



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электроснабжение»

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

*Лабораторный практикум  
для студентов электротехнических  
специальностей*

Часть 2

Минск 2009

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электроснабжение»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
МАШИНЫ  
И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Лабораторный практикум  
для студентов электротехнических  
специальностей

В 2 частях

Часть 2  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Минск 2009

УДК 621.3 (075.8)

~~ББК 31.261.7~~

Э 45

Составители:

*А.А. Гончар, М.М. Олешкевич,  
Ю.В. Макошко, В.М. Олешкевич*

Рецензенты:

*И.И. Сергей, А.А. Тишечкин*

**Гончар, А.А.**

Э 45      Электрические машины и трансформаторы: лабораторный практикум для студентов электротехнических специальностей: в 2 ч. / сост.: А.А. Гончар [и др.]. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 2. Электрические машины переменного тока. – 72 с.

ISBN 978-985-479-904-9 (Ч. 2).

В настоящем практикуме приведены содержание и схемы выполнения лабораторных работ по электрическим машинам переменного тока, а также даны методические указания по выполнению этих работ, приведены контрольные вопросы и требования к содержанию отчетов.

Часть 1 «Электрические машины постоянного тока и трансформаторы» (авторы: А.А. Гончар, М.М. Олешкевич, В.В. Романов) была издана в БНТУ в 2006 году

ISBN 978-985-479-904-9 (Ч.2)

ISBN 978-985-479-421-1

© БНТУ, 2009

**Правила  
техники безопасности и работы  
в лаборатории электрических машин**

1. Работа в лаборатории разрешается только после инструктажа по технике безопасности.
2. При работе необходимо быть предельно внимательным и осторожным, чтобы избежать соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, нельзя проникать за ограждения.
3. Включать установку можно только после получения разрешения преподавателя.
4. Изменения в схеме производить только при обесточенной установке.
5. При выполнении задания нельзя заниматься посторонними делами, ходить без дела по лаборатории.
6. В перерывах необходимо обесточивать установку.
7. Запрещается выполнение работы при отсутствии преподавателя или лаборанта, а также одному студенту.
8. При неисправности или несчастном случае немедленно отключить установку и известить преподавателя.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСКОРОСТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучение способов регулирования частоты вращения и характеристик многоскоростных асинхронных двигателей.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с установкой, запишите паспортные данные исследуемого двигателя, нагрузочного генератора, реостатов, измерительных приборов.

2. Собрать схему согласно рис. 13.1 для исследования характеристик двигателя при частоте вращения 1500 об/мин. Включить двигатель и, не возбуждая нагрузочный генератор, записать показания приборов, соответствующие холостому ходу двигателя. Возбудить нагрузочный генератор. Установить номинальное напряжение генератора и поддерживать его постоянным в процессе снятия характеристик. Включить рубильник РЗ и, уменьшая сопротивление нагрузочного реостата  $R_{нг}$ , нагрузить генератор, следовательно, и испытуемый двигатель. Нагружать двигатель до  $I_1 = 1,2 I_{н}$ . Показания приборов записать в табл. 13.1.

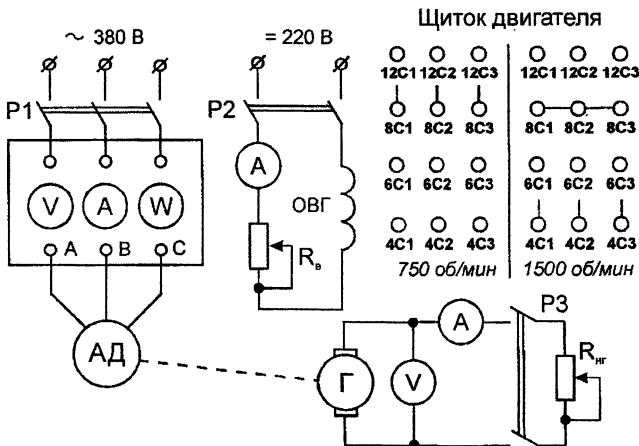


Рис. 13.1. Схема экспериментальной установки

Таблица 13.1

| №<br>п/п | Измерено     |              |               |                 |                 |                | Вычислено       |               |             |               |            |
|----------|--------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|-------------|---------------|------------|
|          | $I_1$ ,<br>А | $U_1$ ,<br>В | $P_1$ ,<br>Вт | $I_{нг}$ ,<br>А | $U_{нг}$ ,<br>В | $I_{в}$ ,<br>А | $n$ ,<br>об/мин | $P_2$ ,<br>Вт | $M$ ,<br>Нм | $\eta$ ,<br>% | $\cos\phi$ |

3. Собрать схему согласно рис. 13.1 для исследования характеристик двигателя при частоте вращения 750 об/мин. Выполнить все измерения аналогично п. 2. Данные опыта занести в табл. 13.1.

### Методические указания

Частота вращения ротора асинхронного двигателя может регулироваться изменением частоты вращения поля (регулированием частоты питающего напряжения  $f$  или числа пар полюсов  $p$ ) и изменением скольжения (например, введением реостата в цепь ротора):

$$n = \frac{f}{p}(1 - s). \quad (13.1)$$

Изменение числа пар полюсов дает возможность ступенчатого регулирования частоты вращения в многоскоростных асинхронных двигателях со специальной обмоткой. Полносно-переключаемый двигатель может быть выполнен с одной обмоткой или двумя независимыми обмотками, каждая из которых имеет свое число полюсов.

В однообмоточных двигателях переключение числа полюсов достигается изменением направления тока в части обмотки. На рис. 13.2 и 13.3 показаны некоторые принципиальные схемы соединения полносно-переключаемых обмоток.

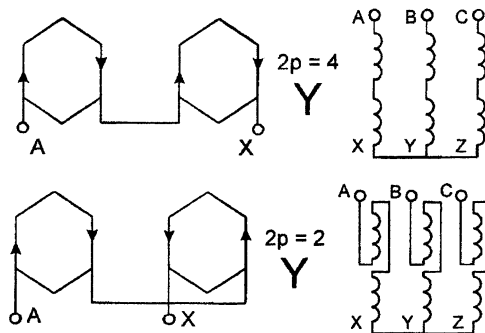


Рис. 13.2

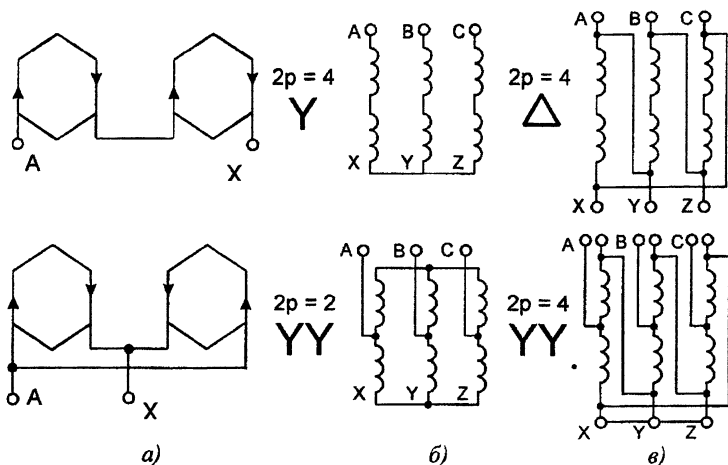


Рис. 13.3. Схемы соединения полюсно-переключаемых обмоток

На рис. 13.2 представлена схема с переключением «звезда» - «звезда», на рис. 13.3 – схема «звезда» - «двойная звезда» (а, б) и «треугольник» - «двойная звезда» (в).

В общем случае полюсно-переключаемой обмотки момент двигателя прямо пропорционален индукции в воздушном зазоре

$$M_{II} : M_I \approx B_{II} : B_I \quad (13.2)$$

а индукция в зазоре изменяется прямо пропорционально напряжению, числу полюсов и обратно пропорционально числу витков:

$$B_{II} : B_I = \frac{U_{II} \cdot P_{II}}{w_{II}} : \frac{U_I \cdot P_I}{w_I} \quad (13.3)$$

Мощность же двигателя прямо пропорциональна величине момента и частоте вращения, поэтому

$$P_{II} : P_I = \frac{M_{II} \cdot f}{P_{II}} : \frac{M_I \cdot f}{P_I} \quad (13.4)$$

На основании (13.2)–(13.4) можно установить, как изменяются располагаемые, т.е. допустимые с точки зрения нагрева, момент

и мощность при переключении полюсов. (Индекс  $\Pi$  относится к большему числу полюсов, следовательно, к меньшей частоте вращения.)

При соединении обмоток «звезда» ( $2p_{\Pi} = 4$ ) - «звезда» ( $2p_I = 2$ )  $U_{\Pi} = U_I$ ,  $w_{\Pi} = w_I$  и  $P_{\Pi} = 2P_I$ . На основании соотношений (13.2) и (13.3) в этой схеме  $M_{\Pi} : M_I = 2$ , т.е. момент изменяется обратно пропорционально частоте вращения ротора, а мощность  $P_{\Pi} : P_I = 1$  остается неизменной.

При соединении обмоток «звезда» ( $2p_{\Pi} = 4$ ) - «двойная звезда» ( $2p_I = 2$ )  $U_{\Pi} : U_I = 1/2$ ,  $w_{\Pi} = w_I$ ,  $P_{\Pi} : P_I = 2$ , поэтому момент, развиваемый двигателем,  $M_{\Pi} : M_I = 1$  остается неизменным.

При схемах соединения «Звезда» и «Треугольник» отношение индукций  $B_{\Pi} : B_I$  равно соответственно 1,16 и 1,73.

Рабочие и механические характеристики по опытным данным рассчитываются согласно методическим указаниям лабораторной работы № 16.

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого двигателя, нагрузочного генератора, измерительных приборов.
3. Электрическая схема установки.
4. Таблица измерений и расчетов.
5. Расчетные формулы с пояснениями.
6. Механические и рабочие характеристики двигателя при рассмотренных числах полюсов двигателя.
7. Выводы по работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Поясните принцип переключений числа пар полюсов в многоскоростных асинхронных двигателях.
2. Докажите, что вращающий момент двигателя зависит от индукции.
3. Покажите, что индукция при переключении полюсов изменяется прямо пропорционально напряжению, числу полюсов и обратно пропорционально числу витков.
4. Покажите на основании соотношений (13.2)–(13.4) как изменяется индукция, вращающий момент, мощность двигателя при переключении числа полюсов по схеме «треугольник» - «двойная звезда» («звезда» - «треугольник»). Начертите схему.



5. Что означает выражение: двигатель может работать с постоянным моментом или с постоянной мощностью?

6. Какие еще вы знаете способы регулирования частоты вращения ротора асинхронных двигателей? Как они осуществляются? В чем их достоинства и недостатки?

### Лабораторная работа № 14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА

**Цель работы:** изучение свойств асинхронной машины в режиме индукционного регулятора.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией индукционного регулятора. Записать паспортные данные машины и измерительных приборов.

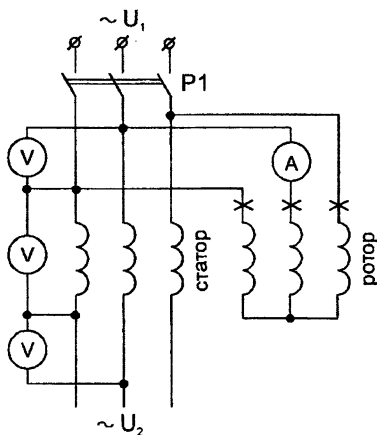


Рис. 14.1. Схема экспериментальной установки

2. Собрать схему согласно рис. 14.1.

3. Снять зависимость выходного напряжения  $U_2$  в зависимости от положения ротора  $\alpha$  при постоянном подведенном напряжении  $0,5U_n$ .

При снятии характеристики ротор регулятора поворачивать каждый раз на  $30^\circ$ . Характеристику снять в пределах изменения угла поворота ротора от  $0$  до  $360^\circ$ . Данные измерений занести в табл. 14.1.

Таблица 14.1

| №<br>п/п | Измерено  |                   |           |         | Вычислено |           |
|----------|-----------|-------------------|-----------|---------|-----------|-----------|
|          | $U_1$ , В | $\alpha$ , градус | $U_2$ , В | $I$ , А | $E_2$ , В | $U_2$ , В |
|          |           |                   |           |         |           |           |

### Методические указания

Индукционный регулятор представляет собой асинхронную машину с неподвижным фазным ротором и применяется для регулирования выходного напряжения. Схема включения индукционного регулятора представлена на рис. 14.1.

Трехфазное напряжение подается на обмотку ротора. Намагничивающий ток создает магнитный поток, вращающийся с  $n = fp$ , об/с. Предположим, что магнитный поток вращается по часовой стрелке и что оси обмоток статора и ротора совпадают в пространстве (рис. 14.2). Магнитный поток, созданный намагничивающим током ротора, одновременно набегает на обе обмотки и наводит в них ЭДС, совпадающие по фазе и направленные навстречу напряжению  $U_1$ . Напряжение на выходе индукционного регулятора в этом случае представляет собой алгебраическую сумму напряжения  $U_1$  и ЭДС  $E_2$  и равно

$$U_2 = U_{2\max} = U_1 + E_2. \quad (14.1)$$

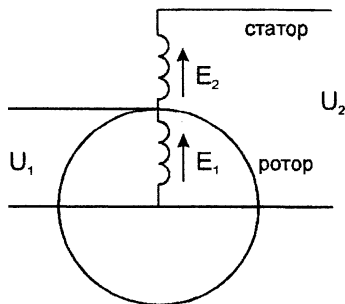


Рис. 14.2

Повернем ротор на  $180^\circ$  электрических градусов. При этом магнитный поток и ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  не изменяются по величине, но изменяется фаза ЭДС  $E_2$  на  $180^\circ$ , так как теперь вращающийся магнитный поток набегает на обмотки ротора и статора со сдвигом в  $180^\circ$ . При этом на выходе индукционного регулятора напряжение будет минимальным

$$U_{2\min} = U_1 - E_2. \quad (14.2)$$

Повороту ротора на произвольный геометрический угол  $\alpha$  соответствует изменение фазы ЭДС  $E_2$  на угол  $p \cdot \alpha$  электрических градусов, а напряжение на выходе регулятора равно геометрической сумме векторов:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2. \quad (14.3)$$

Таким образом, геометрическим местом концов вектора ЭДС  $\dot{E}_2$ , а следовательно, и напряжения  $\dot{U}_2$  является окружность (рис. 14.3). Очевидно, что напряжение  $U_2$  можно плавно регулировать в пределах от  $U_{2\min}$  до  $U_{2\max}$ . При этом также изменяется и фаза вторичного напряжения относительно приложенного напряжения.

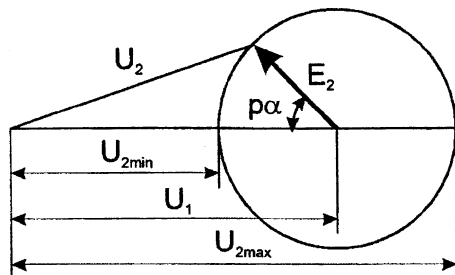


Рис. 14.3

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемой машины и измерительных приборов.

3. Схема экспериментальной установки.
4. Таблица измерений и вычислений.
5. Расчетные формулы с пояснениями.
6. Векторная диаграмма индукционного регулятора.
7. Зависимость  $U_2(p\alpha)$ , полученная экспериментально и расчетным путем с помощью векторной диаграммы.
8. Выводы по работе.
9. Ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1. Поясните, каким образом регулируется напряжение с помощью индукционного регулятора.
2. Почему выходное напряжение обычно снимается со статора?
3. Начертите схему сдвоенного индукционного регулятора. В чем его преимущество?
4. Сравните индукционный регулятор и автотрансформатор. В чем их достоинства и недостатки? Каково их назначение?
5. В соответствии с построенной в результате опыта векторной диаграммой определите напряжение  $U_2$  при повороте ротора на угол  $\alpha = 30^\circ$ , если число пар полюсов индукционного регулятора  $p = 2$  или 3.
6. Начертите векторные диаграммы асинхронной машины с неподвижным ротором при холостом ходе и индукционного регулятора. Чем они отличаются? Почему?
7. Начертите векторную диаграмму и схему замещения асинхронной машины с неподвижным ротором при коротком замыкании. Что такое сопротивление короткого замыкания?
8. Начертите схему включения фазорегулятора. Поясните принцип его действия. Каково назначение фазорегулятора?

### *Лабораторная работа № 15*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**Цель работы:** изучение схем обмоток машин переменного тока.

### **Порядок выполнения работы**

1. Рассчитать и начертить схему одной из трехфазных однослойных обмоток по заданию преподавателя (эвольвентной, цепной

обмотки, обмотки «в развалку» или концентрической) с числом пар полюсов  $p = 2, 3$  или  $6$ , если число пазов статора  $Z = 36$ . Построить звезду пазовых ЭДС.

2. Начертить схему соединения активных проводников обмотки применительно к кольцевым катушкам, уложенным на статоре экспериментального двигателя.

3. Выполнить соединение проводников, выведенных на зажимы, согласно п. 2.

4. Соединить фазные обмотки в звезду, включить в сеть и на холостом ходу убедиться, что частота вращения ротора соответствует заданному числу полюсов обмотки.

5. При тех же исходных данных рассчитать и построить схему двухслойной петлевой обмотки с диаметральной или укороченным шагом (по заданию преподавателя).

### Методические указания

Если задано число пазов статора, число пар полюсов  $p$ , схема обмотки строится в следующем порядке:

1. Наносят пазы на плоскость развертки статора.

2. Разбивают длину окружности статора на полюсные деления

$$\text{по } \tau = \frac{Z}{2p} \text{ пазов.}$$

3. Выделяют фазные зоны с числом пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z}{6p} \text{ со сдвигом между зонами фаз } A, B \text{ и } C \text{ на угол } 2/3\pi \text{ или на}$$

$$\frac{Z}{3p} \text{ пазов.}$$

4. Соединяют проводники, принадлежащие одноименным фазным зонам, в такой последовательности, при которой обеспечиваются симметрия обмоток и минимальная длина лобовых частей, а ЭДС проводников, лежащих в одноименных фазных зонах (например,  $A$  и  $A'$ ,  $B$  и  $B'$ ,  $C$  и  $C'$ ) на соседних полюсных делениях, складываются.

На рис. 15.1 показана разбивка на фазные зоны окружности статора при  $Z = 12$ ,  $p = 2$  и приведены схемы соединения проводников для однослойных обмоток.

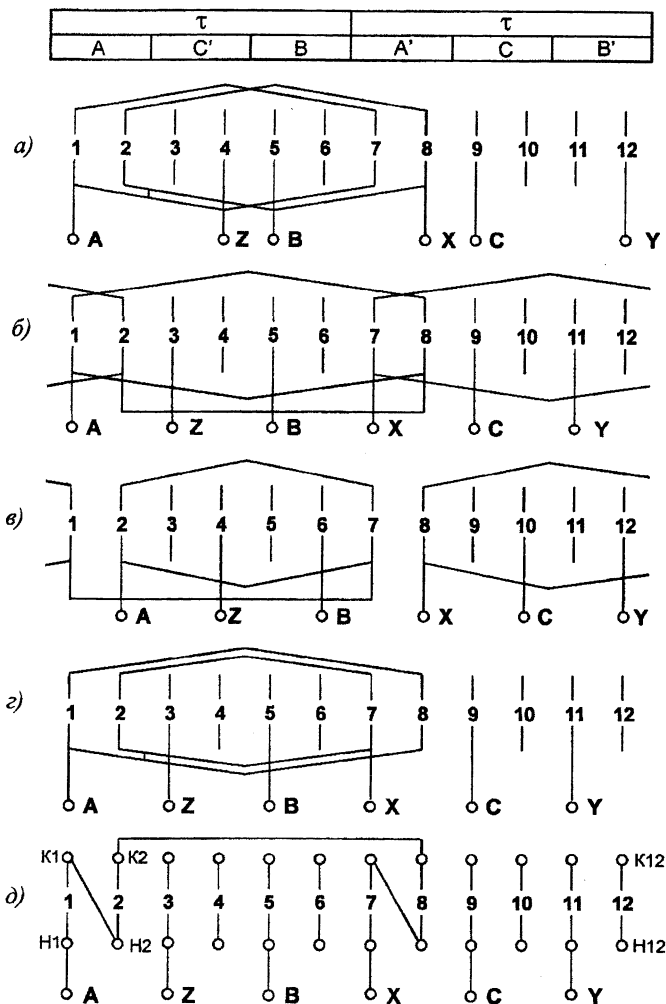


Рис. 15.1. Схемы соединения проводников однослойных обмоток:  
*a* – эвольвентная обмотка; *б* – цепная обмотка; *в* – обмотка «в развалку»;  
*г* – концентрическая обмотка

Из рис. 15.1 видно, что при одной и той же разбивке на фазные зоны проводники могут быть соединены по-разному. В зависимости от порядка соединения проводников и формы, которая придается лобовым частям, и различают названные четыре типа обмоток.

На рис. 15.2 представлена диаграмма пазовых ЭДС, одинаковая для всех четырех обмоток. Векторы ЭДС пазов сдвинуты на одинаковые углы  $\gamma = \frac{2\pi}{Z} \cdot p$ . ЭДС фазы представляет собой геометрическую сумму ЭДС проводников, расположенных в пазах, относящихся к одной фазной зоне.

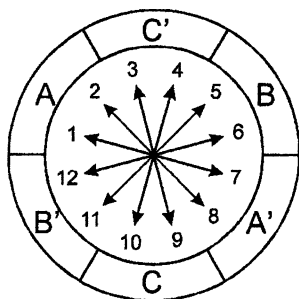


Рис. 15.2

Обмотка асинхронного двигателя экспериментальной установки выполнена в виде ряда кольцевых катушек. Одна сторона каждой лежит в пазу, вторая, не являющаяся активной, намотана вокруг спинки статора. Начала и концы всех катушек выведены на клеммную панель. На рис. 15.3 схематически показано расположение таких катушек на статоре с 12 пазами. Экспериментальная машина имеет 36 пазов. Из-за отсутствия многovitковых жестких лобовых соединений, свойственных обмоткам, здесь возможно соединение пазовых катушек в любой последовательности, удобной для сборки схемы. На рис. 15.1, д показана схема соединения катушек с помощью коротких перемычек.

Рассмотренные схемы однослойных обмоток выполняются только с диаметральной шагом, т.е. одноименные фазные зоны ( $A$  и  $A'$ ,  $B$  и  $B'$ ,  $C$  и  $C'$ ) сдвинуты на расстояние полюсного деления. Обмотки обладают свойствами диаметральных обмоток даже и в том случае, когда их катушки выполняются с укороченным шагом (рис. 15.1, е).

Двухслойные обмотки могут быть выполнены как с диаметральной, так и с укороченным шагом. При укороченном шаге двухслойную обмотку можно рассматривать как две однослойные с диаметральной

шагом, сдвинутые друг относительно друга на  $(\tau - y)$ . На рис. 15.4 показаны порядок разбивки на фазные зоны окружности статора для построения двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом и схема обмотки для одной фазы. Здесь  $Z = 12$ ,  $2p = 2$ ,  $\tau = 6$  пазов,  $y = 5$  пазов,  $\tau - y = 1$  паз. Остальные фазные обмотки строятся аналогично со сдвигом относительно первой на  $2/3\pi$  или на  $\frac{Z}{3p}$  пазов.

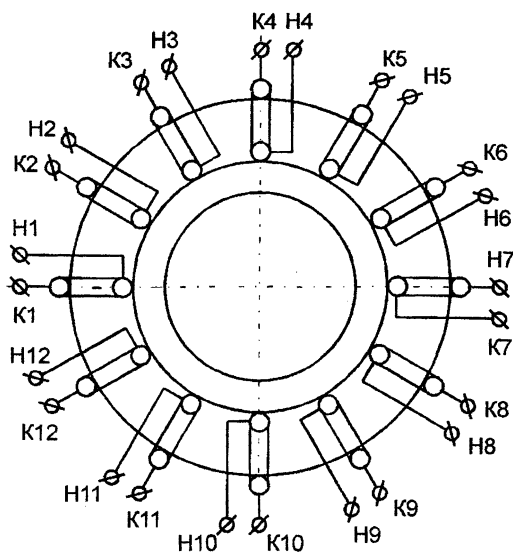


Рис. 15.3

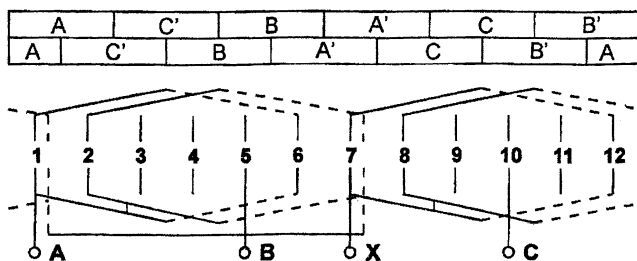


Рис. 15.4



## Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемой машины и измерительных приборов.
3. Расчетные формулы с пояснениями.
4. Развернутая электрическая схема заданной обмотки.
5. Упрощенная схема обмотки, собранная на макете.
6. Выводы по работе.
7. Ответы на контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы

1. Рассчитайте и начертите схему трехфазной однослойной обмотки с такими данными:

- а) эвольвентная обмотка:  $Z = 24, p = 2$ ;
- б) цепная обмотка:  $Z = 24, p = 2$ ;
- в) обмотка «в развалку»:  $Z = 24, p = 1$ ;
- г) концентрическая обмотка:  $Z = 18, p = 3$ ;  
 $Z = 18, p = 1$ .

При построении схемы обмотки достаточно вычертить все соединения для одной фазы и указать начала двух других фаз.

2. Сравните между собой однослойные обмотки разных типов по расходу меди, по симметрии фаз.

4. Назовите преимущества и недостатки двухслойных и однослойных обмоток.

5. Определите коэффициент обмотки, которую вы рассчитывали и собирали в лаборатории.

## Лабораторная работа № 16

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

**Цель работы:** изучение рабочих характеристик и свойств асинхронного двигателя.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой, записать паспортные данные исследуемого двигателя, нагрузочного генератора, реостатов, измерительных приборов.

2. Собрать схему для исследования рабочих характеристик асинхронного двигателя (рис. 16.1). Включить двигатель и, не возбуждая нагрузочный генератор, записать показания приборов.

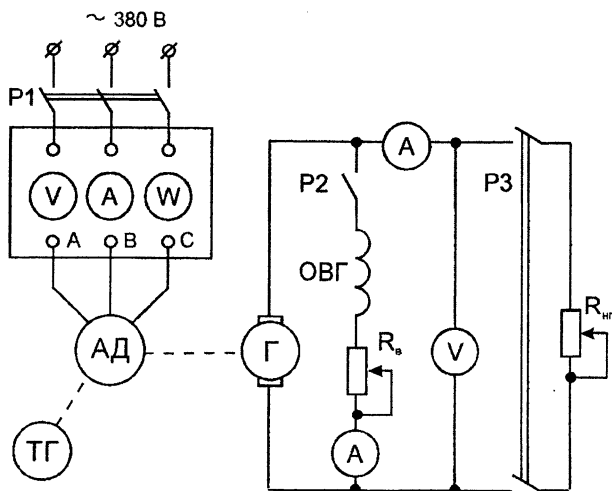


Рис. 16.1. Схема экспериментальной установки

3. Включить рубильник P2. Возбудить нагрузочный генератор. Установить номинальное напряжение на зажимах генератора и поддерживать его постоянным. Включить рубильник P3 и, уменьшая сопротивление нагрузочного реостата  $R_{нг}$ , нагрузить генератор, следовательно, и испытуемый двигатель. Нагрузку изменять от холостого хода до величины, при которой ток двигателя  $I_1 = 1,2 I_n$ . Сделать 5–7 отсчетов по приборам. Частоту вращения двигателя измерять с помощью тахометра. Результаты измерений занести в табл. 16.1.

Таблица 16.1

| №<br>п/п | Измерено     |              |               |                 |                 |              |                 | Вычислено   |     |               |        |               |
|----------|--------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-------------|-----|---------------|--------|---------------|
|          | $I_1$ ,<br>А | $U_1$ ,<br>В | $P_1$ ,<br>Вт | $I_{нг}$ ,<br>А | $U_{нг}$ ,<br>В | $I_g$ ,<br>А | $n$ ,<br>об/мин | $M$ ,<br>Нм | $s$ | $\cos\varphi$ | $\eta$ | $P_2$ ,<br>Вт |
|          |              |              |               |                 |                 |              |                 |             |     |               |        |               |

### Методические указания

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости момента  $M$ , тока статора  $I_1$ , коэффициента мощности

cosφ, КПД, частоты вращения  $n$ , скольжения  $s$  от полезной мощности  $P_2$  при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1н}$  и частоте  $f_1 = f_{1н}$ . Рабочие характеристики позволяют определить свойства двигателя, характеризующие его работу при различных нагрузках. Они могут быть построены по расчетным данным при проектировании двигателя с помощью круговой диаграммы и по опытным данным.

В настоящей работе характеристики снимаются методом непосредственной нагрузки. Нагрузка осуществляется с помощью генератора постоянного тока с параллельным возбуждением, который находится на общем валу с двигателем и работает на нагрузочный реостат.

Полезная мощность  $P_2$ , развиваемая асинхронным двигателем, равна мощности, развиваемой генератором, плюс сумма потерь в генераторе:

$$P_2 = I_{нг} \cdot U_{нг} + I_{я}^2 \cdot R_{я} + 2\Delta U_{щ} \cdot I_{я} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{доб} + I_{в} \cdot U_{нг}. \quad (16.1)$$

Ток якоря  $I_{я} = I_{нг} + I_{в}$ .

Добавочные потери  $\Delta P_{доб} = 0,01 \cdot P_{н} \cdot (I_{я} / I_{ян})^2$ .

Падение напряжения в щеточном контакте  $\Delta U_{щ} = 1$  В.

Сопротивление якоря принимается равным  $R_{я} = 1$  Ом.

Потери в стали и механические потери определяются по графикам  $\Delta P_{ст} = f(n)$ ,  $\Delta P_{мех} = f(n)$  (рис. 16.2).

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, равен отношению механической мощности двигателя к угловой частоте вращения ротора или, если пренебречь механическими и добавочными потерями в нем, приближенно может быть определен как

$$M \approx \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n}, \quad (16.2)$$

где  $n$  – частота вращения ротора, об/с.

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (16.3)$$

Полные потери в двигателе равны сумме:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{м1} + \Delta P_{м2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{доб}. \quad (16.4)$$

где  $\Delta P_{м1}$  и  $\Delta P_{м2}$  – потери в меди обмоток статора и ротора, пропорциональные квадрату тока, т.е. изменяющиеся с нагрузкой;

$\Delta P_{ст}$  – потери в стали статора (потери в стали ротора при нормальной частоте 1–3 Гц весьма малы и ими пренебрегают).

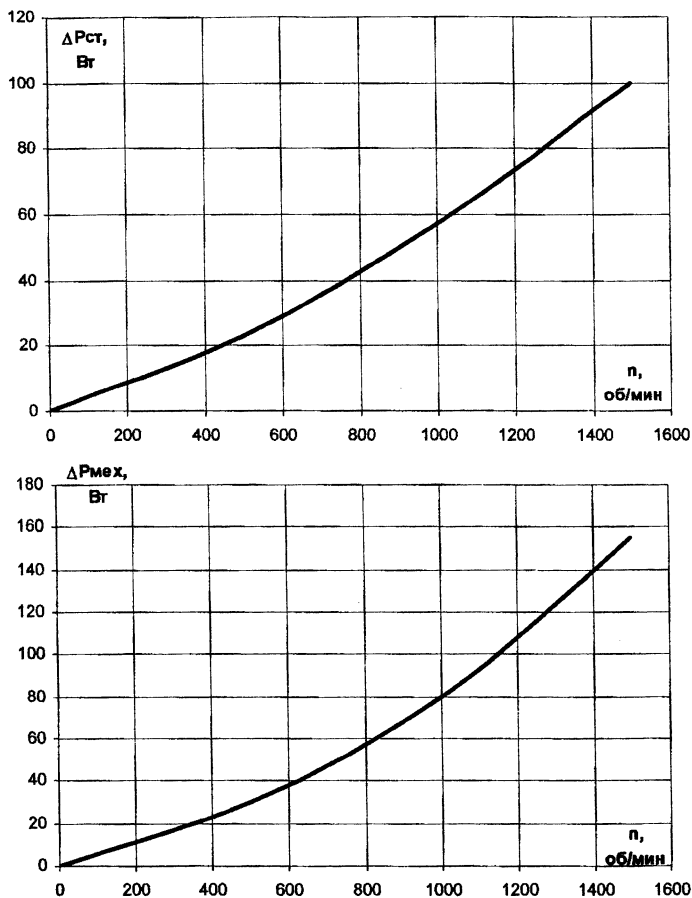


Рис. 16.2. Кривые потерь мощности для машины ПН-45

Потери в стали  $\Delta P_{ст}$  и механические  $\Delta P_{мех}$  при нагрузке двигателя изменяются мало, поэтому они относятся к постоянным.

Добавочные потери  $\Delta P_{доб}$  зависят частично от тока, частично от напряжения. Для простоты расчетов считают, что они изменяются пропорционально подводимой мощности.

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}. \quad (16.5)$$

Частота вращения ротора  $n$  с увеличением нагрузки падает. Изменение частоты вращения характеризуется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (16.6)$$

где  $n_1$  – синхронная частота вращения.

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого двигателя, нагрузочного генератора, реостатов, измерительных приборов.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Описание методики снятия рабочих характеристик.
5. Таблица измерений, вычислений и расчетные формулы с пояснениями.
6. Рабочие характеристики и механическая характеристика  $M(s)$ .
7. Выводы по работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия асинхронного двигателя. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
2. Каково назначение нагрузочного генератора в схеме экспериментальной установки? Как определяется в эксперименте полезная мощность, развиваемая двигателем?
3. Как изменяются скольжение и частота тока в роторе асинхронного двигателя при изменении нагрузки?

4. Какая взаимосвязь существует между полезной мощностью двигателя  $P_2$  и развиваемым им вращающим моментом?

5. Какие потери называются постоянными и какие переменными? Поясните ход кривой  $\eta$  ( $P_2$ ).

6. Поясните ход кривой  $\cos\phi$  ( $P_2$ ). Чем объясняется наличие максимума? Почему при холостом ходе  $\cos\phi \neq 0$ ?

7. Покажите на механической характеристике двигателя рабочий участок и характерные точки.

8. Используя приближенную формулу Клосса, определите критическое скольжение асинхронного двигателя экспериментальной установки.

9. Определите вращающий момент, развиваемый двигателем экспериментальной установки, при  $s = 0,02; 0,5$ .

10. По номинальным данным асинхронного двигателя 4A250S10 определите:

- номинальный ток, А;
- пусковой ток, А;
- синхронную частоту вращения  $\omega$ , рад/с;
- синхронную частоту вращения, об/мин;
- номинальную частоту вращения, рад/с;
- номинальную частоту вращения, об/мин;
- суммарные потери  $\Delta P$ , кВт;
- номинальный вращающий момент, Н·м;
- пусковой момент, Н·м.

Номинальные данные асинхронного двигателя:

|  |        |
|--|--------|
| Номинальная мощность, кВт                      | 30,0.  |
| Номинальное напряжение фазное, В               | 220,0. |
| Число пар полюсов                              | 5.     |
| Частота, Гц                                    | 50,0.  |
| Номинальное скольжение                         | 0,02.  |
| КПД  | 0,88.  |
| Номинальный $\cos\phi$                         | 0,81.  |
| Кратность пускового тока                       | 6,00.  |
| Кратность пускового момента                    | 1,00.  |
| Кратность максимального момента                | 2,20.  |
| Кратность тока холостого хода (ориентировочно) | 0,20.  |
| $\cos\phi$ холостого хода (ориентировочно)     | 0,10.  |

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

**Цель работы:** изучение методики определения параметров для построения схемы замещения.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой, записать паспортные данные исследуемого двигателя, измерительных приборов.

2. Собрать схему согласно рис. 17.1 для снятия характеристики холостого хода при неподвижном роторе. Провести опыт холостого хода. Установить номинальное напряжение и измерить ток  $I_{10}$ , мощность  $P_{10}$  холостого хода и напряжение на кольцах.

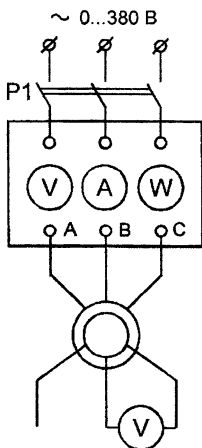


Рис. 17.1

Результаты измерений занести в табл. 17.1. Здесь и далее  $U_1$  и  $U_2$  – фазные напряжения статора и ротора.

Таблица 17.1

| № п/п | Измерено      |              |              |              | Вычислено |                 |                    |                  |
|-------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------------|--------------------|------------------|
|       | $P_{10}$ , Вт | $U_{10}$ , В | $I_{10}$ , А | $U_{20}$ , В | $K_E$     | $z''_{20}$ , Ом | $r_1 + r''_0$ , Ом | $x_1 + x_0$ , Ом |
|       |               |              |              |              |           |                 |                    |                  |

3. Собрать схему согласно рис. 17.2 для снятия характеристики короткого замыкания при неподвижном роторе. Установить первичное напряжение  $U_{1к}$  такой величины, чтобы ток не превышал номинального значения. Измерить мощность  $P_{1к}$ , токи  $I_{1к}$ ,  $I_{2к}$ , напряжение  $U_{20}$ . Результаты измерений занести в табл. 17.2.

Таблица 17.2

| №<br>п/п | Измерено       |               |               |               | Вычислено |               |                    |                    |
|----------|----------------|---------------|---------------|---------------|-----------|---------------|--------------------|--------------------|
|          | $P_{1к}$<br>Вт | $U_{1к}$<br>В | $I_{1к}$<br>А | $U_{2к}$<br>В | $K_I$     | $z_{к}$<br>Ом | $r_1 + r'_2$<br>Ом | $x_1 + x'_2$<br>Ом |
|          |                |               |               |               |           |               |                    |                    |

4. Собрать схему согласно рис. 17.3 для снятия характеристики холостого хода при неподвижном роторе и питании двигателя со стороны ротора. Установить паспортное напряжение ротора и определить ток  $I_{20}$ , мощность  $P_{20}$  холостого хода и напряжение  $U_{20}$ . Результаты занести в табл. 17.3.

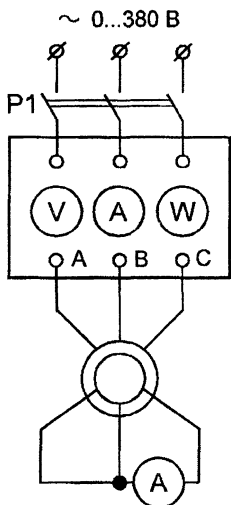


Рис. 17.2

Таблица 17.3

| №<br>п/п | Измерено       |               |               |               | Вычислено |                  |                      |                    |
|----------|----------------|---------------|---------------|---------------|-----------|------------------|----------------------|--------------------|
|          | $P_{20}$<br>Вт | $U_{20}$<br>В | $I_{20}$<br>А | $U_{10}$<br>В | $K_E$     | $z''_{20}$<br>Ом | $r'_2 + r''_0$<br>Ом | $x'_2 + x_0$<br>Ом |
|          |                |               |               |               |           |                  |                      |                    |



5. Собрать схему согласно рис. 17.2 для снятия характеристики холостого хода при вращающемся роторе. Изменяя напряжение  $U_{10}$  в пределах  $(0,5 \dots 1,1) U_{1н}$  снять характеристику холостого хода, т.е. измерить  $P_{10}, I_{10}$ . Результаты занести в табл. 17.4.

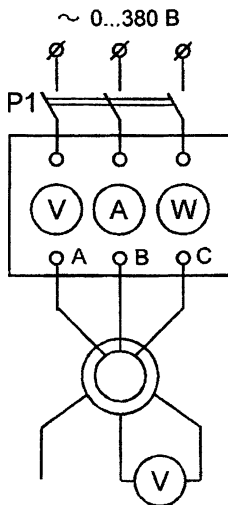


Рис. 17.3

Таблица 17.4

| №<br>п/п | Измерено        |                |                | Вычислено                     |                                 |                                |                 |                    |                    |
|----------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
|          | $P_{10},$<br>Вт | $U_{10},$<br>В | $I_{10},$<br>А | $U_{10}^2,$<br>В <sup>2</sup> | $P_{10} - 3I_{10}^2 r_1,$<br>Вт | $\Delta P_{\text{мех}},$<br>Вт | $z_{10},$<br>Ом | $r_1 + r_0,$<br>Ом | $x_1 + x_0,$<br>Ом |
|          |                 |                |                |                               |                                 |                                |                 |                    |                    |

### Методические указания

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя с фазным ротором могут быть приближенно определены на основании опытов холостого хода и короткого замыкания при неподвижном роторе и опыта холостого хода при вращающемся роторе.

На основании данных опыта холостого хода при неподвижном роторе при питании двигателя со стороны статора определяются:

1) коэффициент трансформации по ЭДС

$$K_E \approx \frac{U_1}{U_2}; \quad (17.1)$$

2) полное сопротивление схемы замещения при холостом ходе

$$z''_{10} \approx \frac{U_1}{I_{10}}; \quad (17.2)$$

3) активное сопротивление обмотки статора и намагничивающего контура

$$r_1 + r''_0 \approx \frac{P_{10}}{3 \cdot I_{10}^2}, \quad (17.3)$$

где  $r''_0$  – активное сопротивление намагничивающего контура, учитывающее потери в стали не только статора, но и ротора;

4) индуктивное сопротивление обмотки статора и намагничивающего контура

$$x_1 + x_0 = \sqrt{z''_0{}^2 - (r_1 + r''_0)^2}. \quad (17.4)$$

На основании данных опыта холостого хода при неподвижном роторе и при питании двигателя со стороны ротора определяются:

1) коэффициент трансформации по ЭДС

$$K_E \approx \frac{U_1}{U_2}; \quad (17.5)$$

Действительное значение  $K_E$  определяется как среднеарифметическое значений, определенных по соотношениям (17.1) и (17.5);

2) полное сопротивление схемы замещения при холостом ходе

$$z''_{20} \approx \frac{U_2'}{I_{20}'}; \quad (17.6)$$

3) активное сопротивление обмотки ротора и намагничивающего контура

$$r'_2 + r''_0 \approx \frac{P_{20}}{3 \cdot I_{20}^2}; \quad (17.7)$$

4) индуктивное сопротивление обмотки ротора и намагничивающего контура

$$x_2' + x_0 = \sqrt{z''_{20}{}^2 - (r'_0 + r''_0)^2}, \quad (17.8)$$

где  $U_2'$ ,  $I_{20}'$ ,  $x_2'$ ,  $r_2'$  – напряжение, ток и сопротивления ротора, приведенные к обмотке статора.

$$U_2' \approx K_E \cdot U_2; \quad (17.9)$$

$$I_{20}' = I_{20} \cdot \frac{1}{K_I}; \quad (17.10)$$

$$r_2' = r_2 \cdot K_E \cdot K_I; \quad x_2' = x_2 \cdot K_E \cdot K_I. \quad (17.11)$$

Коэффициент трансформации по току  $K_I$  определяется из опыта короткого замыкания.

На основании данных опыта короткого замыкания при неподвижном роторе и при питании машины со стороны статора определяются:

1) коэффициент трансформации по току

$$K_I \approx \frac{I_{2к}}{I_{1к}}; \quad (17.12)$$

2) полное сопротивление короткого замыкания

$$z_к \approx \frac{U_{1к}}{I_{1к}}; \quad (17.13)$$

3) активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания:

$$r_1 + r'_2 \approx \frac{P_{1к}}{3 \cdot I_{1к}^2}, \quad (17.14)$$

$$x_1 + x'_2 = \sqrt{z_k^2 - (r_1 + r'_2)^2}. \quad (17.15)$$

Решение системы уравнений, составленной из выражений (17.3), (17.7) и (17.14), дает значения активных сопротивлений схемы замещения  $r_1, r'_2$ . Решение системы уравнений (17.4), (17.8) и (17.15) дает значения индуктивных сопротивлений  $x_1, x'_2$  и  $x_0$ .

Активное сопротивление намагничивающего контура  $r_0$  определяется по данным опыта холостого хода при вращающемся роторе. Чтобы определить потери в стали статора  $\Delta P_{ст}$ , производят разделение потерь. Как известно, механические потери не зависят от напряжения машины, а потери в стали пропорциональны квадрату напряжения. Поэтому строят зависимость  $P_{10} - 3I_{10}^2 r_1 = f(U_{10}^2)$ , которая представляет собой прямую линию, и продолжают ее до пересечения с осью ординат. Отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат, представляет собой механические потери  $\Delta P_{мех}$ . Потери в стали при номинальном напряжении будут равны разности мощностей  $P_{10} - 3I_{10}^2 r_1$  при  $U_{1н}^2$  минус механические потери.

Сопротивление намагничивающего контура

$$r_0 = \frac{\Delta P_{ст}}{3 \cdot I_{10}^2}. \quad (17.16)$$

Определенные таким образом параметры являются параметрами Т-образной схемы замещения двигателя. Более удобной для расчетов характеристик является Г-образная схема замещения. Ее параметры определяются с учетом коэффициента  $\sigma_1 \approx 1 + x_1/x_0$ . Они равны:

$$\begin{aligned} R_1 &= \sigma_1 \cdot r_1; & X_1 &= \sigma_1 \cdot x_1; \\ R_2' &= \sigma_1^2 \cdot r_2'; & X_2' &= \sigma_1^2 \cdot x_2'. \end{aligned}$$

## Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого двигателя, измерительных приборов.
3. Схемы экспериментальной установки.
4. Расчетные формулы с пояснениями.
5. Таблица измерений и вычислений параметров схемы замещения.
6. Описание методики разделения потерь холостого хода и график зависимости  $P_{10} - 3I_{10}^2 r_1 = f(U_{10}^2)$  с указанием величины потерь в стали и механических.
7. Т-образная и Г-образная схемы замещения двигателя с указанием параметров.
8. Выводы по работе.
9. Ответы на контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы

1. Начертите векторную диаграмму асинхронного двигателя при активно-индуктивной нагрузке, соответствующую Т-образной схеме замещения, и поясните порядок ее построения.
2. Расскажите, как определяются параметры схемы замещения асинхронного двигателя с фазным ротором.
3. Какая существует взаимосвязь между параметрами Т-образной и Г-образной схем замещения.
4. Какие погрешности допущены при определении параметров асинхронного двигателя в соответствии с предлагаемой в «Методических указаниях» методикой?
5. Как с помощью Г-образной схемы замещения двигателя определить вращающий момент, полезную мощность, КПД,  $\cos\phi$ , если задано скольжение двигателя?
6. Постройте механическую характеристику асинхронного двигателя в пределах скольжения от 0 до 1. Покажите рабочую часть характеристики, пусковую часть, пусковой момент, критические моменты и скольжение. Как они зависят от параметров схемы замещения двигателя?
7. Покажите, как изменяется механическая характеристика двигателя при введении реостата в цепь ротора. Для чего вводится реостат в цепь ротора асинхронного двигателя при пуске?

## КРУГОВАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

**Цель работы:** изучение методики построения круговой диаграммы асинхронного двигателя по опытным данным.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 18.1. Включить двигатель без нагрузки на валу и, изменяя подводимое напряжение от  $1,1 U_n$  до  $0,2 U_n$ , снять характеристику холостого хода. Результаты измерений занести в табл. 18.1.

Таблица 18.1

| № п/п | Измерено      |              |              | Вычислено       |                      |               |                  |                  |
|-------|---------------|--------------|--------------|-----------------|----------------------|---------------|------------------|------------------|
|       | $P_{10}$ , Вт | $U_{10}$ , В | $I_{10}$ , А | $\cos\varphi_0$ | $\varphi_0$ , градус | $z_{10}$ , Ом | $r_1 + r_0$ , Ом | $x_1 + x_0$ , Ом |
|       |               |              |              |                 |                      |               |                  |                  |

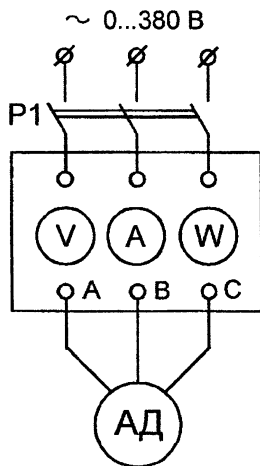


Рис. 18.1

2. Убедиться, что напряжение на выходе источника питания близко к нулю. Затормозить ротор двигателя. Включить двигатель в сеть и при неподвижном роторе снять характеристику короткого замыкания.

Напряжение  $U_{1к}$  изменять от 0 до значения, которому при коротком замыкании соответствует ток  $I_{1к} = 1,25 I_{1н}$ . Результаты измерений занести в табл. 18.2.

Таблица 18.2

| №<br>п/п | Измерено       |               |               | Вычислено      |                 |                 |                       |             |             |             |
|----------|----------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
|          | $P_{1к}$<br>Вт | $U_{1к}$<br>В | $I_{1к}$<br>А | $I_{1кн}$<br>А | $P_{1кн}$<br>Вт | $\cos\varphi_k$ | $\varphi_k$<br>градус | $z_k$<br>Ом | $r_k$<br>Ом | $x_k$<br>Ом |
|          |                |               |               |                |                 |                 |                       |             |             |             |

3. Измерить сопротивление фазных обмоток статора на постоянном токе и найти среднее значение сопротивления фазы.

### Методические указания

Для построения круговой диаграммы необходимо иметь следующие данные:

1. Ток, мощность холостого хода и угол сдвига фаз между током и напряжением при номинальном подведенном напряжении:  $I_{0н}$ ,  $P_{0н}$ ,  $\varphi_{0н}$ .
2. Ток, мощность двигателя в режиме короткого замыкания, приведенные к номинальному напряжению:

$$I_{1кн} = I_{1к} \frac{U_{1н}}{U_{1к}}; \quad (18.1)$$

$$P_{1кн} = P_{1к} \left( \frac{U_{1н}}{U_{1к}} \right)^2, \quad (18.2)$$

и угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1кн}}{3 \cdot I_{1кн} \cdot U_{1кн}}. \quad (18.3)$$

3. Сопротивления короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_{1кн}}{I_{1кн}}; \quad r_k = \frac{P_{1кн}}{3 \cdot I_{1кн}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (18.4)$$

а также сопротивления статора  $r_1$  и ротора  $r_2' \approx r_k - r_1$ .

Активное сопротивление должно быть приведено к расчетной температуре 75 °С.

## Построение круговой диаграммы (рис. 18.2)

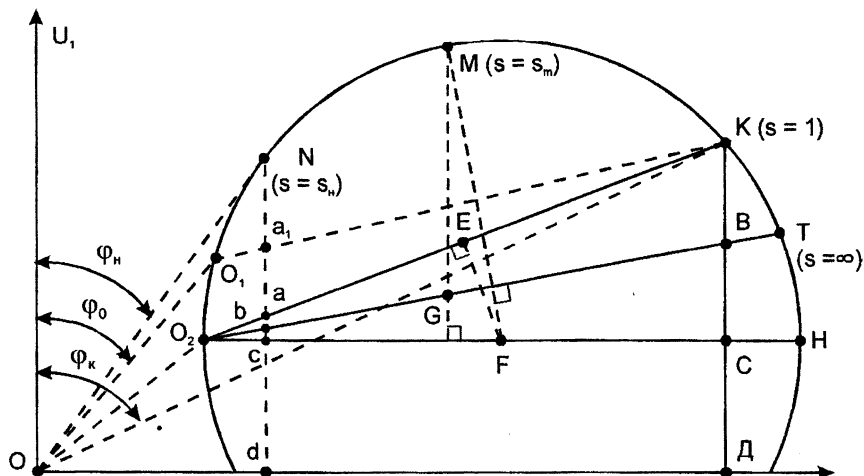


Рис. 18.2. Круговая диаграмма АД

1. Выбирается масштаб тока  $m_I$ , А/мм, мощности  $m_p = 3U_n \cdot m_I$ , вращающего момента  $m_M = m_p / \omega_1$ , Н/мм. Здесь  $\omega_1$  – синхронная угловая скорость вращения.

2. В прямоугольной системе координат под углом  $\varphi_0$  к оси ординат строится вектор тока холостого хода  $OO_1 = I_{OH} / m_I$ . Из точки  $O_1$  опускается перпендикуляр к оси абсцисс. На нем откладывается отрезок  $O_1O_2 = \Delta P_{\text{мех}} / m_p$ , представляющий собой механические потери в двигателе в масштабе мощности. Проведенный затем отрезок  $OO_2$  представляет собой ток идеального холостого хода. Порядок определения механических потерь см. в методических указаниях данной лабораторной работы. Ось абсцисс представляет собой линию подведенной мощности.

3. Под углом  $\varphi_k$  к оси ординат строится вектор  $OK = I_{\text{кн}} / m_I$ .

4. Концы векторов холостого хода и короткого замыкания (точки  $O_2$  и  $K$ ) соединяются отрезком  $O_2K$ . Линия  $O_2K$  представляет собой линию механической мощности.

5. Из точки  $O_2$  проводится прямая  $O_2C$  параллельно оси абсцисс.

6. От середины отрезка  $O_2K$  опускается перпендикуляр до пересечения с линией  $O_2C$  в точке  $F$ , которая является центром окружности токов. Радиусом  $FO_2 = FK$  проводится окружность токов.



7. Из точки  $K$  на диаметр  $O_2H$  опускается перпендикуляр. Отрезок  $KC$  в масштабе сопротивлений равен активному сопротивлению короткого замыкания. Отрезок  $KC$  делится на две части, пропорциональные сопротивлениям ротора и статора:

$$KB : BC = r'_2 : r_1.$$

Через точку  $B$  проводят линию  $O_2B$ , которая представляет собой линию электромагнитной мощности.

8. Соединяя точки  $O_1$  и  $K$ , получают линию полезной мощности.

На круговой диаграмме дуга  $O_2MK$  соответствует двигательному режиму работы машины, точка  $K$  – режиму короткого замыкания при  $s = 1$ . Дуга  $KT$  характеризует работу машины в режиме электромагнитного тормоза ( $\infty > s > 1$ ).

### Определение рабочих характеристик по круговой диаграмме

Для определения рабочих характеристик двигателя по круговой диаграмме задается ряд точек на круге токов.

Порядок нахождения точки  $M$ , соответствующей максимальному значению момента двигателя, показан на рис. 18.2 ( $FM \perp O_2T$  и  $MG \perp O_2H$ ). Из выбранной точки (например, точка  $N$ ) опускается перпендикуляр  $Nd$  на диаметр  $O_2H$ . Отрезок  $ON$  в масштабе тока представляет собой ток статора, отрезок  $O_2N$  – приведенный ток ротора. Угол между осью ординат и прямой равен углу сдвига между напряжением и током статора.

В масштабе мощности отрезок  $Nd$  представляет собой подводенную мощность  $P_1$ , отрезок  $Na_1$  – полезную мощность  $P_2$ , отрезок  $Nb$  – электромагнитную мощность, отрезок  $Nb$  в масштабе момента представляет собой электромагнитный момент двигателя. В масштабе мощности отрезок  $cd$  равен потерям в стали, отрезок  $cb$  – потерям в меди статора, отрезок  $ab$  – потерям в меди ротора, отрезок  $aa_1$  – механическим потерям.

Скольжение  $s$  определяется как отношение потерь в меди ротора к электромагнитной мощности, т.е.  $s = ab / Nb$ . КПД двигателя равен отношению полезной мощности к подводенной, т.е.  $\eta = Na_1 / Nd$ .

Определенные таким образом для различных точек значения  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\eta$ ,  $\cos\phi$ ,  $M$ ,  $s$ ,  $n$  заносят в табл. 18.2, на основании которой затем строятся рабочие характеристики.

## Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого двигателя, используемых приборов.
3. Электрическая схема установки.
4. Расчетные формулы с пояснениями.
5. Таблицы измерений и вычислений.
6. Характеристики холостого хода и короткого замыкания.
7. Круговая диаграмма, построенная на основании опытов холостого хода и короткого замыкания.
8. Рабочие характеристики двигателя, построенные на основании круговой диаграммы.
9. Выводы по работе.
10. Ответы на контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы

1. При каких условиях геометрическим местом концов векторов тока при изменении скольжения асинхронной машины является окружность?
2. Покажите, что отрезок  $Nd$  представляет собой в масштабе мощности подведенную мощность, отрезок  $Nb$  – электромагнитную мощность,  $Na_1$  – полезную мощность, а отрезок  $a_1d$  – суммарные потери. Какие потери выражают отрезки  $a_1a$ ,  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$ ?
3. Как определяются скольжение и КПД по круговой диаграмме? Расскажите, как строится шкала КПД, шкала скольжений.
4. В чем погрешности построения пусковых характеристик асинхронного двигателя на основании круговой диаграммы?
5. Расскажите, как строится круговая диаграмма по опытам холостого хода и короткого замыкания.
6. Расскажите, как по круговой диаграмме определяются данные для построения рабочих характеристик двигателя.
7. Покажите участок круговой диаграммы, соответствующий генераторному режиму.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ НА АВТОНОМНУЮ НАГРУЗКУ

**Цель работы:** изучение свойств синхронного генератора.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с паспортными данными синхронного генератора и приборами, необходимыми для исследования.
2. Собрать схему согласно рис. 19.1.

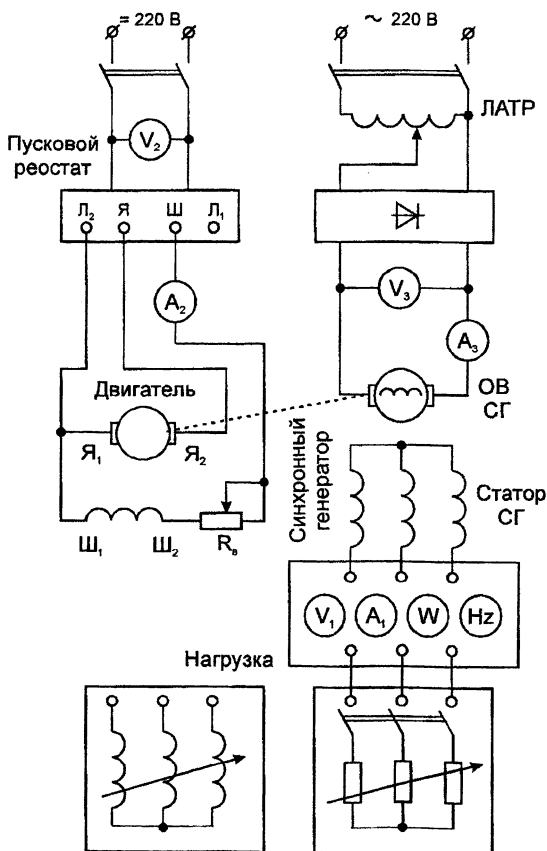


Рис. 19.1. Схема экспериментальной установки

3. Запустить синхронный генератор.

4. Снять характеристику холостого хода  $U(I_B)$  при  $I = 0, n = \text{const}$ . Нагрузочный реостат полностью отключен. Ток возбуждения генератора изменяется от  $I_B$ , соответствующего  $U_{xx} = 1,1 U_n$ , до нуля, а затем в обратную сторону.

Результаты измерений занести в табл. 19.1.

Таблица 19.1

|          | Восходящая ветвь |  |  |  | Нисходящая ветвь |  |  |  |
|----------|------------------|--|--|--|------------------|--|--|--|
| $U, B$   |                  |  |  |  |                  |  |  |  |
| $I_B, A$ |                  |  |  |  |                  |  |  |  |

5. Снять внешние характеристики генератора  $U(I)$  при  $I_B = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ,  $\cos\phi = \text{const}$ .

Установить  $U_{xx} = 1,1 U_n$  при  $I = 0$ .

Увеличивая нагрузку генератора (уменьшая сопротивление нагрузочного реостата), снять 5 точек. Последние точки должны соответствовать номинальному току генератора или близкому к нему. Далее разгружают генератор и получают восходящую ветвь внешней характеристики.

Данные измерений заносят в табл. 19.2.

Таблица 19.2

| № п/п | $U, B$ | $I, A$ | $I_B, A$ |
|-------|--------|--------|----------|
|       |        |        |          |

6. Снять регулировочные характеристики генератора при  $U = U_n$ ,  $n = \text{const}$ ,  $\cos\phi = \text{const}$ .

Синхронный генератор в режиме холостого хода возбуждается до  $U = U_n$ , затем постепенно нагружается до  $I = 1,1 I_n$  (изменением сопротивления нагрузочного реостата), поддерживая постоянным  $U = U_n$  (изменением тока возбуждения генератора).

Опытные данные заносят в табл. 19.3.

Таблица 19.3

| № п/п | $U = U_n, B$ | $I, A$ | $I_B, A$ |
|-------|--------------|--------|----------|
|       |              |        |          |

7. Снять характеристики 2- и 3-фазного короткого замыкания  $I(I_B)$  при  $U = 0, n = \text{const}$ .

Характеристики трехфазного короткого замыкания снимаются при замкнутых накоротко трех фазах, а двухфазного – при замыкании двух путем изменения тока возбуждения от нуля до значения, соответствующего номинальному току статора.

Данные измерений занести в табл. 19.4.

Таблица 19.4

| № п/п | $I, A$ | $I_B, A$ |
|-------|--------|----------|
|       |        |          |

### Методические указания

Характеристики холостого хода в относительных единицах для большинства синхронных машин совпадают с так называемой нормальной характеристикой холостого хода (табл. 19.5).

Таблица 19.5

|         |   |      |     |      |      |     |      |      |
|---------|---|------|-----|------|------|-----|------|------|
| $E^*_0$ | 0 | 0,58 | 1,0 | 1,21 | 1,33 | 1,4 | 1,46 | 1,51 |
| $I^*_B$ | 0 | 0,5  | 1,0 | 1,5  | 2,0  | 2,5 | 3,0  | 3,5  |

Здесь  $E^*_0, I^*_B$  даны в относительных единицах.

$$E^*_0 = \frac{E_0}{U_n}; \quad I^*_B = \frac{I_B}{I_{Bн0}},$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение генератора;

$I_{Bн0}$  – ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению при холостом ходе.

Опытная характеристика представляет собой петлю гистерезиса, поэтому в качестве расчетной характеристики используется кривая, проведенная в середине петли гистерезиса.

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого генератора и измерительных приборов.
3. Схема включения синхронного генератора.

4. Таблицы опытных данных.

5. Графики всех снятых характеристик. Характеристика холостого хода, построенная в относительных единицах и сравниваемая с нормальной характеристикой холостого хода.

6. Процентное изменение напряжения, определенное по внешней характеристике генератора, при изменении нагрузки от нуля до номинальной.

7. Выводы по работе.

8. Ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему при индуктивной нагрузке синхронного генератора при увеличении тока якоря его напряжение уменьшается?

1. Почему при индуктивной нагрузке синхронного генератора его напряжение уменьшается в большей степени, чем при активной?

2. Как влияет на величину напряжения генератора емкостная нагрузка?

3. Что такое нормальная характеристика холостого хода синхронного генератора? Когда ею пользуются?

4. Почему у внешней характеристики синхронного генератора восходящая и нисходящая ветви не совпадают?

5. Почему характеристика холостого хода криволинейная?

6. Почему характеристика короткого замыкания прямолинейная?

7. Объяснить относительное расположение характеристик 2- и 3-фазного короткого замыкания.

### *Лабораторная работа № 20*

## **ВКЛЮЧЕНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ С СЕТЬЮ**

**Цель работы:** приобретение навыков по включению синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться со схемой и условиями включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью, машинами, измерительными приборами, колонкой синхронизации, вспомогательной аппаратурой.

2. Собрать схему для включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью по методу точной синхронизации (рис. 20.1).
3. Синхронизировать и включить генератор на параллельную работу с сетью.

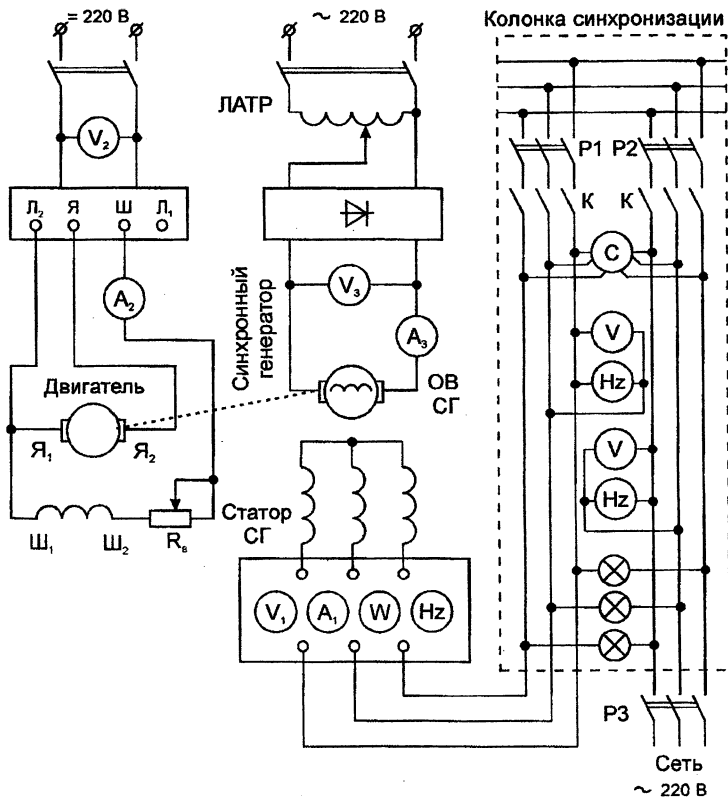


Рис. 20.1. Схема экспериментальной установки

### Методические указания

На современных электрических станциях, как правило, устанавливается несколько генераторов, работающих параллельно с сетью.

Для включения синхронных генераторов на параллельную работу с сетью необходимо выполнить ряд технических мероприятий, которые позволяли бы производить включение наилучшим образом (отсутствие толчков тока и толчков ротора).

Включение генераторов может осуществляться методами:

- 1) точной синхронизации;
- 2) грубой синхронизации (самосинхронизации).

В случае точной синхронизации необходимо добиться выполнения следующих условий:

1. ЭДС включаемого генератора должна быть равна напряжению работающих генераторов (напряжению на шинах).

2. Частота включаемого генератора должна быть равна частоте работающих генераторов (частоте сети).

3. Порядок следования фаз у включаемого и работающих генераторов должен быть одинаковым. Порядок следования фаз проверяется после ремонтов генераторов и цепей, связанных с выдачей электрической энергии в систему.

4. Включение на параллельную работу синхронного генератора должно производиться только в момент, когда ЭДС биения равна нулю.

Соблюдение первого условия контролируется с помощью двух вольтметров. Один вольтметр показывает ЭДС на зажимах включаемого генератора, другой – напряжение на шинах.

Второе условие проверяется с помощью двух частотомеров, показывающих частоты включаемого и работающих генераторов.

Третье условие контролируется с помощью фазоуказателя. Для контроля выполнения четвертого условия применяют приборы, называемые синхроскопами.

Синхроскопы бывают стрелочные и ламповые. Ламповые синхроскопы используют в учебных лабораториях. Ламповые синхроскопы могут быть выполнены по двум схемам включения:

- а) схема на погасание ламп (рис. 20.2);
- б) схема на вращение света (рис. 20.3).

Включение генератора **методом точной синхронизации** производится в следующей последовательности:

1. Включаемый синхронный генератор разворачивается примерно до номинальной частоты вращения. С помощью регулятора в цепи возбуждения генератора устанавливается на его зажимах напряжение, равное напряжению на шинах.

2. Изменением частоты вращения генератора добиваются примерного равенства частот включаемого генератора и сети.

3. По направлению вращения стрелки синхроскопа можно определить, с какой частотой (большей или меньшей) по отношению к синхронной вращается ротор включаемого генератора, а по скорости вращения стрелки – разность скоростей.



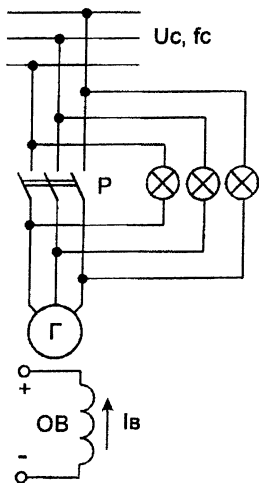


Рис. 20.2

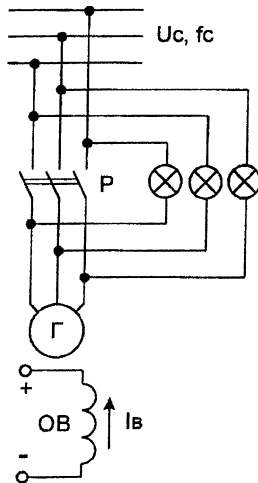


Рис. 20.3

Если синхроноскоп ламповый, то о разности частот генератора и сети можно судить по частоте погасания ламп.

4. Частота вращения стрелки синхроноскопа пропорциональна разности частот генератора и сети, а ее направление вращения зависит от знака этой разности. По показанию синхроноскопа добиваются возможно меньшей разности частот генератора и сети.

5. В момент, когда стрелка синхроноскопа не доходит до вертикальной черты на угол, соответствующий времени включения выключателя, магнитного пускателя, автомата, включают обмотку статора генератора на параллельную работу.

Способ включения генератора методом точной синхронизации относительно сложен, требует большой точности и главное затрат времени, что особенно важно при ликвидации аварий. Невыполнение всех условий может привести к аварии. Поэтому в последнее время в энергетических системах широко применяется включение генераторов на параллельную работу *методом самосинхронизации* (грубой синхронизации).

При включении по этому методу генератор разворачивается до частоты вращения  $n = (0,98 \dots 1,02)n_H$  и включается в сеть. Генератор при этом не возбужден, а его обмотка возбуждения замкнута на некоторое добавочное сопротивление.

После включения обмотки статора в сеть добавочное сопротивление отключается и в цепь ротора подается ток возбуждения. Генератор через несколько периодов втягивается в синхронизм.

При включении методом грубой синхронизации сокращаются затраты времени. Кроме этого, уменьшается вероятность допустить ошибку в процессе включения.

Недостатком метода включения генераторов на параллельную работу является возникновение бросков тока в генераторе и сети при включении. Это может быть препятствием к применению данного метода в сетях малой мощности. Этот ток имеет индуктивный характер и практически не вызывает толчков ротора, но может вызвать понижение напряжения в сети.

### **Содержание отчета**

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого генератора и измерительных приборов.
3. Схема включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.
4. Последовательность включения генераторов на параллельную работу методом точной синхронизации.
5. Последовательность включения генераторов на параллельную работу методом самосинхронизации.
7. Выводы по работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие методы имеются для включения синхронных генераторов на параллельную работу с сетью?
2. К чему приведет несоблюдение отдельных условий включения генераторов на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации?
3. Что произойдет, если при включении генератора на параллельную работу с сетью методом самосинхронизации обмотку возбуждения генератора оставить подключенной к возбудителю?
4. Почему обмотку возбуждения генератора при включении на параллельную работу методом самосинхронизации не следует замыкать накоротко?

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С СЕТЬЮ

**Цель работы:** изучение свойств синхронного генератора при параллельной работе с сетьюю.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с исследуемыми машинами, приборами и оборудованием.
2. Собрать схему согласно рис. 21.1.

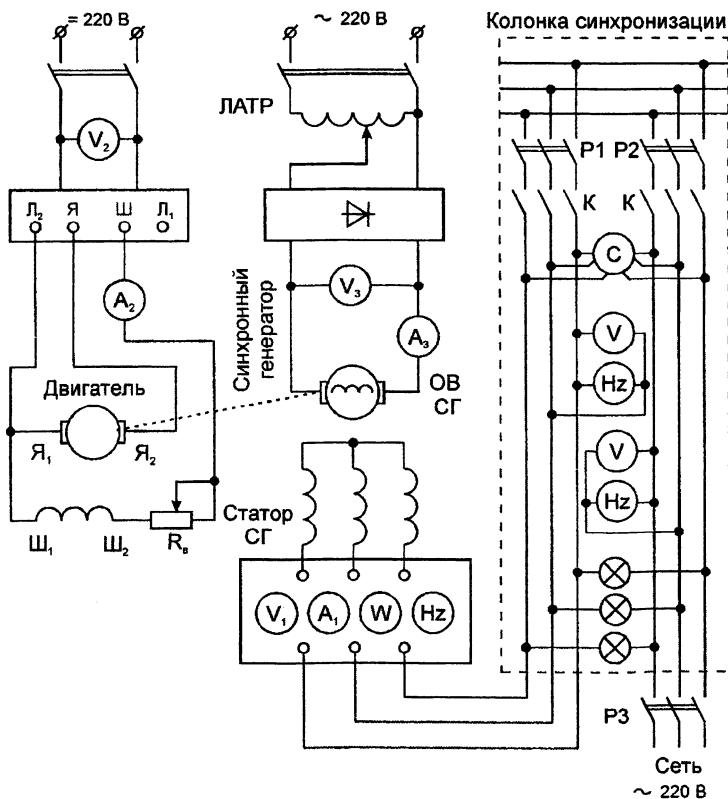


Рис. 21.1. Схема экспериментальной установки

3. Включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.

Для этого необходимо добиться равенства:

1) ЭДС включаемого генератора и напряжения сети (контролируется вольтметрами);

2) частоты включаемого генератора и частоты сети (контролируется частотомерами). Порядок следования фаз включаемого генератора и сети должен быть одинаковым.

Включить генератор в сеть, когда ЭДС биения равна нулю (стрелка синхроскопа подходит к вертикальной черте).

4. Снять V-образные кривые генератора  $I (I_n)$  для следующих значений активной мощности генератора:  $P = 0$ ;  $P = 0,25 P_{н}$ ;  $P = 0,75 P_{н}$ .

Требуемая величина активной мощности устанавливается путем изменения момента приводного двигателя, т.е. изменяя его частоту вращения. Ток возбуждения генератора изменить от  $I_{в\max} = 1,5 I_{вн}$  до  $I_{в\min}$ , соответствующего статической устойчивости генератора. В процессе снятия кривых необходимо зафиксировать точку, соответствующую минимуму тока статора. Данные занести в табл. 21.1.

Таблица 21.1

| № п/п | $P$ , кВт | $I$ , А | $I_b$ , А | $U$ , В | $\cos\varphi$ |
|-------|-----------|---------|-----------|---------|---------------|
|-------|-----------|---------|-----------|---------|---------------|

### Методические указания

При работе синхронного генератора параллельно с сетью бесконечной мощности, значительно превышающей мощность генератора, возможно изменение как активной нагрузки генератора, так и реактивной. Особенность такой параллельной работы – неизменность частоты и напряжения сети при изменении нагрузки генератора.

Изменение реактивной нагрузки называют регулированием при  $M = \text{const}$ ,  $I_b = \text{var}$ . Изменение активной нагрузки называют регулированием при  $M = \text{var}$ ,  $I_b = \text{const}$ .

При изменении тока возбуждения генератора происходит перераспределение реактивной нагрузки между ним и сетью. Активная нагрузка при этом остается неизменной. Однако общий ток статора генератора изменяется. Зависимость тока статора  $I$  от тока возбуждения  $I_b$  имеет вид буквы «V» и называется V-образной характеристикой.

Для изменения активной нагрузки генератора необходимо воздействовать на момент первичного двигателя. При увеличении момента двигателя генератор принимает большую нагрузку и наоборот.

### **Содержание отчета**

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого генератора и измерительных приборов.
3. Электрическая схема установки. Схема включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.
4. Таблица измерений.
5. V-образные кривые при  $P = 0$  и при  $P = 0,5 P_n$ .
6. Выводы по работе.
7. Ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1. Почему при изменении момента на валу синхронной машины изменяется ее активная мощность?
2. Почему при изменении тока возбуждения синхронной машины изменяется ее реактивная мощность?
3. Может ли синхронный генератор развивать активную мощность без возбуждения?
4. Что показывает угловая характеристика? Нарисуйте ее.
5. Почему при неизменном токе возбуждения генератора изменяется реактивная мощность при изменении активной?
6. Как изменяется результирующий магнитный поток генератора при параллельной работе с сетью в зависимости от тока возбуждения?
7. Как влияет ток возбуждения на статическую устойчивость генератора?
8. В каких случаях генератор отдает реактивную мощность в сеть?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучение электромеханических и эксплуатационных свойств синхронного двигателя.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией исследуемой машины и записать типы и паспортные данные машин и приборов.

2. Собрать схему согласно рис. 22.1. В работе исследуемый двигатель запускается методом прямого асинхронного пуска. Перед пуском необходимо обмотку возбуждения синхронного двигателя отключить от источника постоянного тока и замкнуть ее на разрядное сопротивление  $R_p$ . После этого двигатель включается в сеть и разгоняется как асинхронный. При достижении двигателем частоты вращения, близкой к синхронной, разрядное сопротивление отключается и в обмотку возбуждения подается постоянный ток.

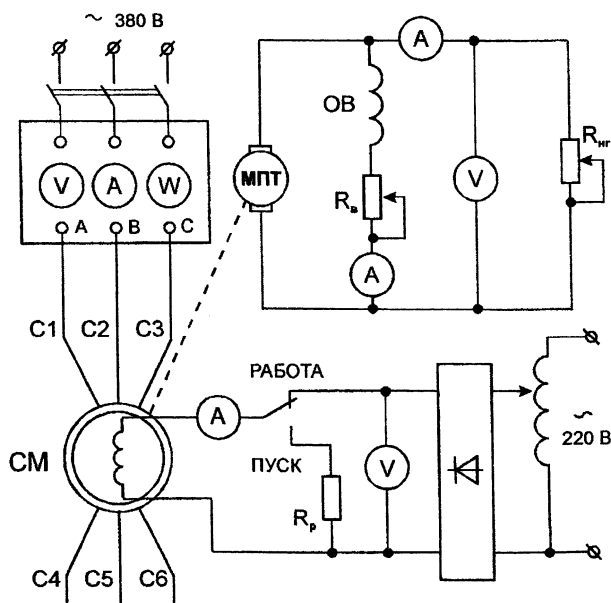


Рис. 22.1. Схема экспериментальной установки

3. Изменяя ток возбуждения двигателя от  $I_b = 1,1 I_{вн}$  до минимально возможного по условиям статической устойчивости, снять V-образные кривые  $I(I_b)$  для трех значений полезной мощности  $P_2 = 0$ ,  $P_2 = 0,5 P_n$  и  $P_2 = P_n$ , определяемых током и напряжением нагрузочного генератора. При снятии кривых следует зафиксировать точку, соответствующую минимальному току статора двигателя.

Данные заносятся в табл. 22.1.

Таблица 22.1

| № п/п | Генератор |           | Двигатель   |         |           |         |             |
|-------|-----------|-----------|-------------|---------|-----------|---------|-------------|
|       | $I_r$ , А | $U_r$ , В | $P_2$ , кВт | $I$ , А | $I_b$ , А | $U$ , В | $P_1$ , кВт |

4. Изменяя полезную мощность двигателя путем изменения тока нагрузочного генератора, снять рабочие характеристики двигателя  $I, M_2, P_1, \eta, \cos\varphi = f(P_2)$  для двух значений тока возбуждения двигателя  $I_b = 0,75 I_{вн}$  и  $I_b = I_{вн}$ .

Данные заносятся в табл. 22.2.

Таблица 22.2

| № п/п | Опытные данные |           |           |         |         | Расчетные данные |             |            |               |        |
|-------|----------------|-----------|-----------|---------|---------|------------------|-------------|------------|---------------|--------|
|       | $I_r$ , А      | $U_r$ , В | $I_b$ , А | $I$ , А | $U$ , В | $P_1$ , кВт      | $P_2$ , кВт | $M_2$ , Нм | $\cos\varphi$ | $\eta$ |

### Методические указания

В лабораторной установке в качестве нагрузки исследуемого двигателя используется генератор постоянного тока, работающий на нагрузочное сопротивление. При изменении этого сопротивления изменяются ток генератора и отдаваемая им мощность:

$$P_{2r} = I_r \cdot U_r.$$

Мощность на валу двигателя больше отдаваемой мощности генератора на величину его потерь:

$$P_2 = P_{2r} + I_r^2 \cdot R_r + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}.$$

Полезный момент на валу двигателя, Нм:

$$M_2 = 9550 \cdot P_2 / n ,$$

где  $P_2$  – мощность, кВт,

$n$  – частота вращения, об/мин.

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n} .$$

КПД двигателя

$$\eta = P_2 / P_1 .$$

Если пренебречь падением напряжения в обмотке статора двигателя, то согласно уравнению напряжений

$$\dot{U} = -\dot{E} + \dot{I}_1 \cdot z_1$$

приложенное напряжение уравновешивается ЭДС двигателя

$$U \approx E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{01} \cdot \Phi_1 .$$

Отсюда следует, что результирующий магнитный поток, созданный токами статора и обмотки возбуждения, при неизменном напряжении остается практически постоянным:

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{01}} .$$

В связи с этим при регулировании тока возбуждения изменяются величина и знак реактивной составляющей тока статора, а следовательно, и реактивной мощности:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_1^2} .$$

При недозвузднении (левый участок V-образных кривых) синхронный двигатель потребляет из сети реактивную мощность, а при перевозбуждении генерирует в сеть реактивную мощность.



## Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого двигателя и измерительных приборов.
3. Схема и краткое описание лабораторной установки.
4. Таблицы с опытными и расчетными данными.
5. V-образные кривые и рабочие характеристики.
6. Графики зависимости  $Q$  ( $I_B$ ) для трех значений  $P = \text{const}$ , построенные по V-образным кривым.
7. Графики зависимости  $\cos\varphi = f(I_B)$  для трех значений  $P = \text{const}$ , построенные по V-образным кривым.
8. Графики зависимости  $Q_1 = f(P_2)$  для двух значений  $I_B = \text{const}$ , построенные по рабочим характеристикам.
9. Выводы по работе.
10. Ответы на контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы

1. Преимущества и недостатки синхронного двигателя по сравнению с асинхронным.
2. Почему изменяется коэффициент мощности синхронного двигателя при изменении нагрузки на валу?
3. Почему при пуске двигателя обмотка возбуждения замыкается на разрядное сопротивление?
4. Почему при пуске нельзя замыкать обмотку возбуждения на коротко?
5. Какая реакция якоря (намагничивающая или размагничивающая) будет при перевозбуждении?
6. Что такое входной момент двигателя?
7. Как можно увеличить входной момент?
8. От чего зависит критический (максимальный) момент двигателя?
9. Может ли синхронный явнополюсный двигатель развивать вращающий момент без возбуждения?
10. Почему ротор синхронного двигателя выполняется цельнометаллическим?
11. Какие обмотки имеются у синхронного двигателя?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ МАШИН

**Цель работы:** изучение методов экспериментального определения параметров синхронных машин.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией электрических машин. Записать типы и паспортные данные машин и приборов.

2. Собрать схему согласно рис. 23.1, запустить приводной двигатель и снять характеристику холостого хода  $U(I_B)$ , изменяя ток возбуждения от значения, соответствующего напряжению статора  $U = 1,25 U_{\text{н}}$  до номинального возможного. Данные занести в табл. 23.1.

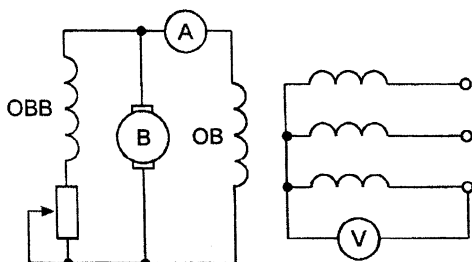


Рис. 23.1

Таблица 23.1

| №<br>п/п | Опытные данные |        | Расчетные данные               |                            |         |            |     |
|----------|----------------|--------|--------------------------------|----------------------------|---------|------------|-----|
|          | $I_B, A$       | $U, B$ | $I_B^* = I_B / I_{\text{вн0}}$ | $U_0^* = U / U_{\text{н}}$ | $x_d^*$ | $x_{d1}^*$ | ОКЗ |
|          |                |        |                                |                            |         |            |     |

3. Замкнуть обмотку статора синхронной машины накоротко (рис. 23.2), запустить приводной двигатель и снять характеристику 3-фазного короткого замыкания  $I_K(I_B)$ , изменяя ток возбуждения от значения, соответствующего  $I_K = I_B$ , до минимального значения. Данные занести в табл. 23.2.

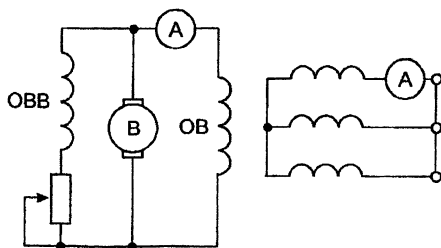


Рис. 23.2

Таблица 23.2

| №<br>п/п | Опытные данные |              | Расчетные данные           |                           |
|----------|----------------|--------------|----------------------------|---------------------------|
|          | $I_{в0}$ , А   | $I_{к0}$ , А | $I_{в}^* = I_{в} / I_{в0}$ | $I_{к}^* = I_{к} / I_{н}$ |

4. Собрать схему согласно рис. 23.3 для проведения опыта скольжения. Убедившись, что напряжение трехфазного источника питания составляет  $(0,05 \dots 0,1) U_{н}$ , при отключенной обмотке статора запустить приводной двигатель и измерить остаточное напряжение синхронной машины. Если остаточное напряжение больше 30 % напряжения источника питания, машину следует размагнитить. Подключить обмотку статора к источнику питания и убедиться, что направление вращения приводного двигателя совпадает с направлением вращения магнитного поля синхронной машины, а его частота вращения отличается от частоты вращения магнитного поля синхронной машины на  $(0,5 \dots 1,0) \%$ , т.е. ротор синхронной машины должен вращаться со скольжением  $0,5 \dots 1 \%$ . При соблюдении этих условий стрелка вольтметра в цепи обмотки возбуждения будет совершать колебания с малой частотой (0,5 Гц и менее) и малой амплитудой.

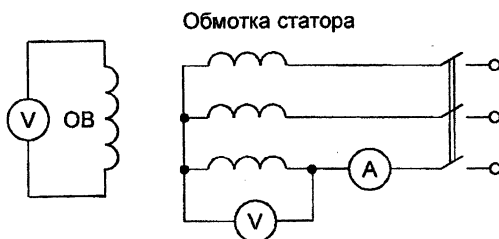


Рис. 23.3

При малом скольжении ротора явнополюсной синхронной машины стрелки приборов, включенных в обмотку статора, будут совершать колебания с малой частотой. Показания приборов занести в табл. 23.3.

Таблица 23.3

| №<br>п/п | Опытные данные |                |                |                | Расчетные данные |         |            |         |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|---------|------------|---------|
|          | $U_{\max}$ , В | $U_{\min}$ , В | $I_{\max}$ , А | $I_{\min}$ , А | $x_d$ , Ом       | $x_d^*$ | $x_q$ , Ом | $x_q^*$ |

5. В схеме на рис. 23.3 изменить направление вращения приводного двигателя или магнитного потока синхронной машины с целью проведения опыта противовращения. В этом опыте напряжение трехфазного источника не должно превышать 30 % напряжения источника. При вращении ротора синхронной машины со скольжением порядка 200 % записываются ток и напряжение статора, и данные заносятся в табл. 23.4. Опыт рекомендуется проводить при двух напряжениях трехфазного источника.

Таблица 23.4

| №<br>п/п | Опытные данные |           | Расчетные данные |         |
|----------|----------------|-----------|------------------|---------|
|          | $U_2$ , В      | $I_2$ , А | $x_2$ , Ом       | $x_2^*$ |

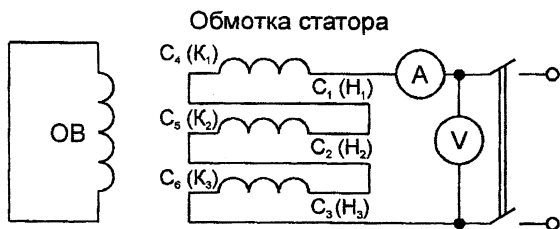


Рис. 23.4

6. Включить обмотку статора в разомкнутый треугольник, а обмотку возбуждения замкнуть накоротко (рис. 23.4). Убедившись, что напряжение источника питания не превышает  $(0,15...0,25) U_n$ , запустить приводной двигатель. После этого подключить обмотку статора к источнику питания и измерить ток и напряжение. Данные занести в табл. 23.5.

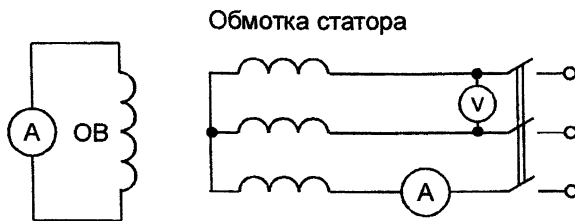


Рис. 23.5

Таблица 23.5

| №<br>п/п | Опытные данные |           | Расчетные данные |         |
|----------|----------------|-----------|------------------|---------|
|          | $U_0$ , В      | $I_0$ , А | $x_0$ , Ом       | $x_0^*$ |

7. Собрать схему согласно рис. 23.5. Убедившись, что напряжение источника питания составляет  $(0,1...0,2) U_n$ , подключить обмотку статора к источнику переменного тока. Поворачивая ротор, находят положения, соответствующие максимальному  $I_{\text{вmax}}$  и минимальному  $I_{\text{вmin}}$  значениям тока возбуждения. В этих положениях ротора фиксируют значения напряжений статора соответственно  $U_d$  и  $U_q$ , а также значения его токов  $I_d$  и  $I_q$ . Данные заносят в табл. 23.6.

Таблица 23.6

| №<br>п/п | Опытные данные           |              |              |                          |              | Расчетные данные |                 |           |                 |           |
|----------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|--------------|------------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
|          | $I_{\text{вmax}}$ ,<br>А | $U_d$ ,<br>В | $I_d$ ,<br>А | $I_{\text{вmin}}$ ,<br>А | $U_q$ ,<br>В | $I_q$ ,<br>А     | $x_d''$ ,<br>Ом | $x_d''^*$ | $x_q''$ ,<br>Ом | $x_q''^*$ |

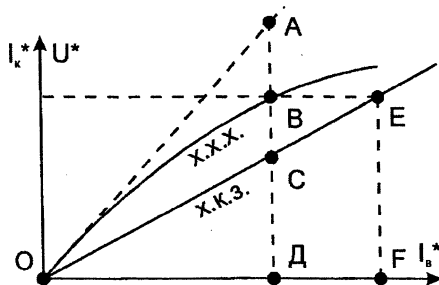


Рис. 23.6

## Методические указания

По данным табл. 23.1 и 23.2 строятся в одной системе координат характеристики холостого хода  $U^*$  ( $I_B^*$ ) и короткого замыкания  $I_K^*$  ( $I_B^*$ ) в относительных единицах.  $I_{вн0}$ , соответствующий номинальному напряжению при холостом ходе, определяется из характеристики холостого хода, построенной в именованных единицах.

Из-за остаточного магнетизма эти характеристики начинаются не с 0, поэтому их следует перенести параллельно самим себе в начало координат. По этим характеристикам можно найти синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси  $x_d$  как частное от деления напряжения холостого хода отрезка АД, взятого на продолжение прямолинейной части характеристики холостого хода при некотором токе возбуждения (например, при  $I_{вн0}$ ), на ток симметричного короткого замыкания отрезка СД, взятого по характеристике трехфазного короткого замыкания при том же токе возбуждения (рис. 23.6):

$$x^*_{d} = \frac{АД}{СД}.$$

Определенное таким образом значение  $x_d$  соответствует ненасыщенному состоянию. Для нахождения этого сопротивления при насыщенном состоянии напряжение следует брать на криволинейном участке характеристики холостого хода – отрезок ВД.

$$x^*_{d\mu} = \frac{ВД}{СД}.$$

По тем же характеристикам определяют ОКЗ (отношение короткого замыкания), как отношение установившегося тока симметричного короткого замыкания – отрезок СД – при токе возбуждения, соответствующем номинальному напряжению по характеристике холостого хода, к номинальному току статора – отрезок ЕF.

$$ОКЗ = \frac{ЕF}{СД}.$$

Синхронные индуктивные сопротивления по продольной оси  $x_d$  и поперечной оси  $x_q$  можно найти по данным опыта скольжения (см. табл. 23.3) следующим образом:

$$x_d = \frac{U_{\max}}{I_{\min}}; \quad x_q = \frac{U_{\min}}{I_{\max}}.$$

Эти же сопротивления в относительных единицах

$$x_d^* = \frac{x_d}{z_H} = \frac{U_{\max}^*}{I_{\min}^*}; \quad x_q^* = \frac{x_q}{z_H} = \frac{U_{\min}^*}{I_{\max}^*}.$$

где  $z_H = U_H / I_H$  – номинальное сопротивление синхронной машины;  $U^*$ ,  $I^*$  – напряжение и ток в относительных единицах, т.е. в долях от номинальных значений.

Если в опыте скольжения остаточное напряжение составляет более 0,1 напряжения источника питания, то в приведенные выражения следует подставлять полусумму двух максимумов или минимумов тока.

Индуктивное сопротивление обратной последовательности находится по данным опыта противовращения (см. табл. 23.4):

$$x_2 = \frac{U_2}{I_2}; \quad x_2^* = \frac{U_2^*}{I_2^*},$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности определяется по данным табл. 23.5.

$$x_0 \approx \frac{U_0}{3I_0}; \quad x_0^* = \frac{U_0^*}{3I_0^*}.$$

Сверхпереходные индуктивные сопротивления по продольной оси  $x_d''$  и по поперечной оси  $x_q''$  находятся по данным опыта при однофазном питании обмотки статора (см. табл. 23.6). По  $U_d$  и  $I_d$ , соответствующим максимуму тока в обмотке возбуждения (в этом положении ось полюсов совпадает с осью пульсирующего поля), находят

$$x_d'' \approx \frac{U_d}{2 \cdot I_d}; \quad x_d''' = \frac{U_d^*}{2 \cdot I_d^*}.$$

Минимум тока в обмотке возбуждения соответствует положению ротора со сдвигом на 90 электрических град. относительно оси магнитного поля, поэтому по значениям напряжения и тока  $U_q$  и  $I_q$  в обмотке статора можно определить

$$x_q'' \approx \frac{U_q}{2 \cdot I_q}; \quad x_q''' = \frac{U_q^*}{2 \cdot I_q^*}.$$

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Типы и паспортные данные машин и приборов.
3. Схемы и описание опытного определения параметров.
4. Расчетные формулы с пояснениями.
5. Таблицы с опытными и расчетными данными.
6. Аналитические и графические расчеты.
7. Выводы по работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Какое из сопротивлений  $x_d$  или  $x_q$  больше? Почему?
2. Почему сопротивление  $x_2$  меньше  $x_q$ ?
3. Почему  $x_d''$  меньше  $x_d'$ ?
4. Может ли сопротивление  $x_0$  быть больше  $x_d'$ ? Почему?
5. Какие еще индуктивные сопротивления, кроме определяемых в настоящей работе, вам известны?
6. Как влияет ОКЗ на статическую устойчивость?
7. Как можно увеличить  $x_d'$ ?
8. Может ли сопротивление  $x_0$  быть больше индуктивного сопротивления рассеяния?
9. Почему в опыте скольжения происходят колебания тока и напряжения статора только в явнополюсной машине?
10. Как определить установившийся ток трехфазного короткого замыкания?



## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ (ДВИГАТЕЛЬ ШРАГЕ-РАХТЕРА)

**Цель работы:** приобретение навыков в обращении с 3-фазным коллекторным двигателем параллельного возбуждения и изучение его свойств.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с данными двигателя, тормоза и измерительных приборов.
2. Собрать схему согласно рис. 24.1.

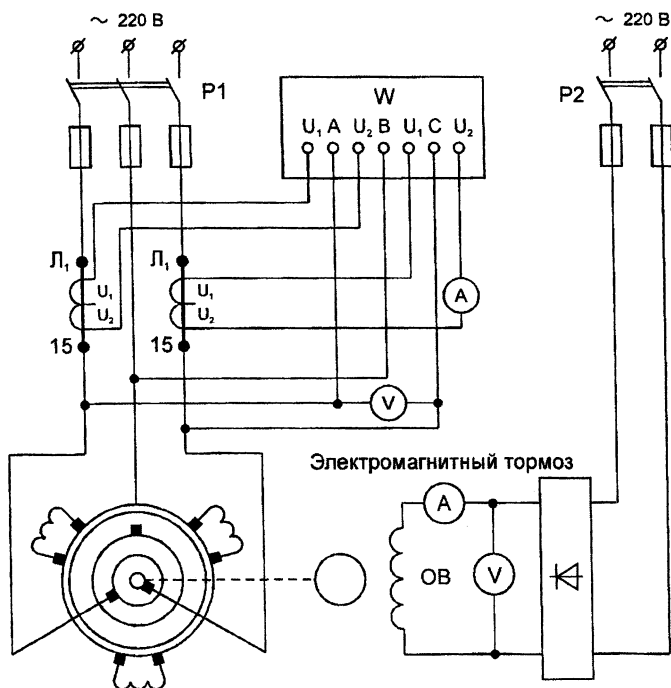


Рис. 24.1. Схема экспериментальной установки

3. Включить двигатель в сеть.

4. Изменяя положение щеток на коллекторе (перемещением щеточных траверс), проследить за изменением частоты вращения ротора.

5. Снять рабочие характеристики  $P_1$ ,  $n$ ,  $M$ ,  $\eta$ ,  $\cos\varphi = f(P_2)$  для двух положений щеток:

- 1) соответствующего максимальной частоте вращения;
- 2) соответствующего минимальной частоте вращения.

Рабочие характеристики снимаются путем изменения момента на его валу, изменяя ток возбуждения электромагнитного тормоза от нуля до значения, соответствующего номинальному току двигателя.

Данные измерения и вычислений занести в табл. 24.1.

Таблица 24.1

| № п/п | Опытные данные |           |            |              | Расчетные данные |            |               |     |
|-------|----------------|-----------|------------|--------------|------------------|------------|---------------|-----|
|       | $U_1$ , В      | $I_1$ , А | $P_1$ , Вт | $n$ , об/мин | $M$ , Нм         | $P_2$ , Вт | $\cos\varphi$ | $s$ |

### Методические указания

Асинхронные двигатели обладают существенным недостатком – имеют плохие регулировочные свойства.

Коллекторные двигатели переменного тока позволяют регулировать частоту вращения введением во вторичную цепь добавочной ЭДС. Эти двигатели позволяют регулировать также и коэффициент мощности.

Наибольшее распространение получил трехфазный коллекторный двигатель параллельного возбуждения с питанием от сети через ротор (система Шраге-Рахтера).

На валу ротора имеются 2 обмотки: 3-фазная обмотка, соединенная с тремя контактными кольцами, к которым подается напряжение сети, и дополнительная обмотка с коллектором. Эти обмотки не имеют электрической связи между собой.

Обмотка статора (вторичная цепь) двигателя Шраге-Рахтера выполнена аналогично обмотке статора 3-фазного асинхронного двигателя. Обмотки статора соединяются со щетками. Начала обмоток присоединены к одному комплекту щеток, а концы – к другому. Комплекты щеток соединены со щеточной траверсой. Обе траверсы могут перемещаться одна относительно другой в противоположные стороны.

Во вторичную цепь при помощи коллектора вводится добавочная ЭДС частоты скольжения. Величина добавочной ЭДС меняется перемещением щеток относительно друг друга.

При введении во вторичную цепь добавочной ЭДС частоты скольжения общая ЭДС вторичной цепи изменяется. Это вызывает изменение тока во вторичной цепи. Следовательно, изменяется вращающий момент двигателя и возникает разница между вращающим и тормозным моментом двигателя. Под действием этой разницы моментов происходит изменение частоты вращения ротора двигателя, пока не наступит равновесие между вращающим и тормозным моментом. Это равновесие будет при другой частоте вращения.

Если щетки совмещены, то добавочная ЭДС равна нулю. Машина работает как обычный асинхронный двигатель. Ротор вращается против поля, так как двигатель обращенный.

Рабочие характеристики двигателя строятся на основании данных табл. 24.1 по следующим уравнениям:

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9550}; \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1};$$
$$I_1 = k \cdot I_A; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где  $k$  – коэффициент трансформации трансформатора тока;  
 $I_1$  – ток двигателя;  
 $I_A$  – показания амперметра.

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого двигателя, тормоза и измерительных приборов.
3. Электрическая схема установки.
4. Таблица с данными измерений и вычислений.
5. Рабочие характеристики в одной системе координат.
6. Выводы по работе.
7. Ответы на контрольные вопросы.

## Контрольные вопросы

1. Как устроен двигатель Шраге-Рахтера?
2. Назначение коллектора в двигателе Шраге-Рахтера.
3. Как можно повысить  $\cos\phi$  исследуемого двигателя?
4. Достоинства и недостатки двигателя Шраге-Рахтера.
5. Чем ограничивается диапазон регулирования частоты вращения?
6. Пояснить роль коллектора как преобразователя частоты.
7. Почему во вторичную обмотку двигателя нужно вводить ЭДС частоты скольжения, а не любой другой частоты?
8. Как изменяется критический момент двигателя в зависимости от положения щеток?

### Лабораторная работа № 25

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МУФТЫ СКОЛЬЖЕНИЯ

**Цель работы:** изучение свойств электромагнитной муфты скольжения.

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой и записать паспортные данные машин, реостатов и измерительных приборов. Собрать схему согласно рис. 25.1.

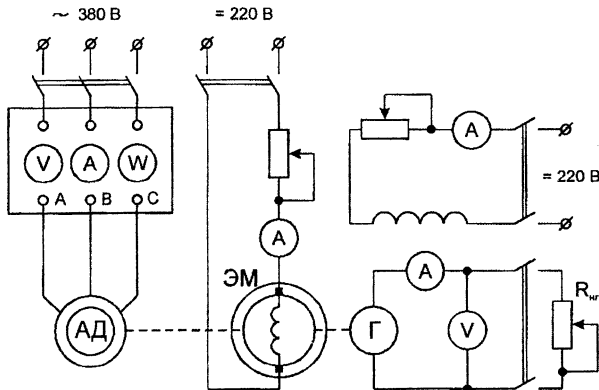


Рис. 25.1. Схема экспериментальной установки

2. Запустить в ход асинхронный двигатель.

3. Снять механические характеристики муфты  $n = f(M)$  при  $I_b = \text{const}$  для 5–7 значений ее тока возбуждения.

После запуска в ход асинхронного двигателя установить номинальные токи возбуждения генератора  $I_{гг}$  и муфты  $I_b$ . Затем, поддерживая неизменными токи возбуждения муфты и генератора, увеличивать ток якоря генератора от нуля до максимального, но не более  $1,5 I_{гг}$ , за счет уменьшения сопротивления в цепи якоря. Данные измерений занести в табл. 25.1.

Таблица 25.1

| №<br>п/п | Опытные данные |            |                    |                    |               |               | Расчетные данные      |             |                |                 |        |     |
|----------|----------------|------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|-----------------------|-------------|----------------|-----------------|--------|-----|
|          | $P_{дв}$<br>Вт | $I_b$<br>А | $n_{дв}$<br>об/мин | $n_{гг}$<br>об/мин | $U_{гг}$<br>В | $I_{гг}$<br>А | $\Delta P_{гг}$<br>Вт | $M$ ,<br>Нм | $P_{2г}$<br>Вт | $P_{1гг}$<br>Вт | $\eta$ | $s$ |
|          |                |            |                    |                    |               |               |                       |             |                |                 |        |     |

Здесь  $P_{дв}$ ,  $n_{дв}$  – мощность и частота вращения двигателя;  $U_{гг}$ ,  $I_{гг}$ ,  $n_{гг}$  – напряжение, ток якоря и частота вращения генератора.

Затем, не изменяя ток возбуждения генератора, установить другой ток возбуждения муфты, меньший номинального, для которого аналогично предыдущему случаю снять механическую характеристику.

### Методические указания

Электромагнитная муфта скольжения имеет две вращающиеся части, одна из которых имеет обмотку возбуждения, как и синхронная машина, а другая – короткозамкнутую обмотку типа «беличья клетка» (обмотка якоря). Одна из этих частей (ведущий вал) связана с двигателем нерегулируемой частоты вращения (в нашем случае асинхронный двигатель), а другая (ведомый вал) – с механизмом (в нашем случае генератор постоянного тока), частоту вращения которого надо регулировать. Это достигается за счет изменения тока возбуждения муфты.

Мощность на ведомом валу муфты равна потребляемой мощности генератора

$$P_{1г} = P_{2г} + \Delta P = U_{гг} \cdot I_{гг} + \Delta P,$$

где  $\Delta P$  – потери генератора, состоящие из потерь холостого хода (потери в стали и механические), электрических потерь в якорной

цепи, потерь на возбуждение генератора и в щеточном контакте:  
 $\Delta P = \Delta P_0 + I_{\Gamma}^2 \cdot R_{\Gamma} + I_{в\Gamma}^2 \cdot R_{в\Gamma} + \Delta U_{щ} \cdot I_{\Gamma}$ .

$R_{\Gamma}$ ,  $R_{в\Gamma}$  – сопротивления якорной цепи и цепи возбуждения генератора.

Потери холостого хода берутся из графика в зависимости от частоты вращения. Падение напряжения в щетках принимаем равным  $\Delta U_{щ} = 2В$ .

Вращающий момент на валу муфты

$$M = \frac{9,55 \cdot P_{1\Gamma}}{n_{\Gamma}},$$

где  $P_{1\Gamma}$  – в Вт;

$n$  – в об/мин.

КПД установки

$$\eta = \frac{P_{1\Gamma}}{P_{д} + I_{в}^2 \cdot R_{в}},$$

где  $R_{в}$  – сопротивление обмотки возбуждения.

Потери в установке

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{д} - P_{1\Gamma} + I_{в}^2 \cdot R_{в}.$$

Скольжение муфты

$$s = \frac{n_{д} - n_{\Gamma}}{n_{д}},$$

где  $n_{д}$  – скорость вращения асинхронного двигателя;

$n_{\Gamma}$  – скорость вращения генератора.

## Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные электрических машин, реостатов и приборов.

3. Схема установки, таблица измерений и вычислений.
4. Механические характеристики муфты, снятые при 5–7 различных токах возбуждения.
5. Регулировочные характеристики  $n_r = f(I_b)$  при  $M = \text{const}$  для 5 значений момента, которые строятся с помощью механических характеристик.
6. Зависимости  $n_r = f(n_r)$  и  $\Delta P_\Sigma = f(n_r)$  при  $M = \text{const}$  для 5 значений вращающего момента.
7. Выводы по работе.
8. Ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем объясняется резкое увеличение потерь с уменьшением частоты вращения?
2. Как примерно измеряется результирующий магнитный поток в зависимости от скольжения у муфты и асинхронного двигателя?
3. Может ли ведомый вал вращаться синхронно с ведущим?
4. Для каких механизмов целесообразнее использовать муфту с точки зрения потерь?
5. Объяснить создание вращающего момента у муфты, рассматривая ее как синхронный генератор в режиме короткого замыкания.
6. Пояснить, как изменятся свойства муфты при изменении соотношения между активным и индуктивным сопротивлением обмотки якоря.

### *Лабораторная работа № 26*

## **ИСПЫТАНИЕ НА НАГРЕВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПРИ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ НАГРУЗКЕ**

**Цель работы:** изучение нагрева обмотки статора асинхронного двигателя при непосредственной нагрузке; изучение метода определения потерь асинхронного двигателя по опытным данным.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с установкой (рис. 26.1), записать тип и паспортные данные испытуемого двигателя.

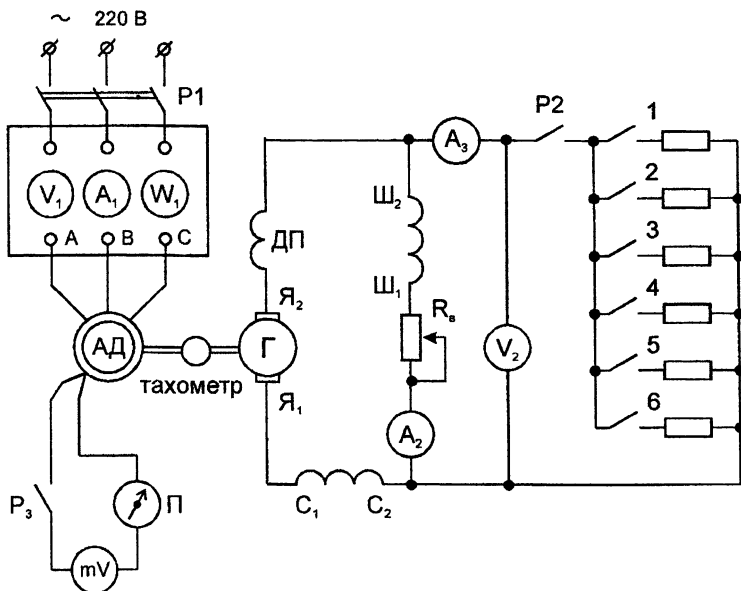


Рис. 26.1. Схема экспериментальной установки

2. По рис. 26.2 ознакомиться с расположением шести термопар в двигателе (1 и 4 в лобовых частях, 2 и 3 в пазах ближе к вентилятору, 5 и 6 в пазах дальше от вентилятора) и выбрать четыре термопары, с которых будут сниматься показания. Пользуясь переключателем П на рис. 26.2, снять показания этих термопар в холодном состоянии двигателя, т.е. при температуре окружающей среды  $\Theta$ , и занести их в табл. 26.1.

3. Включить двигатель в сеть и, возбуждив генератор, включить 2–4 ступени его нагрузки (по указанию руководителя). Через каждые 2 минуты заносить показания выбранных четырех термопар в табл. 26.1 до тех пор, пока показания не начнут повторяться.

Таблица 26.1

| $t$ ,<br>мин | Показания термопар, °C |     |     |     |     |     |
|--------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|              | № 1                    | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 |
|              |                        |     |     |     |     |     |

3. Изменяя величину тока нагрузки от 0 до  $I_{нг}$ , заполнить табл. 26.2.



| $I_{1\phi}, \text{ A}$ | $U_{1\text{л}}, \text{ В}$ | $P_1, \text{ Вт}$ | $n, \text{ об/мин}$ |
|------------------------|----------------------------|-------------------|---------------------|
|------------------------|----------------------------|-------------------|---------------------|

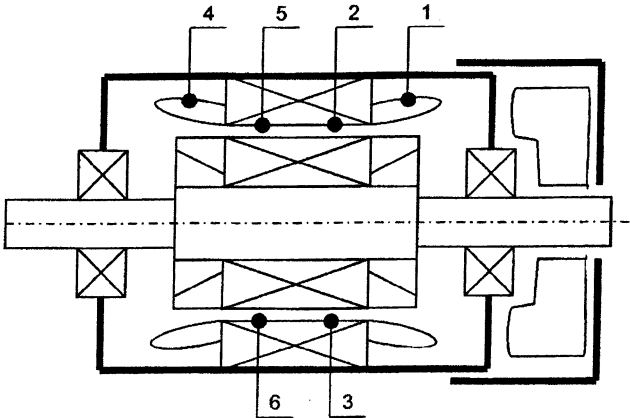


Рис. 26.2. Расположение термомпар в двигателе:  
 1, 4 – в лобовых частях; 2, 3 (5, 6) – на 1/3 (2/3) расстояния сердечника статора со стороны вентилятора

### Методические указания

В электрических машинах преобразование энергии из электрической в механическую и обратно сопровождается преобразованием электрической или механической энергии в тепло.

Испытание на нагревание сводится к определению превышений температуры обмотки статора машины над температурой окружающей среды.

Под превышением температуры понимается разность между температурой данной части машины и температурой окружающей среды. В данном случае применительно к обмотке статора превышение температуры определяется соотношением

$$\Theta = v - v_0, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $\Theta$  – превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;

$v$  – температура данной точки обмотки, °С;

$v_0$  – температура обмотки в данной точке при температуре окружающей среды, °С.

Наиболее нагретой частью машины являются обмотки и ротора, и статора. Допустимая температура обмотки статора зависит от класса изоляции (табл. 26.3).

Таблица 26.3

| Класс изоляции             | <i>A</i> | <i>E</i> | <i>B</i> | <i>F</i> | <i>H</i> | <i>C</i> |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Допустимая температура, °С | 105      | 120      | 130      | 155      | 180      | 180      |

Срок службы электрической машины при эксплуатации с номинальными данными составляет 15–20 лет и определяется главным образом сроком службы изоляции. Установлено, что превышение температуры над допустимой примерно на 10 °С снижает срок службы машины вдвое.

Допустимое превышение температуры определяется разностью (ГОСТ 183-74):

$$\Theta_{\text{доп}} = v_{\text{доп}} - 40,$$

где  $\Theta_{\text{доп}}$  – допустимое превышение температуры данного класса изоляции, °С;

$v_{\text{доп}}$  – температура данного класса изоляции, °С;

40 °С – температура окружающей среды.

Энергию, преобразующуюся в электрических машинах в тепло, принято называть потерями. Потери в электрических машинах делятся на основные и добавочные.

К основным потерям относятся электрические, магнитные и механические. Основные потери могут быть определены опытным путем.

Потери механические  $\Delta p_{\text{мех}}$  и магнитные  $\Delta p_{\text{мг}}$  определяются из опыта холостого хода. Данные опыта холостого хода сводятся в табл. 26.4.

Таблица 26.4

|                        |               |                        |   |   |                                     |
|------------------------|---------------|------------------------|---|---|-------------------------------------|
| $U_{0\text{ф}}$ ,<br>В | $P_0$ ,<br>Вт | $I_{0\text{ф}}$ ,<br>А | $3 \cdot I_{0\text{ф}}^2 \cdot R_{1\text{ф}20^\circ}$ ,<br>Вт | $P_0 - 3 \cdot I_{0\text{ф}}^2 \cdot R_{1\text{ф}20^\circ}$ ,<br>Вт | $U_{0\text{ф}}^2 \cdot 10^4$ ,<br>В |
|------------------------|---------------|------------------------|---|---|-------------------------------------|

$R_{\phi} = 18 \text{ Ом}$  при  $t_{\text{окр}} = 20^{\circ}\text{C}$ .

Разделение потерь холостого хода представлено на рис. 26.3.

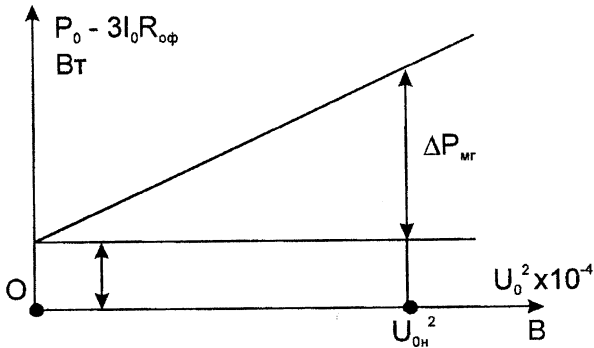


Рис. 26.3

Электрические потери в обмотке статора ( $\Delta p_{\text{эл.1}}$ ) и ротора ( $\Delta p_{\text{эл.2}}$ ) определяются как

$$\Delta p_{\text{эл.1}} = 3 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot R_{\phi.115}.$$

При этом

$$R_{\phi.115} = R_{\phi.t_{\text{окр}}} \cdot [1 + 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot (115 - t_{\text{окр}})];$$

$$\Delta p_{\text{эл.2}} = P_{\text{эм}} \cdot s.$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta p_{\text{эл.1}} - \Delta p_{\text{мг}}.$$

Скольжение

$$s = (n_1 - n) / n_1.$$

Синхронная скорость

$$n_1 = 60 \cdot f / p.$$

Число пар полюсов  $p$  определяется по паспортным данным испытуемой машины.

Добавочные потери согласно ГОСТ 11828-75 принимаются

$$\Delta p_{\text{доб}} = 0,005 \cdot P_n.$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \left( 1 - \frac{\sum \Delta p_i}{P_1} \right) \cdot 100 \% \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%.$$

Полезная мощность двигателя

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta p.$$

Суммарные потери активной мощности в двигателе

$$\sum \Delta p = \Delta p_{\text{эл.1}} + \Delta p_{\text{эл.2}} + \Delta p_{\text{мг}} + \Delta p_{\text{доб}}.$$

Электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}} = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n_1}.$$

Полезный момент на валу двигателя

$$M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n}.$$

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi}}.$$

Данные расчета занести в табл. 26.5.

Таблица 26.5

|          |             |             |           |                       |                     |                      |              |     |                       |                      |                       |           |            |           |            |
|----------|-------------|-------------|-----------|-----------------------|---------------------|----------------------|--------------|-----|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| №<br>п/п | $U_{1ф}, В$ | $I_{1ф}, А$ | $P_1, Вт$ | $\Delta P_{эл.1}, Вт$ | $\Delta P_{мр}, Вт$ | $\Delta P_{мех}, Вт$ | $P_{эм}, Вт$ | $s$ | $\Delta P_{эл.2}, Вт$ | $\Delta P_{доб}, Вт$ | $\Sigma \Delta P, Вт$ | $P_2, Вт$ | $\eta, \%$ | $M_2, Нм$ | $\cos\phi$ |
|----------|-------------|-------------|-----------|-----------------------|---------------------|----------------------|--------------|-----|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|------------|

По данным табл. 26.5 построить рабочие характеристики  $P_1$ ,  $\cos\phi$ ,  $I_1$ ,  $M_2$ ,  $\eta = f(P_2)$  (рис. 26.5).

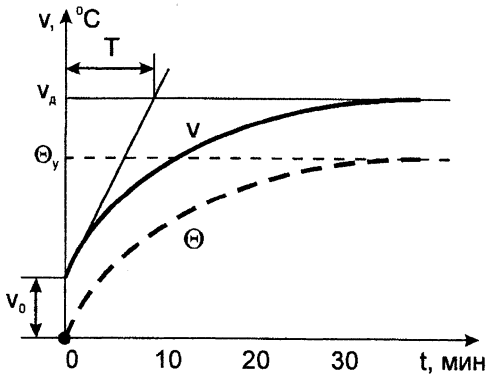


Рис. 26.4. Кривая нагрева электродвигателя

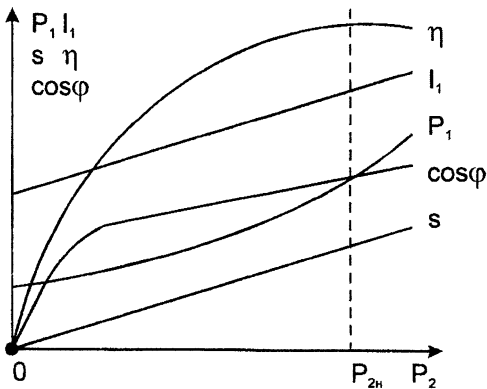


Рис. 26.5. Рабочие характеристики электродвигателя

По рабочим характеристикам определить полезную мощность двигателя  $P_2$ , при которой снималась кривая нагрева, а также при  $P_{2н}$  определить  $P_1$ ,  $\cos\phi$ ,  $I_1$ ,  $M_2$ ,  $\eta$  и сравнить их с паспортными данными испытуемого двигателя.

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные исследуемого двигателя.
3. Электрическая схема установки.
4. Данные измерений, вычислений, расчетные формулы.
5. Кривая изменения температуры нагрева  $v = f(t)$  одной из термомпар.
6. Графическое определение потерь  $\Delta p_{мех}$ ,  $\Delta p_{мг}$ .
7. Определение  $P_2$ , при которой снималась кривая нагрева.
8. Выводы по работе.
9. Ответы на контрольные вопросы.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите виды потерь мощности асинхронного двигателя.
2. От каких факторов зависит установившаяся температура нагрева?
3. Какая температура нагрева двигателя считается допустимой? От чего зависит ее величина?
4. Назовите классы изоляции электрических машин по нагревостойкости. Дайте их краткую характеристику. Назовите материалы, относящиеся к этим классам изоляции.
5. От чего зависит скорость изменения температуры при нагревании и охлаждении двигателя?
6. Что такое постоянная времени нагрева?
7. От чего зависит постоянная времени нагрева?
8. Одинакова ли постоянная времени при нагревании и остывании?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, Г.Н. Электрические машины / Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974. – Ч.1.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1979. – 832 с.
3. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1960. – 928 с.
4. Копылов, И.П. Электрические машины: учебник / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 360 с.
5. Брускин, Д.Э. Электрические машины / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорочович, В.С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1987. – Ч. I и II.
6. Токарев, Б.Ф. Электрические машины: учебник / Б.Ф. Токарев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 547 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Правила техники безопасности и работы<br>в лаборатории электрических машин.....                              | 3  |
| <i>Лабораторная работа № 13</i>  |    |
| Исследование многоскоростного асинхронного двигателя .....   | 4  |
| <i>Лабораторная работа № 14</i>  |    |
| Исследование индукционного регулятора .....  | 8  |
| <i>Лабораторная работа № 15</i>  |    |
| Исследование обмоток электрических машин переменного тока....  | 11 |
| <i>Лабораторная работа № 16</i>  |    |
| Исследование трехфазного асинхронного двигателя<br>с короткозамкнутым ротором.....                           | 16 |
| <i>Лабораторная работа № 17</i>  |    |
| Определение параметров трехфазного асинхронного двигателя<br>с фазным ротором .....                          | 22 |
| <i>Лабораторная работа № 18</i>  |    |
| Круговая диаграмма асинхронной машины.....   | 29 |
| <i>Лабораторная работа № 19</i>  |    |
| Исследование трехфазного синхронного генератора<br>при работе на автономную нагрузку.....                    | 34 |
| <i>Лабораторная работа № 20</i>  |    |
| Включение синхронного генератора<br>на параллельную работу с сетью .....                                     | 37 |
| <i>Лабораторная работа № 21</i>  |    |
| Параллельная работа синхронного генератора с сетью .....   | 42 |
| <i>Лабораторная работа № 22</i>  |    |
| Исследование трехфазного синхронного двигателя .....   | 45 |
| <i>Лабораторная работа № 23</i>  |    |
| Определение параметров синхронных машин .....  | 49 |
| <i>Лабораторная работа № 24</i>  |    |
| Исследование трехфазного коллекторного двигателя<br>параллельного возбуждения (двигатель Шраге-Рахтера)..... | 56 |
| <i>Лабораторная работа № 25</i>  |    |
| Исследование электромагнитной муфты скольжения .....   | 59 |
| <i>Лабораторная работа № 26</i>  |    |
| Испытание на нагревание электрической машины<br>при непосредственной нагрузке.....                           | 62 |
| Литература.....  | 70 |



Учебное издание

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
МАШИНЫ  
И ТРАНСФОРМАТОРЫ**

Лабораторный практикум  
для студентов электротехнических  
специальностей

В 2 частях

**Часть 2  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Составители:  
ГОНЧАР Анатолий Андреевич  
ОЛЕШКЕВИЧ Марк Михайлович  
МАКОСКО Юрий Валерьевич  
ОЛЕШКЕВИЧ Вячеслав Маркович

Редактор Н.В. Артюшевская  
Технический редактор О.В. Дубовик  
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

---

Подписано в печать 18.12.2008.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 200. Заказ 341.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.