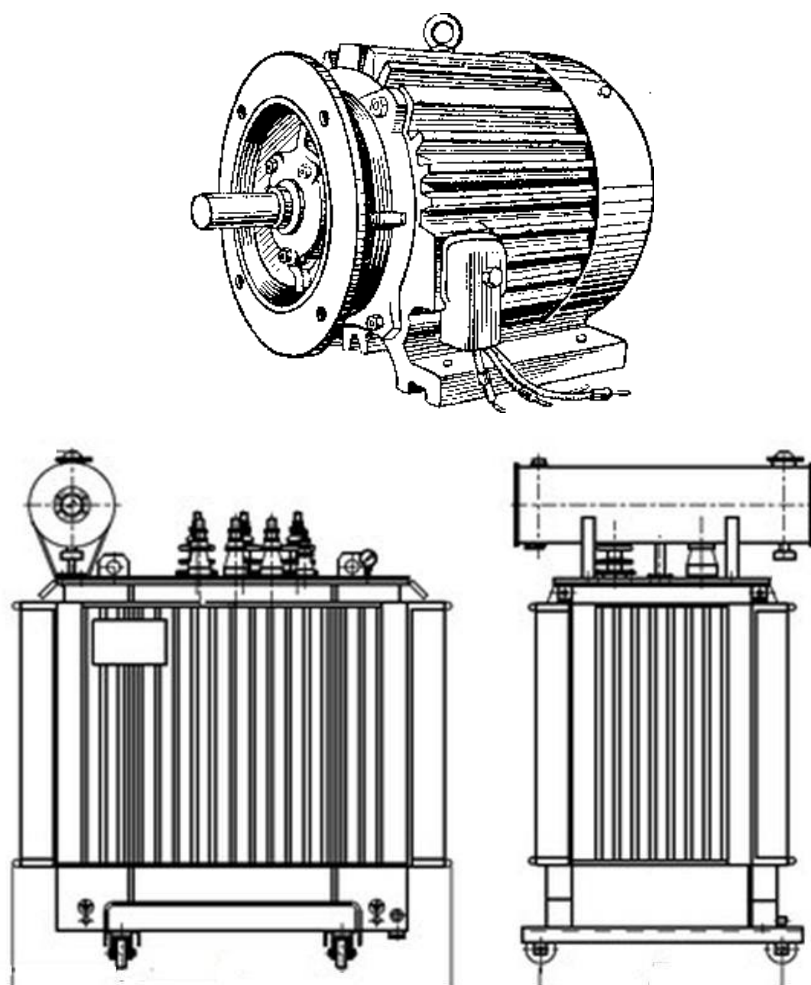


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный аграрный университет»
Институт механизации и технического сервиса

Кафедра машин и оборудования в агробизнесе

Практикум
для выполнения лабораторных и самостоятельных работ
по дисциплине

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ



Казань, 2019

УДК 621.3.011(07)

ББК 31.21

Рецензенты:

и.о. зав. кафедры механизации и цифровизации АПК

ФГБОУ ДПО «ТИПКА» д.т.н., профессор

Р.К. Абдрахманов

к.т.н., доцент кафедры тракторы, автомобили и

энергетические установки ФГБОУ ВО Казанский ГАУ

С.А. Синицкий

Практикум рассмотрен и одобрен:

Решением заседания кафедры машин и оборудования в агробизнесе
Казанского ГАУ (протокол № 2 от 23 сентября 2019 г.)

Решением методической комиссии ИМ и ТС Казанского ГАУ (протокол
№ 2 от 23 октября 2019г.)

**Халиуллин Д.Т., Дмитриев А.В., Хусаинов Р. К., Лукманов Р.Р.,
Лушнов М.А., Нафиков И.Р., Иванов Б.Л. Кашапов И.И.** Практикум для
выполнения лабораторных и самостоятельных работ по дисциплине
«Электрические машины» / Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2019. – 40 с.

Практикум предназначен для выполнения лабораторных работ по дисциплине
«Электрические машины», студентам бакалавриата очной и заочной форм
обучения по направлению 35.03.06 – Агроинженерия.

Изучение дисциплины формирует элементы профессиональных компетенций в
соответствии с ФГОС ВО.

Практикум для выполнения лабораторных и самостоятельных работ
написан в соответствии с типовой программой и предназначен для студентов
очного и заочного отделений института механизации и технического сервиса.

УДК 621.3.011(07)

ББК 31.21

©ФГБОУ ВО Казанский государственный аграрный университет, 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Правила работы в лаборатории электротехники и требования техники безопасности.....	4
Содержание отчета.....	5
<i>Лабораторная работа №1. Экспериментальное определение номинальных параметров асинхронного электродвигателя</i>	<i>6</i>
<i>Лабораторная работа №2. Построение кривой и определение постоянной времени нагрева электродвигателя.....</i>	<i>11</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование асинхронного электродвигателя</i>	<i>17</i>
<i>Лабораторная работа №4. Исследование однофазного трансформатора</i>	<i>25</i>
<i>Лабораторная работа №5. Исследование шунтового генератора постоянного тока с самовозбуждением</i>	<i>30</i>
<i>Лабораторная работа №6. Исследование компаундного генератора постоянного тока с самовозбуждением</i>	<i>35</i>
Литература	39

ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Целью выполнения лабораторных работ является изучение конструкций, принципов действия и схем включения электрических приборов, машин и аппаратов, исследование их характеристик, а также элементов эксплуатации.

Лабораторные работы предусматривают как закрепление и углубление лекционного курса, так и самостоятельное изучение отдельных тем и вопросов программы. В процессе выполнения работ студенты получают навыки в составлении и сборке электрических схем, выборе и правильном использовании измерительных приборов и оборудования, овладевают техникой и методикой проведения эксперимента, а также оценки полученных результатов.

Учебная группа (подгруппа) разбивается на бригады по 2-3 человека, состав которых комплектуется студентами добровольно. Для успешного выполнения лабораторных работ и составления отчетов в каждой бригаде должны быть чертежный инструмент, вычислительные устройства. Перед началом лабораторных занятий студенты изучают правила работы и получают инструктаж по технике безопасности, который проводит преподаватель, затем расписываются в журнале подтверждая, что с правилами ознакомлены и обязуются их выполнять. Журнал хранится на кафедре. Студенты не прошедшие инструктажа к занятиям не допускаются. Электрический ток при не правильном использовании может стать источником пожара, несчастного случая, а также привести к повреждению оборудования и приборов. Основной причиной поражения током является прикосновение к токоведущим частям электроустановок в результате невнимательности, неаккуратности и пренебрежения требований техники безопасности. Степень поражения зависит от многих факторов – условий окружающей среды (помещений), состояния здоровья и кожи человека, величины напряжения и других. Опасны токи как высокого, так и низкого напряжения. В лаборатории приняты все меры удовлетворения требований техники безопасности – помещение сухое, отапливаемое, пол и лабораторные столы деревянные – не проводящие ток, используется пониженное линейное напряжение – 220 В и 380 В, применяемые на производстве, имеется соответствующее нормам защитное заземление.

Перед началом цикла лабораторных работ преподаватель знакомит студентов со схемой электроснабжения лаборатории, правилами пользования коммутационной аппаратурой и электрооборудованием.

При выполнении работ в лаборатории электрической машины необходимо соблюдать следующие правила:

1. Внимательно изучить методическую разработку, уяснить цель работы и ее содержание, подготовить формы таблиц и отчета.
2. Ознакомиться с приборами и оборудованием, проверить исправность

предохранительных, сигнальных устройств и ограждений, о замеченных неполадках сообщить преподавателю или лаборанту.

3. Собранную схему или установку дать проверить преподавателю, при получении разрешения можно включать в сеть.

4. Выполнение каких-либо переключений в схеме, замену сгоревших предохранителей, смену приборов можно производить только после отключения напряжения.

5. Не загромождать рабочее место посторонними предметами, бережно относиться к приборам, лабораторному и аудиторному оборудованию.

6. На занятии выполнять только заданную работу, не оставлять без наблюдения свое рабочее место и не отвлекать внимание товарищей.

7. Включать схему под напряжение только на время проведения экспериментов и измерений, после их завершения отключать от сети.

8. При возникновении несчастного случая из-за поражения электрическим током немедленно отключить силовой выключатель на рабочем столе или общий выключатель лаборатории, оказать помощь пострадавшему, при необходимости вызвать медицинскую службу и сообщить на кафедру.

9. После завершения лабораторной работы студенты сдают зачет преподавателю, разбирают схему, приводят в порядок рабочее место.

По отдельным работам разрешается обработку результатов и расчеты выполнять самостоятельно со сдачей зачета на следующем занятии (по согласованию с преподавателем).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет составляется студентами по каждой работе, оформляется в процессе ее выполнения и представляется преподавателю для сдачи. Рекомендуется для отчетов иметь отдельную тетрадь.

Отчет должен содержать следующее:

- номер и наименование работы;
- краткую характеристику изучаемых приборов, оборудования, установок (название, тип, напряжение, мощность, назначение и т.п.);
- принципиальные схемы, которые собираются и изучаются в работе;
- таблицы измерений и расчетов;
- все расчетные формулы с объяснением их назначения и расшифровкой элементов;
- графики, диаграммы, построенные по экспериментальным данным; заключение и выводы.

Ответы на контрольные вопросы включаются в вышеперечисленные пункты или приводятся отдельно в конце отчета.

Лабораторная работа №1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: Освоить методику экспериментального определения паспортных (номинальных) параметров трехфазного асинхронного электродвигателя.

Оборудование рабочего места

1. Разобранный электродвигатель	2 Вт.
2. Испытуемый электродвигатель 1,7 кВт	1 шт.
3. Плакаты	
4. Лазерный тахометр	1 шт.
5. Комплект электроизмерительных приборов	1 комплект.

Общие сведения

К номинальным параметрам асинхронного электродвигателя относятся величины: напряжение U_n , ток I_n , мощность P_n , коэффициент полезного действия η_n , коэффициент мощности $\cos \varphi_n$ и частота вращения ротора n_n . Номинальное напряжение на статорной обмотке электродвигателя может быть определено по вольтамперной характеристике $I_\phi = f(U_\phi)$, которая снимается при холостом ходе двигателя, когда момент сопротивления M_c на валу равен нулю. Она дает возможность судить о магнитном насыщении стали статора электродвигателя. Величина $U_{\phi n}$ соответствует области перегиба кривой (участок б-в, рисунок 1.1) и может равняться 127, 220, 380 В, то есть одному из стандартных напряжений.

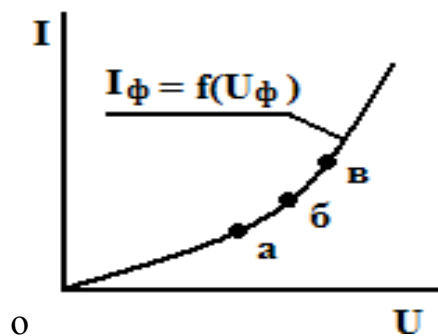


Рисунок 1.1 – Вольтамперная характеристика обмотки двигателя

Если полученное напряжение (по характеристике) значительно отличается от стандартного, то двигатель неисправен или выполнен на нестандартную частоту тока.

Характер кривой тока $I=f(U)$ статорной обмотки асинхронного двигателя определяется, главным образом, изменением его реактивной составляющей I_μ . Так как поля рассеяния при холостом ходе незначительны, то можно считать, что реактивная составляющая I_μ идет на создание только основного поля машины. В магнитную цепь двигателя входит воздушный зазор между статором и ротором, на который обычно затрачивается наибольшая часть намагничивающей силы (н.с.) всей цепи, поэтому I_μ имеет относительно большое значение, превышающее в несколько раз I_μ трансформатора. Обычно для нормальных асинхронных двигателей при $U = U_n$ ток $I_{xx} = (0,25-0,5) I_n$. Он тем больше по относительной величине, чем больше полюсов имеет двигатель и чем меньше его мощность.

При малом значении напряжения сталь статора асинхронного двигателя ненасыщенна и зависимость $I_\phi=f(U_\phi)$ прямолинейна (участок о-а, рисунок 1.1). С увеличением напряжения сталь насыщается, реактивная составляющая тока холостого хода растет значительно быстрее возрастания напряжения и кривая тока $I_\phi=f(U_\phi)$ круче изгибается к оси ординат.

Номинальный ток двигателя ориентировочно может быть определен по величине тока холостого хода, соответствующего номинальному напряжению и мощности из таблицы 1.1

Таблица 1.1 – Кратность тока холостого хода

P_n	кВт	До 1,5	1,5-5	5-15	Свыше 15
I_n	А	$1,5 I_x$	$2,0 I_x$	$2,5 I_x$	$3,0 I_x$

Номинальная мощность на валу двигателя P_n может быть определена через мощность P_1 , потребляемую двигателем из сети при номинальной нагрузке (при $I = I_n$), суммарные потери в двигателе $\sum P_n$ по формуле:

$$P_n = P_1 - \sum P_n, \quad (1)$$

а к.п. д. двигателя по формуле:

$$\eta_n = \frac{P_1 - \sum P_n}{P_1}. \quad (2)$$

Суммарные потери определяются по формуле:

$$\sum P = P_{m1} + P_{m2} + P_{мех.} + P_{ст.} + P_{доб.}, \quad (3)$$

где P_{m1} - потери в меди статора;

P_{m2} - потери в меди ротора;

$P_{мех.}$ - механические потери;

$P_{ст.}$ - потери в стали;

$P_{доб.} = 0,5\% P_1$ – добавочные потери.

Величины слагаемых уравнения (3) определяются по следующей методике.

1. Потери в меди статора пропорциональны квадрату фазного тока, зависят от нагрузки двигателя и равны

$$P_{M1} = 3I_{1\phi}^2 \cdot r_{1\phi}, \quad (4)$$

где $I_{1\phi}$ - ток, потребляемый одной обмоткой двигателя при данной его нагрузке;

$r_{1\phi}$ - активное сопротивление обмотки фазы статора.

2. Потери в обмотках ротора у большей части асинхронных двигателей приближенно равны половине потерь в статорных обмотках:

$$P_{M2} \approx 0,5 P_{M1}. \quad (5)$$

3. Потери в стали $P_{ст}$ пропорциональны квадрату напряжения, приложенного к обмотке, и определяются из опыта холостого хода при номинальном напряжении. Для их нахождения сначала определяют сумму потерь в стали и механических потерь при различных напряжениях, а затем разность между мощностью, потребляемой двигателем, при холостом ходе P_x (измеряется ваттметром) и потерями в обмотках статора и ротора:

$$P_{мех} + P_{ст} = P_x - P_{M1} - P_{M2}. \quad (6)$$

Мощность P_x с увеличением напряжения возрастает приблизительно по квадратичной зависимости, так как потери в стали увеличиваются пропорционально квадрату магнитной индукции, а потери в меди возрастают пропорционально квадрату тока холостого хода.

По результатам опыта холостого хода строятся кривые $P_x = f(U)$ и $P_{мех} + P_{ст} = f(U)$ (рисунок 1.2 а).

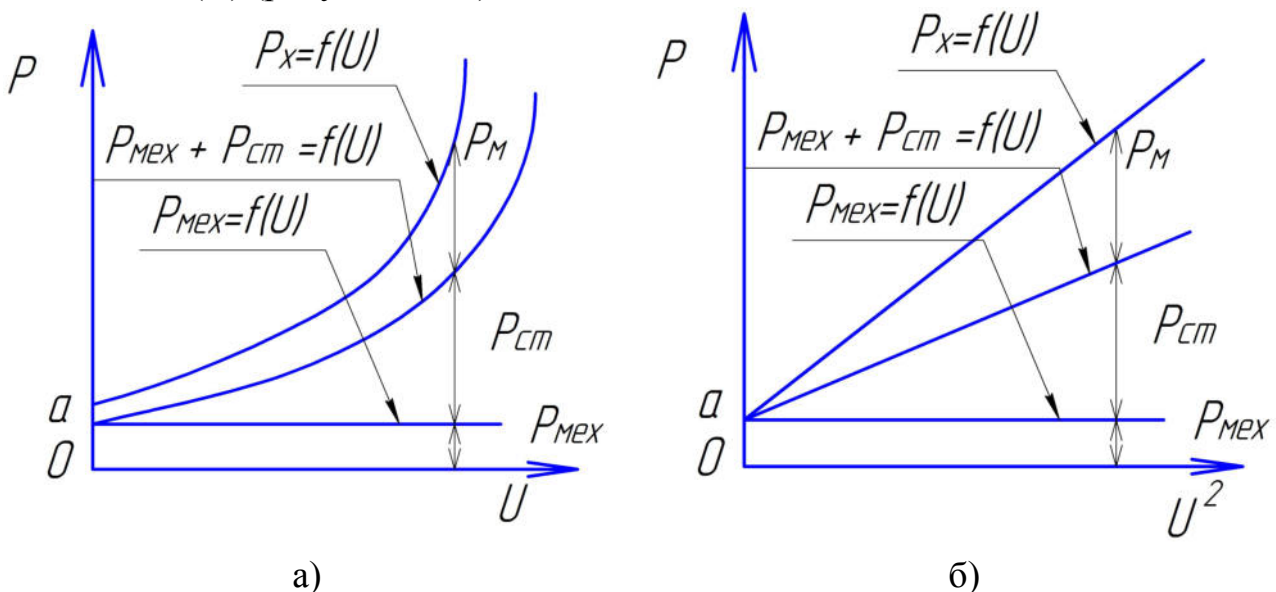


Рисунок 1.2 – Распределение потерь в двигателе на холостом ходу

Если эту кривую продолжить до пересечения с осью ординат, то она отсечет отрезок $о-а$, соответствующий механическим потерям при напряжении равном нулю.

Магнитные и электрические потери также равны нулю, а $n_2=n_1= \text{const}$. Разность ординат кривой общих потерь $P_x = f(U)$ и кривой $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} = f(U)$ составляет потери в меди, а разность ординат кривой $P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}} = f(U)$ и прямой составляет магнитные потери при данном напряжении двигателя. Для поддержания частоты вращения ротора примерно постоянной опыт холостого хода заканчивается при напряжении равном $(0,2-0,3) U_n$, и начало кривой подведенной мощности, нанесенной на графике $P_x = f(U)$, будет находиться на значительном расстоянии от оси ординат. Этим способом значение $P_{\text{мех}}$ определяется приближенно. Более точные результаты можно получить, если на графике кривые представить в зависимости от квадрата напряжения, тогда они близки к линейным (рисунок 1.2 б). Здесь ордината о-а, как и на рисунке 2,а, соответствует величине механических потерь.

Коэффициент мощности одной обмотки двигателя

$$\cos \varphi_n = \frac{P_{1\phi}}{U_{1\phi} I_{1\phi n}} \quad (7)$$

где $I_{1\phi n}$ и $U_{1\phi}$ – номинальные фазные ток и напряжение соответственно.

Номинальная частота вращения ротора, соответствующая номинальной нагрузке можно определить с помощью бесконтактного лазерного тахометра. Сущность его заключается в следующем. На торец вала испытуемого двигателя наклеивается полоска отражательной ленты (фольга). Для измерения частоты вращения ротора луч лазерный тахометр направляют на данную ленту

Частота вращения магнитного поля статора определяется:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{P} \text{ мин}^{-1}, \quad (8)$$

где f – частота тока в обмотке статора

P – число пар полюсов статора.

Как видно из рассмотренного принципа действия двигателя магнитные силовые линии вращающегося поля статора должны пересекать проводники обмотки ротора, только в этом случае в обмотке ротора индуцируются ЭДС и ток. Поэтому частота вращения ротора (n_2) должна быть меньше частоты вращения магнитного поля статора (n_1), т.е. частоты вращения не совпадают, поэтому двигатель называется асинхронным (не совпадающим по оборотам). Это отставание ротора или разность частот вращения называется скольжением и выражается формулой:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% . \quad (9)$$

Скольжение в асинхронных двигателях составляет 2 – 8% от n_n . Частота

вращения ротора $n_2 = n_1 \cdot (1 - S)$,
где S – в долях единицы.

Выполнение работы

1. Записать паспортные данные приборов и оборудования.
2. Измерить сопротивление обмотки каждой фазы $r_{1\phi}$ мостом постоянного тока и определить среднее значение.
3. Собрать схему для проведения опыта холостого хода.
4. Изменяя автотрансформатором напряжение, подводимое к статору, в пределах от нуля до 300 В снять характеристику холостого хода. Данные измерений записать в таблицу 1.2.
5. По данным таблицы построить графики, аналогичные представленным на рисунках 1.2 а и 1.2 б.
6. По кривой $I_\phi = f(U_\phi)$ определить номинальное напряжение $U_{\phi n}$ обмотки двигателя и ток холостого хода при номинальном стандартном напряжении.
7. Определить номинальный ток обмотки по эмпирическим зависимостям таблицы 1.1.
8. Создать нагрузку на валу двигателя тормозным устройством до номинального значения тока и определить мощность $P_{1н}$, потребляемую двигателем из сети.

Таблица 1.2 – Параметры холостого хода № п.п.

№ п.п.	Измерено			Вычислено			
	$U_{1\phi}$	$I_{1\phi}$	$P_{1\phi}$	$I_{1л}$	$P_{1дв}$	P_m	$P_{мех} + P_{ст}$
	В	А	Вт	А	Вт	Вт	Вт

9. Описанным выше способом определить скольжение s_n при номинальном режиме работы и n_n .
10. Определить суммарные потери $\sum P$ при номинальном режиме; мощность $P_{2н}$ на валу двигателя; к.п.д. η_n и коэффициент мощности $\cos \phi_n$.

Контрольные вопросы

1. Каким образом можно определить номинальное напряжение обмотки двигателя?
2. От чего зависят потери в меди асинхронного двигателя?
3. Какие потери мощности включает в себя мощность P_x , потребляемая двигателем из сети при холостом ходе?

4. Каким образом можно определить к.п.д. двигателя?
5. Какими потерями двигателя можно пренебречь, если он работает на холостом ходу?
6. Как и для чего производится опыт короткого замыкания двигателя?
7. Какова разница в методике определения потерь двигателя и трансформатора?
8. Каковы соотношения между токами: номинальным, холостого хода и пусковым в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором?
9. Определите частоту переменного тока f_2 , наведенного в роторе при номинальной нагрузке двигателя.

Лабораторная работа №2

ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ НАГРЕВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: Изучить процесс нагрева двигателя, экспериментальным путем получить данные для построения кривой нагрева и определить постоянную времени нагрева

Оборудование рабочего места

- | | |
|---|-------------|
| 1. Инфракрасный пирометр (бесконтактный) | 1 шт. |
| 2. Испытуемый электродвигатель 0,75 кВт | 1 шт. |
| 3. Плакаты | |
| 4. Комплект электроизмерительных приборов | 1 комплект. |

Общие сведения.

При работе двигателя в его обмотках выделяется тепло. Оно расходуется на повышение температуры частей электродвигателя и частично рассеивается в окружающую среду.

Максимальная мощность, развиваемая двигателем, обусловливается максимальным вращающим моментом и степенью нагрева изоляции обмоток. Степень нагрева изоляции лимитируется допустимой температурой для данного класса изоляционного материала (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Классы изоляции

Класс нагревостойкости изоляции	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Предельно допустимая температура, °С	90	105	120	130	155	180	>180

В расчетах предельно допустимая температура обмоток двигателей принимается на 10°С ниже установленной ГОСТом. Стандартная температура

окружающей среды принята 40^0 C .

Рост температуры двигателя во время работы с момента включения продолжается до тех пор, пока не наступит равновесное состояние, при котором количество тепла, выделяемое током двигателя, станет равным количеству тепла, рассеиваемому в окружающую среду. Уравнение нагрева имеет вид:

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (1)$$

где τ – перегрев двигателя, превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды;

τ_0 - начальное превышение температуры, ^0C ;

T - постоянная времени нагрева двигателя, с;

t - текущее время, с;

$\tau_{уст}$ - установившееся превышение температуры, ^0C .

При отсутствии начального превышения температуры ($\tau_0=0$) уравнение нагрева примет вид

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (2)$$

Если нагретый до температуры $\tau_{уст}$ двигатель отключить от сети, то он начнет охлаждаться. Изменение температуры при охлаждении описывается уравнением

$$\tau = \tau_{уст} e^{-\frac{t}{T}} \quad (3)$$

Примерный вид кривых $\tau=f(t)$ по уравнениям (1), (2) и (3) приведены на рисунке 2.1.

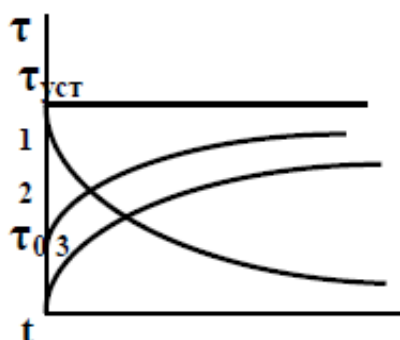


Рисунок 2.1 – Кривые нагрева и охлаждения двигателя

Постоянная времени нагрева определяется как отношение теплоемкости C (Дж/К) к теплоотдаче двигателя A (Дж/К·с).

$$T = \frac{C}{A} \quad (4)$$

Она характеризует интенсивность процесса нагрева и представляет собой время, в течение которого двигатель нагрелся бы до установившегося перегрева $\tau_{уст}$, если бы не было отдачи тепла в окружающую среду.

Установившееся превышение температуры есть отношение общего количества тепла Q (Дж/с), поступающего в двигатель, к теплоотдаче двигателя A :

$$t_{уст} = \frac{C}{A} \quad (5)$$

Постоянная времени нагрева и установившееся превышение температуры могут быть определены несколькими способами.

1. Если известно общее количество тепла Q , теплоёмкость C и теплоотдача A двигателя, то постоянная времени нагрева T и установившаяся температура перегрева $\tau_{уст}$ подсчитываются аналитически по формулам (4) и (5).

2. К построенной кривой нагрева двигателя (если она достаточно удалена от оси времени) строится асимптота. Из начала координат или другой любой точки кривой нагрева (например, a) проводится касательная и вертикаль до пересечения с асимптотой (рисунок 2.2). Отрезок, отсекаемый на асимптоте касательной и вертикалью, равен постоянной времени нагрева в масштабе времени по оси абсцисс.

3. В двух точках кривой нагрева b и c (рисунок 2.2 б) проводятся касательные, составляющие с осью абсцисс углы α_1 и α_2 . Находятся $\operatorname{tg} \alpha_1$ и $\operatorname{tg} \alpha_2$, откладываются их значения на прямых, параллельных оси абсцисс, проходящих через точки касания. Получаются отрезки $db = \operatorname{tg} \alpha_1$ и $fg = \operatorname{tg} \alpha_2$. Через точки b и g проводится прямая до пересечения с осями координат. Отрезок OG определяет величину установившейся температуры перегрева $\tau_{уст}$. Постоянная времени нагрева T получается как отношение отрезка OG в масштабе температуры к отрезку OE в масштабе времени:

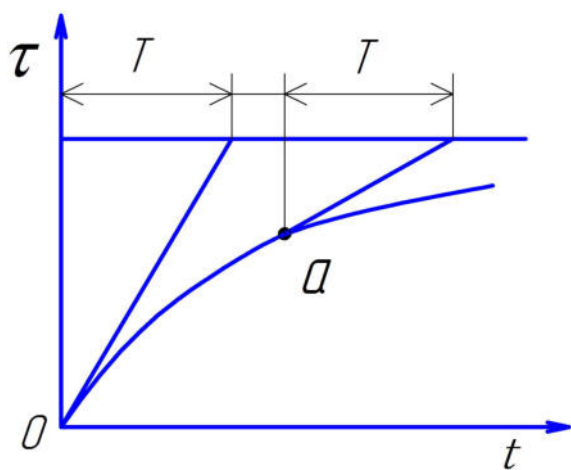
$$T = \frac{d\tau}{dt} \quad (6)$$

4. На кривой нагрева (рисунок 2.2 в) берутся три точки, отстоящие одна от другой на равных промежутках времени Δt . Постоянная времени нагрева определяется следующим образом:

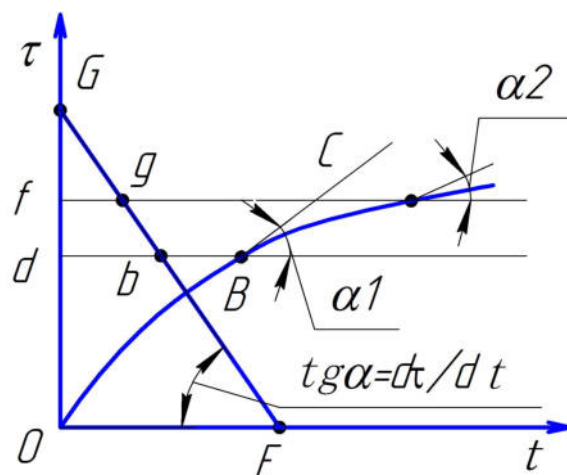
$$T = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}} \quad (7)$$

Зная постоянную времени нагрева и используя второй способ, можно определить установившееся значение превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды $\tau_{уст}$. Для этого на оси абсцисс необходимо отложить отрезок OA , равный постоянной времени T . Из точки A провести вертикаль до пересечения с касательной к кривой нагрева из начала координат. Они пересекутся в точке B , через данную точку проходит асимптота.

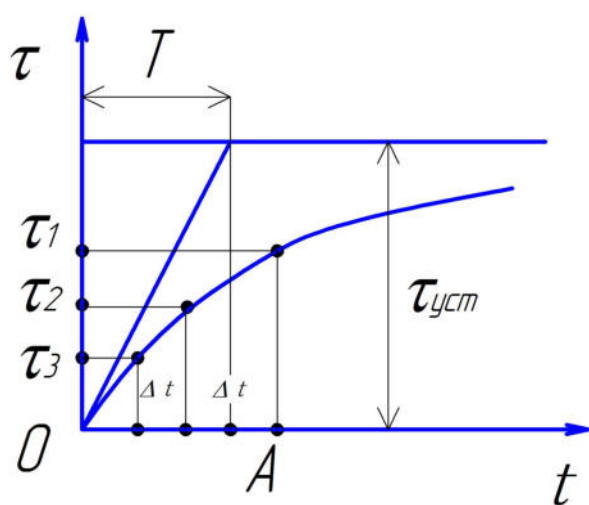
Отрезок AB в масштабе температур является значением установившегося перегрева $\tau_{уст}$.



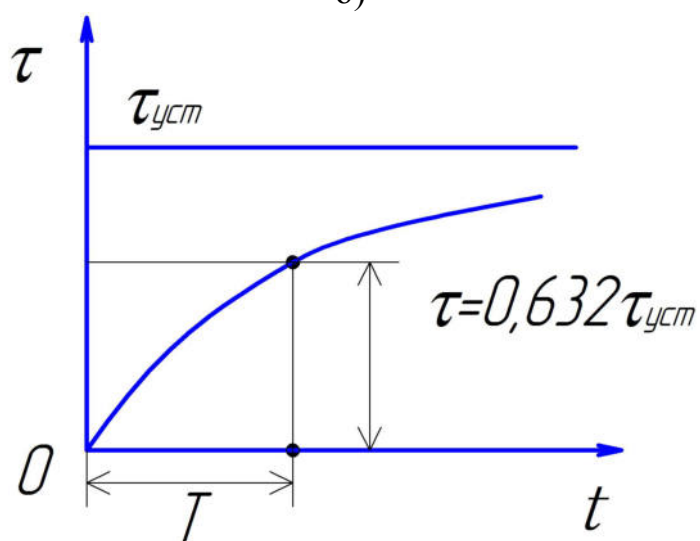
а)



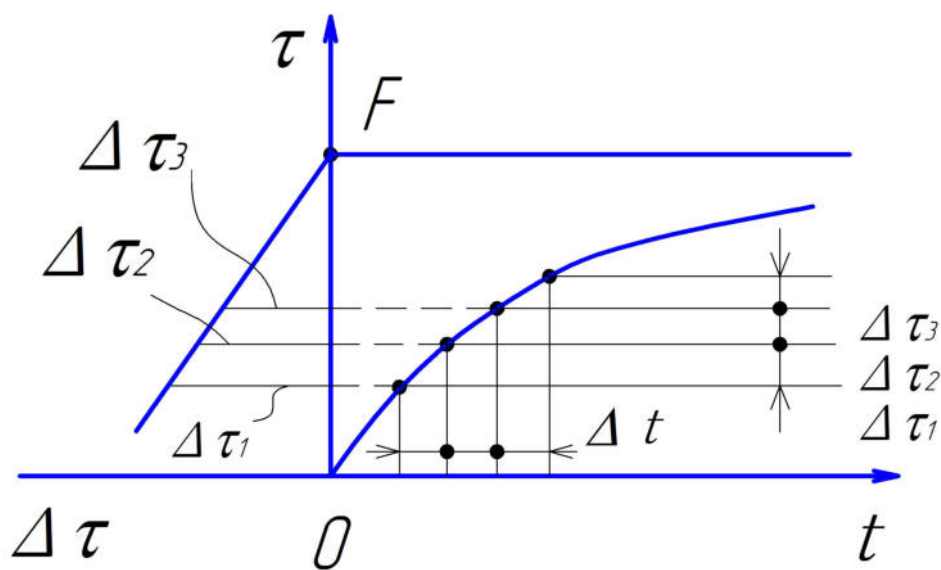
б)



в)



г)



д)

Рисунок 2.2 – Графические методы определения постоянной времени T

5. Нагреваясь по уравнению (2), через промежуток времени $t=T$ превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды будет составлять $\tau=0,632 \tau_{уст}$ (рисунок 2.2 г).

6. По кривой нагрева (рисунок 2.2 д) измеряются приращения температуры $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3$ за равные промежутки времени Δt . Затем строится график $\tau=f(\Delta\tau)$ в произвольном масштабе. Точки 1, 2, 3 лежат на прямой, точка пересечения которой с осью ординат даёт установившуюся температуру перегрева (точка F).

Различная по величине длительная нагрузка приводит двигатель к нагреву до разных значений установившегося превышения температуры $\tau_{уст}$. Чем меньше нагрузка, тем меньше $\tau_{уст}$, и наоборот.

Предположим, что для данного двигателя по каким-либо причинам неизвестна номинальная мощность, но известен класс изоляции, а следовательно, допустимая температура нагрева изоляции $t_{доп}$. При определенной температуре окружающей среды $t_{окр}$, отличной от стандартной, можно найти допустимую температуру перегрева $\tau_{доп}$.

Тогда согласно (5)

$$\tau_{доп} \cdot A = Q_n \quad (8)$$

где Q_n - количество тепла, выделяемое в двигателе при номинальной нагрузке.

Если двигатель длительно работает с частичной мощностью $P_{ч}$ отличной от номинальной, то согласно (5) $\tau_{уст ч} = Q_{ч}/A$.

Приняв приближенно, что нагрев двигателя происходит за счет переменных потерь, можно записать

$$\frac{\tau_{доп}}{\tau_{устч}} = \frac{Q_n}{Q_{ч}} = \frac{Q_{перн}}{Q_{перч}} = \frac{I_n^2}{I_{ч}^2} = \frac{P_n^2}{P_{ч}^2} \quad (9)$$

где $Q_{перн}$ и $Q_{перч}$ - переменные потери при номинальной и частичной мощности. Из выражения (7) следует, что

$$P_n = P_{ч} \sqrt{\frac{\tau_{доп}}{\tau_{устч}}} \quad (10)$$

На мощность электродвигателя влияет температура окружающей среды. Если двигатель поместить в среду с температурой ниже принятой ГОСТом (40°C), то условия охлаждения его улучшатся и $\tau_{уст}$ уменьшится. Чтобы поднять $\tau_{уст}$ до допустимого значения, необходимо увеличить нагрузку на двигатель. Искомая мощность двигателя определится из уравнения

$$P_x = P_n \sqrt{1 \pm \frac{\Delta t^0}{\tau_{устч}} (\alpha + 1)} \quad (11)$$

где Δt^0 - отклонение температуры окружающей среды от стандартной;

$\tau_{уст н}$ - допустимое установившееся превышение температуры для данного класса изоляции при стандартной температуре окружающей среды;

Отношение постоянных потерь к переменным (для асинхронных электродвигателей $\alpha=0,6$) определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta P_{\text{пост}}}{\Delta P_{\text{пер}}} \quad (12)$$

где P_n - номинальная мощность, Вт;

P_x - искомая пересчетная мощность, Вт.

Температура обмоток двигателя во время работы может быть измерена с помощью термодпары. Как известно, термо э.д.с. термодпары пропорциональна разности температур между холодным и горячим спаями. Величина термо э.д.с. измеряется гальванометром. Перевод термо э.д.с. в превышение температуры производится по тарировочному графику.

Выполнение работы

1. Записать технические данные машин, аппаратов и измерительных приборов.
2. Ознакомиться с электрической схемой установки и уяснить принцип ее работы.
3. Собрать электрическую схему и опробовать ее в работе. В качестве тормоза использовать асинхронную машину, работающую в генераторном режиме. Следить, чтобы направление вращения валов двигателя и генератора совпадало.
4. Замерить температуру окружающей среды, напряжение сети $U_{кр}$, U_c
5. Включить схему. С помощью тормоза дать двигателю частичную нагрузку. Снять кривую нагрева двигателя, для чего через каждые 5 минут в течение 90 минут выполнять измерения. Результаты измерений записать в таблицу 2.2.
6. По данным построить кривую нагрева двигателя.
7. Вычислить описанным выше способом установившуюся температуру перегрева $\tau_{уст}$ двигателя и постоянную времени нагрева.
8. По кривой нагрева и формуле (10) определить номинальную мощность двигателя.
9. Определить мощность, которую можно снять с двигателя при работе его в условиях данной среды. Изоляция двигателя класса А.
10. Сравнить результаты эксперимента с паспортными данными электродвигателя.

Таблица 2.2 –Данные опыта

№.п.п	Измерено			
	t	I	P	τ_1
	мин	А	Вт	Град.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами обусловлена максимальная мощность электродвигателя?
2. На какие классы разделяется изоляция двигателей по условиям теплостойкости изоляции?
3. Какими уравнениями описываются процессы нагрева и охлаждения двигателя?
4. Что такое постоянная времени нагрева двигателя и какими способами можно ее определить?
5. Как определить мощность двигателя, при которой установившаяся температура будет допустимой, если температура окружающей среды отличается от установленной ГОСТом?

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы:

1. Изучить устройство и принцип действия электродвигателя.
2. Изучить маркировку и способ определения выводных концов обмотки, статора.
3. Изучить способ подключения на «звезду» и «треугольник».
4. Изучить способ измерения частоты вращения стробоскопическим методом.
5. Изучить методику снятия характеристик.

Оборудование рабочего места

- | | |
|---|-------------|
| 1. Разобранный электродвигатель | 2 Вт. |
| 2. Испытуемый электродвигатель 1,7 кВт | 1 шт. |
| 3. Плакаты | |
| 4. Строботахометр СТ – 5 | 1 шт. |
| 5. Комплект электроизмерительных приборов | 1 комплект. |

Устройство электродвигателя

Асинхронный электродвигатель трехфазного переменного тока состоит из двух основных узлов: неподвижной части – СТАТОРА и вращающейся – РОТОРА.

Корпус статора изготавливается из чугуна, стали или алюминия, и служит для крепления всех элементов конструкции двигателя. В расточку корпуса запрессован сердечник статора (или активное железо статора), который собран из отдельных листов (толщиной 0,3...0,5 мм) электротехнической стали, изолированных между собой (в качестве изоляции используется лаковая пленки

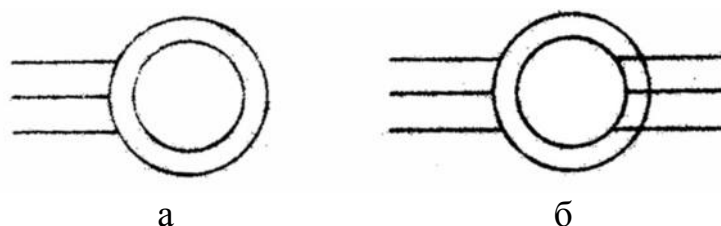
или окалина на листах стали – в двигателях малой мощности). Изолировка листов применяется для устранения вихревых токов и нагрева сердечника.

В пазах статора уложена трехфазная обмотка статора, от которой сделаны шесть выводов.

Роторы выполняют двух типов (рисунок 3.1):

1 – с короткозамкнутой обмоткой типа "белочье колесо";

2 – с трехфазной обмоткой, соединенной в "звезду", выводы которой присоединяется к контактным кольцам.



а) с короткозамкнутым ротором; б) с фазным ротором

Рисунок 3.1 – Условное обозначение асинхронных двигателей
в электрических схемах

В обозначении - внешняя окружность изображает условно обмотку статора, внутренняя – обмотку ротора.

Короткозамкнутый ротор

Сердечник ротора, запрессованный на вал, также собран из листовой электротехнической стали, в пазах ротора имеется обмотка, выполненная из голых медных, латунных или алюминиевых стержней с обоих торцов замкнутых накоротко (отсюда и название двигателя - короткозамкнутый).

Фазный ротор

Сердечник ротора с трехфазной обмоткой изготавливается также, как у короткозамкнутого. Различие роторов – в конструкции обмоток, у фазного ротора обмотка выполняется изолированными обмоточными проводами (круглого сечения в двигателях малой мощности, прямоугольного сечения – в двигателях большой мощности).

Обмотка трехфазная: три конца обмотки соединяют вместе, изолируют, и бандажом крепят к обмотке; три начала выводят через пустотелый вал и соединяют с тремя токосъемными кольцами, насаженными на один конец вала. Кольца имеют электрическую изоляцию между собой и от вала. Для съема тока с ротора в двигателе имеется щеточный механизм (щетками с держателями).

Между статором и ротором асинхронных двигателей имеется воздушный зазор от 0,3...0,5 мм - в малых двигателях, до 1,5 мм и более в крупных

двигателях. Воздушный зазор является важным элементом магнитной цепи машины, его изменение резко влияет на мощность; поэтому в эксплуатации растачивать или шлифовать ротор не допускается, во избежание увеличения воздушного зазора.

Большой износ подшипников также не допустим.

Принцип действия асинхронного электродвигателя

При подключении обмотки статора к сети по ней протекает трехфазный переменный ток, который создает вращающееся магнитное поле. Силовые линии магнитного поля статора проходят по сердечникам статора и ротора, пересекают обмотку ротора и создают в ней ЭДС, под действием которой в замкнутой обмотке ротора появляется ток. Ток ротора создает магнитное поле ротора, которое, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создает вращающий момент, в результате чего ротор приходит, во вращение.

Частота вращения магнитного поля статора определяется:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{P} \text{ мин}^{-1}, \quad (1)$$

где f – частота тока в обмотке статора, Гц;

P – число пар полюсов статора.

Как видно из рассмотренного принципа действия двигателя магнитные силовые линии вращающегося поля статора должны пересекать проводники обмотки ротора, только в этом случае в обмотке ротора индуцируются ЭДС и ток. Поэтому частота вращения ротора (n_2) должна быть меньше частоты вращения магнитного поля статора (n_1), т.е. частоты вращения не совпадают, поэтому двигатель называется асинхронным (не совпадающим по оборотам). Это отставание ротора или разность частот вращения называется скольжением и выражается формулой:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Скольжение в асинхронных двигателях составляет 2 – 8% от n_n . Частота вращения ротора $n_2 = n_1 \cdot (1 - S)$, где S – в долях единицы. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором наряду с достоинствами – простота конструкции, простота и надежность в эксплуатации, обладают недостатком имеют большой пусковой ток, превышающий нормальный рабочий ток в 4 – 6 раз, что вредно отражается на работе сети и иногда затрудняет пуск электродвигателя.

В некоторых современных конструкциях асинхронных короткозамкнутых двигателях пусковой ток уменьшен до 2,5 – 3-х кратного.

Изменение направления вращения двигателей (реверсирование)

производится путем смены местами проводов двух (любых) фаз.

Определение и маркировка начал и концов обмотки статора.

В асинхронных электродвигателях принята следующая маркировка выводов обмотки статора:

1-я фаза начало – C_1 —————> конец – C_4 ;

2-я фаза начало – C_2 —————> конец – C_5 ;

3-я фаза начало – C_3 —————> конец – C_6 .

Отыскание начал и концов обмоток производится таким образом:

а) сначала определяется попарно выходы каждой фазы обмотки статора с помощью контрольной лампочки (мультиметра и др., путем прозвонки) согласно схеме (рисунок 3.2)

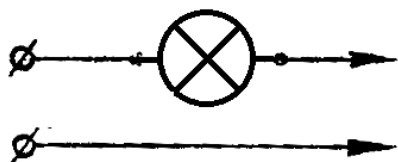


Рисунок 3.2 – Схема включения лампочки

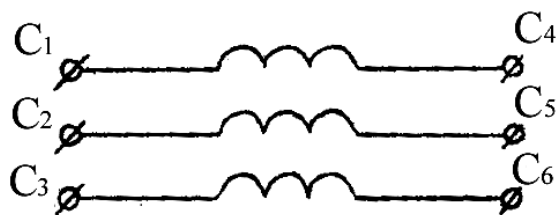


Рисунок 3.3 – Три фазы обмотки статора с 6-ю выводами

Лампочка включается последовательно в сеть; два провода (показано стрелками) поочередно присоединяют к выводам обмотки статора. При попадании на выводы одной фазы лампочка горит;

б) затем произвольно маркируют выходы одной из фаз, считая её первой (C_1 C_4), соединяют ее последовательно с другой фазой (любой из двух не замаркированных) и включают их в сеть, к концам оставшейся третьей фазы подключают лампочку (или вольтметр) согласно схеме (рисунок 3.4).

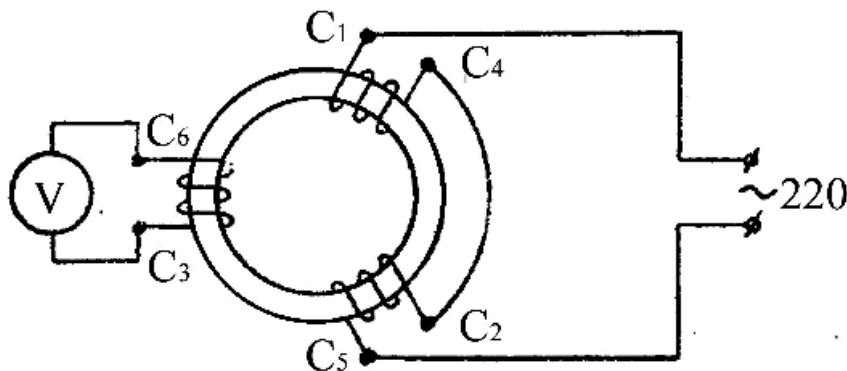


Рисунок 3.4 – Схеме маркировки выводных концов обмотки статора

Если при включении рубильника лампочка загорится (или вольтметр показывает напряжение), то значит вторая фаза включена согласно первой, т.е. к концу 1-й фазы (C_4) присоединено начало 2-й фазы (C_2); т.е. можно маркировать 2-ю фазу (C_2 C_5). В этом случае магнитные потоки 1-й и 2-й фаз Φ_1 Φ_2 совпадают по направлению и создают в стали один общий поток, который

пересекая витки третьей фазы, индуцирует в ней ЭДС, отчего лампочка горит.

Если лампочка не горит, то значит 2-я фаза включена встречно первой (встречные магнитные потоки Φ_1 Φ_2 погасают друг друга, ЭДС в третьей фазе не наводится). В этом случае необходимо концы второй фазы поменять местами и включить снова, лампочка должна загореться.

Определение выводов 3-й фазы производится аналогично: 3-ю фазу включают последовательно с первой (к концу C_4 один из выводов третьей фазы), и подают напряжение от сети, к 2-й фазе подключают лампочку. Если лампочка горит, то к C_4 присоединено начало 3-й фазы – C_3 . Описанный способ называется способом трансформации, т. к. используется индуктирование ЭДС взаимной индукции, как в трансформаторах.

Включение электродвигателя по схеме «звезда» и «треугольник».

Выводные концы обмоток подключают на клеммник, располагая их так, как показано на рисунке 3.5.

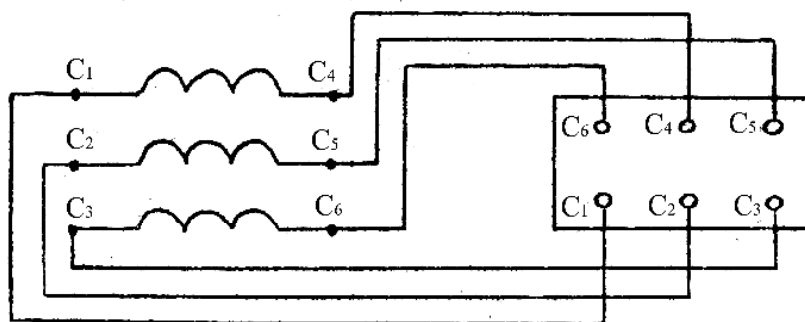


Рисунок 3.5 – Схема подключения выводов обмотки к клеммной коробке

Для включения по схеме «звезда» необходимо соединить в один узел три конца обмоток (C_4 , C_5 , C_6), (на клеммнике это выполняется путем установки пластин-перемычек) к трем началам (C_1 , C_2 , C_3) подводится сеть, как показано на рисунке 3.6, где дана и поясняющая схема «звезды».

Для включения по схеме «треугольник» необходимо соединить: конец 1-й фазы – C_4 с началом 2-й – C_2 , конец 2-й – C_5 с началом 3-й – C_3 и конец 3-й – C_6 с началом 1-й фазы – C_1 .

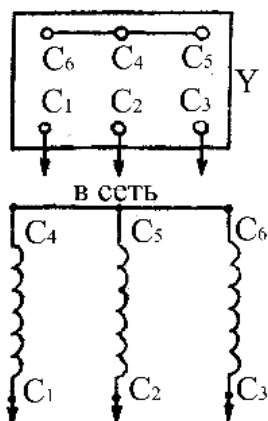


Рисунок 3.6 – По схеме «звезда»

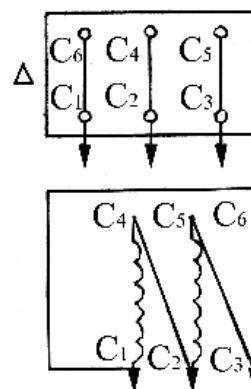


Рисунок 3.7 – По схеме «треугольник»

На клеммнике это получается постановкой трех перемычек, как показано на рисунке 3.7.

Сеть подключается к любым трем клеммам (C_1, C_2, C_3 или C_4, C_5, C_6).

Выбор той или иной схемы соединения обмоток зависит от напряжения сети и электродвигателя. На паспорте электродвигателя нормального исполнения указываются два напряжения – 220/380 В и схемы соединения Δ/Y .

Меньшее напряжение соответствует соединению обмоток на треугольник, большее – соединению в звезду.

Стробоскопический метод определения частоты вращения и скольжения

Для измерения скорости вращения (и скольжения) электрических машин применяются методы:

1. Измерение скорости с помощью тахометров, тахогенераторов, тахографов.
2. Определение скорости по частоте тока.
3. Стробоскопический метод.

Стробоскопический метод основан на стробозэффекте газосветных ламп и позволяет измерить скорость вращения или скольжение машины без механических связей прибора с валом машины, что является достоинством метода. Применяемые приборы называются стробоскопами или строботахометрами.

Способ заключается в следующем:

а) определение частоты вращения ротора (n_2).

На торце вала машины наклеивают бумажный или картонный диск с нанесенными на нем черной или белой краской чередующимися секторами, число секторов каждой окраски равно числу полюсов машины (как показано на рисунок 3.8).

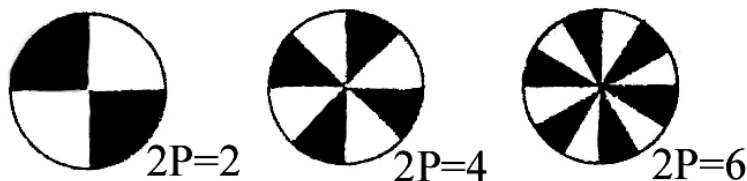


Рисунок 3.8 – Схема нанесения меток на торец вала электродвигателя

Диск освещается какой-либо газосветной лампой (обычно неоновой) дающей кратковременные световые вспышки точно соответствующие частоте тока. За один период переменного тока получается две вспышки лампы (рисунок 3.8). При синхронной скорости вращения машины в течение полпериода, соответствующего одной вспышке, вал ротора повернется точно на

два сектора (один черный и один белый), т.к. два сектора соответствуют одному полюсу машин. Поэтому при каждой новой вспышке лампы торец вала будет освещаться ею при одном и том же положении секторов, и, следовательно, будет казаться неподвижным.

Таким образом, для измерения частоты вращения ротора ручкой настройки вибратора строботометра подбирают такую частоту тока, чтобы вал ротора, освещенный мигающим светом, казался неподвижным. Шкала строботометра проградуирована в оборотах, поэтому сразу показывает частоту вращения ротора.

б) Определение скольжения ротора S.

У асинхронного двигателя ротор вращается медленнее вращающегося поля статора $n_2 < n_1$. При чем n_1 строго соответствует частоте тока f . Поэтому, если на шкале строботометра установить частоту вращения n_1 , то вал ротора между двумя вспышками лампы строботометра не успеет повернуться точно на два сектора и будет казаться, что диски медленно вращаются в сторону, обратную вращению ротора. Число полных оборотов диска в обратную сторону за одну минуту есть скольжение ротора – S.

За один период переменного тока произойдут две вспышки лампы продолжительностью τ . При частоте f_1 тока сети, равной 50 Гц, лампа делает $60f_1 \cdot 2 = 6000$ вспышек в минуту. Если неоновую лампу включить последовательно с диодом, то лампа будет делать 3000 вспышек в минуту. Согласно формуле

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (8)$$

частота вращения магнитного поля статора асинхронного двигателя может быть 3000, 1500, 1000...мин⁻¹ при числе пар полюсов $p=1,2,3...$ соответственно. На холостом ходу ротор вращается почти с частотой вращения поля. При частоте световых импульсов неоновой лампы 3000 раз в минуту и частоте вращения ротора двигателя, например, 1500 мин⁻¹ на один оборот ротора приходится две световых вспышки. Черный сектор осветится в двух местах. Таким образом, по числу освещенных секторов определяется число пар полюсов и частота вращения поля статора. Однако за это время одной вспышки вал не успевает повернуться на угол $\alpha = \frac{2\pi}{p}$ (p - число пар полюсов), как это делает поле статора, и будет казаться, что сектор медленно вращается в сторону, обратную вращению ротора. Подсчитав за минуту число оборотов обратного вращения сектора, определяется абсолютное скольжение (отставание) ротора Δn . Относительное скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\Delta n}{n_1} \quad (9)$$

а частота вращения ротора $n_2 = n_1 - \Delta n$ или $n_2 = n_1 (1-s)$.

Порядок выполнения работы

1. Произвести определение (маркировку) начал и концов обмотки статора электродвигателя.

2. Включить электродвигатель по схеме «звезды» и «треугольника»; провести реверсирование – изменение направления вращения.

3. Определить частоту вращения и скольжение стробоскопическим методом.

4. Замерить пусковой ток и ток холостого хода.

Определить: $K_{II} = \frac{I_{II}}{I_H}$ $K_{XX} = \frac{I_{XX}}{I_H}$

где I_H – номинальный ток электродвигателя по паспорту.

5. Определить параметры режима холостого хода, для чего собрать схему (рисунок 3.9).

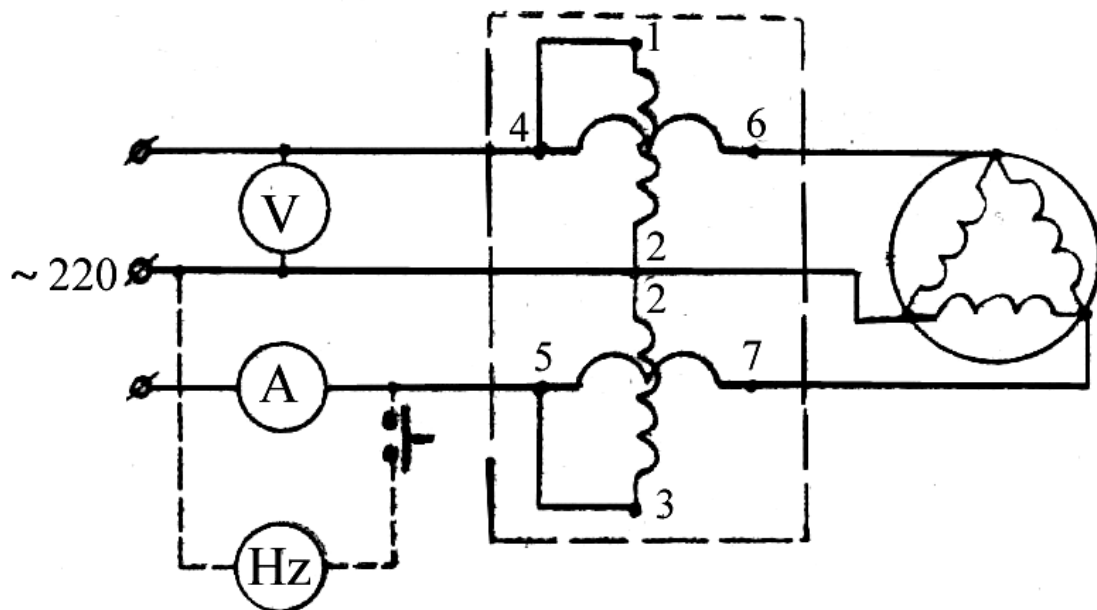


Рисунок 3.9 – Схема определения параметров холостого хода

Расчетные формулы:

полная или кажущаяся мощность $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ [ВА];

коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{P}{S}$,

где P – активная мощность по ваттметру.

Контрольные вопросы

1. Почему асинхронный электродвигатель не может иметь частоту вращения ротора – n_2 , равной частоте вращения поля статора – n_1 ?
 2. Зависят ли величина и длительность протекания пускового тока двигателя от нагрузки?
 3. Почему $\cos\varphi$ при холостом ходе очень мал, при полной нагрузке значительно высок?
 4. В чем заключается сущность стробоскопического эффекта и как он используется при определении скольжения ротора двигателя?
- Ответы обосновать.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: Изучить устройство и принцип действия трансформатора, методы испытания, снятия характеристик и построения векторной диаграммы,

Оборудование рабочего места

- | | |
|---|-------|
| 1. Однофазный трансформатор 220/12 В | 1 шт. |
| 2. Латр 220В 9 А | 1 шт. |
| 3. Амперметры на 1 и 5 А | 2 шт. |
| 4. Ваттметр многопредельный 300 В, 10 А | 1 шт. |
| 5. Вольтметры на 250 и 30 В | 2 шт. |
| 6. Реостат ползунковый | 1 шт. |
| 7. Плакаты, экспонат. | |

Устройство и принцип действия трансформатора

Трансформатор представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в другое напряжение при сохранении частоты тока.

Трансформатор состоит из стального замкнутого сердечника (магнитопровода) и двух, размещенных на нем, обмоток: первичной – W_1 , к которой подводится напряжение питающей сети – U_1 , и вторичной обмотки – W_2 , с которой снимается вторичное напряжение – U_2 или ЭДС. Магнитопровод предназначен для прохождения магнитного потока и изготавливается из листовой трансформаторной стали с изолировкой листов бумагой или лаком, что необходимо для уменьшения потерь в стали от перемагничивания (гистерезиса) и вихревых токов и, тем самым, уменьшения нагрева сердечника. Обмотки (катушки) изготавливается из обмоточных проводов с бумажной или хлопчатобумажной изоляцией круглого или прямоугольного сечения

(последнее при больших токах); обмотки изолируются друг от друга и от магнитопровода; особенно надежной изготавливается изоляция высоковольтной обмотки.

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции. Под действием приложенного к первичной обмотке напряжения по ней протекает ток I_1 и создается магнитный поток Φ , который замыкается по стальному сердечнику, пересекает витки вторичной обмотки $-W_2$ и индуцирует в ней ЭДС E_2 , также за счет самоиндукции ЭДС в первичной обмотке E_1 .

Действующие значения ЭДС определяются

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Phi, [\text{В}]; \quad (1)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot W_2 \cdot \Phi, [\text{В}]. \quad (2)$$

Коэффициент трансформации определяется отношением:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{I_2}{I_1} = K. \quad (3)$$

При холостом ходе трансформаторы (вторичная обмотка разомкнута, и ток в ней отсутствует) вторичное напряжение равно ЭДС ($U_{20} = E_2$).

Ток холостого хода (I_0) также очень мал ($2 \div 6\%$ от номинального); поэтому, пренебрегая падением напряжения ($\Delta U_1 \approx 0$) можно считать для холостого хода $U_{10} = E_1$. Таким образом, коэффициент трансформации можно определить из отношения напряжений при холостом ходе:

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (4)$$

Примечание: все величины, имеющие индекс «нуль» (I_0 ; U_{10} ; U_{20} и т.д.) относятся к режиму холостого хода; имеющие индекс «к» – к режиму или опыту короткого замыкания (I_{1k} ; U_{1k} и т.д.), имеющие индекс «н» – к номинальному, т.е. 100%-ному нагрузочному режиму, индекс «1» – к первичной обмотке, индекс «2» – ко вторичной обмотке.

Коэффициент полезного действия.

Опыты холостого хода и короткого замыкания

К.п.д. трансформатора (η) определяется:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (5)$$

где P_2 – активная мощность, отдаваемая со вторичной обмотки, Вт;

P_1 – активная мощность, потребляемая первичной обмоткой из сети, Вт;

ΔP – потери мощности в трансформаторе, Вт.

При работе трансформатора различают потери мощности электрические - в обмотках ΔP_s , которые идут на нагрев обмоток и пропорциональны квадрату

силы тока: $\Delta P_{\vartheta} = I^2 \cdot R$, (6) и потери магнитные - в стали ΔP_m , которые идут на нагрев стали (обусловлены перемагничиванием и вихревыми токами в стали магнитопровода).

Таким образом

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{\vartheta}. \quad (6)$$

В режиме холостого хода ток во вторичной обмотке равен нулю, в первичной обмотке имеет очень малое значение, следовательно, потери в обмотках при холостом ходе будут очень малы $\Delta P_{\vartheta} = I_0^2 \cdot R \approx 0$ (ими можно пренебречь) и потребляемая мощность – P_0 идет на покрытие потерь в стали:

$$P_0 = \Delta P_m. \quad (7)$$

Потери в обмотках определяются из опыта короткого замыкания. В опыте короткого замыкания вторичную обмотку замыкают накоротко, а к первичной подводит пониженное напряжение $U_{1к}$ такой величины, чтобы токи в обмотках были равны номинальным $I_{1н}$; $I_{2н}$. При таком небольшом напряжении ($U_k = 0,03 \div 0,05 U_n$) магнитный поток в сердечнике очень мал и потери в стали также незначительны, ими можно пренебречь ($\Delta P_m \approx 0$), поэтому мощность, потребляемая трансформатором P_k , идет на покрытие потерь в обмотках:

$$P_k = \Delta P_{\vartheta}. \quad (8)$$

Таким образом, потери мощности трансформатора при номинальном напряжении $U_1 = U_n$ и номинальных токах $I_{1н}$; $I_{2н}$ равны сумме потерь в стали и обмотках, полученных из опытов холостого хода и короткого замыкания:

$$\Delta P = \Delta P_{\vartheta} + \Delta P_m = P_k + P_0. \quad (9)$$

Потери в стали для нормальных режимов работы трансформатора являются постоянными:

$$\Delta P_m = P_0 = const. \quad (10)$$

Потери в обмотках для расчета характеристик удобнее определять по формуле

$$\Delta P_{\vartheta} = \beta^2 \cdot P_k, \quad (11)$$

где $\beta = \frac{I_1}{I_{1н}}$ - степень нагрузки трансформатора;

I_1 - ток нагрузки, при котором нужно определить потери в обмотках, А;

$I_{1н}$ - номинальный ток, А;

P_k - потери мощности в обмотках, соответствующие номинальному току (из опыта к.з.), Вт.

Величина \bar{U}_k (или e_k) полученная из опыта короткого замыкания, называется напряжением короткого замыкания трансформатора и выражается

обычно в процентах от номинального напряжения:

$$U_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{U_{1H}} \cdot 100\% . \quad (12)$$

Для трансформаторов небольшой мощности (до 100 – 320 кВА) $U_{\kappa} = 3 - 5\%$.

Порядок выполнения работы.

1. Записать паспортные данные трансформатора в таблицу 4.1

Тип	Число фаз	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение		Номинальные токи		Назначение	Способ охлаждения
			Первич. U_{1H} , В	Вторич. U_{2H} , В	Первич. I_{1H} , А	Вторич. I_{2H} , А		

2. Собрать схему испытания трансформатора рисунок 4.1.

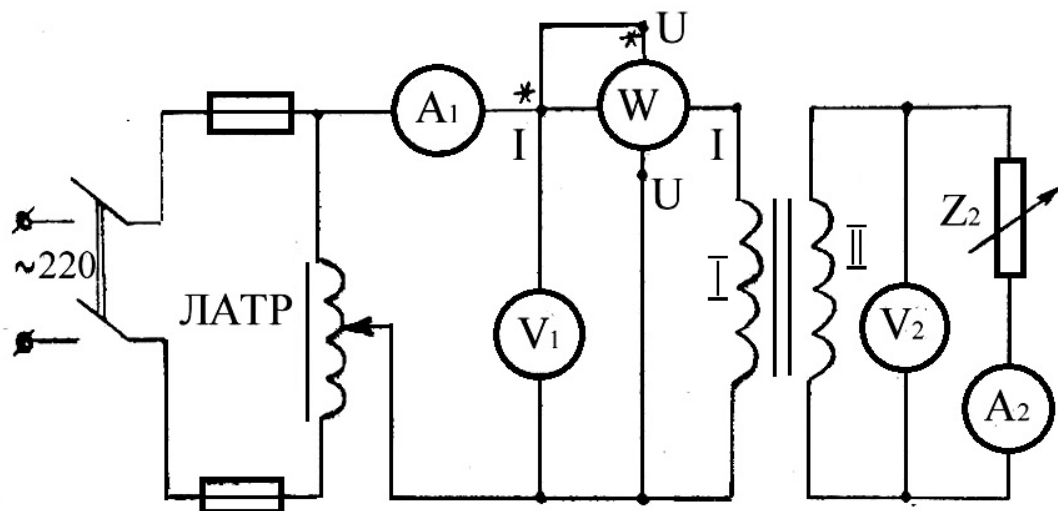


Рисунок 4.1 – Схема испытания трансформатора

3. Опыт холостого хода

Во вторичной цепи (рисунок 4.1) отсоединить амперметр A_2 и нагрузку Z_2 , оставить только вольтметр V_2 . Включить схему и установить ЛАТРОм номинальное напряжение U_{1H} . Произнести замер и записать в таблицу 4.2

Таблица 4.2 – Результаты измерений и расчетов

Измерено				Вычислено			
I_0 , А	U_{10} , В	U_{20} , В	P_0 , Вт	$K = \frac{U_{10}}{U_{20}}$	$\cos \varphi_0$	φ_0 , град	S , ВА

Расчетные формулы:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} \cdot I_0} ; S = I_0 U_{10} .$$

4. Опыт короткого замыкания

В схеме рисунка 4.1 отсоединить вольтметр и нагрузку Z_2 , оставив только амперметр A_2 . Таким образом, вторичная обмотка замкнута накоротко, т.к. сопротивление амперметра очень мало $R_A \approx 0$.

а) предварительно перед включением схемы в сеть регулятором напряжения (ЛАТР) установить его выходное напряжение на нуль;

б) включить сеть и постепенно повышать напряжение регулятором (начиная от нуля), наблюдая за показаниями амперметров; при установлении в обмотках номинальных токов $I_{1н}$, $I_{2н}$ прекратить повышение напряжения и произвести измерения.

Примечание: Значения номинальных токов трансформатора, установленного в лаборатории, принимаются по паспортным данным.

Таблица 4.3 – Таблица измерений и расчетов

Измерено				Вычислено								
$U_k, В$	$I_{1к} А$	$I_{2к} А$	$P_{1к} Вт$	Сопротивление, Ом								
				Z_k	R_k	X_k	R_1	R_2	X_1	X_2	Z_1	Z_2

Расчетные формулы:

Сопротивления обеих обмоток трансформатора:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1к}}; \quad R_k = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

Сопротивление первичной обмотки

$$Z_{1к} = \frac{Z_k}{2}; \quad R_1 = \frac{R_k}{2}; \quad X_1 = \frac{X_k}{2}$$

Сопротивление вторичной обмотки

$$Z_{2к} = \frac{Z_k}{2K}; \quad R_2 = \frac{R_k}{2K}; \quad X_2 = \frac{X_k}{2K}$$

где K – коэффициент трансформации.

5. Снятие нагрузочной характеристики

Во вторичной цепи трансформатора соединять все приборы согласно схеме (рисунок 4.1).

Движок нагрузочного реостата установить на наибольшее сопротивление. Схему включить в сеть, ЛАТРом установить номинальное напряжение $U_{1н}$ (только для начальной точки, в дальнейшем напряжение не регулировать).

Произвести замеры (4 – 5 точек), меняя ток нагрузки реостатом от нуля до номинального.

Таблица 4.4 – Таблица измерений и расчетов

Измерено					Вычислено				
U ₁ , В	U ₂ , В	I ₁ , А	I ₂ , А	P ₁ , Вт	ΔP _э , Вт	P ₂ , Вт	η	cos φ ₁	cos φ ₂

Расчетные формулы

$$P_2 = P_1 - \Delta P; \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}; \cos \varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}$$

$$S_H = U_H \cdot I_H, [\text{ВА}]; \quad Q_H = U_H \cdot I_H \cdot \sin \varphi, [\text{ВАр}].$$

Определить номинальные значения активной (P_H), реактивной (Q_H) и полной (S_H) мощностей трансформатора.

Построить кривые зависимости U₂, ΔP_э, η, ΔP_м, от I₂ и векторную диаграмму нагрузочного режима трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Почему сердечник (магнитопровод) изготавливается из тонколистовой стали с изолировкой листов?
2. Что такое коэффициент трансформации, объяснить его значение для повышающего и понижающего трансформатора?
3. Дайте определение к.п.д. трансформатора.
4. При каком значении нагрузки (I₂ в % от I_{1H}) наступает наибольшее значение к.п.д. трансформатора (экономический режим)? Каково соотношение потерь в меди и стали в этой точке?
5. В чем достоинство метода опытов холостого хода и короткого замыкания при определении параметров и характеристик трансформатора? Рассмотрите, анализируя затрачиваемые мощности.

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы: Изучить устройство, принцип действия, схемы и методы снятия рабочих характеристик.

Оборудование рабочего места

1. Установка мотор-генератор 1 кВт – 1 шт.
2. Виток с приборами постоянного тока:

- | | |
|---------------------------------------|--------------|
| - вольтметр на 250 В | – 1 комплект |
| - амперметры на 1 и 10А | – 1 комплект |
| 3. Реостат на 2–3 кОм, 0,2 А | – 1 шт. |
| 4. Комплект нагрузочных сопротивлений | – 1 комплект |
| 5. Плакаты. | |

Устройство и принцип действия

Основными элементами конструкции машины является: станина с закрепленными на ней главными и добавочными полюсами, якорь, щеточный механизм, подшипниковые щиты. Станина служит для крепления узлов и деталей машины, а также является магнитопроводом, поэтому изготавливается из черных металлов (чугуна, стали) имеющих высокую магнитную проницаемость. Главные полюсы, представляют собой электромагниты, предназначенные для создания основного магнитного потока состоят из сердечников, собранных из толстолистовой стали (для удобства технологии изготовления) и, размещенных на них, катушек шунтовой обмотки возбуждения, которая соединяется параллельно с обмоткой якоря, катушки намотаны из тонкого провода, имеют большое число витков. Добавочные полюсы также состоят из сердечников и катушек, выполненных из провода большого сечения при малом числе витков, соединяются последовательно с обмоткой якоря, предназначены для устранения реакции якоря и улучшения характеристик машины. Якорь машины – вращающаяся часть имеет стальной сердечник – магнитопровод, собранный из листовой электротехнической стали, листы изолированы для устранения вихревых токов и нагрева, обмотку, размещенную в пазах сердечника, коллектор, к пластинам которого припаиваются концы катушек обмотки якоря. Коллектор собран из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала изоляционными прокладками. Щеточный механизм, состоящий из траверсы, щеток и щеткодержателей, служит для передачи тока между коллектором и щетками.

Генератор постоянного тока работает на принципе электромагнитной индукции. На обмотку возбуждения главных полюсов подается постоянный ток возбуждения – I_B , который создает основной магнитный поток $\Phi_{ш}$ (шунтовой поток). Якорь машины получает вращение от первичного двигателя, проводники обмотки якоря при вращении пересекают силовые линии магнитного поля и в обмотке индуцируется переменная ЭДС, проходя через коллектор на щетки она выпрямляется; таким образом, со щеток снимается постоянный ток. Для питания обмотки возбуждения полюсов постоянный ток берется со щеток этой же машины; для индуктирования ЭДС в начальный

момент работы сердечники главных полюсов должны иметь остаточный магнетизм (остаточный магнитный поток $\Phi_{\text{ост}}$).

Основной шунтовой магнитный поток – $\Phi_{\text{ш}}$ и остаточный – $\Phi_{\text{ост}}$ должны совпадать по направлению.

В нагрузочном режиме ток, протекающий по обмотке якоря, создает магнитный поток якоря – $\Phi_{\text{я}}$, который противодействует основному потоку полюсов – $\Phi_{\text{ш}}$, искажает и уменьшает его, в результате чего уменьшается напряжение на щетках. Это явление называется реакцией якоря; для его устранения установлены добавочные полюсы, магнитный поток которых направлен против потока якоря и погашает его. Регулирование напряжения генератора в различных режимах производится шунтовым реостатом, который изменяет ток возбуждения, а, следовательно, основной магнитный поток и напряжение.

Указания по проведению испытания генератора

I. Проверка остаточного магнетизма производится подключением вольтметра к клеммам якоря $Я_1, Я_2$. При вращении якоря от приводного двигателя и наличия остаточного магнетизма в сердечниках полюсов вольтметр покажет остаточную ЭДС – $E_{\text{ост}}$. Отсутствие ЭДС свидетельствует о размагничивании полюсов, их нужно подмагнитить, подключив постоянный ток к шунтовой обмотке от любого источника тока.

Основными характеристиками генератора являются характеристики холостого хода, внешняя и регулировочная.

II. Характеристика холостого хода представляет собой зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при постоянной частоте вращения якоря.

$$E = f(I_B) \text{ при } I = 0 \text{ и } n = \text{const.}$$

Регулируя шунтовым реостатом ток возбуждения плавно повышают ЭДС якоря от E_{min} до значения $E = 125\% U_n$ (4 – 5 точек).

Предварительно до проведения опыта нужно правильно присоединить обмотку возбуждения (клеммы $Ш_1$ и $Ш_2$) к якорю ($Я_1 Я_2$), для чего:

1. Не подключая обмотку возбуждения вращают якорь и измеряют остаточную ЭДС.

2. Затем подключают обмотку возбуждения (собирают схему опыта х.х.), дают небольшой ток возбуждения (I_B), регулируя сопротивлением реостата. Если при вращении якоря вольтметр покажет возрастание ЭДС, то обмотка соединена правильно (остаточный и шунтовой магнитные потоки совпадают по направлению). Если ЭДС уменьшилась, то нужно поменять местами клеммы $Ш_1$ и $Ш_2$.

III. Внешняя характеристика представляет зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянных значениях частоты вращения якоря и сопротивления шунтового реостата.

$$U = f(I) \text{ при } n = \text{const и } R_p = \text{const}$$

Для снятия характеристики включают машину и реостатом возбуждения устанавливают номинальное напряжение – U_n при отключенной нагрузке ($I = 0$), положение реостата в дальнейшем не меняют. Подключают нагрузку и производят измерения (3 - 4 точки, до $I = I_n$). Внешняя характеристика показывает, что с увеличением тока нагрузки напряжение генератора уменьшается. Это объясняется тремя факторами: потерей напряжения в цепи якоря, влиянием реакции якоря и уменьшением тока возбуждения при уменьшении напряжения генератора.

$$U = E - I_a R_a - E_{p.a} - \Delta U_B$$

где E – ЭДС, индуцируемая в якоре;

$I_a R_a$ – потеря напряжения в цепи якоря;

$E_{p.a}$ – противо-эдс реакции якоря;

ΔU_B – потеря напряжения за счет уменьшения возбуждения, B .

Уменьшение напряжения от двух первых причин приводит к уменьшению тока возбуждения $I_B = \frac{U}{R_B} (U \downarrow \text{ значит и } I_B \downarrow)$, что влечет за собой

уменьшение магнитного потока, а, следовательно, и напряжения. Таким образом, анализ внешней характеристики выявляет необходимость регулирования напряжения генератора при изменениях нагрузки. Параметры такого регулирования, определяются снятием регулировочной характеристики.

IV. Регулировочная характеристике представляет зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянных значениях напряжения и частоты вращения:

$$I_B = f(I) \text{ при } U = \text{const и } n = \text{const.}$$

Последовательность снятия характеристики:

1. Пускают генератор, и реостатом возбуждения устанавливают номинальное напряжение – U_n при отключенной нагрузке ($I = 0$).

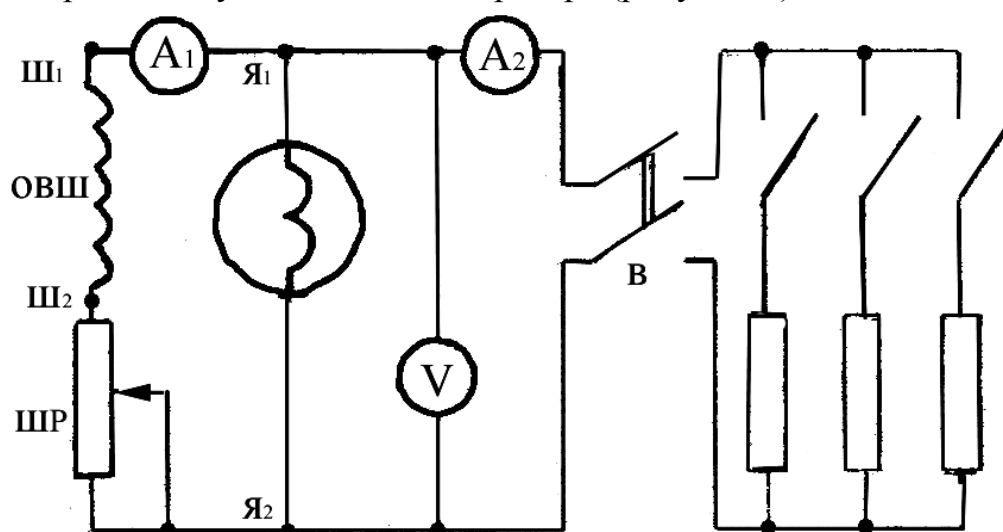
2. Включают нагрузку (ступенями от $I = 0$ до $I = I_n$) и, регулируя ток возбуждения шунтовым реостатом, поддерживают номинальное напряжение генератора ($U = U_n = \text{const}$) на каждой ступени нагрузки.

Порядок выполнения работы:

1. Записать паспортные данные генератора:

тип, R_n , U_n , I_n .

2. Проверить наличие остаточного магнетизма, замерить $E_{ост}$.
3. Собрать схему испытания генератора (рисунок 1).



ОВШ – шунтовая обмотка возбуждения; Ш₁, Ш₂ – клеммы ОВШ;

ШР – шунтовой реостат; Я₁, Я₂ – клеммы обмотки якоря;

В – выключатель нагрузки

Рисунок 5.1 – Схема испытания шунтового генератора

4. Снятие характеристики холостого хода:

- а) отключить выключатель нагрузки "В", что обеспечивает режим холостого хода;
- б) установить самовозбуждение машины, т.е. правильность соединения ОВШ;
- в) снять характеристики и построить график $E = f(I_B)$.

5. Снятие внешней характеристики:

- а) при отключенном выключателе "В" установить номинальное напряжение $U = U_H$;
- б) включая нагрузки ступенями (по возрастанию тока) произвести измерения, построить график $U = f(I)$.

Таблица 5.1– Результаты измерений и расчетов

Измерение			расчет	
I [A]	I _B [A]	U [B]	ΔU	
			[B]	в % от U _H

$$\Delta U = U_H - U \text{ [B]} \text{ или } \Delta U = \frac{U_H - U}{U_H} 100\%.$$

Учитывая, что норма отклонения напряжения для электроустановок в с/х-

ве составляет $\pm 7,5\%$ от номинального, сделать заключение о необходимости регулирования.

6. Снятие регулировочной характеристики.

При холостом ходе установить номинальное напряжение U_n включая нагрузки на каждой ступени поддерживать номинальное напряжение, регулируя его реостатом возбуждения, построить график $I_B = f(I)$.

Контрольные вопросы

1. Для какого режима работы указаны паспортные данные машины?
2. Каково назначение главных и дополнительных полюсов, якоря, коллектора и щеток?
3. Объяснить принцип самовозбуждения генератора
4. В какой части генератора сохраняется остаточный магнетизм, как определяют его назначение? Что нужно сделать при его отсутствии?
5. Каков физический смысл начальной точки характеристики холостого хода генератора с самовозбуждением?
6. Каково назначение внешней характеристики, причины, определявшие изменение напряжения, сделайте вывод из анализа характеристики?
7. Объясните назначение и пользование регулировочной характеристикой.

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАУНДНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Цель работы – изучить особенность конструкции и работу генератора, метод и схему снятия внешней характеристики и расчета к.п.д.

Элементы теории

Компаундный генератор имеет такое же устройство, как и шунтовой; отличие заключается в том, что у него на главных полюсах имеются две обмотки возбуждения – шунтовая и серийная, серийная соединяется последовательно с обмоткой якоря, таким образом компаундный генератор имеет смешанное возбуждение (параллельное и последовательное). Серийная обмотка вступает в действие при работе в нагрузочном режиме. Ток якоря, протекая по ней, создает ампервитки намагничивания $I_{\text{я}} \cdot W_{\text{я}}$ и магнитный поток $\Phi_{\text{с}}$.

Таким образом результирующий магнитный поток главных полюсов складывается из трех потоков – остаточного – $\Phi_{\text{ост}}$, шунтового – $\Phi_{\text{ш}}$ и серийного – $\Phi_{\text{с}}$, которые должны быть согласны, т. е. совпадать по направлению.

$$\Phi = \Phi_{\text{ост}} + \Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}}. \quad (1)$$

При увеличении тока нагрузки создается падение напряжения, пропорциональное этому току, и напряжение генератора уменьшается.

$$U = E - \Delta U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (2)$$

Для поддержания напряжения необходимо компенсировать это падение напряжения путем увеличения магнитного потока. Эту функцию выполняет серийная обмотка возбуждения; ее магнитный поток дополнительно подмагничивает полюсы, за счет чего возрастает результирующий магнитный поток – Φ , а, следовательно, ЭДС и напряжение на клеммах генератора (этот процесс в генераторе происходит автоматически).

Указания по снятию внешней характеристики

Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $R_2 = \text{const}$ и $n = \text{const}$ компаундного генератора снимается аналогично шунтовому.

Собирают схему и устанавливают правильность соединения обмоток в следующем порядке:

а) собирают схему шунтового генератора (без серийной обмотки) устанавливают самовозбуждение;

б) включают генератор, дают небольшое возбуждение, такое чтобы напряжение составило 15 – 20% от $U_{\text{н}}$, включают малую нагрузку – 15 – 20% от $I_{\text{н}}$, измеряют напряжение, фиксируют положение шунтового реостата, останавливают генератор,

в) соединяют в схему серийную обмотку, включают генератор; если напряжение повысилось, то серийную обмотку включили правильно (согласно), если понизилось, то включили неправильно (встречно), необходимо поменять местами провода на клеммах $C_1 C_2$.

г) схема компаундного генератора собрана, снимают характеристику.

Коэффициент полезного действия.

КПД генератора определяется,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3)$$

где P_2 – полезная мощность, отдаваемая потребителям:

$$P_2 = U \cdot I, \quad (4)$$

где U – напряжение на клеммах генератора;

I – сила тока потребителей;

P_1 – полная мощность определяется:

$$P_1 = P_2 + \Delta P \quad (5)$$

где ΔP – потери мощности в генераторе, они складываются из следующих составляющих

$$\Delta P = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{В}} + \Delta P_{\text{С}} + \Delta P_{\text{МЕХ}} \quad (6)$$

где $\Delta P_{\text{я}}$ – потери мощности в цепи якоря

$\Delta P_{\text{В}}$ – потери мощности в шунтовой обмотке возбуждения, Вт;

$\Delta P_{\text{С}}$ – потери в стали (принимаются 1% от номинальной мощности $P_{\text{н}}$);

$\Delta P_{\text{МЕХ}}$ – механические потери, также 1% от $P_{\text{н}}$.

Потери в якоре $\Delta P_{\text{я}}$ определяется по формуле:

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + R_{\text{ДП}} + R_{\text{С}}) \quad (7)$$

где $I_{\text{я}}$ – сила тока якоря, А;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря, $R_{\text{я}} = 0,3 \text{ Ом}$;

$R_{\text{ДП}}$ – сопротивление дополнительных полюсов, $R_{\text{ДП}} = 0,4 \text{ Ом}$;

$R_{\text{С}}$ – сопротивление серийной обмотки возбуждения, $R_{\text{С}} = 0,5 \text{ Ом}$.

Потери на возбуждение определяются:

$$\Delta P_{\text{В}} = U \cdot I_{\text{В}} \quad (8)$$

или

$$\Delta P_{\text{В}} = I_{\text{В}}^2 \cdot R_{\text{Ш}}, \quad (9)$$

где $I_{\text{В}}$ – сила тока в шунтовой обмотке возбуждения, А;

U – напряжение на клеммах генератора, В;

$R_{\text{Ш}}$ – сопротивление шунтовой обмотки, $R_{\text{Ш}} = 700 \text{ Ом}$.

Порядок выполнения работы

1. Записать паспортные данные генератора в таблицу 6.1

Таблица 6.1 – Паспортные данные генератора

Тип	Способ и схема возбуждения	$P_{\text{н}}$ [кВт]	$U_{\text{н}}$ [В]	$I_{\text{н}}$ [А]

2. Собрать схему снятия внешней характеристики генератора (рисунок 6.1).

3. Проверить правильность соединения обмоток возбуждения:

а) отсоединить из схемы серийную обмотку (ОВС);

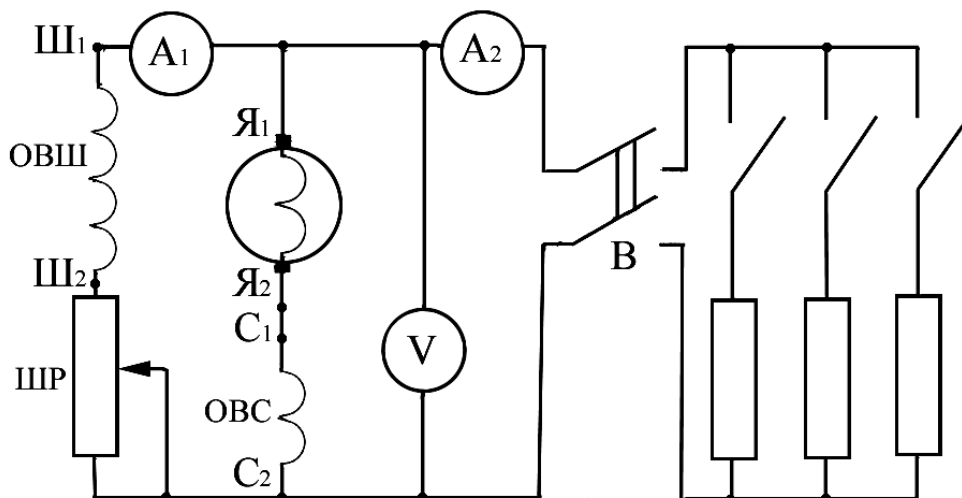
б) установить самовозбуждение;

в) включить выключатель "В" и одну ступень нагрузки, пустить генератор и отметить значение напряжения;

г) соединить ОВС, включить генератор, замерить напряжение, убедиться в правильности сборки схемы.

4. Снять внешнюю характеристику, изменяя ток нагрузки от нуля до номинального, подключая ступенями нагрузочное сопротивление.

Построить график $U = f(I)$ для шунтового (данные взять из работы № 5) и компаундного генераторов в одних осях координат. Провести их анализ и сравнение.



$Я_1, Я_2$ – клеммы обмотки якоря; ОВШ – шунтовая обмотка возбуждения; $Ш_1, Ш_2$ – клеммы шунтовой обмотки; ОВС – серийная обмотка возбуждения; C_1, C_2 – клеммы серийной обмотки; ШР – шунтовой реостат; A_1 – амперметр цепи шунтового возбуждения; A_2 – нагрузочный амперметр; В – выключатель нагрузки

Рисунок 6.1 – Схема испытания компаундного генератора

5. Выполнить расчет КПД шунтового и компаундного генератора для одной из точек характеристики (по заданию преподавателя), результаты записать в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Измерений и расчетов.

Схема генератора	измерено			Вычислено							
	I_B [A]	I [A]	U [B]	I_a [A]	P [Bт]	ΔP [Bт]	η	ΔP_a [Bт]	ΔP_B [Bт]	ΔP_c [Bт]	$\Delta P_{мех}$ [Bт]
шунтовой											
компаунд-ный											

Контрольные вопросы

1. Каково назначение серийной обмотки возбуждения?
2. Объясните принцип автоматического регулирования напряжения в компаундном генераторе при изменениях тока нагрузки.
3. Охарактеризуйте магнитные потоки, действующие в компаундном генераторе.
4. Расскажите последовательность сборки и настройки схемы компаундного генератора.
5. Дайте анализ внешних характеристик шунтового и компаундного

генераторов.

6. Как определяется к.п.д. генератора?

Литература

Основная учебная литература:

1. Иванов И.И., Соловьев Г.И., Фролов В.Я. Электротехника и основы электроники: Учебник 7-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Изд-во Лань, 2012. - 736с., ил.
2. Электротехника : учеб. пособие / И.С. Рыбков. — М. : РИОР : ИНФРА-М, 2018. — 160 с. — (ВО: Бакалавриат).
3. Бородин И.Ф., Шогенов А.Х., Судник Ю.А., Богольбенский В.М. Основы электроники - М.: КолосС, 2009. – 207 с.
4. Общая электротехника и электроника : учебник / Ю.А. Комиссаров, Г.И. Бабокин ; под ред. П.Д. Саркисова. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ИНФРА-М, 2018. — 479 с. — (Высшее образование: Бакалавриат). — www.dx.doi.org/10.12737/13474.
5. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Логос, 2000.
6. Бородин И.Ф., Шогенов А.Х., Судник Ю.А., Богольбенский В.М. Основы электроники - М.: КолосС, 2009. – 207 с.
7. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие /Ю.Г. Синдеев. – Изд. 14-е, стер. – Ростов н/Д: Феникс, 2011. – 407 с. – (Начальное профессиональное образование).
8. Касаткин А.С. Электротехника: Учебник /А.С.Касаткин, М.В. Немцов. - М.: Изд-кий центр Академия, 2008. -544 с.
9. Общая электротехника и электроника: Учебник / Комиссаров Ю.А., Бабокин Г.И. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 480 с.: 60х90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат) (Переплёт) ISBN 978-5-16-010416-4

Для заметок