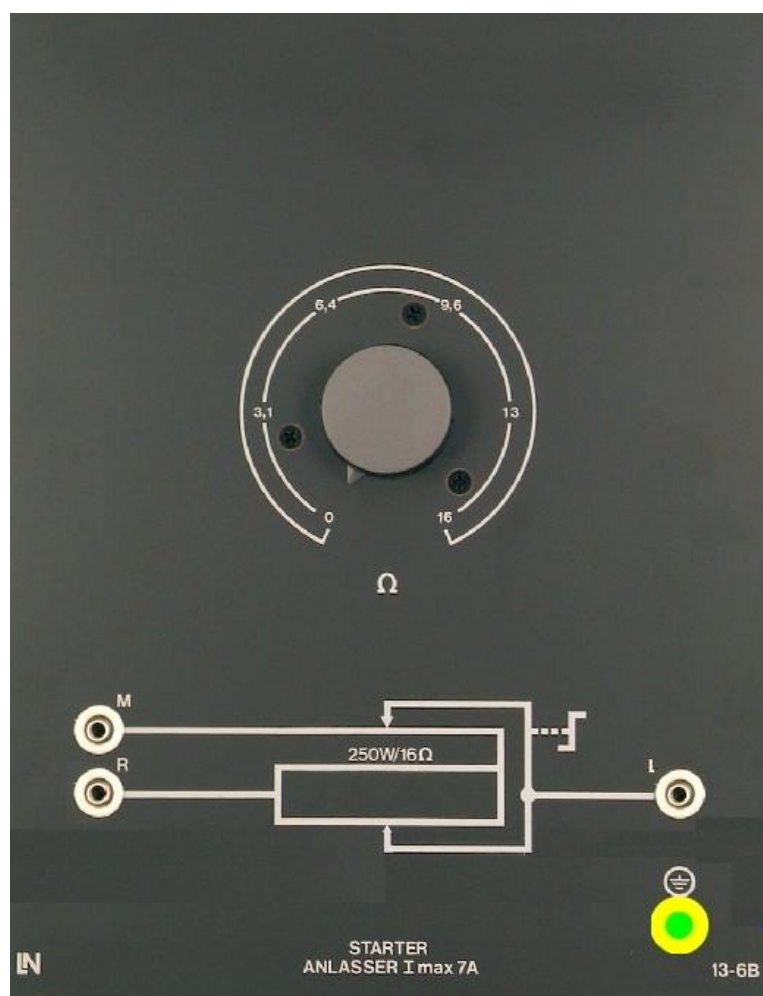


Рисунок 8.3 – Пусковое устройство

Указания по технике безопасности

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения», инструкция приведена в Приложении 1. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

Указания по порядку выполнения работы

Скоростная и механическая характеристика

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 8.4.

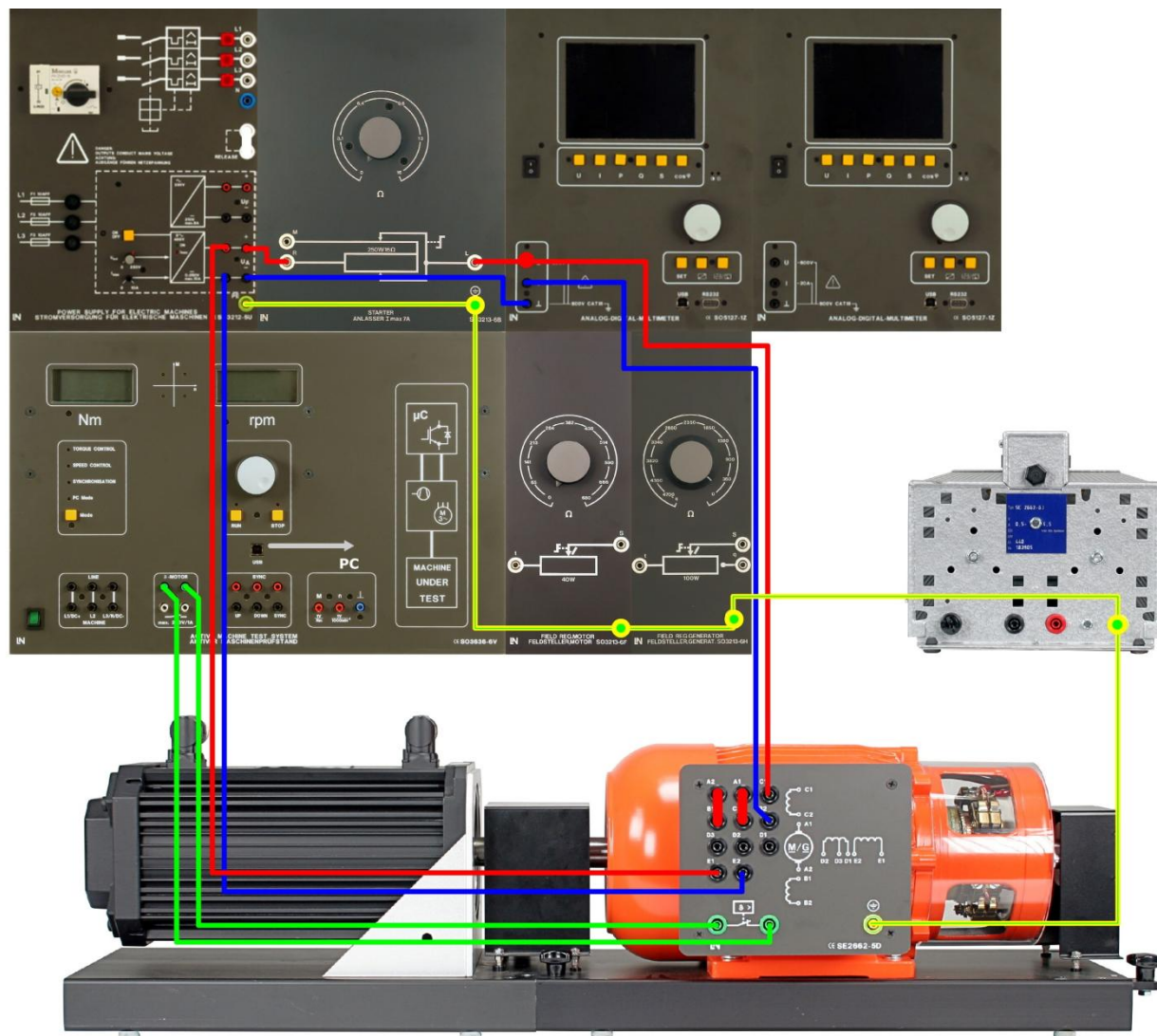


Рисунок 8.4 – Схема для снятия скоростных и механических характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

2. После того как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. На мультиметре, подключенном к цепи якоря, выбрать режим измерения тока (кнопка «I») и напряжения (кнопка «U»). Установить напряжение 220В.

3. Включить тумблер на блоке управления, установить режим «Torque Control». Запустить тормозное устройство (кнопка «RUN»). На пусковом устройстве регулятором установить минимальное значение сопротивления $R=0$ Ом.

4. Запустить двигатель, подав питание на обмотку возбуждения (желтая кнопка на блоке питания), т.к. она включена параллельно якорю двигателя, напряжение также будет и на обмотке якоря.

5. С помощью ручки регулятора установить номинальную частоту вращения 2060 об/мин. Зафиксировать значение тока якоря, соответствующее этому значению.

6. С помощью ручки регулятора установить значение момента 0,5 Н·м. Записать в таблицу 8.1 показания приборов.

7. Повторить опыты п. 6 для значений момента, указанных в таблице 8.1. Показания приборов занести в таблицу 8.1.

8. По завершении опытов отключить тормозное устройство (кнопка «Stop»), снять напряжение с двигателя (желтая кнопка на блоке питания). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему разобрать.

9. По результатам таблицы 8.1 построить скоростную $n = f(I_a)$ и механическую $M = f(I_a)$ характеристики.

Таблица 8.1 – Скоростная и механическая характеристики

M , Н·м	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
n , об/мин								
I_a , А								
U , В								

Регулирование частоты вращения изменением напряжения якоря.

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Собрать на лабораторном стенде схему, представленную на рисунке 8.5.

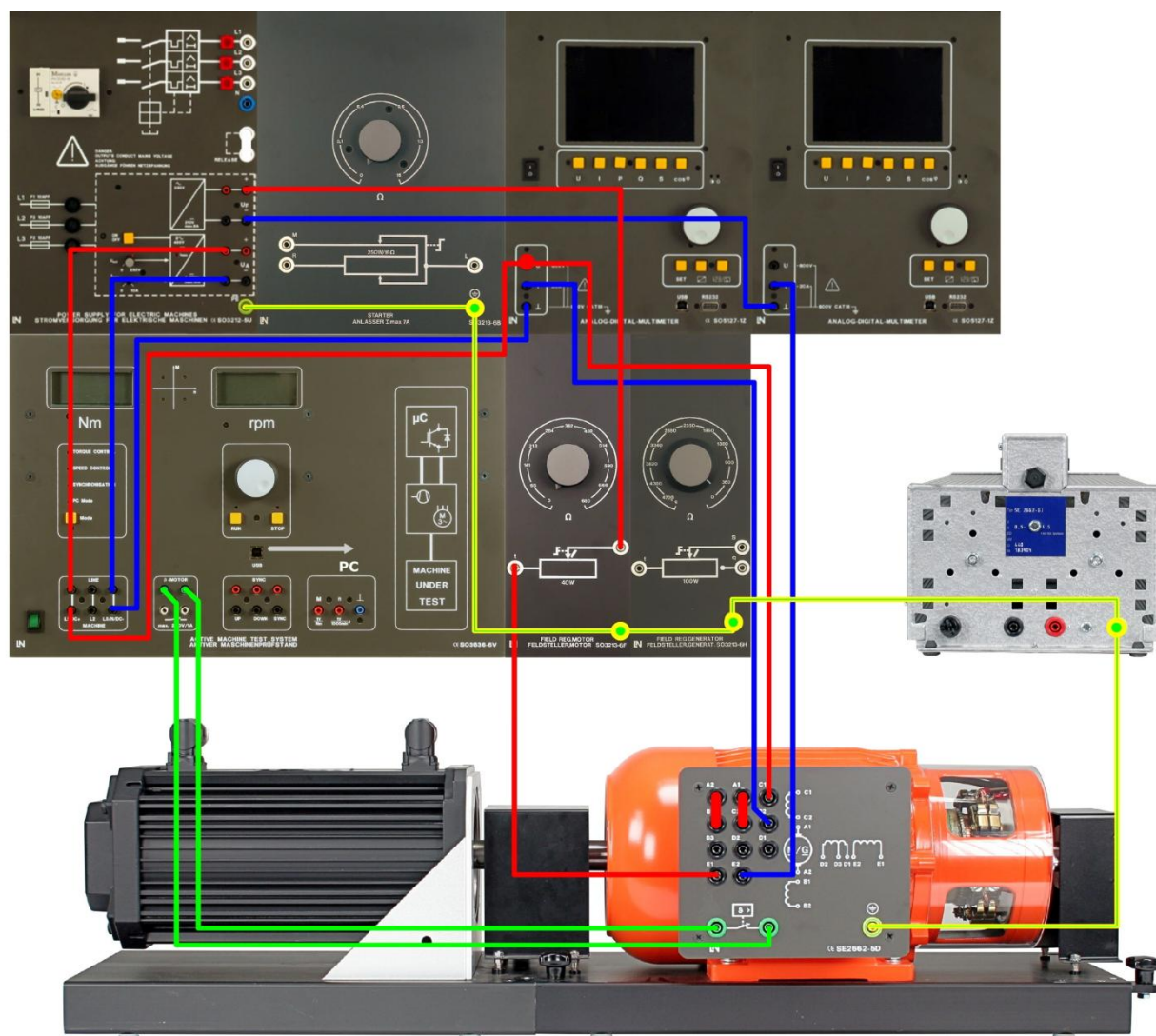


Рисунок 8.5 – Схема установки для опыта регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

2. После того, как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. На мультиметре, подключенном к цепи якоря, выбрать режим измерения тока (кнопка «I») и напряжения (кнопка «U»), на мультиметре, подключенном к обмотке возбуждения, выбрать режим измерения тока (кнопка «I»). Установить напряжение на якоре 220В.

3. Включить тумблер на блоке управления, установить режим «Torque Control». Запустить тормозное устройство (кнопка «RUN»). На регулировочном сопротивлении в обмотке возбуждения установить минимальное значение $R=0$ Ом. На регулируемом источнике питания установить напряжения обмотки якоря 220 В.

4. Запустить двигатель, подав питание на обмотку якоря (желтая кнопка на блоке питания). Занести показания приборов в таблицу 8.2.

5. Изменить напряжение питания согласно значениям в таблице 8.2 и записать показания приборов в таблицу 8.2.

6. По завершении опытов на регулируемом источнике питания вернуть значение напряжения обмотки якоря 220 В. Снять напряжение с двигателя (желтая кнопка на блоке питания). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему не разбирать.

7. По результатам таблицы 8.2 построить характеристики $n=f(U)$, $I_a=f(U)$.

Таблица 8.2 – Регулирование частоты вращения изменением напряжения якоря

U , В	220	190	160
n , об/мин			
I_a , А			

Регулирование частоты вращения изменением тока возбуждения.

Подготовка к проведению эксперимента.

1. Опыт проводится для схемы, собранной в предыдущем опыте (рисунок 8.5).

2. После того, как схема собрана и проверена преподавателем, подать напряжение на стенд. Повернуть выключатель на блоке питания по часовой стрелке до упора. Включить тумблеры на измерительных приборах. На мультиметре, подключенном к цепи якоря, выбрать режим измерения тока

(кнопка «I») и напряжения (кнопка «U»), на мультиметре, подключенном к обмотке возбуждения, выбрать режим измерения тока (кнопка «I»).

3. Включить тумблер на блоке управления, установить режим «Torque Control». Запустить тормозное устройство (кнопка «RUN»). На регулировочном сопротивлении в обмотке возбуждения установить минимальное значение $R=0$ Ом.

4. Запустить двигатель, подав на него питание (желтая кнопка на блоке питания). Измерить значение тока возбуждения и частоту вращения. Занести показания приборов в таблицу 8.3.

5. Изменяя сопротивление реостата в цепи возбуждения, устанавливать значение тока возбуждения согласно значениям в таблице 8.3. Показания приборов занести в таблицу 8.3.

6. По завершении опытов снять напряжение с двигателя (желтая кнопка на блоке питания). Выключить тумблеры на измерительных приборах и блоках управления. На регулировочном сопротивлении в обмотке возбуждения установить минимальное значение $R=0$ Ом. Повернуть против часовой стрелки силовой выключатель в положение «выключено». Схему разобрать.

7. По результатам таблицы 8.3 построить зависимость $I_B=f(n)$.

Таблица 8.3 – Регулирование частоты вращения изменением напряжения якоря

№ опыта	1	2	3	4	5	6
I_B , А		0,28	0,26	0,24	0,22	0,2
n , об/мин						

Содержание отчета

Аналогично лабораторной работы 1.

Контрольные вопросы

1. Способы пуска в ход двигателя постоянного тока.
2. Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного

тока.

3. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока.
4. Почему двигатели постоянного тока последовательного возбуждения не должны работать при малой нагрузке? Пояснить на рабочих характеристиках.
5. Почему нельзя разрывать параллельную обмотку возбуждения?
6. Уравнение напряжения машины постоянного тока.
7. Записать формулы и изобразить на графике скоростные и механические характеристики двигателя постоянного тока.
8. Что понимается под коммутацией в машинах постоянного тока?

Литература: 1, 3.

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. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
3. Токарев, Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие / Б. Ф. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины : машины переменного тока : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. [и др.]: СПб: Питер, 2008. – 349 с.

**Инструкция
по технике безопасности
при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных
электроэнергетических систем и электроснабжения»**

Перед началом лабораторной работы

1. Изучить инструкцию по охране труда при работе студентов в электротехнических лабораториях.
2. Пройти инструктаж на рабочем месте. Ознакомиться с безопасными методами выполнения лабораторной работы.
3. Изучить теоретические положения требований методики проведения лабораторной работы.
4. Получить допуск у преподавателя на выполнение лабораторной работы.
5. Ознакомиться с приборами тушения пожара и правилами обращения с огнетушителями ОУ-03, ОП-05, ОВЭ-6(з)-АВЕ-01.
6. Внимательно осмотреть лабораторный стенд, наличие и соответствие предохранителей, приборов и крепление деталей и узлов.

Требования безопасности во время работы

1. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.
2. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.
3. Сборку схемы осуществлять исправными соединительными проводами, используя при этом приведенные в лабораторной работе принципиальные схемы экспериментов.
4. Собранная цепь проверяется преподавателем и может включаться

только по его разрешению. О включении напряжения предупреждают всех членов бригады, выполняющих работу.

5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.

6. Изменения схемы производят только при выключенном напряжении на стенде, а вновь собранная схема перед подачей на нее напряжения проверяется преподавателем.

7. По окончании испытания или при перерыве в работе схему отключают от напряжения питания. Разборку схему осуществляют по разрешению преподавателя. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. Запрещается включение лабораторного стенда в сеть в присутствии легковоспламеняющихся жидкостей или в атмосфере, содержащей горючие газы.

9. При возникновении неисправностей, а также в случае появления запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или компонентов, следует незамедлительно прекратить работу с лабораторным стендом, выключив его из сети, известить об этом преподавателя и обратиться к обслуживающему персоналу.

10. 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.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1. В ситуации, угрожающей аварией (скачке тока в цепи; появлении дыма или запаха горящей изоляции или др.) обучающийся должен:

1.1. Немедленно прекратить выполнение работы.

1.2. Обесточить прибор, установку (лабораторный стенд), выключив тумблер СЕТЬ.

2. В нестандартной ситуации - выключить автоматический выключатель (или рубильник) на распределительном щите лаборатории.

Требования безопасности по окончании выполнения лабораторной работы

1. Записать результаты измерений в отчет по лабораторной работе.
2. Получить разрешение на выключение лабораторного стенда.
3. Привести в порядок рабочее место и лабораторный стенд.
4. Убрать электроизмерительные приборы в отведенное место.
5. Сдать лабораторный стенд лаборанту.

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

Электрические машины

Методические указания по выполнению практических работ
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) «Цифровые технологии в электроэнергетике»
Квалификация выпускника бакалавр
Изучается в 4, 5 семестре

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ	7
2 РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ	11
3 СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРЁХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	18
4 ТРАНСФОРМАЦИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ТОКОВ	27
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПОТЕРЬ ТРАНСФОРМАТОРА	30
6 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ МНОГОФАЗНОЙ ОБМОТКИ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ЭДС МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	35
7 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ	41
8 ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И РАСЧЕТ ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	46
9 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	54
10 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ	59
11 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ ПРИ НАГРУЗКЕ	64
12 ПРИВЕДЕНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ К РАБОЧЕМУ ПРОЦЕССУ МАШИНЫ С НЕПОДВИЖНЫМ РОТОРОМ.....	68
13 ПОТЕРИ, КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	72
14 МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	77
15 ПУСКОВЫЕ СВОЙСТВА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	82
16 РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ	87

17 Однофазный асинхронный двигатель	90
18 Расчет якорной обмотки машины постоянного тока	94
19 Расчет магнитной цепи машины постоянного тока при холостом ходе	98
20 Расчет магнитной цепи машины постоянного тока при нагрузке	101
21 Режимы работы машины постоянного тока	104
22 Коммутация и реакция якоря машины постоянного тока	108
23 Характеристики генераторов постоянного тока независимого возбуждения	113
24 Характеристики генераторов постоянного тока параллельного возбуждения	118
25 Характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения	122
26 Характеристики двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	126
27 Пусковые и регулировочные свойства двигателей постоянного тока	130
Литература	136

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для проведения практикума по дисциплине «Электрические машины» у студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Дисциплина «Электрические машины» является базовой, направленной на формирование профессиональных компетенций бакалавров – электроэнергетиков. Практикум рассчитан на закрепление и расширение знаний, полученных при изучении наиболее трудоёмких и сложных теоретических разделов дисциплины. Целью выполнения практических занятий является получение умений и навыков расчета параметров схем замещения электрических машин, определения энергетических параметров различных режимов их работы, как установившихся, так и переходных, расчета и построения их характеристик. Практические занятия, представленные в учебном пособии, охватывают основные разделы дисциплины: трансформаторы, синхронные машины, асинхронные машины и машины постоянного тока.

Полученные в результате студентом знания, умения и навыки будут полезны при анализе параметров и режимов электроэнергетических систем, включающих в себя такое оборудование, как трансформаторы, двигатели и генераторы.

Учебное пособие разработано в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования, рабочим учебным планом и рабочей программой дисциплины «Электрические машины».

1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Цель: изучение процессов, происходящих в трансформаторе в режиме холостого хода.

Знать: методы определения параметров трансформаторов;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

Знать: происходящие в трансформаторах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы трансформаторов.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров трансформаторов в режиме холостого хода могут использоваться при анализе параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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 в режиме холостого хода к зажимам первичной обмотки трансформатора приложено синусоидальное 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. Намагничивающая сила 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 $e_1 = -\frac{d\psi_{01}}{dt}$, определяемую изменением потокосцепления $\psi_{01} = w_1 \Phi_0$, во вторичной – $e_2 = -\frac{d\psi_{02}}{dt}$. 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 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.

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

где Φ_m – амплитуда магнитного потока.

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 холостого хода расходуется только на потери в стали.

Пример. Найти действующие значения ЭДС в обмотках E_1 и E_2 , если максимальный магнитный поток $\Phi_m = 0,02$ Вб, частота тока $f = 50$ Гц, числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно $w_1 = 100$, $w_2 = 50$. Определить коэффициент трансформации:

Решение.

Согласно (1.4) ЭДС первичной обмотки:

$$E_1 = 4,44 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 0,02 = 444 \text{ В.}$$

Согласно (1.5) ЭДС вторичной обмотки:

$$E_2 = 4,44 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 0,02 = 222 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации по (1.6):

$$k = 100 / 50 = 2.$$

Задания

1. Найти потокосцепления главного магнитного поля с первичной и вторичной обмотками трансформатора, у которого число витков $w_1 = 34$, $w_2 = 850$ и главный магнитный поток в магнитопроводе $\Phi = 0,03 \sin 314t$, Вб.

2. Максимальный магнитный поток в сердечнике однофазного трансформатора $\Phi_m = 0,02$ 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 $U_{20} = 127 \text{ В}$, частота напряжения сети $f = 50 \text{ Гц}$.

3. Трансформатор в режиме холостого хода при напряжении $u_1 = 8160 \cos 314t \text{ В}$ потребляет из сети активную мощность $P_0 = 220 \text{ Вт}$ при токе $I_0 = 0,33 \text{ А}$. Коэффициент трансформации $k = 850/34$. Записать напряжения и ЭДС взаимной индукции в первичной и вторичной обмотках, реактивную составляющую тока холостого хода, главный магнитный поток комплексными числами.

4. Коэффициент трансформации трансформатора $k = 25$. Ток холостого хода при питании со стороны обмотки высокого напряжения $I_0 = 0,07 \text{ А}$. Определить значение тока холостого хода при питании трансформатора со стороны обмотки низкого напряжения. Сравните величины магнитных потерь в рассматриваемых случаях.

Контрольные вопросы:

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?

Литература: 1–4.

2 РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Цель: изучение процессов, происходящих в трансформаторе, работающем под нагрузкой.

Знать: методы определения параметров трансформаторов;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

Знать: происходящие в трансформаторах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы трансформаторов.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров трансформаторов под нагрузкой могут использоваться при анализе параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

В паспорте трехфазных трансформаторов приводится 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 (рисунок 2.1) и основные уравнения:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 - \dot{I}'_2 R'_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_M + (-\dot{I}'_2). \end{cases} \quad (2.3)$$

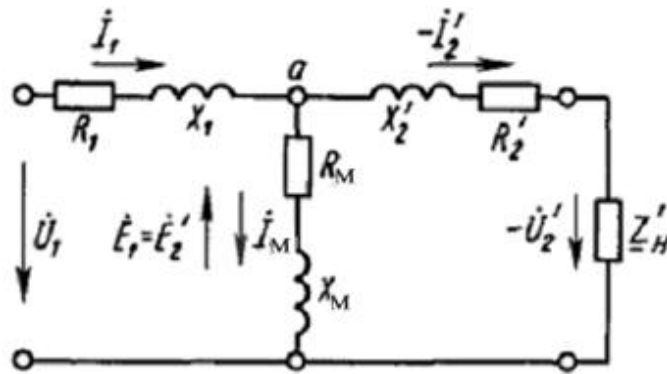


Рисунок 2.1 – Схема замещения трансформатора

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

Формулы приведения параметров вторичной цепи:

– ток вторичной обмотки

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

– ЭДС и напряжение вторичной обмотки

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

– активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2, \quad X'_2 = X_2 \cdot k^2; \quad (2.8)$$

– полное сопротивление вторичной обмотки

$$Z'_2 = Z_{22} \cdot k^2; \quad (2.9)$$

– 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 могут быть найдены 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. Значения токов, напряжений и мощностей, полученные из режимов холостого хода и «нормального» короткого замыкания, позволяют определить основные параметры схемы замещения трансформатора.

Сопротивление короткого замыкания трансформатора

– полное

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

– активное

$$r_k = P_k / 3 \cdot I_{\text{кф}}^2; \quad (2.12)$$

– реактивное

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

Сопротивления первичной и приведенной вторичной 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

$$\begin{array}{c} \text{[Diagram showing vector decomposition of voltage } U_k \text{ into active component } U_{k\cos\varphi_k} \text{ and reactive component } U_{k\sin\varphi_k} \text{]} \end{array}, \quad (2.18)$$

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

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:

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

где B_m – максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода,

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

k_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением:

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

где β – коэффициент загрузки трансформатора;

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:

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

Наибольший КПД соответствует коэффициенту нагрузки:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_{0H}}{P_{\text{KH}}}}. \quad (2.24)$$

Тогда формула для КПД принимает вид:

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

Пример. Дан масляный трансформатор ТМ-25/10 с номинальными параметрами: номинальная мощность $S_H=25\text{кВ}\cdot\text{А}$, номинальное напряжение $U_{1H}=10\text{кВ}$, напряжение короткого замыкания $u_{к\%}=4,5\%$, мощность холостого хода $P_0 = 0,13\text{кВт}$ и короткого замыкания $P_{KH} = 0,6\text{кВт}$, ток холостого хода $i_{0\%}=3,2\%$,. Соединение трансформатора Y/Y. Определить: номинальный ток в первичной обмотке; ток холостого хода и напряжение короткого замыкания в именованных единицах; коэффициент мощности холостого хода и короткого замыкания; активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания и сопротивления короткого замыкания; номинальное изменение напряжения трансформатора при сбросе нагрузки (индуктивный характер).

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 хода:

$$I_0 = i_{0\%} / 100 \cdot I_{1H} = 3,2 / 100 \cdot 1,44 = 0,46 \text{ А}.$$

Коэффициент мощности холостого хода:

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

Напряжение короткого замыкания:

$$U_K = U_{K\%} \cdot U_{1H} / 100 \cdot \sqrt{3} = 4,5 \cdot 10 / 100 \cdot 1,73 = 0,26 \text{ кВ}.$$

Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos \varphi_K = P_{KH} / (3 I_{1H} \cdot U_K) = 0,6 / (3 \cdot 1,44 \cdot 0,26) = 0,53;$$

$$\sin \varphi_K = 0,85.$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания:

$$u_{ка\%} = U_K \cos \varphi_K = 4,5 \cdot 0,53 = 2,38\%; \quad u_{кр\%} = U_K \sin \varphi_K = 4,5 \cdot 0,85 = 3,8\%.$$

Сопротивление короткого замыкания

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

Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \phi_k = 180 \cdot 0,53 = 95,4 \text{ Ом};$$

$$x_k = Z_k \sin \phi_k = 180 \cdot 0,85 = 153 \text{ Ом}.$$

Номинальное изменение напряжения трансформатора при сбросе нагрузки

$$\Delta u_{H\%} = u_{ka\%} \cos \varphi_2 + u_{kp\%} \sin \varphi_2 = 2,38 \cdot 0,8 + 3,8 \cdot 0,6 = 4,18\% .$$

Задания

1. Трехфазный трансформатор имеет параметры, значения которых приведены в таблице 2.1: номинальная мощность S_H и номинальные напряжения (линейные) U_{1H} и U_{2H} , напряжение короткого замыкания $u_{k\%}$, ток холостого хода $i_{0\%}$, потери холостого хода P_0 и потери короткого замыкания P_{KH} . Обмотки трансформатора соединены по схеме Y/Y. Требуется определить: параметры T-образной схемы замещения, считая ее симметричной, а также фактические значения сопротивлений вторичной обмотки; КПД η , соответствующие значениям полной мощности трансформатора $0,25S_H$; $0,5S_H$; $0,75S_H$ и при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер нагрузки) и $\cos \varphi_2 = 1$; номинальное изменение напряжения $\Delta u_{H\%}$. Построить графики $\eta = f(\beta)$ и $U_2 = f(\beta)$.

Таблица 2.1– Исходные данные

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_H, \text{кВ} \cdot \text{А}$	100	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
$U_{1H}, \text{кВ}$	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
$U_{2H}, \text{кВ}$	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
$P_0, \text{Вт}$	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5
$P_{KH}, \text{кВт}$	2,0	3,6	5,8	9,0	13,5	10,0	9,0	8,2	6,0	4,0

2. Определить изменение вторичного напряжения трансформатора в относительных единицах для нагрузки $I_2 = 0,5I_{2H}$ и $\cos\varphi_2 = 0,8$ по следующим данным: $S_H = 100$ кВА, $P_k = 1970$ Вт, $u_{k\%} = 4,5 \%$.

3. Трансформатор мощностью 63 кВА 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.

4. Потери трансформатора, имеющего номинальную мощность $S_H = 63$ кВА, при холостом ходе $P_0 = 265$ Вт, при коротком замыкании $P_k = 1280$ Вт. Определить КПД трансформатора для номинальной нагрузки при трех значениях коэффициента мощности $\cos\varphi_2 = 0,8; 1; (-0,8)$.

5. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_H = 25$ кВА; напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 10$ кВ; вторичной обмотки $U_{2H} = 400$ В; потери при холостом ходе $P_0 = 125$ 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 $\cos\varphi_2 = 0,9$.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой 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?

Литература: 1–4.

3 СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРЁХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель: изучение влияния схем и групп соединений трехфазных трансформаторов на их параметры.

ПК-5

Знать: методы определения параметров трансформаторов;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: происходящие в трансформаторах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы трансформаторов.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров трансформаторов при различных схемах и группах соединений могут использоваться при анализе параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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 ∇ – каждая фаза вторичной обмотки располагается на двух различных стержнях.

Следует иметь в виду, что 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, обозначают X, Y, Z, для обмоток НН эти обозначения, соответственно: а, b, с, и x, y, z..

При включении трансформатора на параллельную работу большое значение имеет способ соединения обмоток, который определяется группой соединения. Номер группы соответствует углу между векторами линейных ЭДС 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.

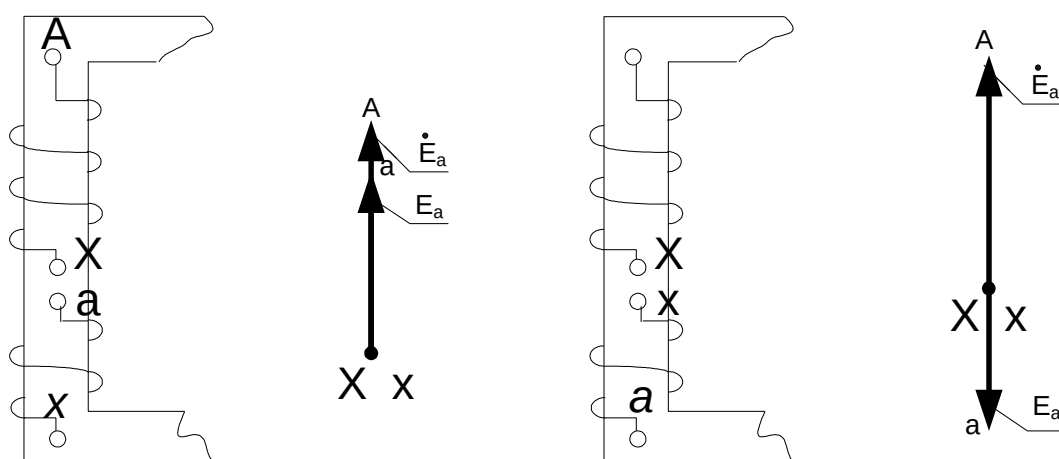


Рисунок 3.1– Группы соединений однофазного трансформатора

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 векторной диаграммы, 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.

Рассмотрим трёхфазный трансформатор, с соединением обмоток ВН и НН в звезду (рисунок 3.2).

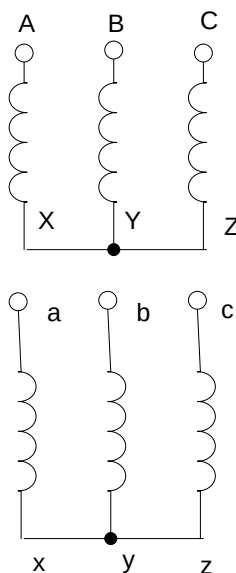


Рисунок 3.2 – Соединение обмоток трехфазного трансформатора по схеме
Y/Y

Для рисунка 3.2 следует отметить:

- 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 векторную диаграмму фазных и линейных ЭДС обмоток ВН и НН (рисунок 3.3). 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». Такая схема соединения называется 0 и обозначается Y/Y-0.

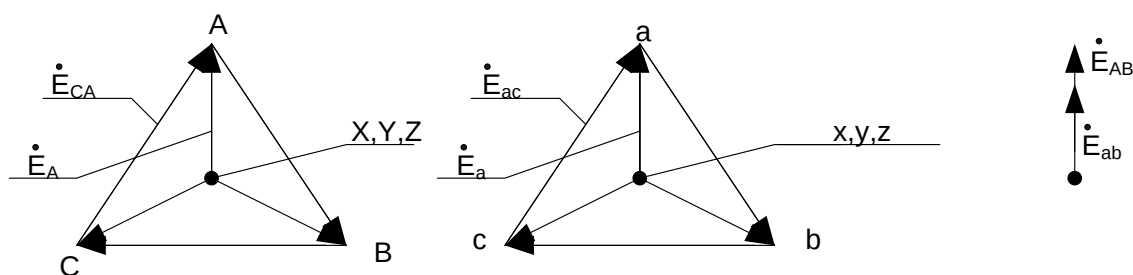


Рисунок 3.3 – Трёхфазный трансформатор с группой соединений Y/Y-0

Если произвести круговую перемаркировку фаз обмотки НН и разместить фазу а на среднем стержне в – на правом, с – на левом, то на векторной диаграмме произойдет круговая перестановка векторов по часовой стрелке. При этом получится 4 группа соединений. Меняя таким образом начала и концы фаз можно получить все чётные группы. Чётные группы получаются также при соединении Δ / Δ , а нечётные – Δ / Y и Y / Δ .

Пример. Определить группу соединения трансформатора, с соединением обмоток по схеме Y/ Δ (рисунок 3.4).

Построим векторные диаграммы (рисунок 3.4). Из рисунка 3.4 видно, что вектор линейной ЭДС НН смещен на 30° по отношению к вектору ВН и располагается напротив цифры 11. Следовательно, группа трансформатора 11.

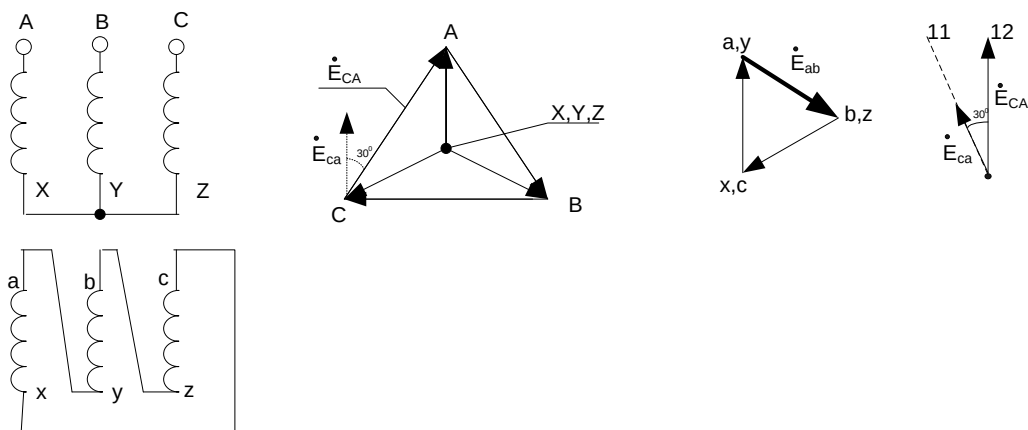


Рисунок 3.4 – Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений
Y/Δ-11

Примечание. Перемаркировкой зажимов можно получить группы 1, 3, 5, 7 и 9.

Задания

Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом (рисунок 2.5 – 2.20).

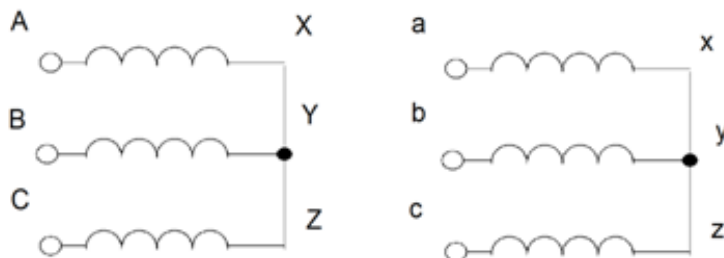


Рисунок 2.5 – Вариант 1

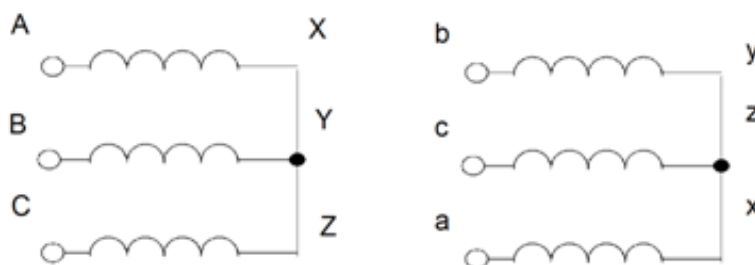


Рисунок 2.6 – Вариант 2

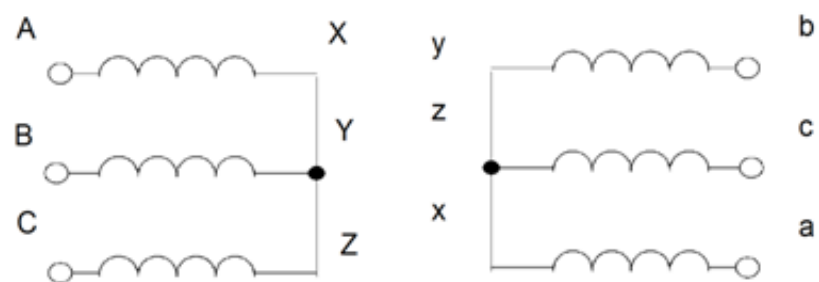


Рисунок 2.7– Вариант 3

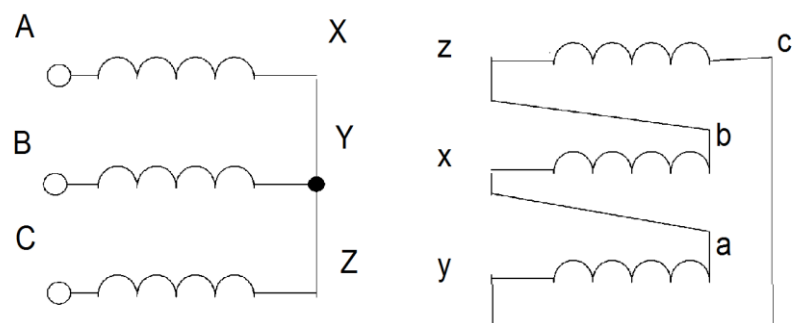


Рисунок 2.8 – Вариант 4

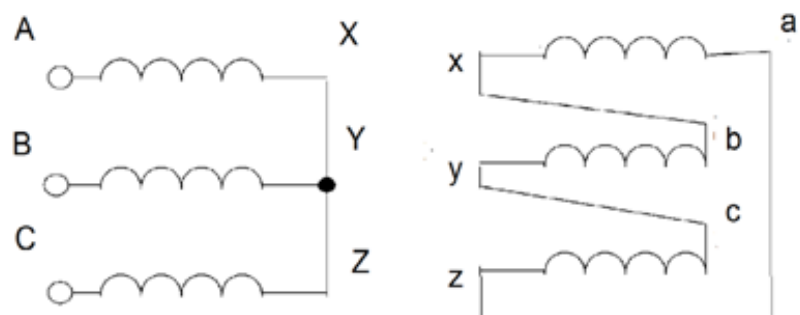


Рисунок 2.9 – Вариант 5

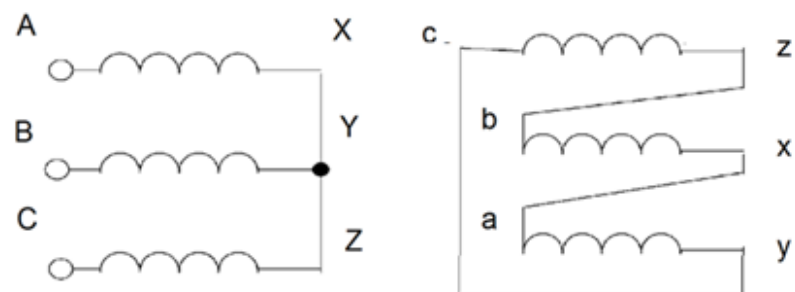


Рисунок 2.10 – Вариант 6

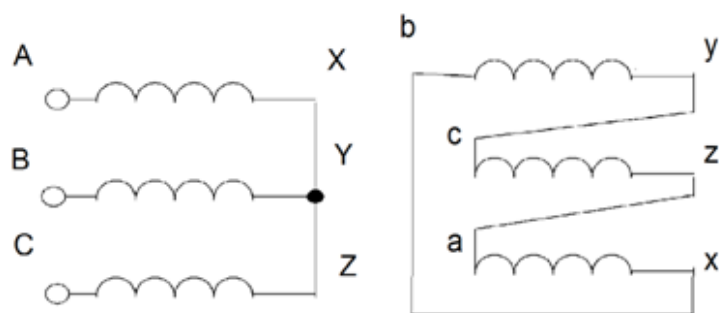


Рисунок 2.11 – Вариант 7

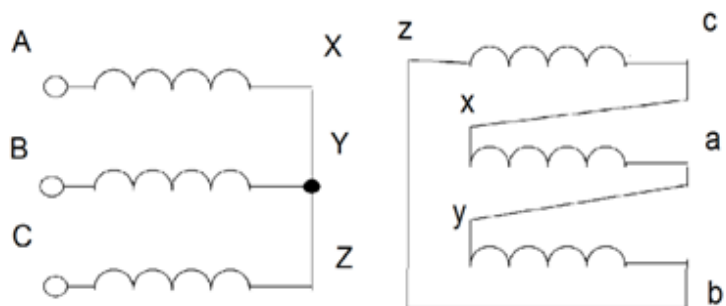


Рисунок 2.12 – Вариант 8

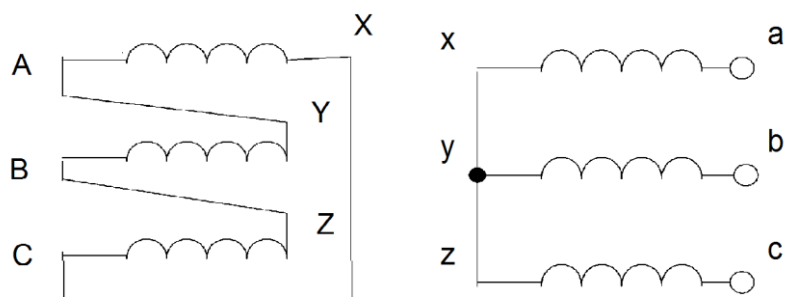


Рисунок 2.13 – Вариант 9

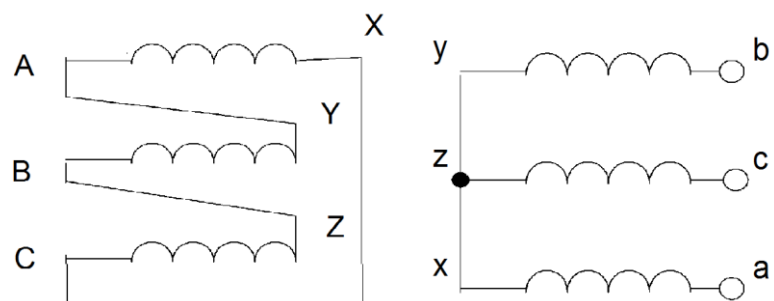


Рисунок 2.14 – Вариант 10

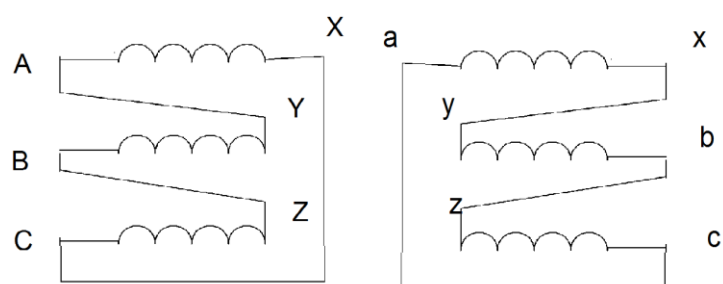


Рисунок 2.15 – Вариант 11

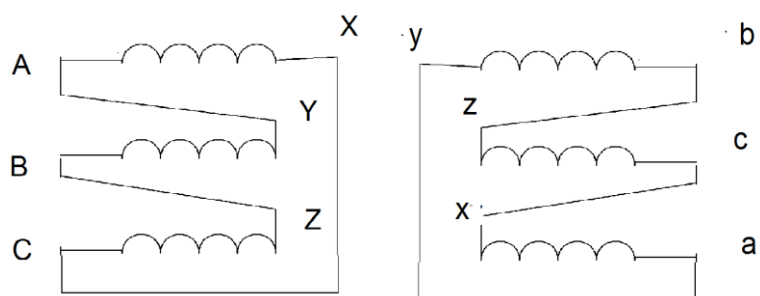


Рисунок 2.16 – Вариант 12

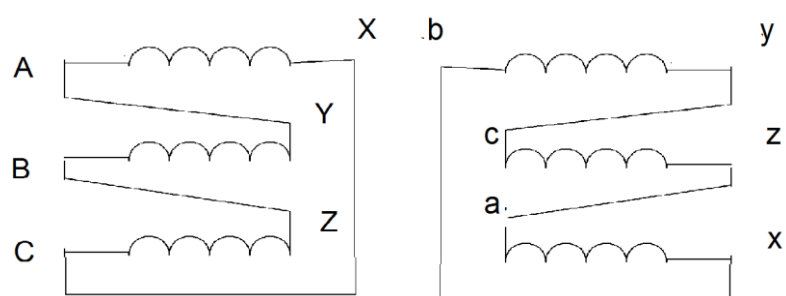


Рисунок 2.17 – Вариант 13

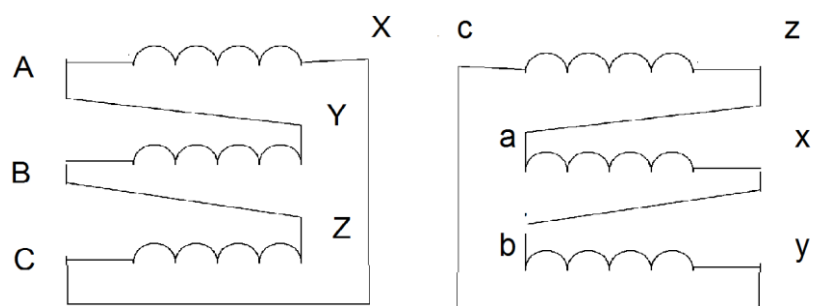


Рисунок 2.18 – Вариант 14

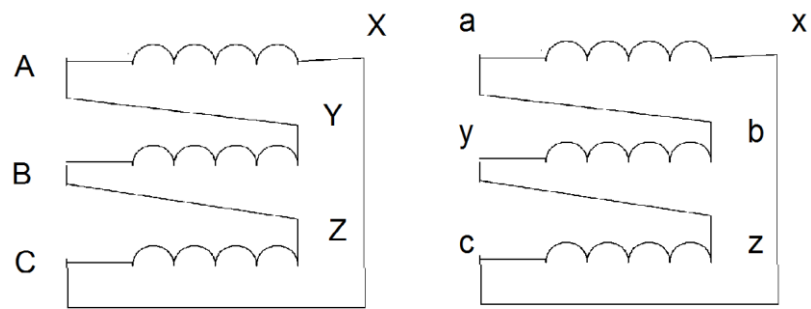


Рисунок 2.19 – Вариант 15

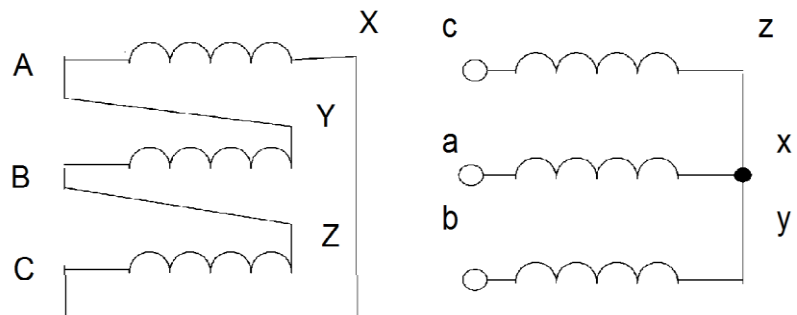


Рисунок 2.20 – Вариант 16

Контрольные вопросы:

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

Литература: 1–4.

4 ТРАНСФОРМАЦИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ТОКОВ

Цель: изучение взаимосвязи параметров режима сети в зависимости от схемы и группы соединения трансформатора.

ПК-5

Знать: методы определения параметров трансформаторов;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: происходящие в трансформаторах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы трансформаторов.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров режима сети в зависимости от схемы и группы соединения трансформатора могут использоваться при анализе параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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 или треугольник.

При симметричных первичных линейных напряжениях

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

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

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

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

при соединении в треугольник:

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

Пример. Число витков на фазу обмотки высокого напряжения трехфазного трансформатора $w_1 = 850$, низкого напряжения – $w_2 = 34$. При подключении к сети с напряжением 10 кВ на вторичной обмотке линейное напряжение равно 400 В. По какой схеме соединена обмотка низкого напряжения, если известно, что обмотка ВН соединена в звезду?

Решение.

Определим коэффициент трансформации

$$k = w_1 / w_2 = 850 / 34 = 25.$$

Определим отношение линейных напряжений:

$$U_{\text{лВН}} / U_{\text{лНН}} = 10000 / 400 = 25.$$

Учитывая, что полученное отношение равно коэффициенту трансформации, рассчитанному ранее по числу витков, можно сделать вывод, что схема соединения обмоток Y/Y либо Δ/Δ. По условию обмотка ВН соединена в звезду, следовательно, обмотка НН также соединена в звезду.

Задания

1. Группа из трех однофазных трансформаторов одинаковой мощности с номинальными фазными напряжениями $U_{1\text{нф}} = 500$ кВ и $U_{2\text{нф}} = 20$ 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. Линейное напряжение трехфазной сети высокого напряжения $U_1=525$ кВ, низкого – $U_2=20$ кВ. При каком соединении обмоток трех однофазных трансформаторов с номинальными напряжениями $U_{1H}/U_{2H}=303/20$ 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.

4. Трехфазный трансформатор подключен к трехфазной сети 35 кВ. Определить вторичное, линейное и фазное напряжения при схемах соединений обмоток Y/Y , Y/Δ , Δ/Y . Коэффициент трансформации $k_{21}=w_2/w_1=0,311$.

5. Трехфазный трансформатор имеет на каждом сердечнике 2000 витков высокого напряжения и 80 витков низкого напряжения. Вычислить отношение $U_{ЛВН}/U_{ЛНН}$ для следующих схем соединения: Δ/Δ , Y/Y , Y/Δ , Δ/Y .

Контрольные вопросы:

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?

Литература: 1–4.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ПОТЕРЬ ТРАНСФОРМАТОРА

Цель: получение навыков расчета параметров и потерь трансформатора на основе экспериментальных данных.

ПК-5

Знать: методы определения параметров трансформаторов;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: происходящие в трансформаторах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы трансформаторов.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров режима трансформатора на основе экспериментальных данных могут использоваться при анализе параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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_k был в пределах номинальных значений. Измеряются параметры U_k , P_k , I_k , из которых затем рассчитываются Z_k , r_k , и x_k .

Схема замещения трансформатора (рисунок 2.1) в режиме короткого замыкания имеет вид, показанный на рисунке 5.1.

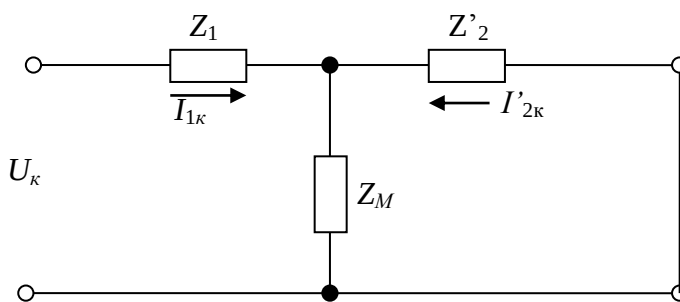


Рисунок 5.1 –Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Общее сопротивление схемы:

$$Z_k = Z_1 + \frac{Z_M \cdot Z'_2}{Z_M + Z'_2} , \quad (5.5)$$

так как $Z_M \gg Z'_2$, 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, представленный на рисунке 5.2.

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

В относительных единицах:

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

Величина U_k обычно представлена в паспортных данных трансформатора.

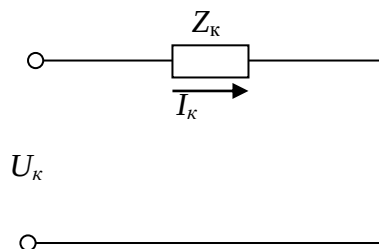


Рисунок 5.2 – Упрощенная схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Пример. Номинальные данные трехфазного трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Y: мощность $S_H = 63$ кВА, напряжение на обмотке ВН и НН, соответственно $U_{ВН} = 21$ кВ и $U_{НН} = 0,4$ кВ. Потери холостого хода $P_0 = 0,29$ кВт, ток холостого $I_0 = 0,035 I_H$, 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: номинальный ток во вторичной обмотке; 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 $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Решение.

Определим номинальные токи:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} U_{ВН}} = \frac{63000}{\sqrt{3} \cdot 21000} = 1,73 \text{ А.}$$

$$I_{2H} = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} I_{1H} = \frac{21}{0,4} 1,73 = 90,93 \text{ А.}$$

Коэффициенты мощности в режиме холостого хода и короткого замыкания:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{ВН} \cdot I_0} = \frac{290}{\sqrt{3} \cdot 21000 \cdot 0,0035 \cdot 1,73} = 1,32 .$$

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{\sqrt{3}U_K \cdot I_{1H}} = \frac{1650}{\sqrt{3} \cdot 0,045 \cdot 21000 \cdot 1,73} = 0,58.$$

Сопротивления короткого замыкания, Ом:

$$R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{1H}^2} = \frac{1650}{3 \cdot 1,73^2} = 183,8 \text{ Ом.}$$

$$X_K = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \frac{U_{HВН}}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}} = \frac{\sqrt{u_{K\%}^2 - u_{KA\%}^2}}{100} \cdot \frac{U_{HВН}}{\sqrt{3} \cdot I_{1H}} = \frac{3,7}{100} \cdot \frac{21000}{\sqrt{3} \cdot 1,73} = 259,3 \text{ Ом.}$$

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке по (2.22):

$$\text{— при } \cos\varphi_2 = 1 \quad \eta = \frac{63 \cdot 1}{63 \cdot 1 + 0,29 + 1,65} \cdot 100\% = 97,0 \text{ \%};$$

$$\text{— при } \cos\varphi_2 = 0,8 \quad \eta = \frac{63 \cdot 0,8}{63 \cdot 0,8 + 0,29 + 1,65} \cdot 100\% = 96,3 \text{ \%}.$$

Задания

1. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_H = 25 \text{ кВА}$; номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 10 \text{ кВ}$, вторичной – $U_{2H} = 0,4 \text{ кВ}$. Схема соединения Y/Y . Трансформатор испытан в режиме холостого хода со стороны обмотки НН. При номинальном напряжении ток $I_{20} = 1,15 \text{ А}$, потребляемая мощность $P_{20} = 0,135 \text{ кВт}$. 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 $U_{1H} = 400 \text{ В}$ и частотой 50 Гц , чтобы реактивная составляющая тока холостого хода осталась без изменений?

3. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_H = 10500 \text{ кВА}$, $U_{1H}/U_{2H} = 110/6,3 \text{ кВ}$. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_K = 11,5 \text{ кВ}$, $P_K = 81,5 \text{ кВт}$. 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?

4. Для трансформатора номинальной мощностью $S_H=25$ МВА максимальное значение КПД $\eta=0,987$ при активно-индуктивной нагрузке $\cos \varphi_2=0,8$ соответствует значению коэффициента загрузки $\beta_{\eta max}=0,475$. Определить магнитные потери и потери короткого замыкания трансформатора.

5. При каком коэффициенте трансформации при первичном фазном напряжении $U_{1H}=3,46$ кВ можно обеспечить на вторичной обмотке трехфазного трансформатора фазное напряжение $U_2=220$ В при токе $I_{1H}=1,93$ А и $\cos \varphi_2=0,7$? Напряжение короткого замыкания трансформатора $U_K=191$ В, потери короткого замыкания $P_K = 0,6$ кВт.

Контрольные вопросы

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?

Литература: 1–4.

6 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ МНОГОФАЗНОЙ ОБМОТКИ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ЭДС МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель: получение навыков расчета параметров обмотки статора машин переменного тока, в том числе при наличии высших гармоник в ЭДС.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки анализа высших гармоник ЭДС переменных машин могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Элементом обмотки статора машины переменного тока 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:

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

2. шагом обмотки по пазам y_1 – с полным (диаметральным) шагом ($y_1 = \tau$) и укороченным шагом ($y_1 < \tau$), где τ – полюсное деление, м,

$$\tau = \pi D_1 / (2p), \quad (6.1)$$

где D_1 – внутренний диаметр статора, м;

$2p$ – число полюсов обмотки статора.

Полный шаг обмотки

$$y_1 = Z_1 / (2p) = \tau. \quad (6.2)$$

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

$$e_{\text{sum}} = e_1 + e_2. \quad (6.3)$$

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 $k_y = E_y / E_\Delta$. Коэффициент укорочения первой (основной) гармоники:

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (6.4)$$

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

Для ЭДС любой гармоники (ν – номер гармоники)

$$k_{y\nu} = \sin\left(\nu \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right). \quad (6.5)$$

Коэффициент распределения обмотки ν -й гармоники характеризует уменьшение ЭДС катушечной группы вследствие распределения ее витков в отдельных пазах:

$$k_{pv} = \frac{\sin[v\pi/(2m)]}{q\sin[v\pi/(2mq)]}, \quad (6.6)$$

где q – число пазов на полюс и фазу или число катушек в катушечной группе.

Обмоточный коэффициент для высшей гармоники учитывает уменьшение ЭДС, вызванное укорочением шага катушки и распределенной конструкцией обмотки:

$$k_{o\delta v} = k_{yv} \cdot k_{pv}. \quad (6.7)$$

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

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

1) укорочение шага обмотки – позволяет исключить только одну гармонику (например, для исключения 7 гармоники следует укоротить шаг так, чтобы $\beta=6/7$);

2) распределение обмотки по пазам таким образом, чтобы число катушек в катушечной группе было $q > 1$ – позволяет снизить значение ЭДС высших гармоник.

ЭДС фазной обмотки статора определяется выражением

$$E_{\phi 1} = 4,44\Phi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1}, \quad (6.8)$$

где Φ – основной магнитный поток,

$$\Phi = (2/\pi)B_{\delta} \cdot l_1 \cdot \tau; \quad (6.9)$$

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

l_1 – длина воздушного зазора;

f_1 – частота переменного тока в обмотке статора;

w_1 – число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_1 = 2pq_1 \cdot w_\kappa = Z_1 \cdot w_\kappa / m, \quad (6.10)$$

где w_κ – число витков в катушке обмотки статора.

При выборе шага катушки

$$y_1 = (\nu - 1)\tau / \nu, \quad (6.11)$$

гармонических ν -го порядка в ЭДС содержаться не будет.

Амплитуда ν -ой гармонической магнитодвижущей силы (МДС) периодической системы катушек

$$F_{\kappa\nu m} = \frac{4}{\pi\nu} F_{\kappa m} k_{y\nu} = \frac{4}{\pi\nu} \sqrt{2} I_a \cdot w_\kappa \cdot k_{y\nu}. \quad (6.12)$$

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

$$F_{\phi\nu} = q F_{\kappa\nu m} \cdot k_{p\nu} = 4q k_{y\nu} k_{p\nu} \sqrt{2} I_a w_\kappa / (\pi\nu). \quad (6.13)$$

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

$$F_{\phi\nu m} = 2\sqrt{2} I w k_{p\nu} k_{y\nu} / (\pi p \nu), \quad (6.14)$$

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

Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки

$$F(\alpha, t) = \sum_{\nu=1}^{\infty} F_{\nu m} \cos(\pm \omega t - \nu \alpha), \quad (6.15)$$

где

$$F_{\nu m} = (3/2) F_{\phi\nu m} = 3\sqrt{2} I \cdot w \cdot k_{p\nu} \cdot k_{y\nu} / (\pi \nu p), \quad (6.16)$$

или

$$F_{\nu m} = 6q k_{p\nu} k_{y\nu} \sqrt{2} I_a \cdot w_\kappa / (\pi \nu), \quad (6.17)$$

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

Прямая гармоническая МДС трехфазной обмотки вращается с угловой скоростью

$$\Omega = \omega / p, \quad (6.18)$$

в положительном направлении, ν -я гармоническая МДС вращается с угловой скоростью

$$\Omega_v = \pm \Omega_1 \cdot v. \quad (6.19)$$

Пример. 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 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:

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

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

$$k_{p1} = 0,96; k_{o\phi 1} = k_{p1} = 0,96.$$

ЭДС фазной обмотки

$$E_\phi = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\phi 1} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,96 = 153 \text{ В.}$$

Задания

1. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой основной гармонической ЭДС, 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 ЭДС.

3. Число зубцов магнитопровода равно 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?

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 гармоники 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.

Контрольные вопросы

1. Как определить ЭДС витка при укорочении шага обмотки?
2. Объясните смысл коэффициента распределения обмотки.
3. Как определить обмоточный коэффициент обмотки?
4. Как с помощью конструкции обмотки осуществить подавление высших гармоник ЭДС?
5. Как выбрать шаг обмотки, при котором в ЭДС не будет содержаться гармонических составляющих ν -го порядка?

Литература: 3–5.

7 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ

Цель: получение навыков расчета параметров синхронных машин при нагрузке.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров синхронных машин при нагрузке могут использоваться при анализе режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

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

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

где p – число пар полюсов.

В обмотке статора в процессе работы синхронной машины индуцируется ЭДС и протекают токи, которые создают магнитодвижущую

силу (МДС), максимальное значение первой гармоники которой

$$F_{1m} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot I \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1} / p, \quad (7.2)$$

где I – действующее значение тока в фазе статора (якоря);

w_1 – число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора;

$k_{o\delta 1}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора.

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

Амплитуда продольной составляющей МДС обмотки якоря

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

где $I_d = I |\sin \beta|$ – действующее значение продольной составляющей тока статора;

β – угол между ЭДС возбуждения $\dot{E}_f$ и током $\dot{I}$ (или МДС F_{1m}).

Амплитуда поперечной составляющей МДС обмотки якоря

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

где $I_q = I |\cos \beta|$ – действующее значение поперечной составляющей тока статора

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

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

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

Уравнение напряжений для неявнополюсной синхронной машины:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I} \cdot r_1. \quad (7.7)$$

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

Выражения для ЭДС взаимной индукции E_1 , E_{1d} и E_{1q} от токов I , I_d и I_q через главные индуктивные сопротивления обмотки якоря:

$$E_1 = -jX_1 I; E_{1d} = -jX_{1d} I_d; E_{1q} = -jX_{1q} I_q. \quad (7.8)$$

где X_1 , X_{1d} , X_{1q} – главное индуктивное сопротивление и его составляющие по продольной и поперечным осям.

Пример. Определить амплитуду основной гармонической МДС трехфазной обмотки якоря четырехполюсной синхронной машины, имеющей следующие данные: число витков в фазе $w_1=105$, коэффициент укорочения $k_{y1}=0,951$, коэффициент распределения $k_{p1}=0,954$. Ток в якоря $I=18$ А.

Решение.

По формуле (6.7) определим обмоточный коэффициент:

$$k_{o\sigma 1} = 0,951 \cdot 0,954 = 0,907.$$

По формуле (7.2) определим амплитуду основной гармонической МДС:

$$F_{1m} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 3 \cdot 18 \cdot 105 \cdot 0,907 / 2 = 1158 \text{ А.}$$

Задания

1. Число витков в фазе обмотки якоря двухполюсного турбогенератора $w_1=16$, коэффициент укорочения $k_{y1}=0,966$, коэффициент распределения

$k_{p1}=0,956$. Вычислить амплитуду основной гармонической МДС обмотки якоря, если мощность турбогенератора $S_H=31250$ кВ·А, фазное напряжение $U_{H.\phi}=6060$ В.

2. 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.

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

4. Номинальная мощность гидрогенератора $S_H=26200$ кВ·А, номинальное линейное напряжение $U_{HЛ} = 10,5$ кВ, частота тока $f = 50$ Гц, соединение фаз – звезда, номинальная частота вращения $n_H=125$ 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.

Контрольные вопросы

1. Как определить синхронную скорость 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; для неявнополюсной.

Литература: 3–5.

8 ПОСТРОЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И РАСЧЕТ ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Цель: получение навыков расчет основных параметров и построения векторных диаграмм синхронного генератора.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки построения векторных диаграмм синхронных машин могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Номинальные параметры генераторов.

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

Номинальным током статора генератора I_n 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 P_H – это наибольшая активная мощность, для длительной работы с которой он предназначен в комплекте с турбиной:

$$P_H = S_H \cdot \cos \varphi_H, \quad (8.1)$$

где $\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности;

S_H – номинальная полная мощность генератора:

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H. \quad (8.2)$$

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 $\cos \varphi_H$ 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 КПД колеблется в пределах 96,3 – 98,8 %. КПД в любом режиме:

$$\eta = P / P_1, \quad (8.3)$$

где P – активная мощность, передаваемая генератором нагрузке;

P_1 – механическая мощность, подводимая к генератору от первичного двигателя.

Механическая мощность, подводимая к генератору от первичного двигателя, с учетом расхода мощности на приведение в движение возбудителя

$$P_1 = M_1 \Omega, \quad (8.4)$$

где M_1 – вращающий момент двигателя, направленный в сторону вращения;

Ω – угловая скорость.

Векторная диаграмма ЭДС синхронных генераторов с одной стороны, позволяет на стадии проектирования определять значение МДС 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: диаграммы Blondеля и диаграммы Потье.

Диаграммы Blondеля

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

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad}\dot{I}_d - j\dot{I}_q x_{aq} - jx_{\sigma a}\dot{I} - \dot{I} \cdot r_a. \quad (8.5)$$

где x_{ad} , x_{aq} – продольная и поперечная составляющие главного индуктивного сопротивления.

На рисунке 8.1 представлен первый вид векторных диаграмм, он строится в указанном ниже порядке: $\dot{E} \rightarrow \dot{I} \rightarrow \dot{E}_{ad} \rightarrow \dot{E}_{aq} \rightarrow \dot{E}_\delta \rightarrow \dot{E}_{\sigma a} \rightarrow \dot{I}_{ra} \rightarrow \dot{U}$

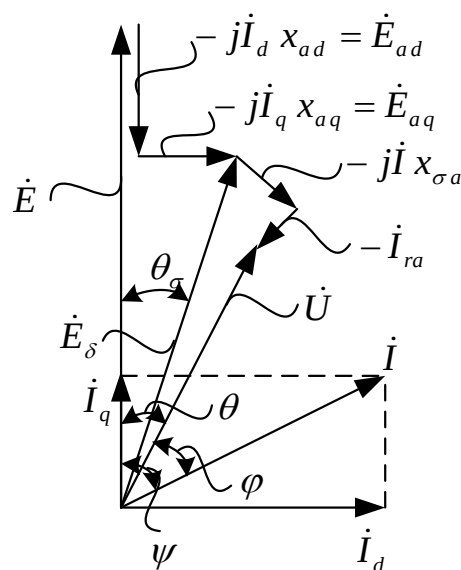


Рисунок 8.1 – Векторная диаграмма Blondеля с учетом сопротивлений реакции якоря (для R-L нагрузки)

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

$$P = m \dot{U} \dot{I} \cos \varphi, \quad (8.6)$$

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

Второй вид диаграммы Блонделя (рисунок 8.2) основан на уравнении, записанном через синхронные сопротивления:

$$\dot{U} = \dot{E} - j \dot{I}_d x_d - j \dot{I}_q x_q - \dot{I} r_a \quad (8.7)$$

и строится в том же порядке, как и предыдущая.

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

$$\dot{E} = \dot{U} + j \dot{I}_d x_d + j \dot{I}_q x_q + \dot{I} r_a \quad (8.8)$$

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

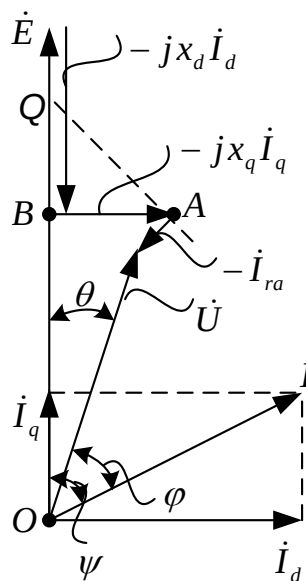


Рисунок 8.2 – Векторная диаграмма Блонделя с учетом синхронных индуктивных сопротивлений

Угол $QAB = \psi$ (т.к. стороны перпендикулярны сторонам угла ψ), значит

$$AQ = \frac{AB}{\cos \psi} = \frac{\dot{I}_q x_q}{\cos \psi} = \dot{I} x_q \quad (8.9)$$

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 (рисунок 8.3).

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

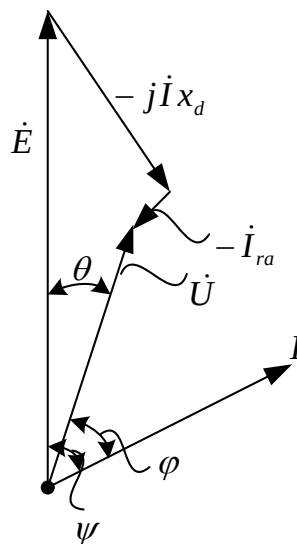


Рисунок 8.3 – Векторная диаграмма неявнополюсного синхронного генератора

Диаграмма Потье (неявнополюсный синхронный генератор).

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

Сначала строят векторы $\dot{U}$ и $\dot{I}$, затем $j\dot{I}x_{sa}$ и $\dot{I}r_a$, находят $\dot{E}_s$,

необходимую для создания данного режима. Затем по характеристике холостого хода определяют $i_{\chi e}$ или $\dot{F}_{\chi e}$, необходимые для создания $\dot{E}_{\delta}$. Затем, вычитая из $\dot{F}_{\chi e}$ приведённую намагничивающую силу реакции якоря $\dot{F}'_a$, получим полную намагничивающую силу обмотки возбуждения $\dot{F}_{\chi}$.

Таким образом, диаграмма Потье состоит из векторной диаграммы ЭДС и векторной диаграммы намагничивающих сил.

Вектор $\dot{E}$ должен быть перпендикулярен AD ($\dot{F}_{\chi}$, рисунок 8.4). Если из точки С провести прямую, перпендикулярную $\dot{I}$, то пересечение её и ОВ даст насыщенную $\dot{E}$, если вместо $\dot{E}_{\delta}$ отложить $\dot{E}_{\delta\infty}$, то аналогичным способом получим $\dot{E}_{\infty}$.

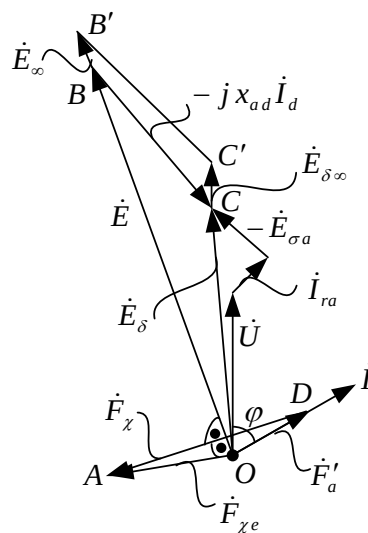


Рисунок 8.4 – Векторная диаграмма ЭДС Потье

При практическом использовании диаграммы Потье, её совмещают с характеристикой холостого хода (рисунок 8.5). При построении принимается $r_a = 0$. Более точные результаты диаграмма даёт, если вместо $x_{\sigma a}$ взять x_p . Диаграмма построена для неявнополюсных машин.

По совмещенной диаграмме Потье и характеристике 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 оттого, что для режима нагрузки и холостого хода принимается одна степень насыщения, а на самом деле они различны.

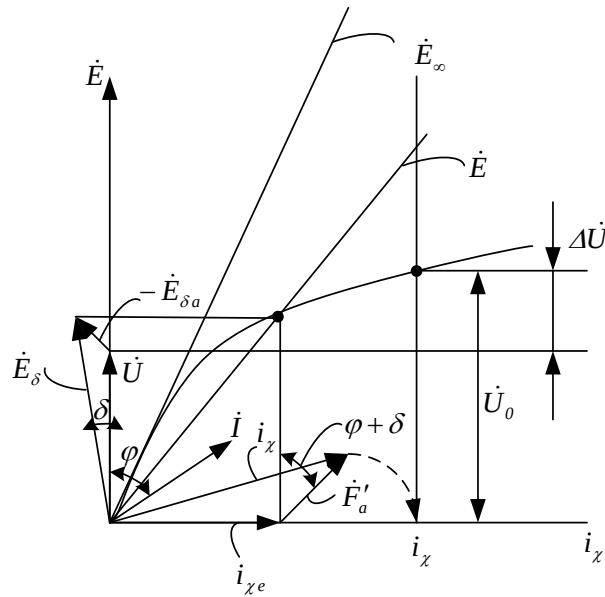


Рисунок 8.5 – Векторная диаграмма намагничивающих сил Потье

Пример. 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:

По формуле (6.8):

$$E_{\phi 1} = 4,44 \Phi \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 0,05 = 239,8 \text{ В.}$$

Задание

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.

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 $\Phi_m=0,012$ 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 $\bar{Z}_н = 8,8 + j6,6$ Ом. Фазный ток генератора $I = 346,8$ А. Определить ЭДС возбуждения генератора (без учета насыщения), если индуктивное сопротивление 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. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активно-емкостную нагрузку; активную нагрузку.

7. Построить векторную диаграмму для неявнополюсного синхронного генератора, имеющего активно-емкостную нагрузку; активную нагрузку.

Контрольные вопросы

1. Что определяют с помощью векторных диаграмм синхронного генератора?
2. Каков порядок построения диаграммы Blondеля?
3. Как выглядит диаграмма Blondеля для неявнополюсного генератора?
4. Порядок построения диаграммы Потье для явнополюсного генератора.
5. Дайте понятие номинальных параметров синхронного генератора.
6. В каких пределах колеблется КПД синхронного генератора?

Литература: 3–5.

9 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Цель: получение навыков расчета параметров режима синхронных двигателей.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров режима синхронных машин могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Сила, действующая на проводник с током I длиной l , помещенный в электромагнитное поле с индукцией B_δ :

$$F_{\text{эм}} = B_\delta \cdot l \cdot I, \quad (9.1)$$

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

$$M_{\text{эм}} = F_{\text{эм}} D_a / 2 = B_\delta I l D_a / 2, \quad (9.2)$$

являющийся в двигателе вращающим моментом.

Следует отметить, что в машинах переменного тока вращающий момент создается только активной составляющей тока:

$$M_{\text{эм}} = B_{\delta} \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot D_a / 2. \quad (9.3)$$

Уравнение угловой характеристики для синхронной машины

$$M_{\text{эм}} = \frac{mEU}{\Omega x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (9.4)$$

Из выражения (10.4) можно определить: максимальный электромагнитный момент:

$$M_{\text{эмт}} = \frac{mEU}{\Omega x_d}, \quad (9.5)$$

синхронизирующий момент:

$$M_{\text{см}} = \frac{dM_{\text{эм}}}{d\theta} = \frac{mEU}{\Omega x_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta, \quad (9.6)$$

коэффициент статической перегружаемости:

$$K_n = M_{\text{эмт}} / M_{\text{эмн}}. \quad (9.7)$$

где $M_{\text{эмн}}$ – номинальный электромагнитный момент.

Из выражения (10.4) можно определить реактивный момент (невозбужденной явнополюсной синхронной машины):

$$M_{\text{эмп}} = \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (9.8)$$

который существует из-за магнитной несимметрии явнополюсной синхронной машины; если $x_d = x_q$, $M_{\text{эмп}} = 0$.

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 момента нагрузки равен нулю, то $M_{\text{эм}} = 0$ и $\theta = 0$, т.е. ось ротора и поля совпадают.

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

Решение:

Потребляемая двигателем из сети активная мощность:

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{575}{0,93} = 618 \text{ кВт.}$$

Потребляемый из сети ток:

$$I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{618}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,8} = 74,5 \text{ А.}$$

Номинальная частота вращения:

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

Развиваемый двигателем вращающий момент:

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

Суммарные потери мощности в двигателе:

$$\Sigma \Delta P = P_{1H} - P_H = 618 - 575 = 43 \text{ кВт.}$$

Пусковой момент двигателя:

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

Пусковой ток двигателя:

$$I_{\pi} = 5I_{\text{H}} = 5 \cdot 74,5 = 372 \text{ A.}$$

Максимальный момент двигателя:

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

Задания

1. Шестиполусный синхронный двигатель имеет номинальную мощность $P_{\text{H}} = 6300 \text{ кВт}$, номинальное линейное напряжение сети $U_{\text{с}} = 6 \text{ кВ}$, частоту $f = 50 \text{ Гц}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{H}} = 0,9$ (опережающий), КПД $\eta_{\text{H}} = 0,971$. Определить номинальный вращающий момент, ток якоря, активную и реактивную мощности, потребляемые двигателем.

2. Трехфазный синхронный двигатель в номинальном режиме имеет технические данные: мощность $P_{\text{H}} = 600 \text{ кВт}$, напряжение $U_{\text{H}} = 3000 \text{ В}$, коэффициент полезного действия $\eta_{\text{H}} = 93 \%$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{H}} = 0,8$, угол нагрузки $\theta = 30^\circ$. Определить потребляемый из сети ток и перегрузочную способность двигателя.

3. Восьмиполусный синхронный двигатель, номинальная мощность которого $P_{\text{H}} = 75 \text{ кВт}$, имеет кратность максимального момента 1,65. Без учета насыщения и явнополусности определить максимальный момент, при котором двигатель удерживается в синхронизме, если ток возбуждения уменьшить до $0,5 I_{f_{\text{H}}}$. Машина имеет нормальную характеристику холостого хода. Частота сети $f = 50 \text{ Гц}$.

4. Кратность максимального момента шестиполусного синхронного двигателя $M_{\text{тн}}/M_{\text{H}} = 2$. Без учета явнополусности построить угловую характеристику момента, определить угол между ЭДС возбуждения и напряжением сети при номинальной нагрузке и номинальном возбуждении синхронного двигателя. Механическими и добавочными потерями пренебречь. Угловая частота сети $\omega_{\text{с}} = 314 \text{ рад/с}$.

Контрольные вопросы

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?

Литература: 3–5.

10 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Цель: изучение процессов, происходящих в асинхронных машинах в режиме холостого хода.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров асинхронных машин в режиме холостого хода могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

При неподвижном роторе ($n_2=0$) 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, 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 статора n_1 определяется частотой питающей сети:

$$n_1 = 60 f_1 / p. \quad (10.1)$$

Основной поток создаёт в обеих обмотках ЭДС:
статора

$$E_1 = \sqrt{2} \pi f_1 w_1 k_{\sigma 61} \Phi_m; \quad (10.2)$$

ротора

$$E_2 = \sqrt{2} \pi f_1 w_2 k_{\sigma 62} \Phi_m. \quad (10.3)$$

Поток рассеяния создаёт в статоре ЭДС:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_0 x_{\sigma 1}, \quad (10.4)$$

где $x_{\sigma 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора.

$\dot{I}_0$ – ток обмотки статор в режиме холостого хода.

Статор обладает также и активным сопротивлением r_1 , тогда учитывая его наличие, можно записать уравнение напряжений для обмотки статора заторможенной АМ:

$$\dot{U} = \dot{I}_0 r_1 + j x_{\sigma 1} \dot{I}_0 - \dot{E}_1. \quad (10.5)$$

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

$$k_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{\sigma 61}}{w_2 k_{\sigma 62}}. \quad (10.6)$$

Для приведённой неподвижной АМ можно построить схему замещения, аналогичную схеме замещения трансформатора. Ее параметры определяются конструктивными особенностями АМ.

Реактивная составляющая тока холостого хода АД:

$$I_{0p} = \frac{m_1 \cdot p \cdot F_{0m}}{\sqrt{2} \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1}}, \quad (10.7)$$

где m_1 – число фаз обмотки статора;

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

Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_m}{m_1 \cdot E_1}, \quad (10.8)$$

где P_m – магнитные потери в магнитопроводе статора.

Главное сопротивление обмотки статора:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 = -\dot{E}_1 / \dot{I}_0, \quad (10.9)$$

где $R_0 = E_1 \cos \beta'_0 / I_0 = P_m / m_1 \cdot I_0^2$ – активная составляющая главного сопротивления;

$X_0 = E_1 \sin \beta'_0 / I_0 = X_{11} \sin^2 \beta'_0$ – реактивная составляющая главного сопротивления;

X_{11} – главное индуктивное сопротивление самоиндукции;

$\beta'_0 = \arctg(I_{0p} / I_{0a})$ – угол между ЭДС $-\dot{E}_1$ и током $\dot{I}_0$;

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 $k_{o\delta 1} = 0,96$. Напряжение сети $U_c = 380$ В, частота $f_1 = 50$ 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:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{o\phi 1}} = \frac{210,86}{3,14 \cdot \sqrt{2} \cdot 336 \cdot 0,96} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Задания

1. Реактивная составляющая тока холостого хода шестиполюсного асинхронного двигателя $I_{0p} = 40 \text{ А}$. Амплитуда МДС, образующей основной магнитный поток, $F_{0m} = 1088 \text{ А}$, обмоточный коэффициент обмотки статора $k_{o\phi 1} = 0,886$. Определить число витков в фазе обмотки статора.

2. Найти ток идеального холостого хода четырехполюсного асинхронного двигателя по следующим данным: ЭДС, индуцированная в фазе статора, $E_{1\phi} = 213 \text{ В}$, МДС, образующая основной магнитный поток, $F_{0m} = 457,5 \text{ А}$; число витков обмотки статора $w_1 = 126$, обмоточный коэффициент $k_{o\phi 1} = 0,96$, магнитные потери в магнитопроводе статора $P_m = 150 \text{ Вт}$.

3. Определить активную и реактивную составляющие главного сопротивления обмотки статора асинхронной машины, если ЭДС, индуцированная в фазе обмотки статора $-\dot{E}_1 = -213 \text{ В}$, идеальный ток холостого хода $\dot{I}_0 = 2 - j35 \text{ А}$.

4. Вычислить реактивную составляющую главного сопротивления обмотки статора четырехполюсной трехфазной асинхронной машины, если число витков фазы обмотки статора $w_1 = 176$, обмоточный коэффициент $k_{o\phi 1} = 0,958$, полюсный шаг $\tau = 145 \text{ мм}$, расчетная длина $l_\delta = 140 \text{ мм}$, расчетный воздушный зазор $\delta_0 = 0,6 \text{ мм}$. Частота сети 50 Гц . Угол β'_0 между ЭДС ($-\dot{E}_1$) и током $\dot{I}_0$ равен 87° .

Контрольные вопросы

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?

Литература: 3–5.

11 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ ПРИ НАГРУЗКЕ

Цель: изучение процессов, происходящих в асинхронных машинах при нагрузке.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

полученные навыки расчета параметров асинхронных машин, работающих под нагрузкой, могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Скорость поля статора 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 .

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (11.1)$$

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

Скорость вращения ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (11.2)$$

Частота тока в обмотке ротора:

$$f_2 = sf_1. \quad (11.3)$$

Режимы работы асинхронной машины:

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

Пример. Асинхронная машина с числом пар полюсов $p=2$ включена в трехфазную сеть с частотой 50 Гц. При внешнем моменте, направленном против вращения поля, ротор машины имеет угловую скорость $\Omega=147,6$ рад/с; при моменте, направленном в сторону вращения поля, $\Omega=166,5$ рад/с. Определить скольжение и режим работы машины в каждом из этих случаев.

Решение:

Рассмотрим первый случай, когда внешний момент направлен против вращения поля. По (11.1) синхронная частота:

$$n_1 = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения ротора:

$$n_{2(1)} = \frac{\Omega_{2(1)}}{2\pi} 60 = \frac{147,6}{2\pi} 60 = 1409 \text{ об/мин.}$$

Скольжение по (12.1):

$$s_{(1)} = (1500 - 1409) / 1500 = 0,06.$$

Режим работы – двигательный.

Рассмотрим второй случай, когда момент направлен в сторону вращения поля. Частота вращения ротора:

$$n_{2(2)} = \frac{\Omega_{2(2)}}{2\pi} 60 = \frac{166,5}{2\pi} 60 = 1590 \text{ об/мин.}$$

Скольжение по (12.1):

$$s_{(2)} = (1500 - 1590) / 1500 = -0,06.$$

Режим работы – генераторный.

Задания

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 $\Omega = 298$ 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 $\Omega_1 = 314$ рад/с?

3. При какой частоте вращения ротора двухполусной асинхронной машины при скольжении $s = -0,1$ в статоре будет генерироваться ЭДС, изменяющаяся с частотой 50 Гц?

4. В цепь ротора четырехполусного асинхронного двигателя с фазным ротором подключен прибор магнитоэлектрической системы с нулем посередине шкалы. При питании статорной обмотки от сети частотой 50 Гц стрелка прибора за 30 с делает 60 полных колебаний. Определить частоту вращения ротора.

5. Асинхронный двигатель с числом полюсов $2p = 4$ имеет номинальную частоту вращения $n_2 = 1450$ об/мин. Определить номинальное скольжение двигателя, частоту ЭДС взаимной индукции в фазах статора и ротора, если синхронная частота вращения $n_1 = 1500$ об/мин.

Контрольные вопросы

1. Каким скольжением определяется двигательный режим работы асинхронной машины?
2. Каким скольжением определяется генераторный режим работы асинхронной машины?
3. Каким скольжением определяется режим противовключения работы асинхронной машины?
4. Как определить скольжение?

Литература: 3–5.

12 ПРИВЕДЕНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ К РАБОЧЕМУ ПРОЦЕССУ МАШИНЫ С НЕПОДВИЖНЫМ РОТОРОМ

Цель: получение навыков приведения параметров вращающейся асинхронной машины к параметрам машин с неподвижным ротором.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров асинхронных машин могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Действующее значение ЭДС взаимной индукции в фазе неподвижного ротора:

$$E_2 = \pi \sqrt{2} f_1 \cdot w_2 \cdot k_{o\phi 2} \cdot \Phi_m. \quad (12.1)$$

Действующее значение ЭДС взаимной индукции в фазе вращающегося ротора:

$$E_{2s} = \pi \sqrt{2} f_2 \cdot w_2 \cdot k_{o\phi 2} \cdot \Phi_m = \pi \sqrt{2} f_1 \cdot s \cdot w_2 \cdot k_{o\phi 2} \cdot \Phi_m = s E_2. \quad (12.2)$$

Действующее значение ЭДС рассеяния ротора:

$$E_{2\sigma s} = x_{2s} I_2, \quad (12.3)$$

где x_{2s} – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора при скольжении

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = s x_2. \quad (12.4)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора:

$$x_2 = 2\pi f_1 L_{2\sigma}. \quad (12.5)$$

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

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}}. \quad (12.6)$$

Уравнение токов асинхронной машины:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2, \quad (12.7)$$

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

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_I}, \quad (12.8)$$

где k_I – коэффициент приведения по току

$$k_I = \frac{m_1 k_{\sigma 1} w_1}{m_2 k_{\sigma 2} w_2}. \quad (12.9)$$

Коэффициенты приведения сопротивлений

$$k = k_U k_I. \quad (12.10)$$

Уравнение напряжений для режима короткого замыкания асинхронной машины такое же, как и для трансформатора

$$\dot{U}_{1\kappa} = -\dot{E}_{1\kappa} + \dot{I}_1 z_\kappa, \quad (12.11)$$

где $z_\kappa = z_1 + z'_2$.

Пример. 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 $k_{o\delta 1} = k_{o\delta 2} = 0,93$. Определить фазные значения ЭДС в обмотке статора E_1 и в обмотке ротора при неподвижном его состоянии E_2 и вращающемся E_{2s} со скольжением $s = 8 \%$, частоту тока в неподвижном и вращающемся роторе. Частота тока питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение:

Полусное 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

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{o\delta 1} \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,93 \cdot 0,019 = 188 \text{ В.}$$

ЭДС в обмотке неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_{o\delta 2} \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 0,93 \cdot 0,019 = 31 \text{ В.}$$

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 $f_2 = f_1 = 50$ Гц, частота во вращающемся роторе:

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

Задания

1. Ротор трехфазного асинхронного двигателя вращается с частотой $n_2 = 1440$ об/мин. Определить ЭДС взаимной индукции в фазе ротора E_{2s} , если синхронная частота вращения $n_1 = 1500$ об/мин, а ЭДС при неподвижном роторе $E_2 = 200$ В.

2. Частота вращения ротора двухполусного асинхронного двигателя 2900 об/мин. Определить ЭДС взаимной индукции в фазе ротора, если при неподвижном роторе она равна 170 В. Частота питающей сети 50 Гц.

3. Трехфазная асинхронная машина имеет следующие данные: число витков фазы обмотки статора $w_1=68$, ротора $w_2=27$, обмоточный коэффициент обмотки статора $k_{o\sigma 1}=0,886$, ротора $k_{o\sigma 2}=0,954$. Частота питающей сети 50 Гц, вращающийся магнитный поток $\Phi=0,027$ Вб. Определить действующие значения ЭДС, индуцированных в обмотках статора и ротора двигателя при неподвижном роторе.

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 $r_2=0,01$ Ом, а индуктивность рассеяния $L_{2\sigma} = 2,2 \cdot 10^{-4}$ Гн. Частота сети $f_1 = 50$ Гц.

5. Активное сопротивление фазы обмотки ротора асинхронной машины с фазным ротором $r_2 = 0,01$ 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 $s = 0,03$.

Контрольные вопросы

1. Причины приведения вращающегося ротора асинхронной машины к неподвижному.
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?

Литература: 3–5.

13 ПОТЕРИ, КПД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель: получение навыков расчета потерь и КПД асинхронной машины.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета потерь мощности и КПД асинхронных машин могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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

$$p_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (13.2)$$

а часть – в стали статора (магнитные потери)

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

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

$$P_{\text{эм}} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_2 I_2^2 \frac{r_2}{s_2}. \quad (13.4)$$

Часть электромагнитной мощности теряется в виде тепла в обмотке ротора (электрические потери в обмотке ротора)

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

оставшаяся часть превращается в механическую мощность, развиваемую на роторе

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

часть механической мощности теряется в машине в виде механических потерь $p_{\text{мх}}$.

Добавочные потери $p_{\text{д}}$ рассчитать очень трудно, поэтому их принимают равными 0,5% от P_1 при $I_1 = I_{1\text{н}}$.

Полезная мощность на валу

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

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

где суммарные потери

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

КПД двигателя определяется как

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

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

$$p_{\text{эл2}} = s P_{\text{эм}}; \quad (13.11)$$

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

из которых видно, что при $s = 0$ электрических потерь в роторе нет (идеальный холостой ход), а при $s = 1$ вся электромагнитная мощность идет на потери в обмотке ротора, а механическая равна нулю. Поэтому с точки зрения КПД – чем меньше s , тем лучше.

Пример. 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 определим из режима холостого хода:

$$p_{\text{мг}} = P_0 - (m_1 I_0^2 r_1 + p_{\text{мх}}) = 325 - (3 \cdot 5,04^2 \cdot 0,326 + 130) = 170 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в обмотке статора в номинальном режиме по (13.2):

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

Потребляемая из сети мощность по (13.1):

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 18,6 \cdot 0,913 = 11164 \text{ Вт.}$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - p_{\text{мг}} - p_{\text{эл1}} = 11164 - 170 - 338 = 10656 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в обмотке ротора по (13.11):

$$p_{\text{эл2}} = 0,027 \cdot 10656 = 288 \text{ Вт,}$$

т.к. при частоте вращения магнитного поля статора $n_1 = 3000$ об/мин скольжение равно

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

Добавочные потери:

$$p_d = P_{\text{эм}} - P_n - p_{\text{эл2}} - p_{\text{мх}} = 10656 - 10000 - 288 - 130 = 238 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери мощности по (13.9):

$$\Sigma p = 338 + 288 + 170 + 130 + 238 = 1164 \text{ Вт.}$$

Коэффициент полезного действия по 13.10:

$$\eta = \frac{10000}{11164} \cdot 100\% = 89,6\%.$$

Задания

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

2. При вращении ротора четырехполюсного асинхронного двигателя с частотой вращения 1450 об/мин электромагнитная мощность двигателя равна 110 кВт. Частота питающей сети 50 Гц. Определить электрические потери в обмотке ротора и электромагнитный момент двигателя.

3. Электрические потери в обмотке статора асинхронного двигателя $p_{\text{эл1}} = 500 \text{ Вт}$. 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 $n_2 = 1450 \text{ об/мин}$, КПД машины $\eta = 87\%$. Частота сети 50 Гц, магнитные потери в магнитопроводе статора принять равными 2/3 от электрических потерь в обмотке статора.

4. 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 $n_2=965$ об/мин. Пренебрегая механическими и добавочными потерями, определить полезный вращающий момент на валу двигателя. Частота питающей сети $f = 50$ Гц.

5. 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.

Контрольные вопросы

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?

Литература: 3–5.

14 МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель: получение навыков аналитического и графического определения электромеханических характеристик асинхронных машин.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета характеристик асинхронных машин могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Механической характеристикой называется зависимость электромагнитного момента от скольжения $M_{\text{эм}} = f(s)$, при $U_1, f_1 = \text{const}$ (рисунок 14.1).

Известно, что электромагнитный момент связан с электромагнитной мощностью:

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \Omega_1, \quad (14.1)$$

где

$$\Omega_1 = 2\pi n_1 / 60. \quad (14.2)$$

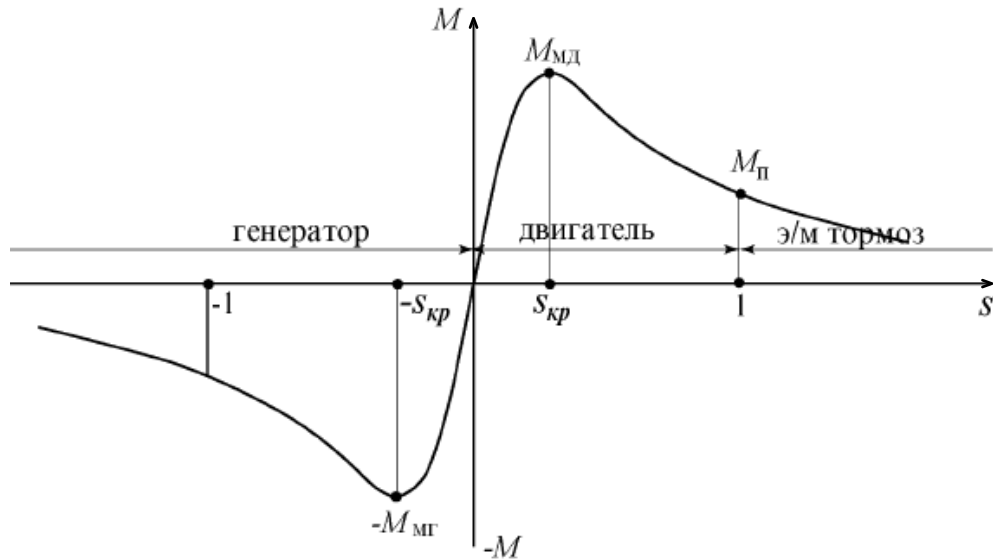


Рисунок 14.1 – Механическая характеристика асинхронной машины

Уравнение механической характеристики

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

где r_1 , r_2' – активные первичное и приведенное вторичное сопротивления Т-образной схемы замещения асинхронной машины;

$x_{\sigma 1}$, $x'_{\sigma 2}$ – первичное и приведенное вторичное индуктивные сопротивления рассеяния;

ω_1 – циклическая частота, определяемая как

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

Скольжение, при котором электромагнитный момент достигает максимальных значений $\pm M_m$, называется критическим $\pm s_{кр}$:

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

Максимальный момент асинхронной машины:

$$M_m = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2} \right]}, \quad (14.6)$$

Знак плюс относится к двигательному режиму, знак минус – к генераторному.

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

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r'_2}{(x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})}. \quad (14.7)$$

Тогда максимальный момент двигателя

$$M_m \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})}. \quad (14.8)$$

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

$$\frac{M_{эм}}{M_m} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}. \quad (14.9)$$

Пример. Найти критическое скольжение и максимальные моменты асинхронной машины, имеющей следующие параметры: $r_{*1} = r_{*2}' = 0,03$, $x_{* \sigma 1} = x_{* \sigma 2}' = 0,13$. Напряжение питающей сети $U_{*1} = 1$.

Решение:

Определим по формуле (14.5) критическое скольжение:

$$s_{кр} = \pm \frac{0,03}{\sqrt{0,03^2 + (0,13 + 0,13)^2}} = \pm 0,115.$$

Максимальный момент в относительных единицах определяется:

– для двигательного режима

$$M_{m(D)} = \frac{U_1^2}{2(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2})} = \frac{1}{2(0,03 + \sqrt{0,03^2 + (0,13 + 0,13)^2})} = 1,71;$$

– для генераторного режима:

$$M_{m(G)} = -\frac{U_1^2}{2(-r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2})} = -\frac{1}{2(-0,03 + \sqrt{0,03^2 + (0,13 + 0,13)^2})} = -2,16.$$

Задания

1. Определить индуктивное сопротивление короткого замыкания $x_K = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}$ четырехполюсного трехфазного асинхронного двигателя, имеющего номинальную мощность 10 кВт, частоту вращения 1450 об/мин, номинальное фазное напряжение 220 В, кратность максимального момента $M_m/M_n = 2$, активное сопротивление обмотки статора $r_1 = 0,4$ Ом, частота сети 50 Гц.

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

3. 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 $\eta = 88\%$.

4. 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.

5. 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 сопротивление обмотки статора $r_1 = 1,1$ Ом, индуктивные

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

Контрольные вопросы

1. Какая характеристика называется механической?
2. Поясните физический смысл механических характеристик АМ.
3. Какое скольжение соответствует максимальному моменту асинхронного двигателя, как его рассчитать?
4. Записать формулу Клосса. Какую характеристику асинхронной машины можно построить с ее помощью?

Литература: 3–5.

15 ПУСКОВЫЕ СВОЙСТВА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель: изучение способов пуска асинхронных двигателей (АД) и получение навыков определения их пусковых характеристик.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета пусковых характеристик асинхронных машин могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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_d включается в цепь ротора с одной стороны для уменьшения пускового тока ротора, равного

$$I'_{2п} = \frac{E'_2}{(r'_2 + r_d) + jx'_{2\sigma}}, \quad (15.1)$$

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

$$s_{кр} \approx \frac{c_1(r'_2 + r'_d)}{x_{\sigma 1} + c_1 x'_{2\sigma}}, \quad (15.2)$$

откуда

$$r'_d = x_{\kappa} - r'_2 \cdot C_1 / C_1; \\ r_d = \frac{r'_d}{k^2}. \quad (15.3)$$

Начальный пусковой ток двигателя с фазным ротором

$$I_n \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + x_{\kappa}^2}}. \quad (15.4)$$

Начальный пусковой момент двигателя с фазным ротором

$$M_n = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r'_2}{\omega_1 [(r_1 + r'_2)^2 + x_{\kappa}^2]} \approx \frac{m_1 \cdot I_n^2 \cdot r'_2}{\omega_1}. \quad (15.5)$$

Начальный пусковой момент максимальный, если сопротивление фазы обмотки ротора

$$r'_{2m} = \sqrt{r_1^2 + x_{\kappa}^2} \approx x_{\kappa}. \quad (15.6)$$

Для получения заданного повышенного скольжения s при заданной (номинальной) нагрузке можно определить необходимое значение активного сопротивления добавочного резистора r_d :

$$r_d = r_2 (s/s_n - 1). \quad (15.7)$$

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

Прямой пуск: ток в сети равен пусковому $I_c = I_n$; $M_{п.пр.} = M_n$.

Пуск через реактор с индуктивным сопротивлением x_p :

$$I_c = I_n / \alpha; M_{п.р.} = M_n / \alpha^2, \quad (15.8)$$

где

$$\alpha = \sqrt{[r_{\kappa}^2 + (x_{\kappa} + x_p)^2] / (r_{\kappa}^2 + x_{\kappa}^2)}. \quad (15.9)$$

Пуск через автотрансформатор с коэффициентом трансформации k

$$I_c = I_n / k^2; M_{п.ат.} = M_n / k^2. \quad (15.10)$$

Пример. 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 (рисунок 15.1).

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, равное номинальному

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

Отношение начального пускового момента к моменту переключений принимаем

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

Начальный пусковой момент

$$M_1 = M_2 \cdot \lambda = 201 \cdot 2,1 = 422 \text{ Н}\cdot\text{м,} \quad \text{т.е.} \quad M_1 / M_2 = 422 / (3 \cdot 201) = 0,7; \quad \text{это}$$

позволяет применить аналитический метод расчета сопротивлений пускового реостата.

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

$$r_{доб1} = r_{доб2} \cdot \lambda = 0,86 \cdot 2,1 = 1,8 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на первой ступени

$$R_{ПР1} = r_{\partial\partial\partial1} + r_{\partial\partial\partial2} + r_{\partial\partial\partial3} = 1,8 + 0,86 + 0,41 = 3,07 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на второй ступени

$$R_{ПР2} = r_{\partial\partial\partial2} + r_{\partial\partial\partial3} = 0,86 + 0,41 = 1,27 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на третьей ступени

$$R_{ПР3} = r_{\partial\partial\partial3} = 0,41 \text{ Ом.}$$

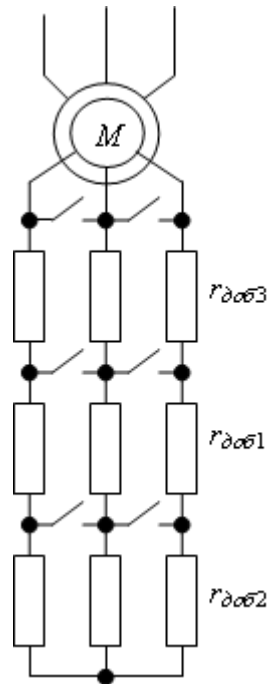


Рисунок 15.1 – Трехступенчатый пусковой реостат

Задания

1. Трехфазный АД имеет номинальную мощность $P_n = 15$ кВт и номинальную частоту вращения $n_n = 2940$ об/мин. Кратность начального пускового момента $M_n/M_n = 1,4$. Найти ускорение, с каким начнет вращаться ротор двигателя без нагрузки на валу. Момент инерции АД $0,00475 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

2. Определить величину начального пускового тока при прямом включении в сеть и величину начального пускового момента трехфазного АД 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. Параметры четырехполюсного трехфазного АД, соответствующие пусковому режиму, $x_k=0,36$ Ом, $r_k=0,11$ Ом, активное сопротивление фазы обмотки статора $r_1=0,05$ Ом. Определить начальный пусковой ток и начальный пусковой момент двигателя, работающего при фазном напряжении $U_1=380$ В и частоте 50 Гц.

4. С помощью реактора ток в сети при пуске трехфазного АД 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 $k_I = 5$?

5. Трехфазный АД с кратностью начального пускового тока $k_I=5,6$ и кратностью начального пускового момента $k_n=1,3$ пускается в ход при нагрузке $M_B=0,5 M_n$. Необходимо обеспечить снижение пускового тока в сети до величины $I_c = 2,5I_n$. Применим ли в этом случае реакторный пуск?

6. Начальный пусковой ток трехфазного АД $I_n=130$ 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?

Контрольные вопросы

1. Какие ограничения имеет прямой пуск АД?
2. Для чего нужен пусковой реостат в АД с фазным ротором?
3. Чем автотрансформаторный пуск АД предпочтительнее реакторного?
4. Почему нежелателен реостатный пуск АД с короткозамкнутым ротором?
5. Чему равно скольжение в момент пуска АД?

Литература: 3–5.

16 РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель: изучение способов регулирования частоты вращения АД.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета регулировочных характеристик асинхронных двигателей могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Способы регулирования угловой скорости ротора основываются на соотношении:

$$n = (1-s)n_1 = (1-s)60 f_1 / p . \quad (16.1)$$

Можно выделить три способа регулирования частоты вращения:

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.

3) изменением скольжения, этот способ основан на изменении механической характеристики двигателя; это возможно тремя способами:

- изменением напряжения;
- изменением активного сопротивления цепи обмотки фазного ротора;
- введением дополнительной ЭДС в цепь обмотки фазного ротора.

Пример. Определить величину дополнительного сопротивления r_d при введении которого в цепь обмотки фазного ротора шестиполюсного АД 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.

Решение.

Определим значения скольжения для различных значений частоты вращения из формулы (16.1):

$$s(1) = (1000 - 950) / 1000 = 0,05; \quad s(2) = (1000 - 600) / 1000 = 0,4;$$

где $n_1 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000$ об/мин.

Значение добавочного сопротивления определим из соотношения:

$$\frac{s(1)}{s(2)} = \frac{r_2}{r_2 + r_d} \Rightarrow r_d = \left(\frac{s(2)}{s(1)} - 1 \right) r_2 = \left(\frac{0,4}{0,05} - 1 \right) 0,009 = 0,063 \text{ Ом.}$$

Задания

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

2. В таблице 16.1 даны значения точек механической характеристики трехфазного АД, соответствующие номинальному напряжению $U_1 = U_n$. Рассчитать характеристики двигателя при $U_1 = 0,85U_n$ и $U_1 = 0,7U_n$. В каких

пределах изменяется частота вращения двигателя при уменьшении напряжения на двигателе от U_n до $0,7U_n$? Как изменяется при этом перегрузочная способность двигателя? Угловая скорость вращения поля $\Omega_1=157$ рад/с.

Таблица 16.1 – Данные для задачи 2

s , о.е.	$s_n=0,05$	0,1	0,2	$s_{кр}=0,24$	0,5	0,8	1
M , Н·м	500	1000	1450	1500	1280	950	800

3. Номинальная частота вращения шестиполюсного АД 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 $r_d=0,5$ Ом?

4. Введением дополнительного сопротивления в цепь ротора АД с фазным ротором частота вращения двигателя в номинальном режиме снижена на 25 %. Определить величину дополнительного сопротивления r_d и оценить изменение КПД при таком режиме, если номинальная мощность шестиполюсного двигателя $P_n=160$ кВт, номинальная частота вращения $n_n=970$ об/мин, активное сопротивление обмотки ротора $r_2=0,01$ Ом, номинальный КПД $\eta_n=93\%$. Частота $f_1=50$ Гц.

Контрольные вопросы

1. Какие способы регулирования частоты вращения АД бывают?
2. Для каких двигателей применяют реостатное регулирование частоты вращения со стороны ротора?
3. Какие условия необходимо соблюдать при регулировании частоты вращения АД изменением первичной частоты тока?
4. Как осуществляется регулирование частоты вращения изменением скольжения?

Литература: 3–5.

17 ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Цель: получение навыков расчета параметров однофазных асинхронных двигателей.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета характеристик однофазных асинхронных двигателей могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

В тех случаях, когда потребление электрической энергии невелико (жилые дома, торговые предприятия и др.) или, когда трудно выполнить трехфазную 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 однофазный асинхронный двигатель получается из трехфазного путем отключения одной фазы статора.

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

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_{\text{пр}} - \dot{\Phi}_{\text{обр}}; \quad (17.1)$$

$$\dot{\Phi}_{\text{пр}} = \dot{\Phi}_{\text{обр}} = \frac{1}{2} \dot{\Phi}_m. \quad (17.2)$$

Прямое поле вращается с синхронной скоростью

$$n_{\text{пр}} = n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (17.3)$$

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

$$n_{\text{обр}} = -n_1. \quad (17.4)$$

Прямая волна имеет по отношению к ротору скольжение

$$s_1 = s = \frac{n_1 - n}{n_1}; \quad (17.5)$$

Обратная волна по отношению к ротору имеет скольжение

$$s_2 = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = 2 - s. \quad (17.6)$$

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 $M_{\text{пр}} = -M_{\text{обр}}$, 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.

Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя имеет вид суммы двух характеристик $M_{\text{пр}} = f(s)$ и $M_{\text{обр}} = f(s)$, получается при подстановке в уравнение механической характеристики вместо s величины $2-s$ и с учетом того, что $M_{\text{пр}}$ и $M_{\text{обр}}$ на характеристике имеют разные знаки

$$M_{\text{обр}} = - \frac{pm_1 U_1^2 \cdot \frac{r'_2}{2-s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{2-s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right]}. \quad (15.7)$$

Для создания пускового момента на статоре двигателя помимо рабочей обмотки применяют ещё одну – пусковую. Эти обмотки располагают на статоре так, чтобы их оси были смещены на 90° эл. 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.

Задания

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.

Контрольные вопросы

1. Почему невозможен самостоятельный запуск однофазного асинхронного двигателя?
2. Что произойдет, если работающий трехфазный асинхронный двигатель перейдет в однофазный режим?
3. Какое назначение имеет фазосдвигающий элемент в схемах включения однофазных асинхронных двигателей?
4. Какое скольжение имеет обратная волна по отношению к ротору?

Литература: 3–5.

18 РАСЧЕТ ЯКОРНОЙ ОБМОТКИ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель: получение навыков расчета якорной обмотки машины постоянного тока.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета якорной обмотки машины постоянного тока могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Обмотка якоря является важнейшим элементом машины. 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 (рисунок 18.1).

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

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

где $u_{\text{п}}$ – число секционных сторон в одном слое пазов;

Z – действительное число пазов.

Полное число элементарных пазов

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

где S – число секций;

K – число коллекторных пластин.

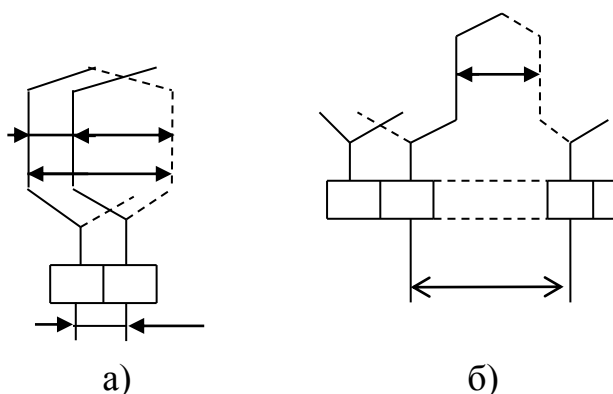


Рисунок 18.1 – Схемы простых обмоток: а) простая петлевая; б) простая волновая

Шаги обмотки:

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 $\tau = Z_p/2p$, то есть

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

где ε – укорочение или удлинение шага обмотки.

Величина ε является дробной частью отношения $Z_p/2p$, 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 уравнительных соединений.

Число параллельных ветвей в простой петлевой обмотке равно числу полюсов ($2a = 2p$), а в простой волновой обмотке – всегда равно 2 ($2a = 2$).

Пример. Якорь машины постоянного тока имеет 33 паза, число секций в катушке равно 3, число витков в секции 2. Определить число коллекторных пластин, общее число секций в обмотке, общее число эффективных проводников обмотки и число эффективных проводников в пазу

Решение.

Общее число коллекторных пластин K и число секций S :

$$S = K = Z \cdot u_n = 33 \cdot 3 = 99.$$

Число эффективных проводников в пазу:

$$N_n = 2 W_c \cdot u_n = 2 \cdot 2 \cdot 3 = 12.$$

Общее число эффективных проводников обмотки:

$$N = N_n \cdot Z = 12 \cdot 33 = 3962.$$

Задания

1. Число эффективных проводников обмотки машины постоянного тока 324, число пазов якоря 27, число коллекторных пластин 81. Найти число секций обмотки, число витков в секции и число эффективных проводников в пазу.
2. Число эффективных проводников в пазу якоря машины постоянного тока 6, число витков в секции 1, число секций 111. Определить число эффективных проводников обмотки и число реальных пазов.
3. Машина постоянного тока с числом пазов якоря 38 содержит 304 эффективных проводника в обмотке якоря. Найти число эффективных проводников в пазу, число витков в секции и число секций в катушке, если число коллекторных пластин 152.
4. Число пазов якоря четырехполюсной машины постоянного тока 42, число секций в катушке простой петлевой обмотки 2. Определить шаги обмотки и число параллельных ветвей.
5. Четырехполюсный якорь машины постоянного тока имеет простую волновую обмотку с числом эффективных проводников 396 и числом витков в секции 2. Рассчитать шаги обмотки и определить ток параллельной ветви, если ток в обмотке якоря 100 А.

Контрольные вопросы

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?
4. Как определить шаги обмотки якоря?

Литература: 1, 3, 4.

19 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Цель: получение навыков расчета магнитной цепи машины постоянного тока при холостом ходе.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета магнитной цепи машины постоянного тока могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

ЭДС параллельной ветви обмотки якоря:

$$E_a = C_0 \cdot \Omega \cdot \Phi, \quad (19.1)$$

где $\Omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения якоря;

C_0 – постоянный коэффициент

$$C_0 = \frac{pN}{2\pi a}; \quad (19.2)$$

Φ – магнитный поток на один полюс

$$\Phi = B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot b_{\delta}, \quad (19.3)$$

где B_{δ} – магнитная индукция в зазоре;

l_{δ} – расчетная длина якоря;

b_{δ} – расчетная полюсная дуга.

Магнитный поток при холостом ходе

$$\Phi_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot B_{\delta}, \quad (19.4)$$

где α_{δ} – коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha_{\delta} = b_{\delta} / \tau, \quad (19.5)$$

Результирующая МДС при холостом ходе

$$F_B = F_{\delta} + F_z + F_a + F_m + F_s = F_{\delta z} + F_m + F_s, \quad (19.6)$$

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

F_m – магнитное напряжение сердечника полюса;

F_s – магнитное напряжение станины.

Пример. 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.

Решение.

Число параллельных ветвей при простой волновой обмотке $2a=2$.

ЭДС параллельной ветви по (19.1 – 19.2):

$$E_a = \frac{pN}{a} \cdot n \cdot \Phi = \frac{2 \cdot 920}{2 \cdot 1} \cdot 1500 \cdot 0,00425 = 195,5 \text{ В.}$$

Задания

1. Угловая скорость вращения якоря машины постоянного тока $\Omega=157,1$ рад/с, число витков параллельной ветви обмотки четырехполюсного якоря 124, магнитный поток на полюс $\Phi=0,804 \cdot 10^{-2}$ Вб. Найти величину коэффициента C_0 и ЭДС якоря в случае простой волновой обмотки.

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. Определить магнитный поток на полюс, необходимый для создания в простой петлевой обмотке якоря машины постоянного тока ЭДС $E = 230$ В при частоте вращения 1500 об/мин, если число эффективных проводников обмотки якоря четырехполюсной машины $N=168$.

4. Найти магнитный поток четырехполюсной машины постоянного тока, соответствующий индукции в зазоре $B_\delta=0,8$ Тл, если расчетная длина якоря $l_\delta=0,15$ м, диаметр якоря $D_a=0,3$ м.

Контрольные вопросы

1. Как определяется магнитный поток в машине постоянного тока при холостом ходе?
2. Какие составляющие включает в себя МДС при холостом ходе?
3. Что определяет магнитный поток на полюс в машине постоянного тока?
4. Как связаны ЭДС и магнитный поток в машине постоянного тока?

Литература: 1, 3, 4.

20 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ НАГРУЗКЕ

Цель: получение навыков расчета магнитной цепи машины постоянного тока при нагрузке.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета магнитной цепи машины постоянного тока могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Уравнение напряжения якоря при нагрузке:

– для генератора постоянного тока

$$U_r = E - I_a R_a; \quad (20.1)$$

– для двигателя постоянного тока

$$U_d = E + I_a R_a. \quad (20.2)$$

Электромагнитный момент:

$$M = C_0 \cdot I_a \cdot \Phi. \quad (20.3)$$

Линейная нагрузка якоря:

$$A = N \cdot I_a / 2a \cdot \pi \cdot D_a. \quad (20.4)$$

Пример. 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.

Решение.

По формуле (20.1) напряжение на генераторе:

$$U_r = 225 - 500 \cdot 0,01 = 220 \text{ В.}$$

По формуле (20.2) напряжение на двигателе:

$$U_d = 225 + 500 \cdot 0,01 = 230 \text{ В.}$$

Задания

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

3. 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.

4. Определить число эффективных проводников простой волновой обмотки якоря, если ток якоря $I_a = 40$ А, диаметр якоря $D_a = 0,16$ м, линейная нагрузка $A = 20000$ А/м.

5. Диаметр якоря машины постоянного тока $D_a = 0,162$ м. Эффективные проводники простой волновой обмотки якоря образованы из двух круглых проводов диаметром $d = 1,35$ мм каждый. Найти число эффективных

проводников обмотки якоря, если плотность тока в обмотке $7,26 \text{ А/мм}^2$, линейная нагрузка якоря $A = 202,8 \text{ А/см}$.

Контрольные вопросы

1. Поясните физическую сущность реакции якоря МПТ.
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. От чего зависит характер реакции якоря?

Литература: 1, 3, 4.

21 РЕЖИМЫ РАБОТЫ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель: получение навыков расчета параметров режима машины постоянного тока.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров режима машины постоянного тока могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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:

$$P_1 = M_1 \cdot \Omega, \quad (21.1)$$

где M_1 – вращающий момент первичного двигателя.

Механическая мощность, преобразуемая электромагнитным путем в электромагнитную мощность:

$$P_{\text{мех}} = P_1 - p_T - p_M - p_D = P_{\text{ЭМ}}, \quad (21.2)$$

где p_T – механические потери;

p_M – магнитные потери в зубцах и ярме якоря;

p_D – добавочные потери.

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{ЭМ}} = C_0 \cdot I_a \cdot \Phi \cdot \Omega = E \cdot I_a. \quad (21.3)$$

Электрическая мощность, снимаемая со щеток якоря:

$$P_a = P_{\text{ЭМ}} - p_{\text{Э}} = UI_a, \quad (21.4)$$

где $p_{\text{Э}} = R_a I_a^2$ – электрические потери в цепи якоря.

Полезная электрическая мощность:

$$P = P_a - P_B = UI, \quad (21.5)$$

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

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P/P_1 = 1 - \frac{\Sigma p}{(P + \Sigma p)}, \quad (21.6)$$

где $\Sigma P = p_T + p_D + p_{\text{Э}} + p_B$ – сумма потерь.

В режиме двигателя $U > E$, ток $I_a < 0$, 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:

$$\eta = P_1/P = 1 - \frac{\Sigma P}{(P_1 + \Sigma P)}. \quad (21.7)$$

Пример. Найти электромагнитную мощность четырехполюсной машины постоянного тока при токе якоря $I_a = 40$ А, если простая волновая обмотка

якоря имеет число эффективных проводников $N=500$, магнитный поток $\Phi = 0,8 \cdot 10^{-2}$ Вб. Частота вращения 1500 об/мин.

Решение:

Определим по (19.2) коэффициент:

$$C_0 = \frac{pN}{2\pi a} = \frac{2 \cdot 500}{2\pi \cdot 1} = 160,2.$$

Определим электромагнитную мощность по (21.3):

$$P_{\text{эм}} = C_0 \cdot I_a \cdot \Phi \cdot \Omega = 160,2 \cdot 40 \cdot 0,008 \cdot 157,1 = 8000 \text{ Вт},$$

где $\Omega = 2\pi n / 60 = 6,28 \cdot 1500 / 60 = 157$, рад/с.

Задания

1. Генератор постоянного тока мощностью $P_n = 50$ кВт, имеет КПД $\eta = 86,7\%$, активное сопротивление цепи якоря $R_a = 0,13$ Ом, сумма механических, магнитных и добавочных потерь составляет 4% от номинальной мощности. Определить ток обмотки якоря, если потери в цепи параллельного возбуждения $P_b = 400$ Вт.

2. Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие данные: номинальную мощность $P_n = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 230$ В, активное сопротивление цепи якоря $R_a = 0,3$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_b = 150$ Ом. Определить КПД генератора, если сумма механических, магнитных и добавочных потерь составляет 6% от номинальной мощности.

3. Якорь четырехполюсной машины постоянного тока с простой волновой обмоткой имеет $N=396$ проводников и вращается с частотой 1450 об/мин. Магнитный поток на полюс $\Phi = 1,019 \cdot 10^{-2}$ Вб, сопротивление цепи якоря $R_a = 0,25$ Ом, сумма механических, магнитных и добавочных потерь равна 860 Вт. Определить напряжение и КПД для режима двигателя и

генератора при автономной нагрузке, если при параллельном возбуждении $I_B=1,7$ А, ток в обмотке якоря $I_a=100$ А.

4. 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 $R_a=0,175$ Ом, основной магнитный поток $\Phi=4,8 \cdot 10^{-2}$ Вб. Для номинального режима работы генератора определить: ЭДС якоря E_a , ток нагрузки I_a , электромагнитную мощность $P_{эм}$ и электромагнитный момент $M_{эм}$. Размагничивающим действием реакции якоря пренебречь.

5. ЭДС генератора независимого возбуждения $E_a = 240$ В, сопротивление якорной обмотки $R_a = 0,1$ Ом. Определить напряжение на щетках генератора при токе нагрузки $I = 100$ А.

Контрольные вопросы

1. Какой вид имеет энергетическая диаграмма ГПТ и ДПТ?
2. Какие потери в машинах постоянного тока являются механическими?
3. Чем обусловлены магнитные потери мощности?
4. Чем обусловлены и в какой части машины постоянного тока имеют место электрические потери?

Литература: 1, 3, 4.

22 КОММУТАЦИЯ И РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель: получение навыков расчета параметров коммутации и реакции якоря машины постоянного тока.

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета параметров коммутации машины постоянного тока могут использоваться при анализе режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Коммутацией в машинах постоянного тока 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.

Период коммутации:

$$T_{\kappa} = b_{\text{щ}} / b_{\kappa} \cdot K \cdot n, \quad (22.1)$$

где $b_{\text{щ}}$ – ширина щетки;

b_k – ширина коллекторного деления;

K – число коллекторных пластин.

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 большой мощности – еще и компенсационную обмотку.

Размагничивающее влияние реакции якоря по поперечной оси учитывается обычно использованием коэффициента реакции якоря при расчете МДС, компенсирующей влияние реакции якоря по поперечной оси:

$$F_{qd} = k_{p.я.} F_a, \quad (22.2)$$

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

$$F_a = NI_a / (4ap). \quad (22.3)$$

Для определения коэффициента реакции якоря пользуются графиком $k_{p.я.} = f(F_a / F_{BO})$ (рисунок 22.1), 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

$$F_{BO} = 2F_\delta k_\mu, \quad (22.4)$$

где F_δ – магнитное напряжение воздушного зазора;

$$F_\delta = 0,8B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot 10^3 F_\delta; \quad (22.5)$$

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

B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре машины;

k_δ – коэффициент воздушного зазора, учитывает увеличение воздушного зазора, вызванное зубчатой поверхностью якоря.

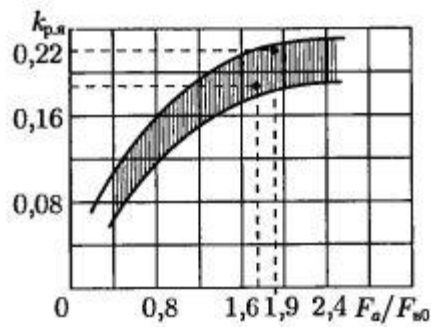


Рисунок 22.1 – График для определения коэффициента $k_{р.я.}$

Максимальная МДС якоря:

$$F_{amax} = A \cdot \tau / 2. \quad (22.6)$$

Пример. 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 $I_v=0,02I_{an}$, 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 магнитного насыщения магнитопровода $k_\mu=1,35$; коэффициент воздушного зазора $k_\delta=1,3$. Определить МДС реакции якоря по поперечной оси F_{qd} и число витков в полюсной катушке возбуждения w_δ , 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:

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

Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке:

$$I_{an} = 255 - 5 = 250 \text{ А.}$$

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:

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

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

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

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

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

$$F_{\epsilon n}=F_{\epsilon 0}+F_{qd}=4590+1925=6515 \text{ А.}$$

Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения:

$$w=\frac{F_{\epsilon n}}{2I_{\epsilon}}=\frac{6515}{2 \cdot 5}=651 \text{ виток.}$$

Задания

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 $w_n=6$, 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.

4. Линейная нагрузка якоря машины постоянного тока для номинального тока $I_a = 42$ А равна $A = 202$ А/см. Определить продольную и поперечную составляющие МДС якоря при сдвиге щеток с нейтрали на расстояние s , равное 0,2 полюсного деления τ , если максимальная МДС якоря при номинальном токе $F_{a\max} = 2370$ А. Найти те же значения при уменьшении тока якоря в 2 раза и при сдвиге щеток на 0,3 τ .

5. Определить максимальную МДС реакции якоря двухполюсной машины постоянного тока при положении щеток на нейтрали, если якорь при диаметре $D_a = 21$ см имеет число эффективных проводников $N = 396$. Ток в якоре $I_a = 100$ А. Обмотка простая волновая с числом витков в секции $w_c = 2$. Найти значения составляющих МДС при сдвиге щеток на одно коллекторное деление.

Контрольные вопросы

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?

Литература: 1, 3, 4.

23 ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель: получение навыков расчета характеристик генераторов постоянного тока независимого возбуждения

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета характеристик генераторов постоянного тока могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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, короткого замыкания, внешняя, регулировочная, нагрузочная. Для ГПТ с различными типами возбуждения характеристики имеют свои особенности.

Рассмотрим характеристики ГПТ независимого возбуждения:

1) Характеристика холостого хода представляет собой зависимость $U=f(I_\epsilon)$ при $I_a = 0$. Поскольку $I_\epsilon \sim F_\epsilon$, а $U = E_a \sim \Phi_\sigma$, то характеристика точно повторяет кривую намагничивания машины (рисунок 23.1).

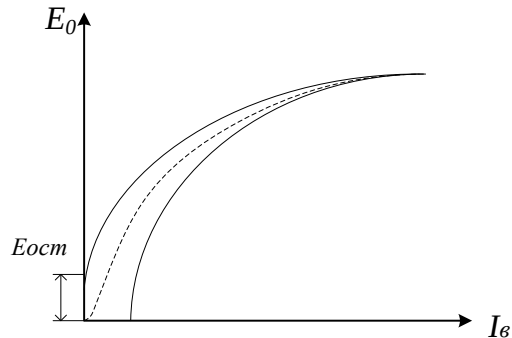


Рисунок 23.1 – Характеристика холостого хода ГПТ независимого возбуждения

2) Характеристика короткого замыкания (рисунок 23.2) представляет собой зависимость $I_a=f(I_\epsilon)$ при закороченной якорной цепи ($U=0$). В этом случае:

$$I_a = (E_a - U) / R_a = E_a / R_a, \quad (23.1)$$

и т.к. R_a мало, то значение E_a должно быть понижено, т.е. машина будет ненасыщенна и характеристика будет иметь вид прямой. Т.к. при $I_\epsilon = 0$ есть E_{0c} , то $I_a = I_{0c}$. Машину надо либо размагнитить, пропустив по обмотки возбуждения I_ϵ другого знака, либо перенести характеристику параллельно самой себе в начало координат.

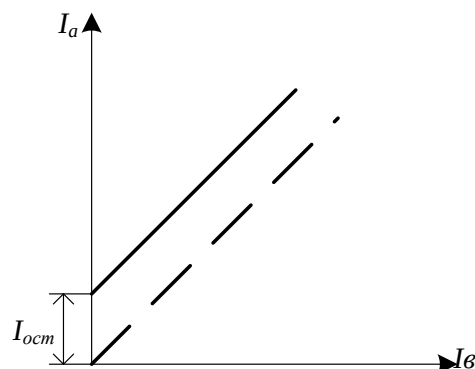


Рисунок 23.2 – Характеристика короткого замыкания ГПТ независимого возбуждения

3) Внешняя характеристика – это зависимость $U = f(I_a)$, при $I_e = \text{const}$ (рисунок 23.3). Если щётки стоят на геометрической нейтрали, то с ростом тока якоря I_a , напряжение U – падает из-за увеличения $I_a R_a$ и поперечной реакции якоря. Если снимать эту характеристику с точки U_n, I_n вниз, то можно получить номинальное изменение напряжения генератора $\Delta U_{\text{н}\%} = 100\%(\Delta U / U_n)$.

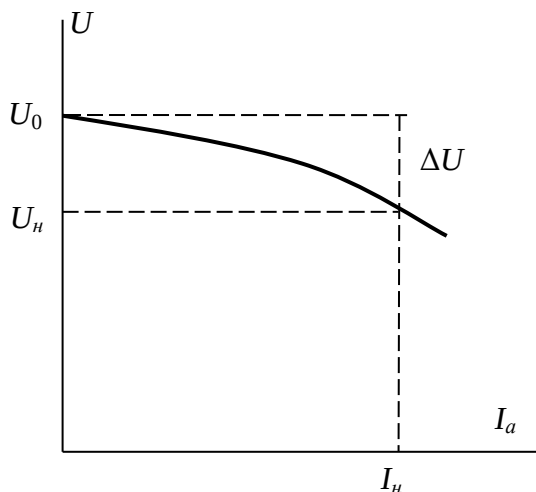


Рисунок 23.3 – Внешняя характеристика ГПТ независимого возбуждения

4) Регулировочная характеристика – это зависимость $I_e = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ (рисунок 23.4). Характеристика показывает, как надо изменять I_e , чтобы при изменении тока якоря I_a напряжение U было постоянным. Если щётки на нейтрали, то характеристика носит возрастающий характер из-за $I_a \cdot R_a$ и размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

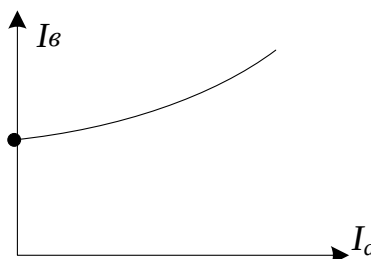


Рисунок 23.4 – Регулировочная характеристика ГПТ независимого возбуждения

5) Нагрузочная характеристика представляет собой зависимость $U=f(I_a)$ при $I_a = \text{const}$. Характеристика холостого хода – частный случай нагрузочной при токе якоря $I_a=0$. Нагрузочная характеристика идёт несколько ниже характеристики холостого хода из-за падения напряжения в цепи якоря $I_a \cdot R_a$ и поперечной реакции якоря.

Пример. ГПТ независимого возбуждения мощностью $P_n=20$ кВт и напряжением $U_n=230$ В имеет сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, $R_a = 0,12$ Ом; в генераторе используются 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:

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

Задания

1. Для ГПТ независимого возбуждения известны: номинальная мощность $P_n=40$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 230$ В, сопротивление цепи якоря при рабочей температуре $R_a=0,12$ Ом, КПД $\eta=0,86$, номинальная частота вращения $n = 1470$ об/мин. Определить: номинальный ток ГПТ I_n , сопротивление 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 23.1) 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 $R_a = 0,65 \text{ Ом}$. Падением напряжения на щетках пренебречь. Ток возбуждения $I_{\text{в}} = 2,4 \text{ А}$, продольная МДС $F_d = 300 \text{ А}$. Число витков обмотки возбуждения $w_{\text{в}} = 600$.

Таблица 23.1 – Характеристика холостого хода

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

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

Контрольные вопросы

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 холостого хода и короткого замыкания
3. Поясните физический смысл внешней характеристики.
4. Поясните физический смысл регулировочной характеристики.
5. Поясните физический смысл нагрузочной характеристики.

Литература: 1, 3, 4.

24 ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель: получение навыков расчета характеристик генераторов постоянного тока параллельного возбуждения

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета характеристик генераторов постоянного могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Для самовозбуждения ГПТ необходимо выполнение следующих условий:

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

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_ϕ . Ток I_ϕ увеличивает поток полюсов, а значит и E_a , что, в свою очередь ведёт к увеличению I_ϕ . Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжение генератора U_T не достигнет установившегося значения. Если ОВ подключена неверно, то ток I_ϕ , возникающий под действием остаточного потока, протекает в обратную сторону и ослабляет магнитный поток $\Phi_{ост}$.

Рассмотрим характеристики ГПТ параллельного возбуждения.

1) Характеристика холостого хода имеет такой же вид, как у независимого ГПТ, но может быть снята только в одном квадранте ($U_a = E_a - i_a R_a$); $I_a R_a \approx 0$.

2) Характеристика короткого замыкания снимается при независимом питании ОВ, иначе, если $U=0$, то $I_\phi=0$ при любой E_a и частоте вращения n .

3) Внешняя характеристика – представляет собой зависимость $U = f(I_a)$ при $R_\phi = \text{const}$ (рисунок 24.1).

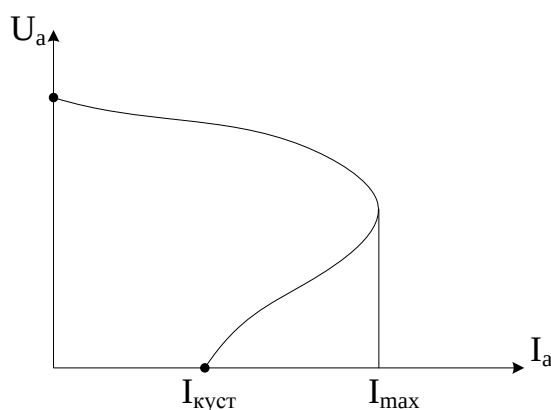


Рисунок 24.1 – Внешняя характеристика ГПТ параллельного возбуждения

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_g (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 короткого замыкания. В этой точке $U=0$, $I_g=0$, 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.

Задания

1. Для ГПТ параллельного возбуждения известны технические данные: номинальное напряжение $U_n=115$ В, номинальный ток $I_n=20$ А, сопротивление цепи якоря работающей машины $R_a = 0,4$ Ом, сопротивление цепи возбуждения работающей машины $R_b = 145$ Ом, КПД $\eta = 0,8$, частота вращения $n = 2850$ об/мин. Определить: номинальную мощность генератора, мощность первичного двигателя, ток якоря, электромагнитную мощность, ЭДС генератора, электромагнитный момент.

2. В таблице 24.1 приведена характеристика холостого хода ГПТ параллельного возбуждения. Построить внешнюю характеристику, если сопротивление цепи якоря $R_a = 0,9$ Ом, номинальный ток якоря $I_{ан} = 20$ А, номинальное напряжение $U_n=230$ В, продольная МДС, компенсирующая размагничивающее действие реакции якоря $F_{qdн}=270$ А, число витков параллельной обмотки возбуждения $w_b=490$, сопротивление цепи возбуждения $R_b=96$ Ом.

Таблица 24.1 – Данные к задаче 2

I_b, A	0	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2
E, B	13	151	200	233	256	274	289	300

3. ГПТ 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 $R_b = 11$ 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 обмотке возбуждения неизменными.

Контрольные вопросы

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.

Литература: 1, 3, 4.

25 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель: получение навыков расчета характеристик двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета характеристик двигателей постоянного тока могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

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_{ϕ} также не зависит от тока якоря I_a .

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

$$n_0 = \frac{U}{C_e \Phi_{\sigma}}, \quad (25.1)$$

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 (рисунок 25.1). 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).

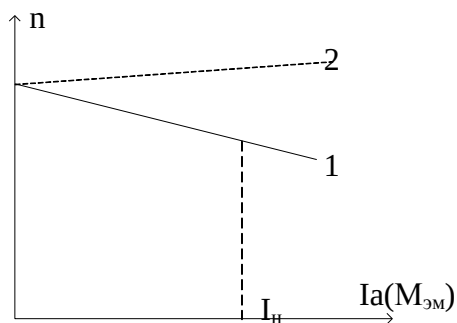


Рисунок 25.1 – Скоростная характеристика ДПТ параллельного возбуждения

Рабочие характеристики двигателя (рисунок 25.2 представляют собой зависимости потребляемой мощности P_1 , тока $I_a \approx I_n$, частоты вращения n , момента M и КПД η от мощности P_2 на валу двигателя при $U = \text{const}$ и $I_{\phi} = \text{const}$. 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.

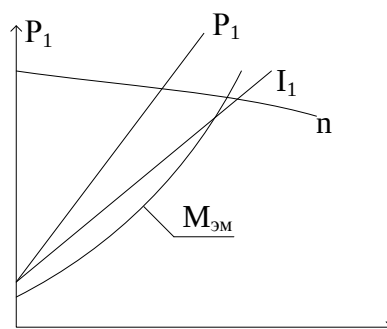


Рисунок 25.2 – Рабочие характеристики ДПТ параллельного (независимого) возбуждения

Задания

1. ДПТ параллельного возбуждения работает от сети напряжением $U_c=220$ В. Технические данные двигателя приведены в таблице 25.1: номинальный ток I_n , номинальная частота вращения n_n , ток холостого хода I_0 , сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, R_a , ток возбуждения I_e ; 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 25.1 – 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
R_a , Ом	0,28	0,17	0,11	0,055	0,42	0,57
I_e , А	1,6	2,2	2,7	4,0	1,5	1,18

2. ДПТ параллельного возбуждения имеет сопротивление в цепи якоря $R_a=0,39$ Ом. Сопротивление цепи возбуждения $R_e=137$ 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

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 $R_\phi = 137$ 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 $R_\phi = 85$ 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.

Контрольные вопросы

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?

Литература: 1, 3, 4.

26 ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель: получение навыков расчета характеристик двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета характеристик двигателей постоянного тока могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

В ДПТ с последовательным возбуждением ток возбуждения $I_e = I_a$, 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 $M = f(I_a)$.

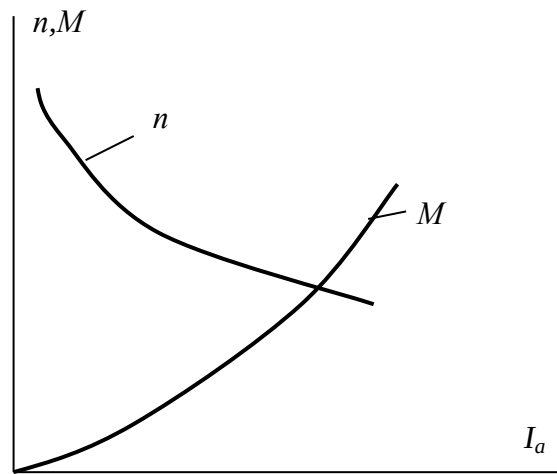


Рисунок 26.1 – Скоростная и моментная характеристика ДПТ последовательного возбуждения

При $I_a < (0,8 \div 0,9)I_n$ скоростная характеристика двигателя $n = f(I_a)$ (рисунок 26.1) имеет форму гиперболы, так как частота вращения

$$n = \frac{U - I_a \Sigma r_a}{c_e \Phi}, \quad (26.1)$$

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 (рисунок 26.1), т.к. электромагнитный момент

$$M = c_m \Phi I_a. \quad (26.2)$$

В ДПТ 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.

Задания

1. Тяговый ДПТ последовательного возбуждения имеет номинальную мощность $P_n = 52$ кВт, КПД $\eta = 81\%$, частоту вращения $n = 650$ об/мин, номинальное напряжение $U_n = 550$ В, общее сопротивление обмоток якоря и возбуждения $R_a + R_b = 0,095$ Ом. Определить: потребляемую мощность, ток двигателя, полезный момент на валу, ЭДС, суммарные потери мощности.

2. ДПТ 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 $R_{в.с} = 0,0048$ Ом, сопротивление параллельной обмотки возбуждения $R_{в.ш} = 48,4$ Ом, КПД $\eta = 0,86$. Определить: номинальный ток двигателя, ток якоря, потребляемую мощность, ЭДС, электрические потери в параллельной обмотке возбуждения.

3. Двигатель смешанного 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 $R_b = 100$ Ом, число витков на полюс параллельной обмотки возбуждения $w_g = 900$. Продольная МДС, компенсирующая размагничивающее действие поперечной МДС якоря, $F_{qdh} = 220$ А. Характеристика намагничивания машины приведена в таблице 26.1, постоянная $C_0 = 165$. Определить изменение частоты вращения двигателя при токе 20 А.

Таблица 26.1 – Характеристика намагничивания к задаче 3

Φ , Вб	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$	$0,72 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$0,88 \cdot 10^{-2}$	$0,92 \cdot 10^{-2}$
F_b , А	560	860	1100	1400	1800	2200

4. ДПТ 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 $I_n = 50$ 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 $R_d = 0,8$ Ом при неизменном вращающем моменте на валу.

Контрольные вопросы

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?

Литература: 1, 3, 4.

27 ПУСКОВЫЕ И РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель: получение навыков расчета пусковых и регулировочных характеристик двигателей постоянного тока

ПК-5

Знать: методы определения параметров электрических машин;

Уметь: самостоятельно определять и анализировать параметры работающего электромеханического оборудования;

Владеть: навыками самостоятельного определения параметров электромеханического оборудования;

ПК-6

Знать: электромагнитные процессы, происходящие в электрических машинах при различных режимах их работы;

Уметь: рассчитывать режимы работы электрических машин;

Владеть: навыками расчета режимов работы электрических машин.

Актуальность темы практического занятия заключается том, что полученные навыки расчета пусковых и регулировочных характеристик двигателей постоянного могут использоваться при расчете параметров и режимов электроэнергетических систем, являющихся одним из объектов изучения студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Теоретическая часть

Применяют следующие способы пуска ДПТ:

1) Прямой пуск. В этом случае $E_a=0$ ($n=0$)

$$I_n = \frac{U}{R_a} \quad (27.1)$$

т.к. $R_{a*}=0,02 \div 0,1$, то $I_n=(10 \div 50)I_n \rightarrow$ такой пуск допустим только в маломощных машинах, где R_{a*} , больше.

2) Пуск с помощью пускового реостата;

Последовательно с якорем включают пусковое сопротивление R_n , тогда:

$$I_n = \frac{U}{R_a + R_n}, \quad (27.2)$$

при пуске R_n отключают последовательно отдельными ступенями и скорость достигает номинального значения.

3) Пуск при понижении напряжений. 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:

$$\gamma = \frac{t_n}{T}, \quad (27.3)$$

или величину угла зажигания тиристорov α меняют среднее значение U , которое и определяет ток I и n .

Способы регулирования частоты вращения ДПТ n следуют из уравнения скоростной характеристики:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi_\sigma}. \quad (27.4)$$

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 КПД, т.к. U и I_a при этом не меняются, а потери на возбуждение падают. Диапазон ограничен условиями механической прочности и коммутацией.

2) Регулирование включением в цепь якоря регулировочного реостата, при этом:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_p)}{C_e \Phi_\delta}. \quad (27.5)$$

Скорость изменяется вниз от номинальной, плавно, но при этом резко уменьшается КПД из-за потерь в реостате.

3) Регулирование изменением подводимого к якору U .

Это также плавный способ и экономичный, т.к. нет дополнительных источников потерь. Способ регулирует скорость в широком диапазоне вниз от номинальной скорости.

Пример. ДПТ 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 $R_a = 0,15$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_b = 88$ 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_n , 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:

$$I_e = U_n / R_e = 440 / 88 = 5 \text{ А.}$$

Ток в обмотке якоря:

$$I_{an} = I_n - I_e = 67 - 5 = 62 \text{ А.}$$

Начальный пусковой ток якоря при заданной кратности пускового тока 2,5:

$$I_{an} = 2,5I_n = 2,5 \cdot 62 = 155 \text{ А.}$$

Требуемое сопротивление цепи якоря при заданной кратности тока 2,5:

$$R_a = R_{np} + \Sigma r = U_n / I_{an} = 440 / 155 = 2,83 \text{ Ом.}$$

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 $\Delta U_{щ} = 0$):

$$E_{a0} = U_n - I_{a0} \Sigma r = 440 - 3,68 \cdot 0,15 = 439 \text{ В.}$$

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:

$$\Delta n_n = \frac{n_0 - n_n}{n_n} 100 = \frac{1540 - 1500}{1500} 100 = 2,66 \text{ \%}.$$

Задания

1. В таблице 27.1 приведены данные каталога на двигатели постоянного тока независимого возбуждения серии 2П: номинальная мощность P_n , номинальное напряжение U_n , номинальная частота вращения n_n , КПД двигателя η_n , сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, R_a . Требуется определить сопротивление добавочного резистора R_d , который следует включить в цепь якоря, чтобы при номинальной нагрузке двигателя частота вращения якоря составила $0,5n_n$; построить естественную и искусственную механические характеристики двигателя.

Таблица 27.1 – Каталожные данные на двигатели постоянного тока независимого возбуждения серии 2П

Тип двигателя	P_n , кВт	U_n , В	n_n , об/мин	η_n , %	R_a , Ом
2ПО200L	7,1	220	750	83,5	0,48
2ПО200M	20	440	2200	90	0,28
2ПФ200M	30	440	2200	90	0,22
2ПФ200L	20	220	1000	85,5	0,18
2ПН225M	37	220	1500	86,5	0,07
2ПФ225M	10	220	500	74,5	0,58
2ПО180M	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 $R_d = 3$ 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 номинального момента на валу и тока возбуждения частота вращения двигателя уменьшилась вдвое? Сопротивление цепи якоря $R_a = 0,04$ Ом, сопротивление цепи возбуждения $R_\phi = 54$ Ом, КПД двигателя 89 %.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к пуску 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: 1, 3, 4.

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. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
3. Токарев, Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие / Б. Ф. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
4. Читечян В. И. Электрические машины. Сборник задач: учебное пособие для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1988. – 231 с.
5. Вольдек, А. И. Электрические машины : машины переменного тока : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. [и др.]: СПб: Питер, 2008. – 349 с.

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по организации самостоятельной работы

«Электрические машины»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника Направленность (профиль) Цифровые технологии в
электроэнергетике
Изучается в 4, 5 семестре

Ставрополь
2025

Оглавление

Введение	3
Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины.....	4
План-график выполнения самостоятельной работы	7
Методические рекомендации по изучению теоретического материала	9
Методические указания по подготовке к практическим занятиям.....	22
Методические указания по подготовке к лабораторным работам.....	23
Методические указания по выполнению курсового проекта.....	24
1 Структура и содержание курсового проекта.....	24
2 Оформление пояснительной записки.....	25
3 Оформление графической части.....	31
4 Отзыв руководителя.....	33
Методические указания по подготовке к экзамену	35
Список рекомендуемой литературы.....	37
Приложение А	38
Приложение Б	39

Введение

Самостоятельная работа является внеаудиторной и предназначена для самостоятельного изучения определенных тем дисциплины по материалам, рекомендованным преподавателем, а также в порядке подготовки к практическим занятиям и лабораторным занятиям.

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.

Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины

Основная задача высшего образования заключается в формировании творческой личности специалиста, способного к саморазвитию, самообразованию, инновационной деятельности. Решение этой задачи вряд ли возможно только путем передачи знаний в готовом виде от преподавателя к студенту. Для решения этой задачи в учебные планы всех специальностей включена самостоятельная работа.

В широком смысле под самостоятельной работой студентов следует понимать совокупность всей самостоятельной деятельности студентов как в учебной аудитории, так и вне ее, в контакте с преподавателем и в его отсутствие.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется студентом по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

Содержание внеаудиторной самостоятельной определяется в соответствии с рекомендуемыми видами заданий согласно примерной и рабочей программ учебной дисциплины. Видами заданий для внеаудиторной самостоятельной работы являются:

- для овладения знаниями: чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы), составление плана текста, графическое изображение структуры текста, конспектирование текста, выписки из текста, работа со словарями и справочниками, ознакомление с нормативными

документами, учебно-исследовательская работа, использование аудио- и видеозаписей, компьютерной техники и Интернета и др.

- для закрепления и систематизации знаний: работа с конспектом лекции, обработка текста, повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио и видеозаписей, составление плана, составление таблиц для систематизации учебного материала, ответ на контрольные вопросы, заполнение рабочей тетради, аналитическая обработка текста (аннотирование, рецензирование, реферирование, конспект-анализ и др), подготовка мультимедиа сообщений/докладов к выступлению на семинаре (конференции), подготовка реферата, составление библиографии, тематических кроссвордов, тестирование и др.

- для формирования умений: решение задач и упражнений по образцу, решение вариативных задач, выполнение чертежей, схем, выполнение расчетов (графических работ), решение ситуационных (профессиональных) задач, подготовка к деловым играм, проектирование и моделирование разных видов и компонентов профессиональной деятельности, опытно экспериментальная работа, рефлексивный анализ профессиональных умений с использованием аудио- и видеотехники и др.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов. Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов может осуществляться в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине и внеаудиторную самостоятельную работу студентов по дисциплине, может проходить в письменной, устной или смешанной форме.

Следует с первых дней обучения в вузе приучать себя к целесообразному распределению занятий по месяцам и неделям семестра.

При этом очень важна равномерная работа как основное условие успешных занятий в вузе.

Высшей ступенью обучения является приобретение навыков самостоятельной творческой работы, а творческому применению знаний нужно учиться параллельно с их приобретением.

Задачами самостоятельной работы студентов по дисциплине «Учет, контроль и управление энергетическими ресурсами» являются:

- формирования готовности студентов к поиску, обработке и применению информации для решения профессиональных задач;
- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- развитие познавательных способностей и активности студентов, творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- выработка навыков эффективной самостоятельной профессиональной деятельности.

План-график выполнения самостоятельной работы

Общий объём самостоятельной работы в рамках изучения дисциплины «Электрические машины» составляет 94,5 часа.

В структуре самостоятельной работы предусмотрено самостоятельное изучение теоретического материала, подготовка к практическим и лабораторным занятиям, выполнение курсового проекта.

Для лучшего усвоения *практических вопросов*, рассматриваемых на практических занятиях, в разделе самостоятельной работы предусмотрено самостоятельное решение задач.

Задачи выдает преподаватель в конце практического занятия согласно графику учебного процесса. Для самостоятельного решения следует использовать литературу [1–2]. Форма отчётности – наличие решённых задач, представленных в рукописном виде, правильность выполнения которых проверяет преподаватель и делает соответствующие пометки в журнале.

Технологическая карта самостоятельной работы обучающегося

Код реализуемой компетенции	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объем часов
4 семестр				
	Изучение литературы по темам № 1-18	Конспект	Собеседование	12
	Подготовка к лабораторным занятиям	Отчет по лабораторной работе	Собеседование	12
	Подготовка к практическим занятиям	Оформленные в тетради задачи	Отчет	12
	Подготовка к экзамену	Экзамен	Зачетное	36

			задание	
	Итого за 4 семестр			72
	Изучение литературы по темам № 19-36	Конспект	Собеседование	14
	Подготовка к лабораторным занятиям	Отчет по лабораторной работе	Собеседование, тестирование	14
	Подготовка к практическим занятиям	Оформленные в тетради задачи	Собеседование	14
	Подготовка курсового проекта	Записка к курсовому проекту, чертеж	Защита курсового проекта	48
	Подготовка к экзамену	Экзамен	Зачетное задание	36
	Итого за 5 семестр			126
	Итого			198

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Большая часть самостоятельной работы студента состоит в **изучении литературы**. Одна из задач студента – научиться самостоятельно работать с книгой, а это требует определенных затрат энергии и времени. Поэтому надо научиться делать эту работу рационально, то есть необходимо учиться читать.

Как работать с учебной и научной книгой

Методы эффективной работы с книгой в целях развития интеллекта можно условно разделить на две группы:

1. Правильная организация процесса чтения
2. Повышение скорости чтения и восприятия.

В комплексе оба метода могут в 2-3 раза сократить время прочтения различных материалов.

При чтении текста мозг формирует «свою трактовку содержания» прочитанного. Происходит перекодирование сообщения на языке собственных мыслей читателя. Мозг выделяет «ядерное», сущностное значение из текста. Эффективность такой перекодировки зависит от осмысления и внимательности чтения.

Как показали эксперименты, знание и умелое применение некоторых упражнений дают возможность извлекать «ядерное» значение в тексте быстро и надежно. Эти упражнения основаны на использовании дифференциального алгоритма чтения. Центральное место в этом алгоритме занимает «блок доминанта». Это слово в переводе с латинского языка означает «господствующий, основной, главный». Что же такое доминанта применительно к тексту?

Доминанта – главная смысловая часть текста. Она выражается своими словами, на языке собственных мыслей, является результатом переработки текста, его осмысления в соответствии с индивидуальными особенностями читателя, выявления основного замысла автора.

Дифференциальный алгоритм чтения в соответствии с блоками позволяет реализовать логико-семантический анализ текста: вначале выделить ключевые слова, затем построить смысловые ряды и, наконец, выделив цепь знаний, сформулировать доминанту. Именно так и только так (по О.А. Андрееву) можно увидеть главное, действительно, проникнуть в суть вещей, явлений, излагаемых автором.

Возможны три основных способа чтения.

- Первый способ – артикуляция или проговаривание вслух (или почти вслух) того, что читаешь. Скорость такого чтения невелика.

- Второй способ – чтение про себя, при котором речевой процесс проявлен в форме внутренней речи, то есть без открытой артикуляции. Текст, при этом усваивается более эффективно. Способ в принципе допускает быстрое чтение.

- Третий, наиболее совершенный способ чтения – тоже молча, но в условиях максимального сжатия внутренней речи, при котором она проявляется в виде коротких залпов ключевых слов и смысловых рядов, адекватно отражающих смысл текста.

Итак, артикуляция замедляет процесс чтения и от нее необходимо избавиться. Однако не приведет ли сокращение артикуляции при повышении скорости чтения к снижению качества восприятия и осмысления полученной информации?

Как показали исследования психологов, иногда при чтении слова могут быть заменены наглядными представлениями, пространственными схемами. Целые группы слов – одним словом.

Быстро читающие люди обладают способностью, не проговаривая читаемый текст, сразу улавливать и фиксировать замысел автора, а затем усваивать его на уровне внутренней речи. В этом случае, несмотря на высокую скорость чтения, происходит глубокое понимание и усвоение прочитанного, так как основная идея понятна с самого начала. Задачу научиться такому чтению можно решать в два этапа. Первый предполагает

сокращение артикуляции, если она ярко выражена, второй – овладение приемами чтения, при которых текст воспринимается крупными информационными блоками.

Перед углубленным чтением любого текста (статьи, книги, конспекта, лекции перед экзаменом) сначала бегло просмотрите его целиком. При этом постарайтесь выявить основные стержневые идеи, наиболее крупные части и логику их изложения. Лишь после такого просмотра переходите к более детальному чтению.

Перед чтением статьи или параграфа учебника попробуйте проделать следующее: прочитайте внимательно первый абзац, потом бегло просмотрите первые или последние фразы следующих абзацев (в них обычно содержится основная информация), обратите внимание на курсивы, разрядки, подзаголовочный текст и, наконец, внимательно прочтите один-два последних абзаца; постарайтесь выявить основное направление текста и его построение.

Прочитав в тексте интересную идею, полезно остановить свое внимание на ней, прислушаться к тем мыслям, которые она у вас вызвала, подумать о тех последствиях, которые из нее вытекают, попытаться развивать ее дальше.

Существенно замедляют чтение регрессии – частые возвратные движения глаз, многократное повторное прочитывание материала. Возвратиться к уже прочитанному, но недостаточно хорошо понятому участку лучше всего, когда прочитан законченный смысловой фрагмент текста и сделана хотя бы попытка его осмысления, а не в процессе чтения предложения.

Любой текст не однороден по своей информационной насыщенности. В некоторых предложениях, абзацах сконцентрировано очень много информации, например, формулируются основные положения, ведущие идеи и т.д., а другие служат лишь иллюстрацией, фоном. Таким образом, текст имеет «смысловой рельеф». Чем точнее читатель умеет определить степень

важности каждого отрезка текста и приспособить к «смысловому барьеру» способ своего чтения (то есть замедлить и углубить в более важных местах и ускорять в менее важных), тем продуктивнее чтение. Постарайтесь гибко варьировать способ работы с текстом в соответствии с его «смысловым барьером».

Чтобы чтение было эффективным, попробуйте по прочитанному всегда отвечать на 6 вопросов: *«Кто делает? Что делает? Когда? Почему? Где? Как?»*

Формы ведения записей

Самостоятельная работа с книгой может быть успешной, если текст не только прочитан, но и конспектирован. Существует несколько **форм записей**, но любая форма записи не даст нужного результата, если не будет пробуждать мысли того, кто ее ведет, если отсутствует активная работа ума и формирование своих выводов из прочитанного.

Выбор формы записи зависит от индивидуальных особенностей человека, его образованности и опыта. При этом не меньшую роль играет назначение записей, то есть то, какие задачи ставит перед собой человек (для самообразования, для выступления на семинаре, для использования в будущем).

Введение записей мобилизует наряду со зрительной памятью, также и моторную память. Кроме того, у человека, систематически ведущего записи изучаемой литературы, создается свой фонд материалов для быстрого повторения и мобилизации накопленных знаний.

Все записи должны быть убористыми и компактными. Интервалы между строками должны быть достаточными, чтобы вписывать дополнения. Рекомендуется вести записи ручкой, а карандашом или ручкой другого цвета пользоваться для отметок и выделений при последующей работе. Полезно также датировать записи.

Записи могут носить различный характер: план, выписки, тезисы, аннотирование, конспектирование, реферирование.

1. План - наиболее краткая формой записи.. Это перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. План обычно раскрывает структуру произведения, логику автора, способствует лучшей ориентации в содержании.

Так, составленным планом можно воспользоваться, чтобы вспомнить прочитанное или быстро отыскать в книге нужное место. Представление об основных пунктах плана дает оглавление книги, поэтому во многих случаях наименования глав и разделов можно использовать в качестве пунктов. Составление плана приучает логически мыслить, вырабатывать умение сжато и последовательно излагать суть вопроса в письменной и устной форме.

Существует два способа составления плана: работа над ним по ходу чтения и составление плана после ознакомления с произведением. При этом план получается более последовательным и стройным.

Трудность составления плана состоит в том, что надо выяснить для себя, прежде всего, построение изучаемого текста, ход мыслей автора и лишь затем изложить содержание работы кратко и ясно. При всей своей краткости план дает представление о содержании прочитанного. Следует учесть, что форма плана не исключает цитирования отдельных мет и обобщений. Различают простой и развернутый план. В отличие от простого плана развернутый план не только содержит перечисление вопросов, но и раскрывает основные идей произведения, может включать выдержки из него, схемы, таблицы. Планом, особенно развернутым, необходимо пользоваться при написании выступления или статьи.

В целом развернутый план дает гораздо большее представление о произведении, его основных идеях, задачах, которые в нем решаются. Он может включать положения, замечания, собственные мысли студента.

Важно знать, что составление планов помогает вырабатывать способность к отвлеченному, абстрактному мышлению, но наибольшую пользу составление плана даст подготовленным лицам, которые бывают

достаточно лишь взглянуть на перечень основных вопросов, чтобы воспроизвести содержание прочитанного.

2. Тезисы – более сложная и совершенная форма записи, чем составление плана.

Это сжатое изложение основных мыслей прочитанного произведения или подготовляемого вступления. Особенностью тезисов является их утвердительный характер.

В них сосредотачивается самое главное, только выводы и обобщения, в них меньше доказательств, иллюстрации и пояснений. Тезисы не должны повторять дословно текст, но в ряде мест могут быть близки к нему, воспроизводя некоторые характерные выражения автора, важные для понимания хода его мыслей. Составление тезисов помогает глубже понять основные идеи произведения, выделить главное в нем; приучают сжато, точно и четко сформулировать свои мысли, повышает культуру речи и письма. При составлении тезисов учитывают следующее. Прежде всего, если произведение небольшое, необходимо внимательно изучать его в целом, если большое – изучать по главам и разделам. Затем, когда будут ясны основные идеи, кратко и последовательно излагать их в виде пунктов.

Различают простые и сложные, развернутые тезисы. Если записывают только утверждение чего – либо, такой тезис называют простым, а сложным тезисом будет выражение главной мысли, содержащее, кроме утверждения, еще и краткое ее доказательство.

Часто тезисы формулируются самим автором как выводы и обобщения в заключении книги или разделах книги. Нередко тезисы выделяются в тексте другим шрифтом.

Рекомендуется делать тезисные записи своими словами, причем можно записывать один абзац за другим, учитывая смысловую связь между ними. Но в большинстве случаев следует составлять сводный тезис, сложный по форме. При этом объединяется несколько утверждений, тесно связанных между собой.

Тезисы по содержанию очень близки к **конспекту**, но конспект носит более описательный характер, и его положения не столь категоричны, как в тезисах. Кроме того, конспект представляет собой более полную форму записи.

Следует отметить, что различие между формами записей условно, но в любой форме запись – важнейшая часть самостоятельной работы с книгой.

3. Выписки. Это записи текста из книги: теоретических положений, статистических данных, имеющих по мнению читателя важное значение.

Достоинство выписок состоит в точности воспроизведения текста книги, удобстве пользования записями при последующей работе, в накоплении обобщений и фактического материала. Выписки полезны для повторения, освежения в памяти прочитанного, для быстрой мобилизации своих знаний, когда необходимо в короткий срок вспомнить материал. Выписки выделяют из текста самое главное и тем самым помогают глубже понять его. Без них трудно обойтись при подготовке доклада, реферата, выступления. Выписки следует рассматривать как составную часть тезисов и конспектов.

Выписывать текст можно и по ходу чтения и после его завершения. В последнем случае надо замечать места, которые потом будут выписаны. Необходимо каждую выписку снабжать ссылкой на источник с указанием соответствующей страницы. Это нужно, чтобы в последствии можно было быстро найти в книге соответствующее место. Целесообразно выписывать из текста только такие места, в которых содержится самое главное, суть вопроса. Выписки должны быть ориентированы на изучение произведения в целом, а не отдельных мест, поскольку положения, вырванные из общего контакта, понимаются нередко совсем не так, как этого хотел автор. Иначе говоря, отдельно взятые, лишённые пояснений выдержки могут быть не поняты или поняты неправильно.

Выписки бывают дословные (цитаты) и «свободные», когда мысли автора излагаются своими словами. Следует учесть, что большие отрывки,

которые трудно цитировать, целесообразнее в краткой форме переложить своими словами, но «яркие» и важные места лучше выписывать дословно. Каждую цитату следует заключать в кавычки. Если ее берут из середины предложения, то после вводных кавычек ставят три точки. Ставят их и в конце цитаты, если из предложения опущены последние слова.

Следует знать, что какого-либо единого метода выписок, годного для всех случаев, не существует, поскольку у каждого человека свои особенности мышления и восприятия, свой подход к теме. Все это влияет на содержание и характер выписок.

Выписки рекомендуется хранить в картотеке, конвертах или папках, на которых следует обозначить общую тему.

4. Аннотация – еще одна форма записи, являющаяся кратким обобщением содержания книги. Ею удобно пользоваться, если имеется намерение вернуться к изучаемому произведению. Аннотация может быть необходима и для того, чтобы не забыть о нем.

Для составления аннотации надо сначала полностью прочитать и глубоко продумать произведение. При всей своей краткости аннотация может содержать отдельные фрагменты авторского текста, а не только оценку книги или статьи.

5. Резюме очень близко к аннотации. Это запись, являющаяся краткой оценкой прочитанного материала. Различие между ними состоит в том, что аннотация сжато характеризует произведение в целом, а резюме концентрирует внимание на его выводах, главных итогах.

6. Конспект – наиболее совершенная и наиболее сложная форма записи. Слово «конспект» происходит от латинского «conspectus», что означает «обзор, изложение». В правильно составленном конспекте обычно выделено самое основное в изучаемом тексте, сосредоточено внимание на наиболее существенном, в кратких и четких формулировках обобщены важные теоретические положения.

Конспект представляет собой относительно подробное, последовательное изложение содержания прочитанного. На первых порах целесообразно в записях ближе держаться тексту, прибегая зачастую к прямому цитированию автора. В дальнейшем, по мере выработки навыков конспектирования, записи будут носить более свободный и сжатый характер.

Конспект книги обычно ведется в тетради. В самом начале конспекта указывается фамилия автора, полное название произведения, издательство, год и место издания. При цитировании обязательная ссылка на страницу книги. Если цитата взята из собрания сочинений, то необходимо указать соответствующий том. Следует помнить, что четкая ссылка на источник – неременное правило конспектирования. Если конспектируется статья, то указывается, где и когда она была напечатана.

Конспект подразделяется на части в соответствии с заранее продуманным планом. Пункты плана записываются в тексте или на полях конспекта. Писать его рекомендуется четко и разборчиво, так как небрежная запись с течением времени становится малопонятной для ее автора. Существует правило: конспект, составленный для себя, должен быть по возможности написан так, чтобы его легко прочитал и кто-либо другой.

Формы конспекта могут быть разными и зависят от его целевого назначения (изучение материала в целом или под определенным углом зрения, подготовка к докладу, выступлению на занятии и т.д.), а также от характера произведения (монография, статья, документ и т.п.). Если речь идет просто об изложении содержания работы, текст конспекта может быть сплошным, с выделением особо важных положений подчеркиванием или различными значками.

В случае, когда не ограничиваются переложением содержания, а фиксируют в конспекте и свои собственные суждения по данному вопросу или дополняют конспект соответствующими материалами их других источников, следует отводить место для такого рода записей. Рекомендуется разделить страницы тетради пополам по вертикали и в левой части вести

конспект произведения, а в правой свои дополнительные записи, совмещая их по содержанию.

Конспектирование в большей мере, чем другие виды записей, помогает вырабатывать навыки правильного изложения в письменной форме важные теоретических и практических вопросов, умение четко их формулировать и ясно излагать своими словами.

Таким образом, составление конспекта требует вдумчивой работы, затраты времени и труда. Зато во время конспектирования приобретаются знания, создается фонд записей.

Конспект может быть текстуальным или тематическим. В **текстуальном конспекте** сохраняется логика и структура изучаемого произведения, а запись ведется в соответствии с расположением материала в книге. За основу тематического конспекта берется не план произведения, а содержание какой-либо темы или проблемы.

Текстуальный конспект желательно начинать после того, как вся книга прочитана и продумана, но это, к сожалению, не всегда возможно. В первую очередь необходимо составить план произведения письменно или мысленно, поскольку в соответствии с этим планом строится дальнейшая работа. Конспект включает в себя тезисы, которые составляют его основу. Но, в отличие от тезисов, конспект содержит краткую запись не только выводов, но и доказательств, вплоть до фактического материала. Иначе говоря, конспект – это расширенные тезисы, дополненные рассуждениями и доказательствами, мыслями и соображениями составителя записи.

Как правило, конспект включает в себя и выписки, но в него могут войти отдельные места, цитируемые дословно, а также факты, примеры, цифры, таблицы и схемы, взятые из книги. Следует помнить, что работа над конспектом только тогда будет творческой, когда она не ограничена текстом изучаемого произведения. Нужно дополнять конспект данными из другими источниками.

В конспекте необходимо выделять отдельные места текста в зависимости от их значимости. Можно пользоваться различными способами: подчеркиваниями, вопросительными и восклицательными знаками, репликами, краткими оценками, писать на полях своих конспектов слова: «важно», «очень важно», «верно», «характерно».

В конспект могут помещаться диаграммы, схемы, таблицы, которые придадут ему наглядность.

Составлению **тематического конспекта** предшествует тщательное изучение всей литературы, подобранной для раскрытия данной темы. Бывает, что какая-либо тема рассматривается в нескольких главах или в разных местах книги. А в конспекте весь материал, относящийся к теме, будет сосредоточен в одном месте. В плане конспекта рекомендуется делать пометки, к каким источникам (вплоть до страницы) придется обратиться для раскрытия вопросов. Тематический конспект составляется обычно для того, чтобы глубже изучить определенный вопрос, подготовиться к докладу, лекции или выступлению на семинарском занятии. Такой конспект по содержанию приближается к реферату, докладу по избранной теме, особенно если включает и собственный вклад в изучение проблемы.

Следующим методом самостоятельной работы с книгой является **реферирование** на определенную тему. Слово реферат употребляется в двух различных значениях:

1. Краткое изложение содержания книги, научной работы;
2. Доклад за заданную тему на основе критического образа литературных источников.

7. Реферат – это один из самых сложных видов самостоятельной работы с книгой, а для этого следует овладеть более простыми приемами работы – разработкой плана, составлением тезисов и конспектов. Подготовка реферата и выступление с его изложением углубляет знания, расширяет кругозор, приучает логически, творчески мыслить, развивать культуру речи.

При просмотре литературы намечается ориентировочный план реферата, в который включается обычно 3-4 основных вопроса или раздела. Каждом из разделов формулируются подвопросы, помогающие последовательно раскрыть содержание проблемы.

В процессе изучения материала формулировки подвопросов и разделов обычно уточняются. При реферировании следует делать выписки, записывать мысли, возникающие при чтении; следует также точно записывать и определения тех понятий, которые будут использованы в реферате. Из прочитанной литературы нужно заимствовать не буквальный текст, а важнейшие мысли, идеи, теоретические положения; можно цитировать небольшие отрывки, приводить диаграммы, схемы, чертежи, но главное – высказывать собственные соображения по вопросам реферата. Приведенные выше советы следует рассматривать как примерные, предполагающие и другие подходы, поскольку у каждого человека вырабатываются свои приемы и навыки составления рефератов. Большую помощь в работе над рефератом оказывают предисловия к монографиям и сборникам. В них можно найти сведения о цели издания, а также о существующих пробелах в исследовании.

При разработке плана реферата важно учитывать, чтобы каждый его пункт раскрывал одну из сторон избранной темы, а все пункты в совокупности охватывали тему целиком. Различают несколько композиционных решений реферата: во-первых, хронологическое, когда тема раскрывается в исторической последовательности; во-вторых, описательное, при котором тема расчленяется на составные части, в целом раскрывающие определенное явление; в-третьих, аналитическое, когда тема исследуется в ее причинно-следственных связях и взаимозависимых проблемах. Важно следить за тем, чтобы каждый пункт плана был соотнесен с главной темой и не содержал повторения в других пунктах. Важными разделами реферата является вступление и заключение. Во вступлении надо обосновать актуальность темы, обозначить круг составляющих ее проблем, четко и

кратко определить задачу своей работы. В заключении делаются краткие выводы, подводятся итоги. В конце реферата должен быть приложен список литературы.

В отличие от тематического конспекта реферат требует большей творческой активности, самостоятельности в обобщении изученной литературы, умения логически стройно изложить материал, оценить различные точки зрения на исследуемую проблему и высказать о ней собственное мнение. В реферате важно связать теоретические положения с практикой.

Итак, реферат – это самостоятельное произведение автора, которое должно свидетельствовать о знании литературы по данной теме, ее основной проблематике, отражать точку зрения автора реферата на эту проблематику, его умение осмысливать явления жизни на основе теоретических знаний.

При оценке реферата обычно руководствуются следующими критериями:

1. Удалось ли его автору раскрыть сущность данной проблемы;
2. Сумел ли автор показать связь рассматриваемой проблемы с жизнью;
3. Проявил ли автор самостоятельность и творческий подход в изложении реферата;
4. Можно ли считать реферат логически стройным и т.д.

Методические указания по подготовке к практическим занятиям

На практических занятиях реализуется решение задач согласно текущей теме на развитие способностей к творческому использованию получаемых знаний и навыков. В ходе подготовки к занятиям студенту следует просмотреть материалы лекции, а затем начать изучение учебной литературы.

Студенту рекомендуется следующая схема подготовки к семинарскому занятию:

1. Проработать конспект лекций;
2. Прочитать основную и дополнительную литературу, рекомендованную по изучаемому разделу;
3. Ответить на вопросы занятия;
4. Выполнить домашнее задание;
5. Проработать тестовые задания и задачи;
6. При затруднениях сформулировать вопросы к преподавателю.

Методические указания по подготовке к лабораторным работам

На лабораторных занятиях студенты работают с учебными стендами, проводят эксперименты на оборудовании, аналогичном используемому в промышленности. В ходе подготовки к занятиям студенту следует просмотреть материалы лекции, а затем начать изучение учебной литературы, оформить отчет.

Студенту рекомендуется следующая схема подготовки к семинарскому занятию:

1. Проработать конспект лекций;
2. Прочитать основную и дополнительную литературу, рекомендованную по изучаемому разделу;
3. Ответить на вопросы занятия;
4. Оформить отчет;
5. Проработать тестовые задания и задачи;
6. При затруднениях сформулировать вопросы к преподавателю.

Методические указания по выполнению курсового проекта

1 Структура и содержание курсового проекта

Курсовой проект (КП) состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка оформляется в программе Microsoft Word и должна содержать:

- титульный лист КП (Приложение А),
- задание на КП,
- содержание,
- введение,
- основной расчетный раздел,
- заключение,
- список использованных источников,

Содержание включает введение, перечень всех разделов, заключение, список использованных источников, с указанием страниц, с которых начинаются эти элементы. Слово «Содержание» записывают в виде заголовка.

Введение содержит обоснование проблемы, ее актуальность, цель и задачи проектирования, определение теоретической и (или) практической значимости работы. Рекомендуемый объем – не более 1 страницы машинописного текста.

Список используемой литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа к оформлению библиографии; в нем указываются все использованные студентом источники научной и технической литературы и документации.

Графическая часть включает в себя чертеж проектируемой машины (в двух проекциях) с продольным и поперечным разрезом, выполненный на листе формата А1

2 Оформление пояснительной записки

Пояснительная записка к КП относится к текстовым документам и должна соответствовать требованиям ГОСТ 2.105-95 и ГОСТ 2.106-96.

Текст КП выполняют с использованием программы Microsoft Word на одной стороне листа белой бумаги, формата А4, шрифт – Times New Roman 14-го размера, межстрочный интервал – 1,5. Номер страницы проставляют в правом нижнем углу листа. Страницы текстового материала следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему документу. Титульный лист текстового документа включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют. Расстояние от края бумаги до границ текста следует оставлять: в начале строк – 30 мм; в конце строк – 15 мм; от верхней или нижней строки текста до верхнего или нижнего края бумаги – 20 мм. Размер абзацного отступа должен быть одинаковым по всему тексту работы и равным 12,5 мм. Выравнивание текста – по ширине.

Текст пояснительной записки КП делится на разделы, которые должны содержать заголовок, соответствующий содержанию работы.

Каждый раздел и основные структурные части работы: введение, заключение, список использованных источников и приложения следует начинать с нового листа (см. пример). После заголовка текст расчетно-пояснительной записки начинается с абзацного отступа (1,25 см).

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего КП, обозначенные арабскими цифрами. После цифры следует заголовок раздела. Между номером и заголовком точка не ставится. Заголовки следует писать с прописной буквы без точки в конце. Переносы слов в заголовках не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Подчеркивание заголовка не допускается. Заголовок разделов отделяют от текста интервалом в одну строку. Каждый раздел пояснительной записки рекомендуется начинать с

новой страницы (к разделам приравниваются: введение, заключение, список литературы, приложения и т.д.). Выравнивание заголовков разделов – по центру. Заголовок выделяется жирным шрифтом.

Например:

1 Выбор главных размеров Предварительное значение КПД электродвигателя выбираем по рисунку и т.д

Повреждение листов, помарки текста или графической части не допускаются. Пояснительная записка должна быть сброшюрована с помощью скоросшивателя.

Номер страницы проставляют в правом нижнем углу листа. Страницы текстового материала следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему документу. При нумерации страницы считаются от первой (титульный лист КП), вторая страница – задание на КП, а проставляется нумерация, начиная с содержания.

При ссылке в тексте на источник, описание которого включено в библиографический список, в тексте пояснительной записки после упоминания о нем проставляют в прямых квадратных скобках номер, под которым он значится в библиографическом списке и, в необходимых случаях, страницы, например: [3], [12], [26, с. 125].

Недопустимо отделять единицу физической величины от числового значения (переносить их на разные строки или страницы), кроме единиц физических величин, помещаемых в таблицах.

Оформление формул. В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими стандартами. Формулы должны быть набраны в редакторе формул. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения

каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где», без двоеточия после, без абзацного отступа.

Формулы, должны иметь сквозную нумерацию в рамках раздела арабскими цифрами, которые записываются на уровне формулы справа в круглых скобках. Первая цифра соответствует номеру раздела, а вторая – порядковому номеру формулы в данном разделе. Эти цифры разделяются точкой. Например, (3.1) – первая формула третьего раздела. Выравнивание формулы – по центру.

Например:

Выбор сечений по нагреву осуществляется по расчетному току в нормальном и послеаварийном режимах по следующим выражениям:

в нормальном режиме:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}; \quad (1.3)$$

в послеаварийном режиме:

$$I_{\max p} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (1.4)$$

где S_p – расчетная мощность линии, кВА;

n – число линий;

U_n – номинальное напряжение сети, кВ.

В том случае, если формула представляет собой вычисление по приведенной ранее формуле и содержит числовые значения переменных, нумеровать ее не нужно, выравнивание – по ширине, с абзацного отступа.

Например:

Отсюда экономически целесообразное сечение

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{I_{\text{РН}}}{j_{\text{ЭК}}} = \frac{77,26}{1,7} = 45,45 \text{ мм}^2.$$

Полученное сечение округляем до ближайшего стандартного 50 мм ² .

Формулы, следующие одна за другой и не разделённые текстом, разделяют запятой.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак «х». Не допускаются переносы на знаке деления.

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например: ... в формуле (1.2).

Расчеты, выполняемые с использованием формул, приводят в следующем порядке:

- 1) записывают формулу;
- 2) расшифровывают ее символы;
- 3) подставляют числовые данные в порядке записи символов;
- 4) записывают окончательный результат с указанием размерности.

Обозначение единиц одного и того же параметра в пределах пояснительной записки должно быть постоянным.

После формулы должен ставиться соответствующий знак препинания.

Оформление иллюстраций. Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, эскизы, фотографии) располагают так, чтобы их было удобно рассматривать без поворота или с поворотом по часовой стрелке.

Каждая иллюстрация должна отвечать тексту, а текст – иллюстрации. Необходимые качества любой иллюстрации – наглядность, графическая выразительность, ясность. Используемые чертежи, схемы, графики должны удовлетворять требованиям государственных стандартов, входящих в ЕСКД.

Количество иллюстраций должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста. Иллюстрации могут быть расположены как по тексту документа (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в

конце его или даны в приложении.

Рисунки нумеруются в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой. Иллюстрации следует располагать по центру страницы непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые или на следующей странице. На все иллюстрации должны быть ссылки в тексте.

Надписи под рисунками следует размещать горизонтально, без рамок, вблизи элемента, к которому они относятся. Каждый рисунок должен иметь краткое содержательное название, которое помещается под рисунком по центру в следующем порядке: название иллюстрации «Рисунок», порядковый номер цифрами без символа «№» и далее название иллюстрации. Название рисунка начинается с заглавной буквы, в конце названия точка не ставится. Рисунок и заголовок к нему выравниваются по центру без абзацного отступа.

Например:



Построение таблиц. Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблиц. Таблицу, в зависимости от ее размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице, а, при необходимости, в приложении к документу.

Допускается помещать таблицу вдоль длинной стороны листа документа.

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой, например, в первом разделе пятая таблица – Таблица 1.5.

Если строки или графы таблицы выходят за формат листа, таблицу делят на части, которые, в зависимости от особенностей таблицы, переносят на другие листы или помещают на одном листе рядом или одну под другой. Над продолжением таблицы на новой полосе ставится слева заголовок типа «Продолжение таблицы 3.4» (если таблица на этой полосе не кончается) или «Окончание таблицы 3.4» (если таблица на этой полосе кончается).

Тематический заголовок таблицы выполняется строчными буквами (кроме первой прописной) и помещается над таблицей, выравнивание заголовка – по ширине. Заголовок должен быть точным, кратким и полностью отражать содержание таблицы. Тематический заголовок над продолжением таблицы на новой полосе не повторяют.

На все таблицы должны быть ссылки в тексте, например: «... в таблице 1.1» или (таблица 1.1). Ссылку на таблицу следует помещать после первого упоминания ее данных.

Например:

.....в таблице 1.1 приведены электрические нагрузки завода.

Таблица 9.1– Электрические нагрузки завода по производству оборудования...

№№ цеха на плане	Наименование цехов и участков	Установленная мощность на напряжение 0,4 кВт	
		Р _{уст} , кВт	cosφ
1	2	3	4
1	Литейный цех	1500	0,75
2	Кузнечно-прессовый цех	2340	0,7

Продолжение таблицы 9.1			
1	2	3	4

Список использованных источников. Список использованных источников должен быть оформлен в соответствии с ГОСТом «Библиографическая запись. Библиографическое описание». Пример оформления библиографического списка указано ниже.

1. Гужов Н.П. Системы электроснабжения: учебник / Н.П. Гужов, В.Я. Ольховский, Д.А. Павлюченко. – Ростов н/Д: Феникс, 2011. – 382 с.

2. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии /под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г.Герасимова и др. (гл. ред. А.И.Попов. 8-е изд., испр. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2002. – 964 с.

3 Оформление графической части

Техническая документация выполняется на листах определенных размеров, которые носят название форматов (ГОСТ 2. 301-68). Форматы листов определяются размерами внешней рамки листа. Форматы разделяют на основные и дополнительные.

За основные форматы приняты:

A0 - 841×1189 мм;

A1 - 594×841 мм;

A2 - 420×594 мм;

A3 - 297×420 мм;

A4 - 210×297 мм.

Графическая часть КП оформляется на листах, формата A1.

Вся техническая документация сопровождается основной надписью. Основные надписи располагают в правом нижнем углу технических документов.

Основные надписи, дополнительные графы и рамки выполняют

сплошными основными и сплошными тонкими линиями. В графах основной надписи (ГОСТ 2.104-68) (номера граф на рисунке 1 даны в скобках) указывают:

1 – наименование изделия в соответствии с ГОСТ 2.109-73, или наименование чертежа;

2 – обозначение документа (КП-СКФУ-13.03.02-№ зач.книжки-год защиты);

3 – наименование документа (тема КП);

4 – литеру по ГОСТ 2.103-68 (У);

5 – массу изделия по ГОСТ 2.109-73 (если имеется);

6 – масштаб (в соответствии с ГОСТ 2.302-68 и ГОСТ 2.109-73);

7 – порядковый номер листа (на документах, состоящих из одного листа, графу не заполняют);

8 – общее количество листов документа;

9 – наименование или различительный индекс предприятия, выпускающего документ (номер учебной группы);

10, 11, 12 – характер работы, фамилии и подписи лиц, разработавших документ;

13 – дата подписи документа.

Для чертежа КП применяется основная надпись на рисунке 1 а.

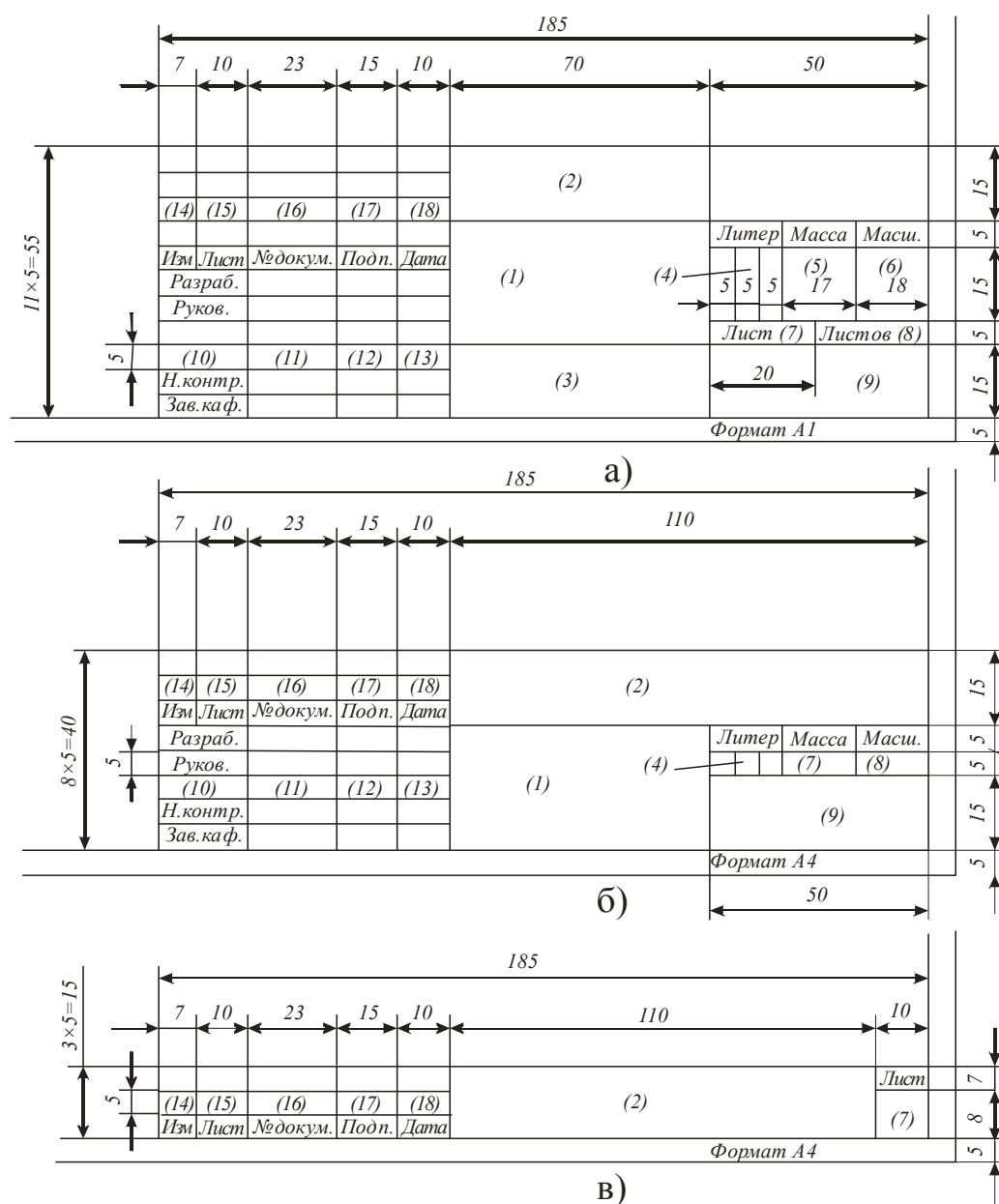


Рисунок 1 –

Основная надпись:

- а) – для чертежей и схем; б) – для текстовых документов;
в) – для последующих листов чертежей, схем и текстовых документов.

4 Отзыв руководителя

Законченный КП подписывается студентом на титульном листе, задании и на последнем листе заключения, представляется руководителю, который составляет на нее отзыв. (Приложение Б)

В отзыве руководителя должны быть отмечены:

- актуальность темы работы,
- степень решенности поставленной задачи,
- степень самостоятельности и инициативности студента,
- умение студента пользоваться специальной литературой,
- способности студента к инженерной или исследовательской работе,
- возможность использования полученных результатов на практике,
- допуск КП к защите.

Методические указания по подготовке к экзамену

Готовиться к экзамену необходимо в течение всего учебного времени, т.е. с первого дня очередного семестра: вся работа студента на лекциях, семинарских занятиях, консультациях, а также написание рефератов и выполнение курсовых работ и т.п. - это и есть этапы подготовки студента к зачетам и экзаменам. Подготовка к сессии должна быть нацелена не столько на приобретение новых знаний, сколько на закрепление ранее изученного материала и повторение его. Сумму полученных знаний студенту перед сессией надо разумно обобщить, привести в систему, закрепить в памяти, для чего ему надо использовать учебники, лекции, консультации, курсовые работы, рефераты и т.п., а также методические пособия и различного рода руководства. Повторение необходимо производить по разделам, темам.

Методика подготовки к сдаче зачета и экзамена одинакова и состоит из двух взаимосвязанных этапов.

1. Регулярное посещение всех учебных занятий в течение всего семестра: лекций, семинарских занятий, консультаций и т.п., а также активное изучение рекомендованной литературы, отработка (в случае необходимости) в установленные сроки всех пропущенных учебных занятий.

2. Непосредственная подготовка к экзамену, когда студенту нужно в короткий срок (2-4 дня) охватить весь изученный материал по предмету и успешно сдать экзамен. А для того, чтобы это успешно сделать, студент, в первую очередь, должен мысленно в спокойной обстановке вспомнить весь материал, изученный за семестр, с тем, чтобы выявить разделы курса (предмета) слабо изученные или плохо понятые при первоначальном изучении с целью устранения пробелов в своих знаниях. Для успешной подготовки к экзаменам студенту необходимо составить себе своеобразный рабочий график, в котором отразился бы последовательный переход от темы к теме, от раздела к разделу. Во время подготовки к экзаменам могут появиться вопросы. Их нужно записать и получить ответ на

предэкзаменационных консультациях. На консультациях преподаватель интересуется, как студентами изучены темы, пройденные в учебном процессе, при необходимости он разъясняет отдельные вопросы этих тем. Иногда преподаватель делает сжатый обзор важнейших тем курса, отмечает те вопросы, на которые студенты, ранее сдававшие экзамен, отвечали плохо. Во время подготовки к экзамену студенту необходимо просмотреть и собственные конспекты прослушанных лекций и самостоятельно проработанных тем семинарских занятий. Это позволит ему восстановить в памяти ранее изученные положения, выявить пробелы в своих знаниях и восполнить их из других источников. Значение предэкзаменационных консультаций очень велико. Они призваны: 1) помочь устранить пробелы в знаниях; 2) помочь систематизировать весь ранее изученный материал; 3) информировать студентов о новейших сведениях по тому предмету, который изучен последним.

Экзамен проводится в форме устного опроса.

Список рекомендуемой литературы

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. : Питер, 2010. - 349 с. : ил. ; 24 см. - (Учебник для вузов). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 341-343. - Алф. указ.: с. 344-349. - ISBN 978-5-469-01381-5, экземпляров неограничено

2. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : [учебник] / А.И. Вольдек, В.В. Попов ; Министерство образования РФ. - СПб. : Питер, 2008. - 320 с. : ил. - (300 лучших учебников для высшей школы). - На учебнике гриф: Доп.МО. - ISBN 978-5-469-01380-8, экземпляров 6

3. Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / [Копылов И.П. и др.] ; под ред. И. П. Копылова. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Юрайт, 2012. - 767 с. : ил., табл. - (Бакалавр. Базовый курс). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 755-756. - Предм. указ.: с. 757-762. - ISBN 978-5-9916-1848-9, экземпляров неограничено

Дополнительная литература:

4. Беспалов, В. Я. Электрические машины : учебник / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Академия, 2013. - 320 с. : ил. - (Бакалавриат). - Доп. УМО. - Прил.: с. 308. - Библиогр.: с. 315. - ISBN 978-5-7695-8497-8, экземпляров 10

5. Копылов, И. П. Электрические машины : учебник для бакалавров / И.П. Копылов ; под ред. И.П. Копылова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2012. - 675 с. - (Бакалавр). - На учебнике гриф: Доп.МО. - Библиогр.: с. 668-669. - ISBN 978-5-9916-1501-3, экземпляров 10

6. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : [учебник] / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. - 2-е изд., перераб. - М. : Высшая школа, 2001. - 432 с. : ил. - На учебнике гриф: Доп.МО. - Библиогр.: с. 428. - ISBN 5-06-003842-4, экземпляров 5

Приложение А

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине
«Электрические машины»
на тему:

«.....»

Выполнил:

Фамилия И.О.
студент 3 курса
группы ЭЭТ-_____
направления 13.03.02
очной формы обучения

(подпись)

Руководитель работы:

Романенко И.Г.,
доцент кафедры АЭСиЭ

Работа допущена к защите _____
(подпись руководителя) (дата)

Работа выполнена и
Защищена с оценкой _____ Дата защиты _____

Члены комиссии	_____	_____	_____
	(должность)	(подпись)	(И.О. Фамилия)
	_____	_____	_____
	_____	_____	_____

Ставрополь, 2024 г.

Приложение Б

Отзыв

на курсовой проект студента 3 курса

ФИО

Тема «.....»

Актуальность:

В связи с этим получение навыков в проектировании и анализе свойств спроектированной машины является актуальной задачей для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02.

На первом этапе были выбраны и проверены

На втором этапе

На заключительном этапе был выполнен проектный чертеж согласно проведенным расчетам.

Проанализирован достаточный объем учебной и технической литературы, а также интернет-ресурсы.

Выводы, сделанные в заключении, соответствуют целям, поставленным во введении.

За время работы студент проявил себя, показал, и т.д.

Таким образом, проект выполнен на *хорошем (оценка, на которую студент претендует)* уровне, соответствует требованиям, предъявляемым к курсовым проектам, и заслуживает *хорошей (оценка, на которую студент претендует)* оценки.

Научный руководитель

кандидат технических наук,

доцент кафедры АЭСиЭ

И.Г. Романенко

«__» _____ 202_ г.

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по курсовому проектированию

«Электрические машины»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника Направленность (профиль) Цифровые технологии в
электроэнергетике

Ставрополь
2024

Оглавление

Введение	3
1 Структура и содержание курсового проекта.....	4
2 Оформление пояснительной записки	5
3 Оформление графической части.....	12
4 Отзыв руководителя.....	15
5 Тематика КП	16
Список рекомендуемой литературы	17
Приложение А	18
Приложение Б	19

Введение

Курсовой проект является частью самостоятельной работы и предназначен для получения навыков самостоятельного изучения определенных тем дисциплины по материалам, рекомендованным преподавателем, и навыков проектирования электрических машин.

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.

1 Структура и содержание курсового проекта

Курсовой проект (КП) состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка оформляется в программе Microsoft Word и должна содержать:

- титульный лист КП (Приложение А),
- задание на КП,
- содержание,
- введение,
- основной расчетный раздел,
- заключение,
- список использованных источников,

Содержание включает введение, перечень всех разделов, заключение, список использованных источников, с указанием страниц, с которых начинаются эти элементы. Слово «Содержание» записывают в виде заголовка.

Введение содержит обоснование проблемы, ее актуальность, цель и задачи проектирования, определение теоретической и (или) практической значимости работы. Рекомендуемый объем – не более 1 страницы машинописного текста.

Список используемой литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа к оформлению библиографии; в нем указываются все использованные студентом источники научной и технической литературы и документации.

Графическая часть включает в себя чертеж проектируемой машины (в двух проекциях) с продольным и поперечным разрезом, выполненный на листе формата А1

2 Оформление пояснительной записки

Пояснительная записка к КП относится к текстовым документам и должна соответствовать требованиям ГОСТ 2.105-95 и ГОСТ 2.106-96.

Текст КП выполняют с использованием программы Microsoft Word на одной стороне листа белой бумаги, формата А4, шрифт – Times New Roman 14-го размера, межстрочный интервал – 1,5. Номер страницы проставляют в правом нижнем углу листа. Страницы текстового материала следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему документу. Титульный лист текстового документа включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют. Расстояние от края бумаги до границ текста следует оставлять: в начале строк – 30 мм; в конце строк – 15 мм; от верхней или нижней строки текста до верхнего или нижнего края бумаги – 20 мм. Размер абзацного отступа должен быть одинаковым по всему тексту работы и равным 12,5 мм. Выравнивание текста – по ширине.

Текст пояснительной записки КП делится на разделы, которые должны содержать заголовок, соответствующий содержанию работы.

Каждый раздел и основные структурные части работы: введение, заключение, список использованных источников и приложения следует начинать с нового листа (см. пример). После заголовка текст расчетно-пояснительной записки начинается с абзацного отступа (1,25 см).

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего КП, обозначенные арабскими цифрами. После цифры следует заголовок раздела. Между номером и заголовком точка не ставится. Заголовки следует писать с прописной буквы без точки в конце. Переносы слов в заголовках не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Подчеркивание заголовка не допускается. Заголовок разделов отделяют от текста интервалом в одну строку. Каждый раздел пояснительной записки рекомендуется начинать с

новой страницы (к разделам приравниваются: введение, заключение, список литературы, приложения и т.д.). Выравнивание заголовков разделов – по центру. Заголовок выделяется жирным шрифтом.

Например:

1 Выбор главных размеров Предварительное значение КПД электродвигателя выбираем по рисунку и т.д

Повреждение листов, помарки текста или графической части не допускаются. Пояснительная записка должна быть сброшюрована с помощью скоросшивателя.

Номер страницы проставляют в правом нижнем углу листа. Страницы текстового материала следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему документу. При нумерации страницы считаются от первой (титульный лист КП), вторая страница – задание на КП, а проставляется нумерация, начиная с содержания.

При ссылке в тексте на источник, описание которого включено в библиографический список, в тексте пояснительной записки после упоминания о нем проставляют в прямых квадратных скобках номер, под которым он значится в библиографическом списке и, в необходимых случаях, страницы, например: [3], [12], [26, с. 125].

Недопустимо отделять единицу физической величины от числового значения (переносить их на разные строки или страницы), кроме единиц физических величин, помещаемых в таблицах.

Оформление формул. В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими стандартами. Формулы должны быть набраны в редакторе формул. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения

каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где», без двоеточия после, без абзацного отступа.

Формулы, должны иметь сквозную нумерацию в рамках раздела арабскими цифрами, которые записываются на уровне формулы справа в круглых скобках. Первая цифра соответствует номеру раздела, а вторая – порядковому номеру формулы в данном разделе. Эти цифры разделяются точкой. Например, (3.1) – первая формула третьего раздела. Выравнивание формулы – по центру.

Например:

Выбор сечений по нагреву осуществляется по расчетному току в нормальном и послеаварийном режимах по следующим выражениям:

в нормальном режиме:

$$I_p = \frac{S_p}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}; \quad (1.3)$$

в послеаварийном режиме:

$$I_{\max p} = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (1.4)$$

где S_p – расчетная мощность линии, кВА;

n – число линий;

U_n – номинальное напряжение сети, кВ.

В том случае, если формула представляет собой вычисление по приведенной ранее формуле и содержит числовые значения переменных, нумеровать ее не нужно, выравнивание – по ширине, с абзацного отступа.

Например:

Отсюда экономически целесообразное сечение

$$F_{\text{ЭК}} = \frac{I_{\text{РН}}}{j_{\text{ЭК}}} = \frac{77,26}{1,7} = 45,45 \text{ мм}^2.$$

Полученное сечение округляем до ближайшего стандартного 50 мм ² .

Формулы, следующие одна за другой и не разделённые текстом, разделяют запятой.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак «х». Не допускаются переносы на знаке деления.

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например: ... в формуле (1.2).

Расчеты, выполняемые с использованием формул, приводят в следующем порядке:

- 1) записывают формулу;
- 2) расшифровывают ее символы;
- 3) подставляют числовые данные в порядке записи символов;
- 4) записывают окончательный результат с указанием размерности.

Обозначение единиц одного и того же параметра в пределах пояснительной записки должно быть постоянным.

После формулы должен ставиться соответствующий знак препинания.

Оформление иллюстраций. Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, эскизы, фотографии) располагают так, чтобы их было удобно рассматривать без поворота или с поворотом по часовой стрелке.

Каждая иллюстрация должна отвечать тексту, а текст – иллюстрации. Необходимые качества любой иллюстрации – наглядность, графическая выразительность, ясность. Используемые чертежи, схемы, графики должны удовлетворять требованиям государственных стандартов, входящих в ЕСКД.

Количество иллюстраций должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста. Иллюстрации могут быть расположены как по тексту документа (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в

конце его или даны в приложении.

Рисунки нумеруются в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой. Иллюстрации следует располагать по центру страницы непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые или на следующей странице. На все иллюстрации должны быть ссылки в тексте.

Надписи под рисунками следует размещать горизонтально, без рамок, вблизи элемента, к которому они относятся. Каждый рисунок должен иметь краткое содержательное название, которое помещается под рисунком по центру в следующем порядке: название иллюстрации «Рисунок», порядковый номер цифрами без символа «№» и далее название иллюстрации. Название рисунка начинается с заглавной буквы, в конце названия точка не ставится. Рисунок и заголовок к нему выравниваются по центру без абзацного отступа.

Например:



Построение таблиц. Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблиц. Таблицу, в зависимости от ее размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице, а, при необходимости, в приложении к документу.

Допускается помещать таблицу вдоль длинной стороны листа документа.

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой, например, в первом разделе пятая таблица – Таблица 1.5.

Если строки или графы таблицы выходят за формат листа, таблицу делят на части, которые, в зависимости от особенностей таблицы, переносят на другие листы или помещают на одном листе рядом или одну под другой. Над продолжением таблицы на новой полосе ставится слева заголовок типа «Продолжение таблицы 3.4» (если таблица на этой полосе не кончается) или «Окончание таблицы 3.4» (если таблица на этой полосе кончается).

Тематический заголовок таблицы выполняется строчными буквами (кроме первой прописной) и помещается над таблицей, выравнивание заголовка – по ширине. Заголовок должен быть точным, кратким и полностью отражать содержание таблицы. Тематический заголовок над продолжением таблицы на новой полосе не повторяют.

На все таблицы должны быть ссылки в тексте, например: «... в таблице 1.1» или (таблица 1.1). Ссылку на таблицу следует помещать после первого упоминания ее данных.

Например:

.....в таблице 1.1 приведены электрические нагрузки завода.

Таблица 9.1– Электрические нагрузки завода по производству оборудования...

№№ цеха на плане	Наименование цехов и участков	Установленная мощность на напряжение 0,4 кВт	
		Р _{уст} , кВт	cosφ
1	2	3	4
1	Литейный цех	1500	0,75
2	Кузнечно-прессовый цех	2340	0,7

Продолжение таблицы 9.1			
1	2	3	4

Список использованных источников. Список использованных источников должен быть оформлен в соответствии с ГОСТом «Библиографическая запись. Библиографическое описание». Пример оформления библиографического списка указано ниже.

1. Гужов Н.П. Системы электроснабжения: учебник / Н.П. Гужов, В.Я. Ольховский, Д.А. Павлюченко. – Ростов н/Д: Феникс, 2011.– 382 с.

2. Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии /под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г.Герасимова и др. (гл. ред. А.И.Попов. 8-е изд., испр. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2002. – 964 с.

3 Оформление графической части

Техническая документация выполняется на листах определенных размеров, которые носят название форматов (ГОСТ 2. 301-68). Форматы листов определяются размерами внешней рамки листа. Форматы разделяют на основные и дополнительные.

За основные форматы приняты:

A0 - 841×1189 мм;

A1 - 594×841 мм;

A2 - 420×594 мм;

A3 - 297×420 мм;

A4 - 210×297 мм.

Графическая часть КП оформляется на листах, формата A1.

Вся техническая документация сопровождается основной надписью. Основные надписи располагают в правом нижнем углу технических документов.

Основные надписи, дополнительные графы и рамки выполняют сплошными основными и сплошными тонкими линиями. В графах основной надписи (ГОСТ 2.104-68) (номера граф на рисунке 1 даны в скобках) указывают:

1 – наименование изделия в соответствии с ГОСТ 2.109-73, или наименование чертежа;

2 – обозначение документа (КП-СКФУ-13.03.02-№ зач.книжки-год защиты);

3 – наименование документа (тема КП);

4 – литеру по ГОСТ 2.103-68 (У);

5 – массу изделия по ГОСТ 2.109-73 (если имеется);

6 – масштаб (в соответствии с ГОСТ 2.302-68 и ГОСТ 2.109-73);

7 – порядковый номер листа (на документах, состоящих из одного листа, графу не заполняют);

- 8 – общее количество листов документа;
- 9 – наименование или различительный индекс предприятия, выпускающего документ (номер учебной группы);
- 10, 11, 12 – характер работы, фамилии и подписи лиц, разработавших документ;
- 13 – дата подписи документа.
- Для чертежа КП применяется основная надпись на рисунке 1 а.

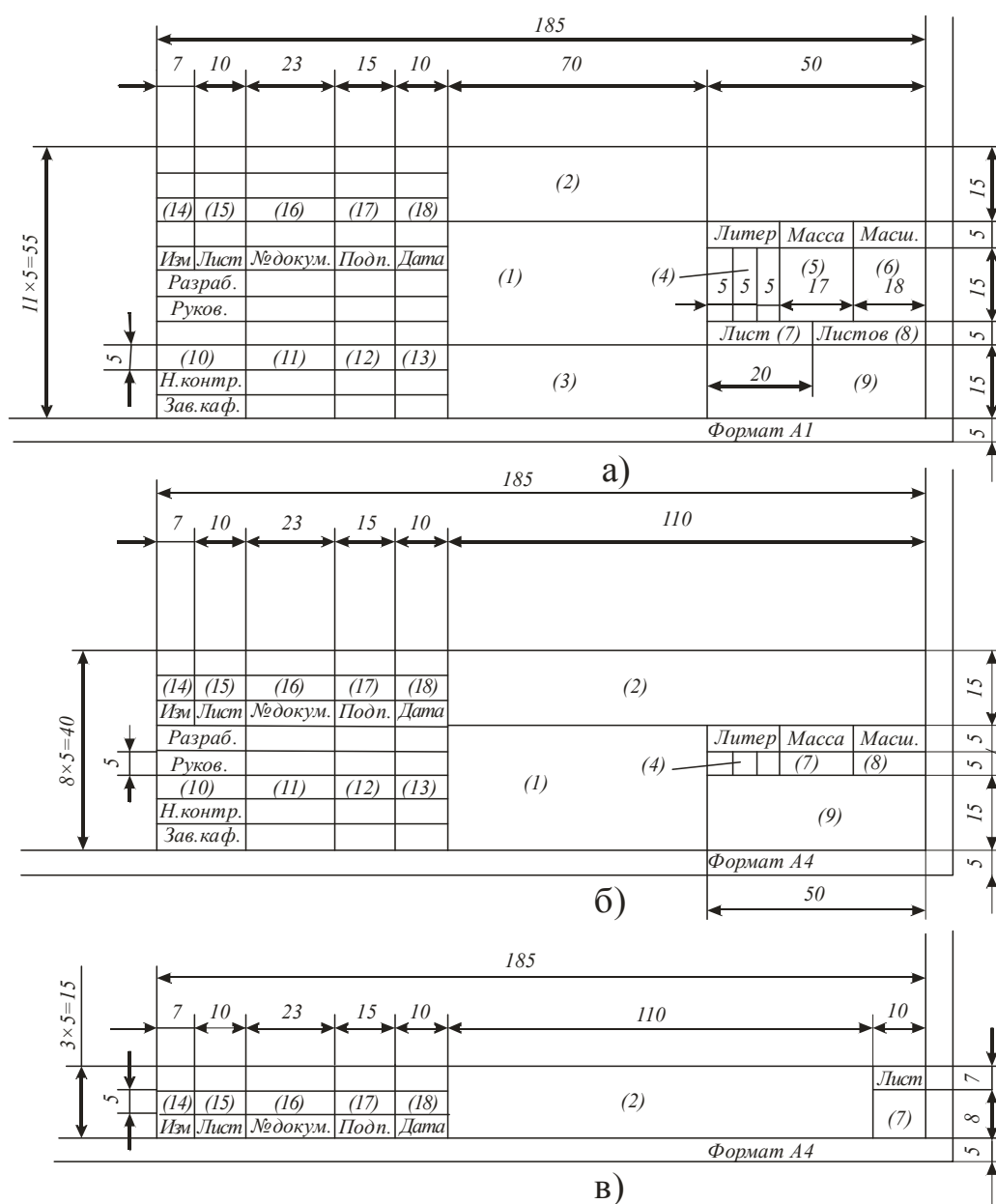


Рисунок 1 –

Основная надпись:

- а) – для чертежей и схем; б) – для текстовых документов;
- в) – для последующих листов чертежей, схем и текстовых документов.

4 Отзыв руководителя

Законченный КП подписывается студентом на титульном листе, задании и на последнем листе заключения, представляется руководителю, который составляет на нее отзыв. (Приложение Б)

В отзыве руководителя должны быть отмечены:

- актуальность темы работы,
- степень решенности поставленной задачи,
- степень самостоятельности и инициативности студента,
- умение студента пользоваться специальной литературой,
- способности студента к инженерной или исследовательской работе,
- возможность использования полученных результатов на практике,
- допуск КП к защите.

5 Тематика КП

Студенту выдается индивидуальное задание на курсовой проект согласно одной из приведенных тематик:

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 двигателя.
6. Расчет двигателя постоянного тока.
7. Расчет генератора постоянного тока.

Список рекомендуемой литературы

Основная литература:

1. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник / А. И. Вольдек, В. В. Попов. - СПб. : Питер, 2010. - 349 с. : ил. ; 24 см. - (Учебник для вузов). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 341-343. - Алф. указ.: с. 344-349. - ISBN 978-5-469-01381-5, экземпляров неограничено

2. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : [учебник] / А.И. Вольдек, В.В. Попов ; Министерство образования РФ. - СПб. : Питер, 2008. - 320 с. : ил. - (300 лучших учебников для высшей школы). - На учебнике гриф: Доп.МО. - ISBN 978-5-469-01380-8, экземпляров 6

3. Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / [Копылов И.П. и др.] ; под ред. И. П. Копылова. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Юрайт, 2012. - 767 с. : ил., табл. - (Бакалавр. Базовый курс). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 755-756. - Предм. указ.: с. 757-762. - ISBN 978-5-9916-1848-9, экземпляров неограничено

Дополнительная литература:

4. Беспалов, В. Я. Электрические машины : учебник / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Академия, 2013. - 320 с. : ил. - (Бакалавриат). - Доп. УМО. - Прил.: с. 308. - Библиогр.: с. 315. - ISBN 978-5-7695-8497-8, экземпляров 10

5. Копылов, И. П. Электрические машины : учебник для бакалавров / И.П. Копылов ; под ред. И.П. Копылова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2012. - 675 с. - (Бакалавр). - На учебнике гриф: Доп.МО. - Библиогр.: с. 668-669. - ISBN 978-5-9916-1501-3, экземпляров 10

6. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : [учебник] / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. - 2-е изд., перераб. - М. : Высшая школа, 2001. - 432 с. : ил. - На учебнике гриф: Доп.МО. - Библиогр.: с. 428. - ISBN 5-06-003842-4, экземпляров 5