

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра электромеханики

*А.С. ПАДЕЕВ, С.В. МИТРОФАНОВ*

# ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
“ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН”

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
государственного образовательного учреждения высшего  
профессионального образования «Оренбургский государственный  
университет»

Оренбург 2005

УДК 621.3(07)  
ББК 31.261-07я7  
П 12

Рецензент кандидат технических наук, доцент А.М. Кутарев

**А.С. Падеев**

П 12 **Испытания и надежность электрических машин: методические указания к выполнению лабораторных работ/А.С. Падеев, С.В. Митрофанов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005 – 46 с.**

Методические указания содержат 6 лабораторных работ по одноименному курсу. Приводится краткое описание лабораторных установок, программ работ, последовательности выполнения работ и обработки полученных результатов.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по курсу “Испытания и надежность электрических машин” студентами специальности 140601 – “Электромеханика” очной и заочной форм обучения.

ББК 31.261-07я7

© Падеев А.С.,  
Митрофанов С.В., 2005  
© ГОУ ОГУ, 2005

## Введение

Задачи повышения конкурентоспособности продукции электротехнической промышленности России связаны с повышением качества и надежности выпускаемой продукции. Качество производимой продукции проверяется во время ее испытаний на соответствие стандартам и нормам по широкому кругу показателей, включая основные характеристики, энергетические показатели, уровень шума и вибраций, а также показатели надежности.

Испытания электрических машин выполняются на заключительной части производства, а также после ремонта машин или трансформаторов для проверки пригодности их к работе. Для проведения испытаний необходимо, чтобы испытываемая электрическая машина (объект испытаний) была известной (тип машины или трансформатора и их паспортные данные), аппаратура и оборудование, с помощью которых проводятся испытания, удовлетворяли требуемой точности и пределам измерений, была разработана программа и цель испытаний.

Целью данных лабораторных работ является получение студентами знаний и навыков по проведению испытаний электрических машин и трансформаторов для закрепления лекционного курса.

# 1 Лабораторная работа № 1 Испытание асинхронного двигателя и машины постоянного тока при нагреве

## 1.1 Общие сведения

Задачей испытания электрических машин на нагревание является определение теплового состояния машины, которое устанавливается при ее нагрузке в заданном режиме работы и характеризуется превышениями температуры отдельных частей машины над температурой окружающей среды. Это испытание может проводиться разными способами:

- 1) непосредственно, т.е. при работе в заданном режиме работы;
- 2) косвенно – путем проведения ряда опытов, в которых машина нагревается не сразу всеми потерями, соответствующими заданному режиму, а поочередно потерями отдельных видов, с последующим расчетным определением результата их совместного действия;
- 3) искусственным методом – в режиме работы, подобранном так, чтобы нагревание было по возможности близким к заданному режиму работы, но выполнение которого легче и экономичнее, чем реального режима.

Для определения температуры отдельных частей электрических машин наибольшее применение находят следующие методы измерения:

- метод термометра;
- метод сопротивления;
- метод заложенных термопреобразователей.

**Под термометрами** следует понимать как термометры расширения – ртутные, спиртовые и т.п., так и всякие измерители температуры, если они прикладываются к доступным поверхностям частей машины и, следовательно, позволяют определить только температуру поверхности в той точке, где они приложены.

Для повышения точности измерения температуры нужно стремиться максимально улучшить теплопередачу от поверхности к резервуару (измерительному органу) термометра (обернуть резервуар оловянной или алюминиевой фольгой, плотно прижав ее; прикрыть ватой или ветошью, плотно прижать к поверхности и т.д.).

Когда точка измерения находится в переменном магнитном поле, то предписывается применять спиртовые термометры, так как в ртути могут индуцироваться вихревые токи, нагревающие ее и увеличивающие показания.

**Метод сопротивления** основан на изменении сопротивления металлического проводника в зависимости от его температуры. Данный метод применяется для определения температуры изолированных обмоток и позволяет найти среднюю температуру обмотки (последовательно соединенных обмоток), тогда как отдельные части ее могут быть нагреты в большей или меньшей степени.

Если сопротивление обмотки в практически холодном состоянии при температуре  $\vartheta_x$  равно  $R_x$ , а в нагретом состоянии равно  $R_r$ , то неизвестную температуру  $\vartheta_r$  можно найти из выражения (1.1):

$$\vartheta_r = \frac{R_r - R_x}{R_x} \left( \frac{1}{\alpha} - \vartheta + \vartheta_x \right) + \vartheta_x, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки, отнесенный к некоторой условной температуре  $\vartheta$ .

Если принять  $\vartheta = 15^\circ\text{C}$ , то для меди с достаточной точностью можно считать  $\alpha = 0,004 = 1/250$  ( $\alpha = 1/260$  для обмотки из алюминия). С учетом этого выражения (1.1) для медной обмотки запишется следующим образом:

$$\vartheta_r = \frac{R_r - R_x}{R_x} (235 + \vartheta_x) + \vartheta_x. \quad (1.2)$$

**Метод заложенных термопреобразователей** применяют для определения температуры обмотки или активной стали. Применение данного метода предполагает наличие термопреобразователей сопротивления, термопар или полупроводниковых терморезисторов, заложенных при изготовлении машины в таких точках, где ожидаются наиболее высокие значения температуры. Обычно устанавливают не менее шести датчиков, равномерно расположенных по окружности машины в таких точках обмотки в осевом направлении пазов, в которых ожидают наибольшие значения температуры. Каждый датчик должен соприкасаться непосредственно с поверхностью, температура которой подлежит измерению, и быть защищен от воздействия охлаждающей среды.

Температуру в месте заложения термопары следует определять по ее градуировочной характеристике. Холодный спай термопары должен быть защищен от быстрых изменений температуры окружающей среды. При наличии одной – двух термопар ЭДС измеряется милливольтметром с пределом измерений 3...10 мВ и внутренним сопротивлением не менее 25 Ом/мВ. Для устранения методической ошибки (учет сопротивления термопары) следует вводить поправку на показания милливольтметра по формуле:

$$U = U_{И} \frac{(R_B - R_T)}{R_B} \quad (1.3)$$

где  $U$  – истинное значение ЭДС термопары, мВ;

$U_{И}$  – измеренное значение ЭДС, мВ;

$R_B, R_T$  – внутренне сопротивление милливольтметра и сопротивление термопары, Ом.

При большем числе термопар, как правило, используют компенсационный метод измерений. Температуру в месте заложения термометров сопротивления определяют путем измерения сопротивления термометра мостом или специально предназначенными для этого логометрами. Превышение температуры следует принимать равным наибольшему измеренному значению.

Данные преобразователи служат для контроля температуры в течение всего срока службы электрической машины и применяются в крупных машинах, в основном переменного тока.

## 1.2 Краткое описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе проводится испытание асинхронной машины и машины постоянного тока на нагревание при их работе под нагрузкой. Для этого выполнена спарка из асинхронного двигателя (АД) и машины постоянного тока (МПТ) параллельного возбуждения, механически соединенных между собой. Схема установки приведена на рисунке 1.1.

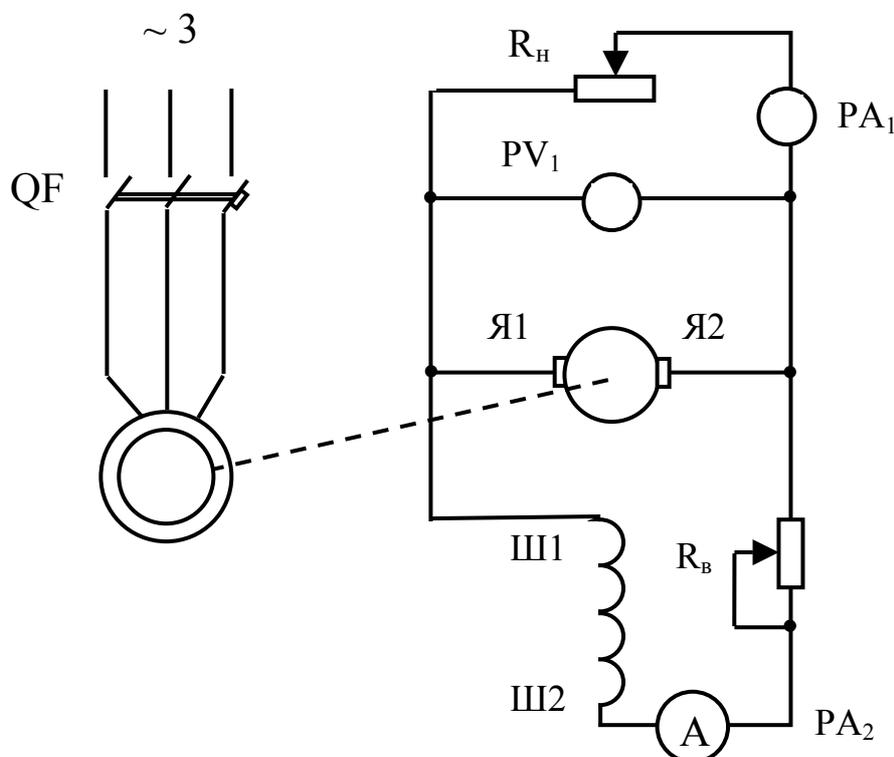


Рисунок 1.1 – Схема лабораторной установки

АД с помощью выключателя QF подключается к сети трехфазного симметричного напряжения. Обмотки АД соединяются в Y или в  $\Delta$  по указанию преподавателя. Возможно соединение обмоток в Y или  $\Delta$  внутри двигателя. В этом случае на стенд выводятся только начала соответствующих фаз  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ .

МПТ работает в режиме генератора, нагрузкой которого служит водяной реостат  $R_n$ . Для контроля режима работы генератора в его последовательную цепь включен амперметр  $PA_1$ , а напряжение на нагрузке измеряется вольтметром  $PV_1$ .

Для измерения сопротивления обмоток постоянному току необходимо использовать стабилизированный источник постоянного тока ( $U = 3 - 20$  В, и выходным током не менее 1 А), вольтметр и амперметр постоянного тока и реостат для регулирования и ограничения тока протекающего по обмотке (рисунок 1.2).

## 1.3 Задание

1.3.1 Измерить сопротивление обмоток статора АД, обмоток якоря, добавочных полюсов и параллельного возбуждения МПТ в практически холодном состоянии.

1.3.2 Нагрузить АД и МПТ до мощности, близкой к номинальной и выдержать в этом режиме 15–20 минут.

1.3.3 Снять нагрузку АД и МПТ, отключить их и измерить сопротивление всех обмоток, указанных в п. 1.3.1.

1.3.4 Повторить п.п. 1.3.2 – 1.3.3 два раза.

1.3.5 Рассчитать температуры обмоток и построить зависимости температур обмоток от времени.

1.3.6 Проанализировать полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

## 1.4 Методические указания

1.4.1 Измерение сопротивления обмоток в практически холодном состоянии

Измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии необходимо выполнить методом вольтметра и амперметра. Измерение сопротивлений следует проводить непосредственно на выводах обмоток, а для замкнутых обмоток, не имеющих начала и конца (например, обмоток якорей коллекторных машин постоянного и переменного тока) – между точками, доступными для присоединения измерительного устройства и выбираемыми в соответствии с типом обмотки.

Схема для измерения сопротивлений обмоток методом вольтметра и амперметра приведена на рисунке 1.2.

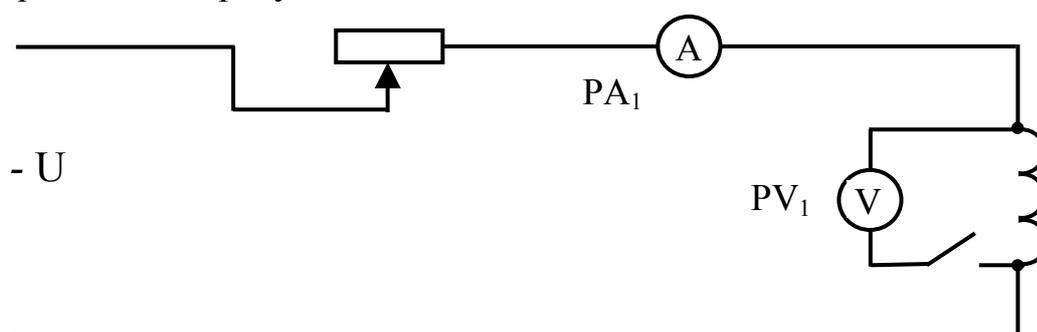


Рисунок 1.2 – Схема для измерения сопротивлений методом вольтметра и амперметра

Каждое сопротивление следует измерять при нескольких различных значениях тока, переходя от больших к меньшим. Обычно проводится три измерения. За сопротивление обмотки принимается среднее арифметическое значение от трех измерений.

Значение постоянного тока при измерении сопротивлений обмоток в практически холодном состоянии методом вольтметра и амперметра должно

быть таким, чтобы адиабатное повышение температуры измеряемой обмотки за время измерения не превышало 1 °С.

Скорость адиабатного повышения температуры медной обмотки  $\Delta\vartheta/\Delta t$ , °С/с определяется по формуле:

$$\Delta\vartheta/\Delta t = j^2/200, \quad (1.4)$$

где  $j$  - плотность тока в обмотке при измерении, А/мм<sup>2</sup>.

Для алюминиевых обмоток в знаменателе вместо 200 следует подставить 86.

Если сечение обмотки неизвестно, значение измерительного тока не должно превосходить 20 % номинального тока данной обмотки, а длительность его протекания – 60 секунд.

Чтобы не повредить вольтметр импульсами напряжения, индуктируемого в обмотке при резком изменении тока, его следует подключить при установившемся значении тока и отключать при изменении тока в цепи, особенно если обмотка имеет большую индуктивность, например параллельная обмотка возбуждения МПТ.

Если расчетное значение измеряемого сопротивления отличается от сопротивления вольтметра менее, чем в 100 раз, то истинное значение измеренного сопротивления подсчитывают по формуле:

$$R' = \frac{R}{1 - R/R_V}, \quad (1.5)$$

где  $R$  - сопротивление, вычисляемое по измеренным значениям тока и напряжения, Ом;

$R_V$  - сопротивление вольтметра, Ом.

При измерении сопротивления обмоток в практически холодном состоянии обязательно фиксируют температуру обмотки, при которой производят измерения. Так как испытываемые АД и МПТ длительное время не были включены, то температуру всех обмоток можно принять равной температуре окружающей среды (т.е. воздуха в лаборатории), которую необходимо определить по градуснику.

Последовательность определения сопротивления фаз обмотки статора АД зависит от схемы соединения обмотки. Если на щиток выведены начала и концы всех фаз, то сопротивление каждой из них можно найти, последовательно соединяя фазы по схеме, приведенной на рисунке 1.2. Для упрощения измерения сопротивления в лабораторной работе разрешается соединить фазы последовательно в открытый треугольник и сопротивление фазы определить делением полученного результата на число фаз.

Обмотки статоров АД чаще всего выполняют с глухим сопряжением фаз в  $Y$  или в  $\Delta$ . При измерении сопротивления обмотки с глухим сопряжением фаз в  $Y$  между каждыми двумя выводами оказываются включенными последовательно две фазы и результат измерения дает сумму их сопротивлений (см. рисунок 1.3, а).

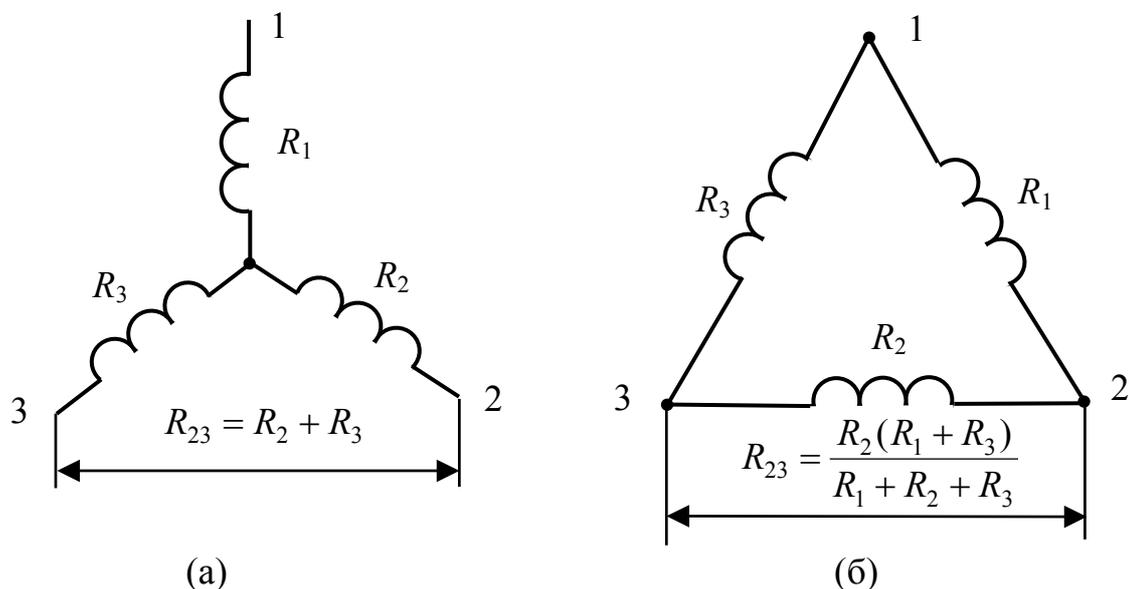


Рисунок 1.3 – Измерение сопротивлений обмоток при глухом сопряжении фаз в звезду (а) и треугольник (б)

Если  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  - действительные значения сопротивлений фаз, примыкающих к выводам 1, 2 и 3, а  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{31}$  - результаты измерений, произведенных соответственно между выводами 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1, то сопротивление фаз можно найти по выражениям:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{31} - R_{23}}{2}, \quad (1.6)$$

$$R_2 = \frac{R_{32} + R_{23} - R_{31}}{2}, \quad (1.7)$$

$$R_3 = \frac{R_{23} + R_{31} - R_{32}}{2}. \quad (1.8)$$

При измерении сопротивления обмотки с глухим сопряжением фаз в  $\Delta$  между каждыми двумя выводами при измерении сопротивления оказываются включенными параллельно две ветви, одна из которых состоит из одной фазы, а другая – из двух фаз, соединенных последовательно (см. рисунок 1.3, б). Для определения сопротивления фаз получим следующие выражения:

$$R_1 = \frac{2R_{23}R_{31}}{R_{23} + R_{31} - R_{12}} - \frac{R_{23} + R_{31} - R_{12}}{2}, \quad (1.9)$$

$$R_2 = \frac{2R_{31}R_{12}}{R_{31} + R_{12} - R_{23}} - \frac{R_{31} + R_{12} - R_{23}}{2}, \quad (1.10)$$

$$R_3 = \frac{2R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2}. \quad (1.11)$$

Если расхождение измеренных сопротивлений не превосходит 2 % при сопряжении фаз в Y и 1,5 % при сопряжении в  $\Delta$ , то сопротивление одной фазы допускается определять упрощенно: при сопряжении фаз в звезду:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R/2 \quad (1.12)$$

и при сопряжении их в треугольник:

$$R_1 = R_2 = R_3 = 3R/2, \quad (1.13)$$

где  $R$  - среднее из измеренных значений.

В лабораторной работе допускается пользоваться упрощенными формулами.

Сопротивления обмоток добавочных полюсов и обмоток возбуждения измеряют по схемам, аналогичным изображенной на рисунке 1.2.

Особенностью обмотки якоря является то, что она не имеет ни начала, ни конца; за них могут быть приняты любые две ее точки, соединенные с коллектором. При испытании МПТ в зависимости от схемы обмотки якоря находят коллекторные пластины, между которыми определяют значение сопротивления обмотки якоря. В простейшем случае при четном числе коллекторных пластин это могут быть диаметрально противоположные пластины. Подведение тока и измерение падения напряжения должно осуществляться через эти пластины, которые необходимо пометить. Для упрощения измерений в лабораторной работе разрешается определять сопротивление обмотки якоря между зажимами А1 и А2, т.е. сопротивление обмотки, включенное последовательно с сопротивлением щеточного контакта.

Сопротивление обмотки якоря находят по выражению:

$$R_{я} = \frac{U - \Delta U_{щ}}{I}, \quad (1.14)$$

где  $\Delta U_{щ}$  - падение напряжения в двойном щеточном контакте

$$\Delta U_{щ} = 2B.$$

## 1.4.2 Пуск установки и ее нагрузка

После измерения сопротивлений всех обмоток собирают схему испытания по рисунку 1.1

Выключателем QF подключают обмотки АД к питающей сети и возбуждают генератор постоянного тока до номинального напряжения. Регулируя величину нагрузки  $R_H$  и ток в цепи возбуждения, устанавливают необходимый режим работы. АД и МПТ, соединенные в спарку, могут иметь различные номинальные мощности. До номинальной мощности нужно нагрузить ту машину, у которой эта мощность меньше. Если мощность МПТ меньше мощности АД, то, изменяя величину  $R_H$  и  $R_B$ , устанавливают номинальный ток и напряжение генератора постоянного тока (МПТ).

После вывода установки на указанный режим фиксируют время и поддерживают данный режим. Показания приборов записывают через 15 минут.

## 1.4.3 Измерение сопротивлений обмоток в нагретом состоянии

После отключения установки необходимо измерить сопротивление всех обмоток, указанных в п. 1.3.1. При этом необходимо использовать те же схемы и те же приборы, что и при определении сопротивления обмоток в практически холодном состоянии. Измерения желательнее проводить как можно быстрее, т.к. тепло рассеивается и температура обмоток уменьшается.

Схема для измерения сопротивления обмоток постоянному току должна быть уже собрана (рисунок 1.2). Разбираем схему (рисунок 1.1) и подключаем измерительные клеммы поочередно к каждой обмотке АД и МПТ.

Измеряя сопротивление обмоток в нагретом состоянии, можно увеличить значение тока в обмотках до номинального, а затем, уменьшая его, произвести три замера.

После измерения сопротивлений всех обмоток необходимо повторно нагрузить установку до указанного режима, поддерживать его в течение 15 минут, затем, отключив установку, измерить сопротивление обмоток. Повторить указанные процедуры еще раз.

## 1.4.4 Обработка полученных результатов

Данные измерений сопротивлений обмоток и расчетные значения температур заносятся в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Обмотка	t=0			t=15 мин.			t=30 мин.			t=45 мин.		
	U	I	$R_{\phi} =$	U	I	$R_{\phi} =$	U	I	$R_{\phi} =$	U	I	$R_{\phi} =$
Статора АД			$\mathcal{G}_{\phi} =$			$\mathcal{G}_{\phi} =$			$\mathcal{G}_{\phi} =$			$\mathcal{G}_{\phi} =$

Продолжение таблицы 1.1

Обмотка	t=0			t=15 мин.			t=30 мин.			t=45 мин.		
	U	I	$R_{я} =$	U	I	$R_{я} =$	U	I	$R_{я} =$	U	I	$R_{я} =$
Якоря МПТ												
			$\mathcal{G}_{я} =$			$\mathcal{G}_{я} =$			$\mathcal{G}_{я} =$			$\mathcal{G}_{я} =$
Добавоч- ных полю- сов МПТ	U	I	$R_{д} =$	U	I	$R_{д} =$	U	I	$R_{д} =$	U	I	$R_{д} =$
			$\mathcal{G}_{д} =$			$\mathcal{G}_{д} =$			$\mathcal{G}_{д} =$			$\mathcal{G}_{д} =$
Возбужде- ния МПТ	U	I	$R_{в} =$	U	I	$R_{в} =$	U	I	$R_{в} =$	U	I	$R_{в} =$
			$\mathcal{G}_{в} =$			$\mathcal{G}_{в} =$			$\mathcal{G}_{в} =$			$\mathcal{G}_{в} =$

Температуры обмоток при известных сопротивлениях рассчитываются по выражению (1.5). Как указано в п. 1.4.1, при  $t = 0$  температуры всех обмоток считаем равными температуре окружающей среды.

Зависимости температур обмоток от времени работы под нагрузкой нужно построить на одном графике. При этом время перерывов на измерение сопротивлений обмоток не учитываем, т.е. на графике откладываем время  $t = 0, 15, 30$  и  $45$  минут.

Из анализа полученных данных нужно сделать соответствующие выводы о тепловом состоянии АД и МПТ или их отдельных частей.

## 1.5 Контрольные вопросы

1.5.1 С какой целью ЭМ испытывают на нагревание?

1.5.2 Как определяют температуры отдельных частей ЭМ?

1.5.3 Как определяют температуры вращающихся частей ЭМ?

1.5.4 Какие виды испытаний ЭМ на нагревание Вы знаете?

1.5.5 Назовите и охарактеризуйте способы измерения сопротивления обмоток.

1.5.6 Назовите возможные источники погрешностей измерений при определении температуры методом сопротивления.

1.5.7 При номинальной мощности МПТ нагрузка АД составила 0.8 от номинальной. Как провести испытание, чтобы найти температуру обмотки статора АД при номинальной нагрузке?

## 2 Лабораторная работа № 2 Определение коэффициента полезного действия асинхронного двигателя

### 2.1 Общие сведения

Определение коэффициента полезного действия (КПД) входит в программу приемочных испытаний всех типов электрических машин.

По технике выполнения испытания делятся на три группы:

1) измерение мощности, подводимой к машине и отдаваемой ею. Как правило, оно включает в себя измерение механической мощности на валу машины;

2) измерение подводимой и отдаваемой мощности двух машин, объединенных механически. Этим устраняется измерение механической мощности, подводимой к машине или отдаваемой ею;

3) измерение действующих потерь в машине при определенном режиме ее работы.

Испытания первой группы проводятся для непосредственного определения КПД; испытания второй группы могут проводиться как для непосредственного, так и для косвенного определения КПД; Испытания третьей группы проводятся только для косвенного определения КПД.

К методам непосредственного определения КПД относятся:

1) **метод измерения механической мощности** – метод непосредственного определения КПД, при котором механическая мощность на валу машины определяется как произведение измеренного вращающего момента на угловую частоту вращения, а электрическая мощность измеряется электроизмерительными приборами.

2) **метод измерения электрической мощности** – метод непосредственного определения КПД, при котором две одинаковые машины соединяются друг с другом и одна работает в режиме двигателя от соответствующего источника, а другая – в режиме генератора на реостат или сеть. Полные потери в двух машинах определяются как разность между электрической мощностью, подводимой к первой машине и электрической мощностью, отдаваемой второй машиной.

3) **метод тарированной вспомогательной машины** – метод непосредственного определения КПД, при котором испытываемая машина механически соединяется с тарированной машиной.

Вычисление КПД (в %), при непосредственных методах его определения, производится по формуле:

$$\eta = 100 P_2 / P_1, \quad (2.1)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - подводимая и отдаваемая мощности, Вт или кВт.

К методам косвенного определения КПД относятся:

**1) метод взаимной нагрузки** – метод косвенного определения КПД, при котором две одинаковые машины соединяются механически и электрически. Одна из них работает в режиме двигателя и передает всю развиваемую ею механическую мощность второй машине, работающей в режиме генератора и возвращающей всю генерируемую ею электрическую мощность первой машине.

**2) метод динамометра или тарированного двигателя** – метод косвенного определения КПД, при котором испытываемая машина приводится во вращение при помощи тарированного двигателя, который нагружается суммой механических потерь, потерь в стали и добавочных потерь холостого хода.

**3) метод ненагруженного двигателя** – метод косвенного определения КПД, при котором испытываемая машина работает в режиме ненагруженного двигателя при питании от источника соответствующего напряжения.

**4) метод самоторможения** – метод косвенного определения КПД, при котором испытываемая машина подвергается свободному выбегу и затормаживается потерями в ней или какой-либо нагрузкой, поддающейся достаточно точному измерению.

**5) калориметрический метод** – метод косвенного определения КПД, при котором потери в испытываемой машине определяются по количеству тепла, выделяемого ими в объеме машины.

Вычисление КПД (в %), при косвенных методах его определения, производится по формулам:

$$\text{для генераторов} \quad \eta = 100 \left( 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \right), \quad (2.2)$$

$$\text{для двигателей} \quad \eta = 100 \left( 1 - \frac{\sum P}{P_1} \right), \quad (2.3)$$

где  $P_1$  - подводимая мощность, Вт или кВт;

$P_2$  - отдаваемая мощность, Вт или кВт;

$\sum P$  - сумма потерь в машине при данной нагрузке, Вт или кВт.

Косвенные методы определения КПД имеют перед непосредственными определенными преимуществами. Основные из них сводятся к следующему:

1) относительная погрешность определения КПД при косвенных методах значительно ниже, чем при непосредственных;

2) косвенные методы большей частью не требуют фактической нагрузки испытываемой машины, что упрощает конструкцию испытательного стенда;

3) при косвенных методах исключается влияние температуры частей машины на конечные результаты испытаний.

В зависимости от типа и назначения электрической машины стандарт рекомендует тот или иной метод определения КПД. В общем случае при гарантированном значении КПД, равном или меньшем 85 %, допускается использование методов непосредственного определения КПД. Если нет иных указаний, то

косвенное определение КПД обязательно для машин с гарантированным значением КПД больше 85 %; косвенное определение может быть применено и для машин с гарантированным значением КПД менее 85 %.

Для многофазных АД с гарантированным значением КПД, ниже или равным 85 %, в соответствии с ГОСТ 25941-83 предпочтительным является метод тарированной вспомогательной машины.

## 2.2 Краткое описание лабораторной установки

Для определения КПД АД непосредственным методом он механически соединен с тарированным генератором постоянного тока. Схема установки приведена на рисунке 2.1.

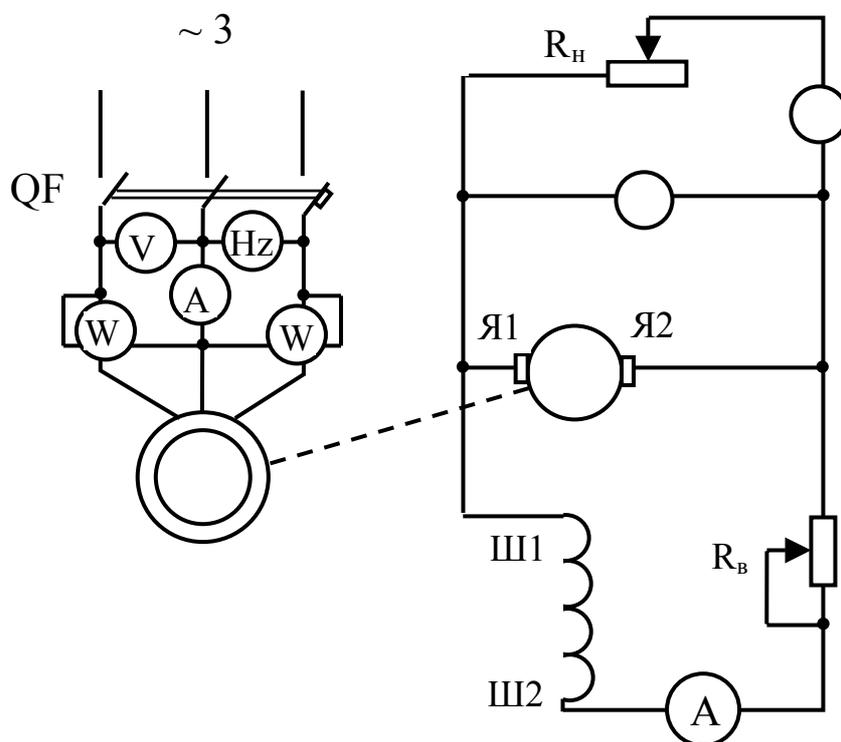


Рисунок 2.1 – Схема установки для определения КПД АД

АД с помощью автоматического выключателя подключается к сети трехфазного симметричного напряжения, величина и частота которого определяется соответственно вольтметром и частотомером.

Активная мощность, потребляемая АД, определяется или с помощью двух ваттметров (как показано на рисунке 2.1), или с помощью трехфазного измерительного комплекта. В последнем случае полная потребляемая мощность определяется суммой

$$P_1 = P_a + P_b + P_c, \quad (2.4)$$

где  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $P_c$  - показания ваттметра соответственно в фазах А, В и С.

Нагрузкой для тарированного генератора постоянного тока параллельного возбуждения служит водяной реостат  $R_H$ . Движок реостата  $R_B$  устанавлива-

ется таким образом, чтобы в режиме холостого хода напряжение генератора равнялось номинальному.

## 2.3 Задание

2.3.1 Нагрузить испытуемый АД до мощности, близкой к номинальной, и выдержать в этом режиме 15-20 минут.

2.3.2 Провести опыт по определению зависимости КПД АД от мощности на валу.

2.3.3 Рассчитать значение КПД при различных нагрузках и построить его зависимость от полезной мощности  $\eta = f(P_2)$ .

2.3.4 Проанализировать полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

## 2.4 Методические указания

### 2.4.1 Пуск установки и ее нагрузка

Испытания ЭМ для определения механических потерь или определения КПД непосредственными методами должны проводиться при практически установившейся температуре опор (подшипников и подпятников) испытуемой машины. В случае невозможности непосредственного измерения температуры опор машина должна до начала испытания вращаться без нагрузки при номинальной частоте вращения в течение определенного времени, зависящего от мощности машины и вида испытаний. При периодических испытаниях машин с подшипниками качения мощностью от 1 до 10 кВт это время составляет 30 минут.

Значение КПД при использовании непосредственных методов его определения, зависит от изменения температуры частей машины (в частности, обмоток), имеющей место при испытании. Поэтому испытание должно проводиться при температуре машины, по возможности более близкой к той, которая достигается в конце периода работы, установленного номинальным режимом.

Для выполнения этих условий следует нагрузить АД до мощности, возможно ближе к номинальной и выдерживать в таком режиме 15-20 минут.

Пуск установки производится в режиме холостого хода, то есть при выведенном реостате  $R_H$ . Убедившись в самовозбуждении генератора постоянного тока и установив напряжение генератора, равное номинальному, постепенно вводится реостат  $R_H$ . Так как КПД тарированной машины тоже зависит от температуры, то мощность АД, близкую к номинальной, можно установить или по потребляемому току ( $I \approx I_H$ ), или по расчетному значению потребляемой мощности  $P_{1\text{расч}}$ .

$$P_{1\text{расч}} = \frac{P_{2H}}{\eta_H}, \quad (2.5)$$

где  $P_{2H}$  и  $\eta_H$  - соответственно номинальная мощность и номинальное значение КПД АД ( по паспортным данным).

#### 2.4.2 Определение зависимости коэффициента полезного действия двигателя от полезной мощности

Для получения зависимости КПД АД от мощности на валу необходимо произвести измерения электрической мощности, подводимой к АД и электрической мощности, отдаваемой тарированным генератором, в диапазоне  $(0,2 - 1,2)P_{2H}$ , где  $P_{2H}$  - номинальная мощность АД. Изменяя положение реостата  $R_H$  производят измерения при 6 – 7 различных значениях мощности, охватывающих указанный диапазон. Результаты измерений можно занести в левую часть таблицы 2.1.

Таблица 2.1

№ опыта	Измерение							Расчет				
	$U_1,$ В	$Hz,$ Гц	$I_1$ А	$PW_1,$ Вт	$PW_2,$ Вт	$U,$ В	$I,$ А	$P_1,$ Вт	$P_{2T},$ Вт	$\eta_T,$ о.е.	$P_2,$ Вт	$\eta_D,$ о.е.

Примечание: При использовании трехфазного измерительного комплекта вместо столбцов  $PW_1$  и  $PW_2$  удобнее ввести три с обозначением  $P_a, P_b$  и  $P_c$ .

#### 2.4.3 Оформление и анализ полученных результатов

После окончания измерений рассчитывают и заполняют правую часть таблицы 2.1, где

$P_1$  - электрическая мощность, потребляемая АД;

$P_{2T}$  - электрическая мощность, отдаваемая тарированным генератором;

$\eta_T$  - КПД тарированного генератора в относительных единицах;

$P_2$  - мощность на валу АД;

$\eta_D$  - КПД испытуемого АД.

Для определения  $\eta_T$  используется график зависимости  $\eta_T = f(P_{2T})$  или  $\eta_T = f(P_{2T}/P_{2TH})$ , где  $P_{2TH}$  - номинальная мощность тарированного генератора, Вт.

На графике строится зависимость  $\eta_D = f(P_2)$ .

## **2.5 Контрольные вопросы**

2.5.1 Какими методами определяется КПД электрических машин?

2.5.2 Почему относительная погрешность определения КПД при косвенных методах меньше, чем при непосредственных?

2.5.3 От чего зависит точность определения КПД с помощью тарированного генератора?

2.5.4 Как повлияют на результаты измерений отклонения напряжения и частоты питающей сети от номинальных значений?

## **3 Лабораторная работа № 3 Испытание трансформатора**

### **3.1 Общие сведения**

В соответствии со стандартом силовые трансформаторы могут подвергаться следующим испытаниям:

- проверка коэффициента трансформации;
- проверка группы соединения обмоток;
- измерение сопротивления обмоток постоянному току;
- проверка потерь и тока холостого хода;
- проверка потерь и напряжения короткого замыкания;
- измерение сопротивления нулевой последовательности;
- определение параметров изоляции;
- испытание на нагрев;
- испытание бака на прочность.

Программа испытаний устанавливается в каждом случае, исходя из целей испытания.

Трансформаторы чаще всего испытываются в собранном виде с установленными на них деталями и частями.

За нормальные значения температуры охлаждающего воздуха, при которых производятся испытания, должны приниматься значения от 10 до 40<sup>0</sup> С.

Ток, напряжение и мощность должны измеряться приборами и измерительными трансформаторами класса точности не ниже 0,5, если в стандартах не предусмотрена другая точность. Действующие значения напряжений допускается измерять приборами класса точности 1,5.

### **3.2 Задание**

3.2.1 Определить сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и друг относительно друга.

3.2.2 Измерить сопротивления обмоток постоянному току.

3.2.3 Определить группу соединения обмоток при указанной преподавателем схеме соединения обмоток и маркировке их выводов.

3.2.4 Проанализировать результаты измерений и сделать соответствующие выводы.

### **3.3 Методические указания**

3.3.1 Определение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и друг относительно друга

Сопротивление изоляции обмоток не является параметром трансформатора. Оно характеризует (вместе с тангенсом угла диэлектрических потерь и емкостью обмотки) состояние изоляции в данный момент времени.

Сопротивление изоляции зависит от многих факторов, в первую очередь от температуры изоляции и от ее влажности. Повышение температуры и влажности приводит к уменьшению сопротивления изоляции.

Нормы для измеренного сопротивления изоляции обмоток различных трансформаторов могут устанавливаться в стандартах или в технических условиях на конкретные виды трансформаторов. При этом должно быть указано, к какому значению температуры обмоток они относятся и каким способом надлежит пересчитывать результат измерения, если температура, при которой он получен, имеет иное значение.

Из сказанного следует, что в протоколе испытаний обязательно указывают температуру, при которой проводили измерения.

Так как испытанию в лаборатории подвергается сухой трансформатор, длительное время не подвергавшийся включению, то за температуру обмоток можно принять температуру окружающей среды, т.е. воздуха в лаборатории, которую нужно определить по термометру.

Измерение сопротивления изоляции производится мегомметром, содержащим источник постоянного напряжения в виде либо магнитоэлектрического генератора, либо выпрямительного устройства, питаемого от сети переменного тока. Измерение нужно производить поочередно для каждой электрически независимой цепи, т.е. имеющей самостоятельные, изолированные выводы начала и конца, при соединении всех остальных цепей с корпусом; этим одновременно производится измерение сопротивления изоляции как по отношению к корпусу, так и между обмотками. Все доступные точки обмотки, на которой производят измерение, соединяют между собой.

Обмотки силовых трансформаторов обычно соединяют в звезду (Y) или в треугольник ( $\Delta$ ) при монтаже обмоток. В этом случае сопротивление изоляции обмоток трансформатора измеряют в последовательности и по правилам, указанным в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Двухобмоточные трансформаторы и трехобмоточные автотрансформаторы		Трехобмоточные трансформаторы	
Обмотки, на которых производят измерения	Заземляемые части трансформатора	Обмотки, на которых производят измерения	Заземляемые части трансформатора
НН ВН (ВН+НН) <sup>1</sup>	Бак <sup>2</sup> , ВН Бак <sup>2</sup> , НН Бак <sup>2</sup>	НН СН ВН (ВН+СН) <sup>1</sup> (ВН+СН+НН) <sup>1</sup>	Бак <sup>2</sup> , СН, ВН Бак <sup>2</sup> , ВН, НН Бак <sup>2</sup> , НН, СН Бак <sup>2</sup> , НН Бак <sup>2</sup>

где 1 – измерения производятся в случае несоответствия результатов остальных измерений установленным требованиям;

2 – для сухих трансформаторов – защитный кожух или остов.

В испытуемом трансформаторе следует измерять сопротивление изоляции каждой фазы отдельно. Схема проведения опыта для фазы А – X приведена на рисунке 3.1.

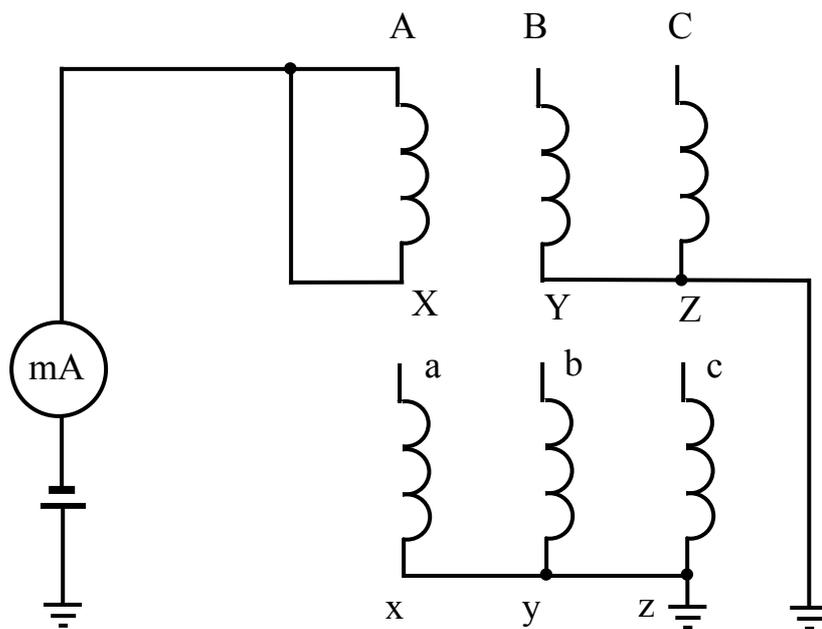


Рисунок 3.1 – Схема измерения сопротивления изоляции фазы А – X трансформатора

Следует иметь в виду, что показания мегомметра могут меняться в зависимости от продолжительности измерений, так как для заряда емкости обмотки требуется время. При сильно увлажненной изоляции показания мегомметра быстро устанавливаются и измерения сопротивления изоляции в течение, например, 15 и 60 секунд, дают близкие результаты. Наоборот, при мало увлажненной изоляции показания мегомметра нарастают сравнительно медленно и сопротивление  $R_{60}$ , регистрируемое прибором через 60 секунд, может в два и более раз превосходить сопротивление  $R_{15}$ , зарегистрированное через 15 секунд. Это положено в основу оценки степени увлажненности изоляции методом абсорбции.

Изоляция считается достаточно сухой, если отношение  $R_{60}$  к  $R_{15}$ , называемое коэффициентом абсорбции,  $k = R_{60}/R_{15}$  превосходит некоторое, большее единицы, значение. Обычно  $k \geq 1,3$ .

### 3.3.2 Измерение сопротивления обмоток постоянному току

Сопротивление обмоток постоянному току определяют с целью сравнения их с расчетными значениями данных сопротивлений, а также для определения средней температуры обмотки.

Сопротивления обмоток измеряют методом моста (одинарного или двойного) или методом вольтметра и амперметра.

Схема для измерения сопротивления методом вольтметра и амперметра приведена на рисунке 3.2.

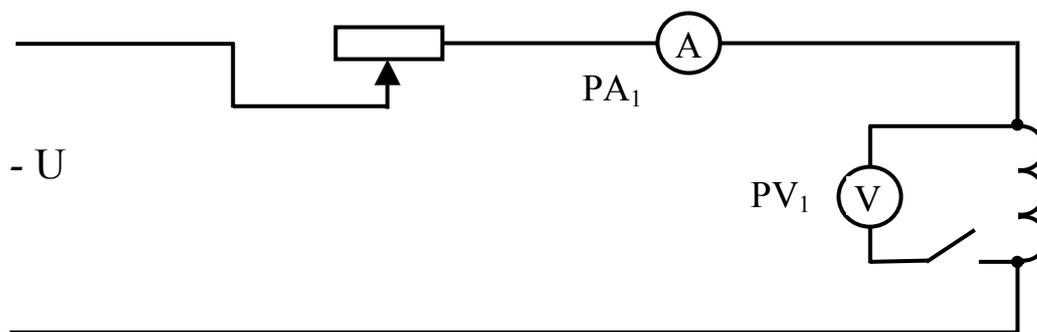


Рисунок 3.2 – Схема для измерения сопротивления способом вольтметра и амперметра

Каждое сопротивление следует измерять при нескольких различных значениях тока, переходя от больших к меньшим. Обычно проводится три измерения. Значение постоянного тока при измерении сопротивлений обмоток способом вольтметра и амперметра должно быть таким, чтобы адиабатное повышение температуры исследуемой обмотки за время измерения не превышало  $1^\circ \text{C}$ .

Скорость адиабатного повышения температуры медной обмотки  $\Delta\theta / \Delta t$  ( $^\circ \text{C}/\text{сек}$ ) определяется по формуле:

$$\Delta\theta / \Delta t = j^2 / 200, \quad (3.1)$$

где  $j$  - плотность тока в обмотке при измерении,  $\text{A}/\text{мм}^2$ .

Для алюминиевых обмоток в знаменателе (3.1) вместо 200 следует поставить 86.

Если сечение обмотки неизвестно, значение измерительного тока не должно превосходить 20 % номинального тока данной обмотки, а длительность его протекания – 60 секунд.

Чтобы не повредить вольтметр импульсами напряжения, которые индуктируются в обмотке при резком изменении тока, его следует подключать при установившемся значении тока и отключать на время изменения тока в цепи.

Если расчетное значение измеряемого сопротивления составляет 0,5 % и более от сопротивления вольтметра, то значение определяемого сопротивления вычисляют по формуле:

$$R' = \frac{R}{1 - R / R_V}, \quad (3.2)$$

где  $R$  - сопротивление, вычисляемое по измеренным значениям тока и напряжения, Ом;

$R_V$  - сопротивление вольтметра, Ом.

Как и при измерении сопротивления изоляции, измерению сопротивления постоянному току должна быть подвергнута каждая электрически независимая часть обмотки, имеющая самостоятельные выводы.

В работе необходимо измерить сопротивления всех фаз трансформатора с помощью моста или цифрового омметра, а затем методом вольтметра и амперметра.

При измерении сопротивления обмоток постоянному току обязательно определяют температуру обмотки, при которой производятся измерения. Учитывая, что измерение сопротивления изоляции мегомметром и сопротивления обмоток с помощью моста или цифрового омметра практически не влияют на температуру обмотки, температуру последней следует принять равной температуре окружающей среды.

Результаты измерений можно оформить в виде таблицы 3.2.

Таблица 3.2

Обозначение фазы	$R$ , измеренное мостом	$U$	$I$	$R$	$R'$
A – X	...	..	..	..	..
B – Y		..	..	..	..
C – Z		..	..	.. $R_{cp}$	.. $R'_{cp}$

### 3.3.3 Определение группы соединения обмоток

После изготовления трансформатора, его ремонта, а иногда перед его монтажом, необходимо проверять группу соединения обмоток трансформатора. Группу соединения обмоток трансформатора проверяют одним из следующих методов:

- прямым методом;
- методом двух вольтметров;
- методом моста;
- методом постоянного тока.

Проверка группы соединения прямым методом предполагает использование фазометра или иного прибора, позволяющего непосредственно измерять сдвиг фаз между линейными напряжениями обмоток ВН и НН.

Для проверки группы соединений обмоток трансформаторов методом двух вольтметров соединяют зажимы “А” и “а” испытываемого трансформатора. К одной из обмоток (ВН или НН) подводят напряжение, которое не должно превышать номинального, но и не должно составлять менее 1 % от него. Схема проведения опыта приведена на рисунке 3.3.

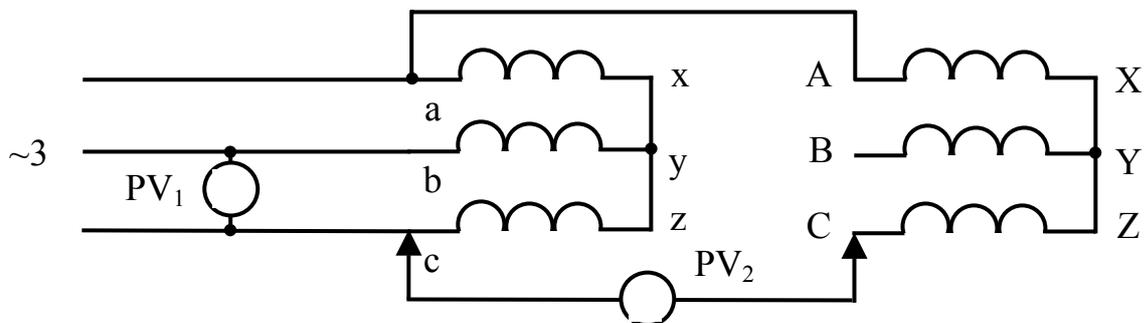


Рисунок 3.3 – Схема для проверки группы соединений трехфазного трансформатора методом двух вольтметров

Вольтметром  $PV_1$  измеряют величину подводимого напряжения. Вольтметром  $PV_2$  измеряют величину напряжения  $U_{bB}$  и  $U_{cC}$  между зажимами b-B и c-C. Они должны быть одинаковы ( $U_{bB} = U_{cC}$ ) и равны значениям, указанным в таблице 3.3. Затем измеряют напряжение  $U_{cB}$  и проверяют, будет ли оно равно (=), больше (>) или меньше (<) напряжения  $U_{bB}$ . На основании этих измерений по таблице 3.3 определяют группу соединений.

Если результаты измерений не соответствуют ни одному из случаев, представленных в таблице, то это указывает на то, что маркировка зажимов обмоток низшего и высшего напряжений выполнена в разной последовательности (A – B – C и a – c – b).

Таблица 3.3

Группа соединений	Напряжение	
	$U_{bB} = U_{cC}$	$U_{cB}$ по сравнению с $U_{bB}$
0	$U_{л}(K_{л} - 1)$	>
1	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 - \sqrt{3}K_{л} + 1}$	>
2	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 - K_{л} + 1}$	>
3	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 + 1}$	>
4	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 + K_{л} + 1}$	>
5	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 + \sqrt{3}K_{л} + 1}$	=
6	$U_{л}(K_{л} + 1)$	<
7	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 + \sqrt{3}K_{л} + 1}$	<
8	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 + K_{л} + 1}$	<
9	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 + 1}$	<
10	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 - K_{л} + 1}$	<
11	$U_{л}\sqrt{K_{л}^2 - \sqrt{3}K_{л} + 1}$	=

Примечание:  $U_{л}$  - линейное напряжение на зажимах обмотки низшего напряжения при испытании;  
 $K_{л}$  - линейный коэффициент трансформации.

Для исключения ошибок при испытании трехфазных трансформаторов напряжение, подаваемое на обмотку, должно быть симметрично. Трехфазное напряжение можно считать симметричным, если отличие наибольшего и наименьшего линейных напряжений составляет не более 2 %.

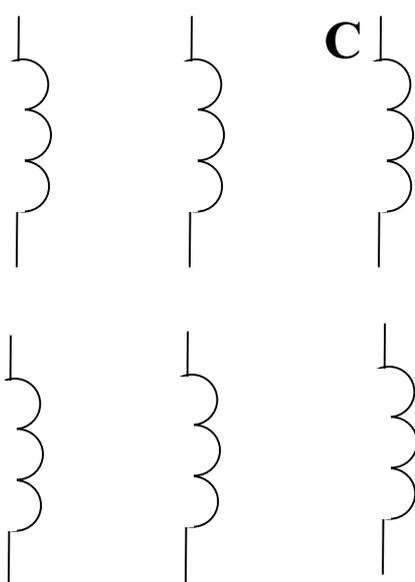
Группу соединений методом моста проверяют одновременно с измерением коэффициента трансформации с помощью специального компенсационного моста.

Метод постоянного тока может быть использован для определения группы соединений однофазных трансформаторов, а также для трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток  $Y_0/Y_0$  и в случае соединения обмоток  $\Delta/\Delta$ , когда соединение в «треугольник» выполнено вне бака трансформатора.

В лабораторной работе группу соединений следует определить методом двух вольтметров. Для этого нужно получить у преподавателя схему и маркировку двух обмоток трансформатора, определить коэффициент трансформации линейных напряжений, проверить симметрию напряжения в фазах, а затем определить группу по изложенной выше методике.

Данные измерений по определению группы соединения можно представить в виде таблицы 3.4.

Таблица 3.4

Схема обмотки			$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{AC}$	$U_{1cp}$
						
			$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ac}$	$U_{2cp}$
			$K = \frac{U_{1cp}}{U_{2cp}}$			
$U_{л}$	$U_{bB}$	$U_{cC}$	$U_{bB}$ расчетное	$U_{cB}$	Группа	

### **3.4 Контрольные вопросы**

3.4.1 Что характеризует величина сопротивления изоляции обмотки?

3.4.2 Чем и как измеряется сопротивление изоляции обмотки?

3.4.3 Перечислите и охарактеризуйте способы измерения сопротивления обмоток постоянному току.

3.4.4 Какой выбирается величина измерительного тока?

3.4.5 Расскажите о способах уменьшения погрешности измерения сопротивления обмоток.

3.4.6 Назовите способы определения группы соединения обмоток трансформатора. Области применения способов?

## 4 Лабораторная работа № 4 Проверка обмоток машин постоянного тока

### 4.1 Общие сведения

Машины постоянного тока малой и средней мощности поступают на испытательный стенд в собранном виде. Машины большой мощности трудно транспортировать в собранном виде, поэтому их окончательную сборку производят на испытательном стенде. И в том, и в другом случае иногда возникает необходимость в проверке правильности соединения обмоток, хотя это и не входит в программу испытаний.

Большую часть соединений обмоток выполняют наглухо при изготовлении машины. Обнаружение ошибок в соединениях, в собранной машине, часто требует ее разборки для их устранения, что вызывает потерю времени. Поэтому целесообразно проводить проверку правильности соединений до сборки, когда обеспечивается свободный доступ к магнитной системе.

Внутренние соединения машины постоянного тока можно разделить на соединения между отдельными частями обмотки (например, катушками или секциями), соединения целых обмоток между собой (например, соединение последовательной цепи машины, включающей обмотки якоря, добавочных полюсов, компенсационную, последовательного возбуждения) и соединения обмоток с коробкой выводов.

На главных полюсах могут находиться обмотки независимого возбуждения, параллельного возбуждения, последовательного возбуждения (или стабилизирующие), а также другие стабилизирующие обмотки. На добавочных полюсах, кроме основных (последовательных) обмоток, иногда могут располагаться вспомогательные обмотки (предназначенные для подпитки основных). Компенсационные обмотки заложены в пазы полюсных наконечников главных полюсов, но создают намагничивание по оси добавочных полюсов, поэтому соединяются с ними наглухо.

Катушки обмоток возбуждения (последовательных и параллельных), а также обмотки добавочных полюсов должны быть соединены между собой так, чтобы образовывать на соседних полюсах (главных или добавочных) магнитные потоки разной полярности.

Для проверки правильности соединения катушек могут быть применены различные способы.

**Осмотр с прослеживанием направления обтекания полюсов током.** Условием возможности применения данного способа является доступность катушек и соединений между ними. Способ применим, когда катушки не покрыты сплошной изоляцией, особенно если они состоят из небольшого числа витков и можно легко проследить направление намотки. Если направление намотки установить нельзя, но точно известно, что все катушки одинаковы (намотаны на одну сторону), то данный способ может быть успешно применен.

**Способ магнитной стрелки** – позволяет определить полярность полюсов при питании обмоток постоянным током. Магнитная стрелка, подвешенная на нити, подносится по очереди к полюсным наконечникам.

Если полюсные наконечники недоступны, например, при закрытом исполнении машины, то после подачи питания в рассматриваемую обмотку стрелка подносится к головкам болтов, крепящих полюс к ярму. Стрелка указывает полярность, противоположную той, которую имеет данный полюс на активной поверхности. Однако, это может потребовать питания обмоток значительным током, что для обмоток последовательной цепи неудобно.

**Способ пробной катушки** также требует питания рассматриваемой обмотки. Инструментом служит плоская катушка, намотанная из возможно большего числа концентрических витков тонкой изолированной проволоки. Катушка присоединяется к флюксметру, а в случае его отсутствия – к чувствительному магнитоэлектрическому прибору. Для проверки полярности полюсов наблюдаются отклонения стрелки прибора либо при отключении питания обмотки полюсов, к поверхностям которых прикладывается катушка, либо при быстром сдергивании катушки с этих поверхностей. Первый способ позволяет исключить влияние остаточного намагничивания, что существенно при проверке обмоток последовательного питания, но второй – часто проще в выполнении.

Кроме перечисленных, могут быть использованы и другие способы определения полярности полюсов при питании обмоток постоянным током, например, основанные на использовании датчиков Холла.

В некоторых случаях приходится производить проверку правильности схемы обмотки якоря и отсутствие в ней обрывов и коротких замыканий секций или витков. Проверка состоит в измерении сопротивлений отдельных секций: при петлевой обмотке – между каждыми двумя соседними пластинами коллектора, а при волновой – между пластинами, номера которых отстоят на полный шаг обмотки по коллектору.

У волновой обмотки нужно предварительно проверить шаг, для чего следует найти пластины, между которыми измеренное сопротивление имеет наименьшее значение; расстояние между ними примерно равно двойному полюсному делению. Отступление на одну пластину в любую сторону дает возрастание измеренного сопротивления в несколько раз, кроме четырехполюсной обмотки, в которой две соседние пластины дают одно и то же сопротивление с пластиной, находящейся на противоположном конце диаметра коллектора.

Таким образом измеряется сопротивление не одной секции, а сложного контура, одну из параллельных ветвей которого составляет данная секция, а другую – вся остальная обмотка. Однако сопротивление одной секции в несколько раз меньше, чем у всей остальной части обмотки, поэтому отличие измеренного сопротивления как в большую сторону, например при плохой пайке соединений, так и в меньшую сторону – при коротком замыкании секции или ее части этим способом отчетливо обнаруживаются.

Проверка правильности соединения целых обмоток между собой сводится к определению их начал и концов. Обозначения выводов обмоток МПТ по ГОСТ 26772-85 приведены в таблице 4.1 и в таблице 4.2.

Таблица 4.1

Наименование обмотки	Обозначение вывода	
	начало	конец
Обмотка якоря	A1	A2
Обмотка добавочного полюса	B1	B2
Обмотка компенсационная	C1	C2
Обмотка последовательного возбуждения	D1	D2
Обмотка параллельного возбуждения	E1	E2
Обмотка независимого возбуждения	F1	F2
Вспомогательная обмотка по продольной оси	H1	H2
Вспомогательная обмотка по поперечной оси	J1	J2

Выводы обмоток **вновь разрабатываемых** электрических машин постоянного тока следует обозначать в соответствии с таблицей 4.1. Выводы обмоток **ранее разработанных и модернизируемых** электрических машин постоянного тока следует обозначать в соответствии с таблицей 4.2.

Выводы обмоток, имеющие одинаковые буквенные обозначения, следует обозначать дополнительной цифрой, стоящей впереди букв (например 1B1, 1B2, 2B1, 2B2). При применении обозначений для внутренних присоединительных выводов, их следует указывать в скобках.

Таблица 4.2

Наименование обмотки	Обозначение вывода	
	начало	конец
Обмотка якорная	Я1	Я2
Компенсационная обмотка	K1	K2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Последовательная обмотка возбуждения	C1	C2
Независимая обмотка возбуждения	H1	H2
Параллельная обмотка возбуждения	Ш1	Ш2
Пусковая обмотка	П1	П2

Обозначения выводов должны выполняться так, чтобы при правом вращении в режиме двигателя ток во всех обмотках (за исключением размагничивающих обмоток на главных полюсах) протекал в направлении от начала 1 к концу 2.

Под правым вращением понимается вращение по часовой стрелке, если смотреть на машину со стороны приводного конца вала, а в машинах с двумя приводными концами вала – со стороны, противоположной коллектору.

При проверке правильности соединения целых обмоток нужно помнить следующие правила:

1) При переходе от режима двигателя к режиму генератора или обратно с сохранением направления вращения ток в якоре и в обмотках последовательной цепи изменяет направление, а в обмотках параллельного или независимого возбуждения главных полюсов сохраняет его.

2) При изменении направления вращения с сохранением режима двигателя или генератора, направление тока изменяется на обратное либо в обмотках якоря и добавочных полюсов, либо в обмотках возбуждения главных полюсов.

3) По направлению вращения ротора машины после каждого главного полюса следует добавочный полюс той же полярности при работе в режиме генератора.

4) Обозначение начал и концов всех обмоток можно одновременно поменять местами.

## **4.2 Задание**

4.2.1 Соединить обмотки добавочных полюсов и проверить правильность соединения.

4.2.2 Соединить обмотки возбуждения основных полюсов и проверить правильность соединения.

4.2.3 Для заданных преподавателем условий (количество и тип обмоток, режим работы, направление вращения) составить схему обмоток с обозначением начал и концов обмоток).

4.2.4 Соединить имеющиеся обмотки для удовлетворения условиям п. 4.2.3 и проверить правильность соединения.

4.2.5 Проверить обмотку якоря. Определить тип обмотки и шаг по коллектору.

4.2.6 Проанализировать полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

## **4.3 Методические указания**

4.3.1 Катушки обмоток добавочных полюсов должны быть соединены так, чтобы на соседних полюсах образовывали противоположные полярности. Это может быть достигнуто несколькими способами:

1) катушки данной обмотки для всех полюсов выполняются одинаковыми, но соединяются между собой так, что обтекаются током попеременно в противоположных направлениях: конец 1В2 соединяется с концом 2В2, начало 2В1 – с началом 3В1, конец 3В2 – с концом 4В2 и т.д. (рисунок 4.1 а);

2) одинаковые катушки могут быть соединены через полюс: конец 1В2 – с началом 3В1, конец 3В2 – с началом 5В1 и т.д. для нечетных полюсов и конец 2В2 – с началом 4В1, конец 4В2 – с началом 6В1 и т.д. для четных; образуются две группы катушек – нечетных и четных полюсов; они могут быть соединены как последовательно, так и параллельно (рисунок 4.1 б);

3) катушки нечетных полюсов наматываются в одном направлении, а четных – в другом и соединяются так: конец 1В2 – с началом 2В1 и т.д. (рисунок 4.1 в).

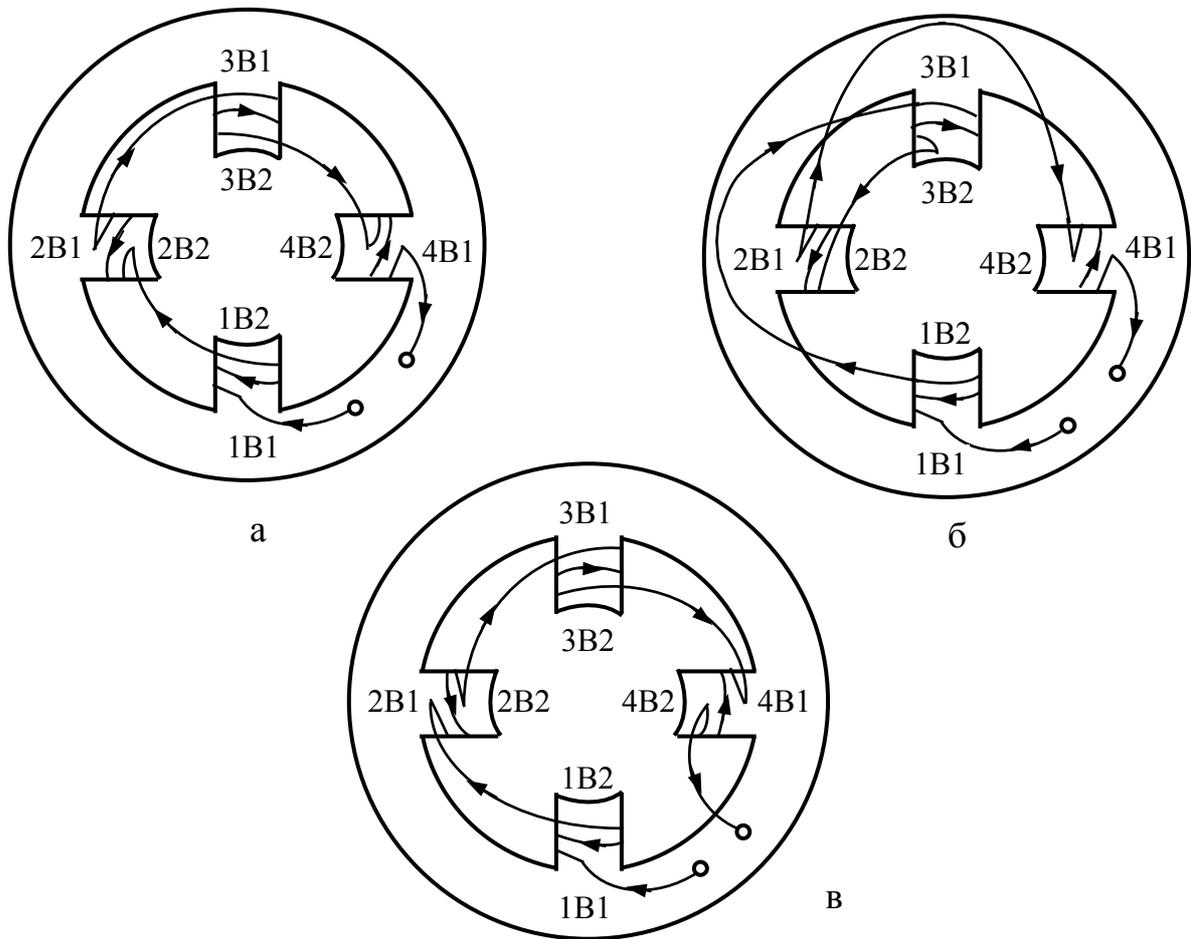


Рисунок 4.1 – Способы соединения полюсных катушек

В работе необходимо соединить обмотки одним из названных способов и, подав на них питание, проверить правильность соединения.

4.3.2 Пункт 4.2.2 выполняется в такой же последовательности, как изложено в 4.3.1.

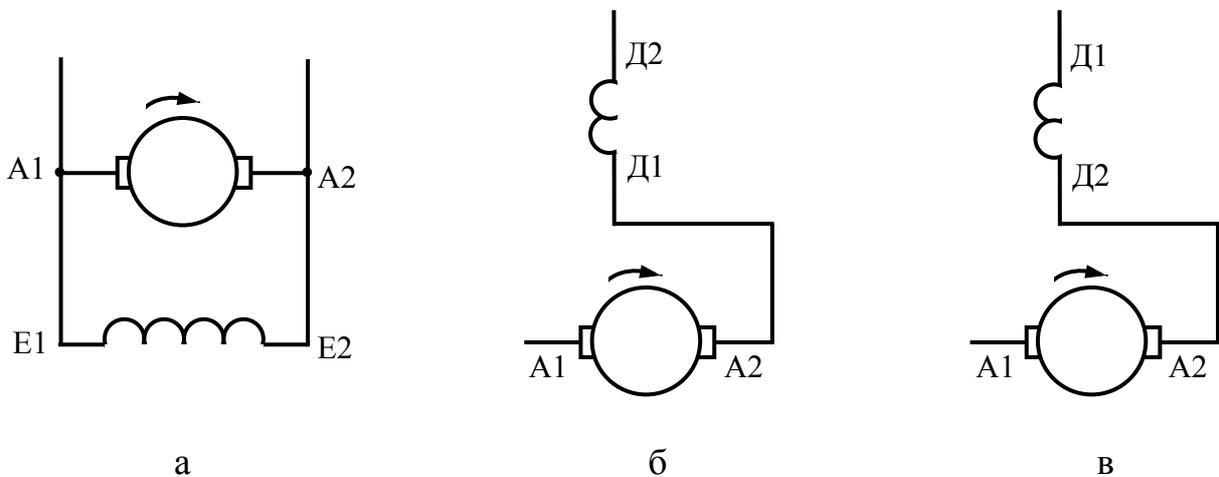


Рисунок 4.2 – Схемы обмоток МПТ

4.3.3 В качестве примера на рисунке 4.2 приведены схемы двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (а), двигателя последовательного возбуждения (б) и генератора последовательного возбуждения (в).

#### **4.4 Контрольные вопросы**

4.4.1 Как проверить правильность соединения частей обмоток МПТ?

4.4.2 Как проверить, согласно или встречно соединены обмотки, расположенные на одном полюсе?

4.4.3 Как проверить обмотку якоря?

4.4.4 Как маркируются обмотки МПТ?

4.4.5 Зависит ли схема соединения обмоток от направления вращения?

4.4.6 Генератор постоянного тока параллельного возбуждения приводится во вращение. ЭДС якоря имеет очень малое значение (около нуля) или значительно меньше своего номинального значения. Назовите и охарактеризуйте возможные причины.

## 5 Лабораторная работа № 5 Оценка качества коммутации машин постоянного тока

### 5.1 Общие сведения

Одним из важнейших показателей, характеризующих пригодность машин постоянного тока к эксплуатации, является качество коммутации. На практике о качестве коммутации обычно судят по оценке степени искрения под щетками и по характеру области безыскровой работы машины.

В соответствии с ГОСТ 183-74 искрение на коллекторе электрической машины оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки по шкале, указанной в таблице 5.1. Если степень искрения коллекторной МПТ не оговорена, то она при нормальном режиме работы машины должна быть не выше 1½.

Таблица 5.1 – Оценка степени искрения МПТ

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения	Отсутствие почернения на коллекторе и следов нагара на щетках
1¼	Слабое искрение под небольшой частью щетки	
1½	Слабое искрение под небольшой частью щетки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
3	Значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности бензином, а также подгар и частичное разрушение щеток

Оценка степени искрения, а также состояние коллектора и щеток проверяются по истечении времени, необходимого для достижения практически установившейся температуры машины.

Более полное представление о коммутационных свойствах машины можно получить после определения области безыскровой работы. При этом определяются верхние и нижние пределы МДС обмоток добавочных полюсов, между которыми коммутация остается «темной». Изменение этой МДС может производиться следующими способами:

1) Путем дополнительного питания обмоток добавочных полюсов от самостоятельного источника, который подключается к их выводам;

2) Путем независимого питания обмоток добавочных полюсов, отключенных от остальных цепей испытуемой машины, от самостоятельного источника постоянного тока;

3) Питанием временной обмотки, наложенной на добавочные полюсы помимо постоянной обмотки, от самостоятельного источника или от самой испытуемой машины.

Определение области безыскровой работы может проводиться в режиме нагрузки или в режиме короткого замыкания.

Перед испытаниями щетки устанавливаются в положение, соответствующее геометрической нейтрали. Установка может проводиться методом реверсирования (при работе машины под нагрузкой с притертыми и шлифованными к коллектору щетками) или индуктивным методом (при неподвижном якоре).

При использовании **метода реверсирования** считается, что положение щеток соответствует нейтрали в том случае, если в результате изменения направления вращения у двигателя при неизменных значениях напряжения, тока нагрузки и тока возбуждения практически не изменяется частота вращения (опыт рекомендуется проводить при номинальной частоте вращения), а у генератора при неизменных значениях частоты вращения, тока нагрузки и тока возбуждения практически не изменяется напряжение (питание обмотки возбуждения должно быть независимым).

Для машин со смешанным возбуждением как при правом, так и при левом направлении вращения согласное или встречное включение обмоток должно сохраняться неизменным.

При использовании **индуктивного метода** положение щеток, соответствующее геометрической нейтрали, определяется по чувствительному магнитоэлектрическому прибору (предпочтительно с нулем в середине шкалы), который подключают к щеткам разной полярности, а в обмотку главных полюсов подают импульсами питание от постороннего источника постоянного тока.

При положении щеток, соответствующем нейтрали, прибор не должен давать отклонений или эти отклонения должны быть минимальными и направленными в разные стороны. Опыт повторяют при установке якоря в различные положения по отношению к полюсам. При отсутствии напряжения постоянного тока в обмотку главных полюсов можно подавать напряжение переменного тока и использовать чувствительный вольтметр переменного тока.

## 5.2 Краткое описание лабораторной установки

Для оценки качества коммутации коллекторной машины постоянного тока используется генератор параллельного возбуждения, приводимый во вращение асинхронным двигателем. Схема установки приведена на рисунке 5.1.

Специальный переключатель S1 позволяет подключить обмотки добавочных полюсов (ДП) к независимому источнику питания, замыкая соответствующим образом цепь якоря. Переключатель S2 служит для изменения полярности источника питания.

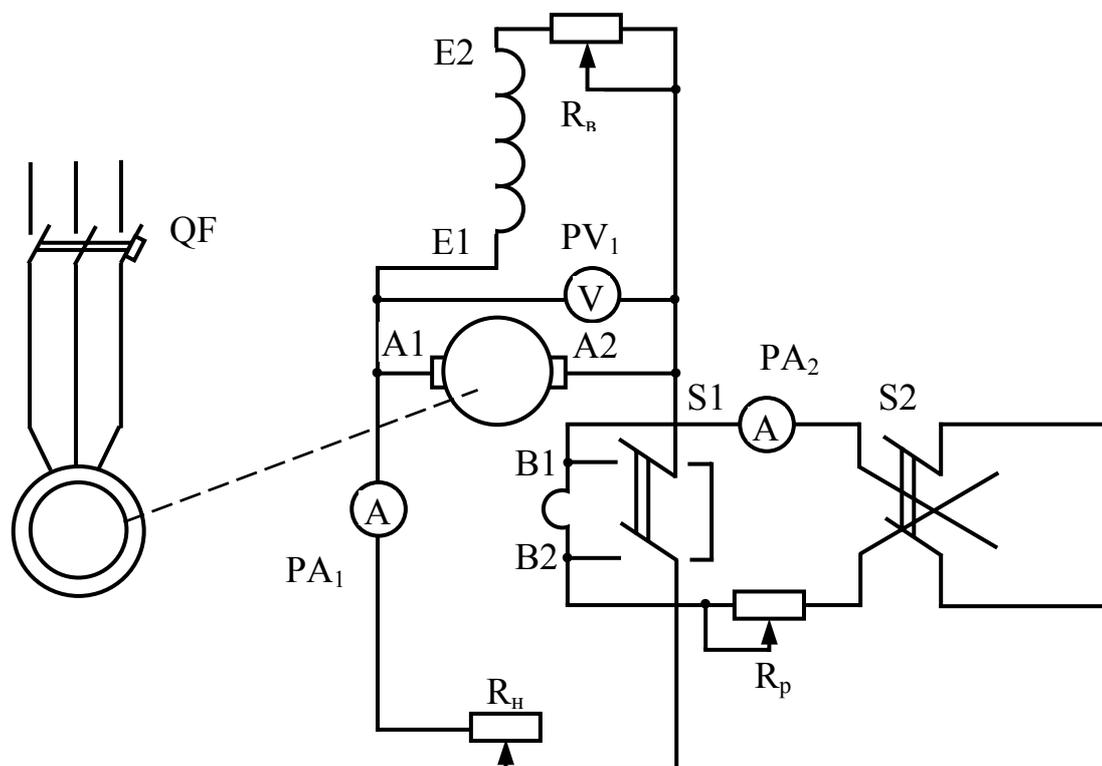


Рисунок 5.1 – Схема лабораторной установки для определения области безыскровой работы

## 5.3 Задание

5.3.1 Оценить степень искрения под щетками в режиме номинальной нагрузки.

5.3.2 Провести опыт по определению области безыскровой работы в режиме нагрузки.

5.3.3 Построить область безыскровой работы и ее среднюю линию.

5.3.4 Проанализировать полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

## 5.4 Методические указания

5.4.1 Оценка степени искрения под щетками

Как уже отмечалось в разделе 1, оценка степени искрения проверяется по истечении времени работы машины в заданном режиме, необходимого для достижения практически установившейся температуры ее частей. В соответствии со стандартом для машин мощность до 100 кВт включительно – это не менее 2-х часов. Для сокращения времени испытаний при проведении лабораторной работы рекомендуется выдержать номинальную нагрузку в течение 10-15 минут, а затем оценить степень искрения под щетками, руководствуясь критериями, изложенными в таблице 5.1.

При проведении данного опыта обмотки ДП должны быть включены последовательно в цепь якоря.

#### 5.4.2 Определение области безыскровой работы

Опыт обычно начинают с режима холостого хода испытуемой машины. При разомкнутой цепи якоря в обмотки ДПТ подается питание произвольной полярности; ток питания постепенно увеличивают, пока не будет замечено появление искрения под сбегаящими краями щеток. После этого ток в обмотках ДП понижают до нуля, направление его изменяют на обратное и снова таким же образом устанавливают границу искрения.

Далее, не изменяя тока питания обмоток ДП, замыкают цепь якоря и нагружают ее током около 20 – 25 % номинального. Если в процессе установления этого тока искрение склонно усиливаться, нужно одновременно уменьшить ток в обмотках ДП. После установления границы искрения при этой нагрузке якоря ток в обмотках ДП уменьшают до нуля, направление его меняют на обратное и находят вторую границу искрения.

Повторяя эти операции, как показано на рисунке 5.2, при постепенно увеличиваемых токах нагрузки, получают два ряда точек, определяющих верхнюю и нижнюю области безыскровой работы.

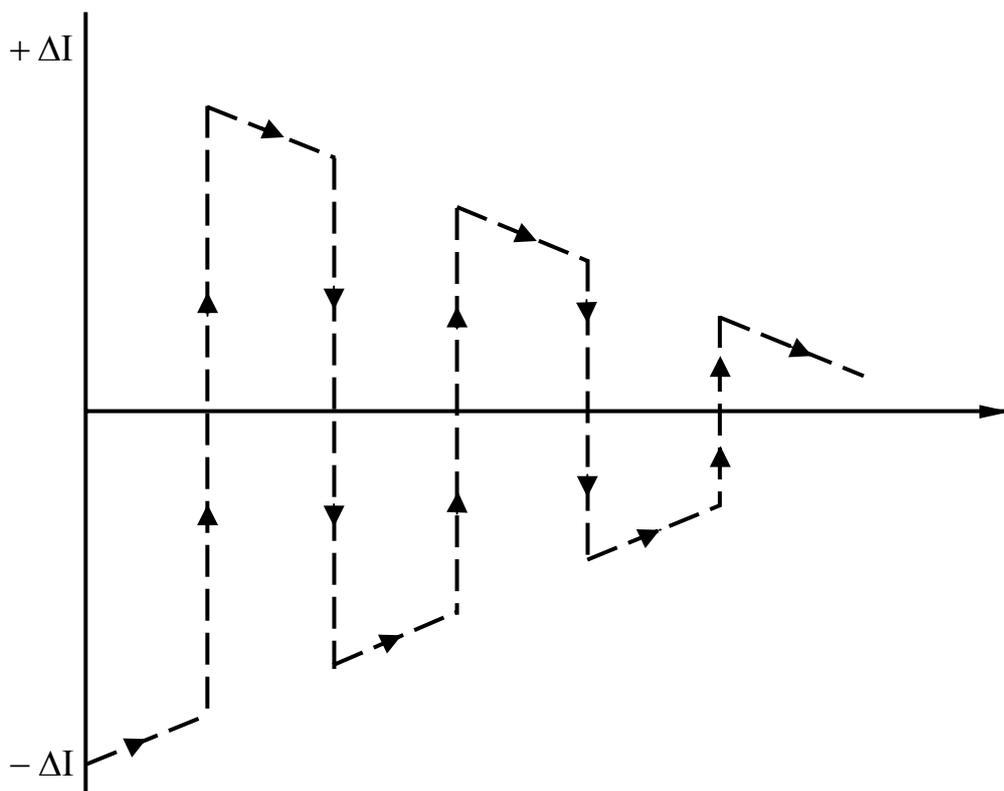


Рисунок 5.2 – Последовательность проведения опыта по определению области безыскровой работы

#### 5.4.3 Оформление и анализ полученных результатов

Результаты опытов обычно представляют в виде области безыскровой работы, ограниченной верхней и нижней кривыми, характеризующими границу «темной» коммутации.

Можно считать, что для каждого значения тока нагрузки наилучшая коммутация будет определяться точкой, лежащей в середине между верхней и нижней границами искрения. Линия, соединяющая такие точки для различных значений тока нагрузки, называется средней линией области безыскровой работы.

Суждение о коммутационных свойствах машины может быть основано на нескольких критериях.

1) **Отклонение средней линии от оси абсцисс** – чем оно меньше, тем удачнее выбор витков обмоток ДП и зазора между добавочными полюсами и якорем.

Отклонение средней линии вверх от оси абсцисс (Рисунок 5.3) свидетельствует о слишком «слабых» обмотках добавочных полюсов.

Наоборот, отклонение средней линии вниз (Рисунок 5.4) указывает на наличие слишком «сильных» обмоток ДП.

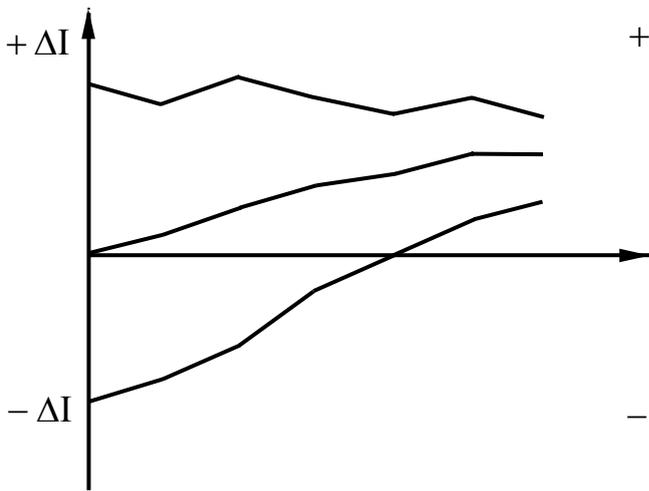


Рисунок 5.3 – Область безыскровой работы при «слабых» обмотках ДП

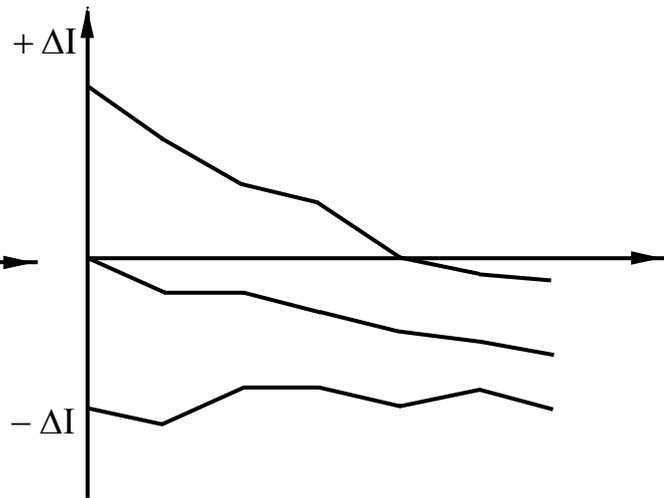


Рисунок 5.4 – Область безыскровой работы при «сильных» обмотках ДП

2) **Ширина области безыскровой работы** – чем она больше, тем надежнее и устойчивее безыскровая работа при данной нагрузке. Ширина области безыскровой работы зависит от многих факторов (ширина полюсных наконечников, марки щеток, их размеров и т.д.) и обычно уменьшается по мере повышения тока нагрузки. Если машина механически исправна, это уменьшение происходит достаточно плавно. Быстрое схождение верхнего и нижнего пределов искрения до пересечения часто может считаться признаком механических неисправностей, преимущественно таких, которые вызывают вибрацию щеток.

## 5.5 Контрольные вопросы

5.5.1 По каким показателям оценивают качество коммутации коллекторных МПТ?

5.5.2 Назовите методы установки щеток на геометрическую нейтраль.

5.5.3 Как проводятся опыты по определению области безыскровой работы?

5.5.4 Как использовать полученные результаты для улучшения качества коммутации?

## 6 Лабораторная работа № 6 Испытание синхронного двигателя

### 6.1 Общие сведения

Полная программа испытаний синхронных машин очень обширна и включает в себя 33 различных вида испытаний.

При испытаниях синхронных машин определение всех параметров производят применительно к схеме соединения фаз якоря в звезду, если по условиям проведения опыта не требуется другая схема соединения, например, открытый треугольник. Все параметры и характеристики рекомендуется выразить в относительных единицах, принимая в качестве базисных номинальные значения линейного напряжения  $U_n$  и полной мощности  $S_n$ . В этом случае базисное значение тока равно номинальному току:

$$I_{\sigma} = I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n}, \quad (6.1)$$

а базисное значение полного сопротивления

$$Z_{\sigma} = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{S_n}{3I_n} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n}. \quad (6.2)$$

За базисные значения частоты тока и напряжения и угловой скорости машины следует принимать соответственно их номинальные значения

$$f_{\sigma} = f_n \text{ и } \omega_{\sigma} = 2\pi f_n.$$

За базисное значение тока возбуждения при вычислении характеристик и построении диаграмм следует принимать ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению по характеристике холостого хода ( $I_{f_0}$ ).

### 6.2 Краткое описание лабораторной установки

Для проведения испытаний используется синхронный двигатель с электромагнитным возбудителем на валу. Схема лабораторной установки изображена на рисунке 6.1. Переключатель S1 служит для снятия возбуждения, а переключатель S2 – для выполнения трехфазного симметричного короткого замыкания обмотки якоря после отключения двигателя от питающей сети.

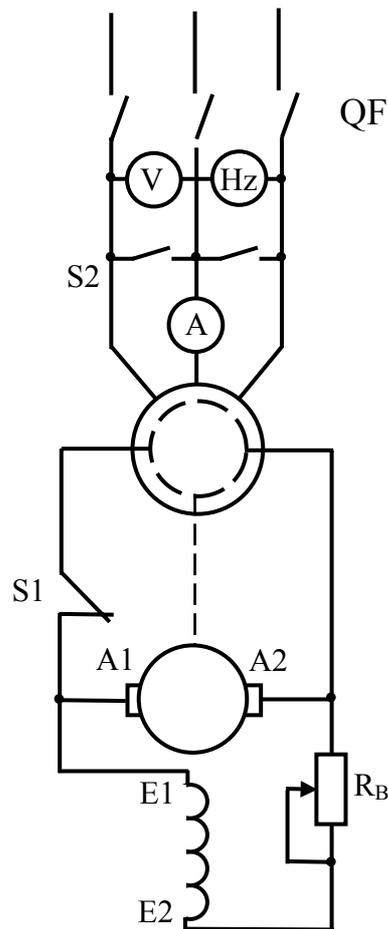


Рисунок 6.1 – Схема лабораторной установки

### 6.3 Задание

6.3.1 Определить характеристику холостого хода.

6.3.2 Определить характеристику трехфазного короткого замыкания.

6.3.3 Измерить ток возбуждения ненагруженной синхронной машины в режиме перевозбуждения.

6.3.4 Определить номинальный ток возбуждения,  $\Delta U_n$  и регулировочную характеристику в режиме генератора.

6.3.5 Оформить и проанализировать полученные результаты и сделать соответствующие выводы.

### 6.4 Методические указания

6.4.1 Определить характеристики холостого хода

Характеристика холостого хода (ХХ) представляет собой зависимость напряжения обмотки якоря от тока возбуждения. При определении характеристики ХХ следует измерять ток возбуждения, линейное напряжение и частоту напряжения (или частоту вращения).

Если при определении характеристики ХХ частота отличается от номинальной  $f_n$ , то напряжение холостого хода  $U_0$  необходимо пересчитать по измеренным значениям напряжения  $U$  по формуле

$$U_0 = U \frac{f_n}{f}.$$

Изменение тока возбуждения при снятии характеристики ХХ следует производить плавно и только в одном направлении, начиная с наибольшего значения тока, равного, если возможно, номинальному току возбуждения.

Для получения характеристики ХХ, проходящей через начало координат, снятую характеристику необходимо сместить по оси абсцисс на величину  $\Delta i_f$ , полученную путем экстраполяции этой характеристики до пересечения с осью абсцисс.

Характеристику ХХ синхронной машины чаще всего снимают в режиме генератора, реже – ненагруженного двигателя.

Определение характеристики ХХ допускается производить на выбеге машины, если снижение частоты вращения не превышает 0,04 номинальной частоты вращения в секунду.

Непосредственно перед отключением машины от сети необходимо установить ток возбуждения, соответствующий, если возможно, номинальному, но не ниже значения тока, при котором напряжение испытуемой машины составляет 1,3 номинального напряжения в режиме холостого хода.

Для снятия характеристики ХХ на выбеге необходимо подключить двигатель к питающей сети и установить требуемое значение тока возбуждения.

После отключения машины ток возбуждения следует снижать ступенями. На каждой ступени необходимо одновременно измерять  $U$ ,  $f$  и  $i_f$ . Данные измерений заносятся в таблицу.

#### 6.4.2 Определение характеристики трехфазного короткого замыкания

Характеристика трехфазного короткого замыкания (КЗ) представляет собой зависимость тока в обмотке якоря от тока возбуждения.

Точное поддержание частоты вращения на уровне номинальной при определении характеристики КЗ не требуется и поправок на отклонение частоты вращения от номинальной в результаты испытаний не вносят.

Определение характеристики проводится, начиная от наибольшего значения тока. Для получения характеристики, проходящей через начало координат, имеющуюся характеристику смещают по оси абсцисс на величину  $\Delta i_f$ .

Определение характеристики КЗ допускается производить на выбеге, если снижение частоты вращения в секунду не превышает 0,1 номинальной.

Опыт проводят в следующей последовательности. После пуска синхронного двигателя в режиме холостого хода устанавливают ток возбуждения, соответствующий  $\cos \varphi = 1$ , т.е. минимальному значению тока якоря. Синхронный

двигатель отключают от сети, переключателем S1 снимают возбуждение, а после этого переключателем S2 замыкают выводы обмотки якоря. Затем восстанавливают возбуждение (включением переключателя S1), и производят несколько измерений тока якоря и тока возбуждения. Результаты измерений заносят в таблицу.

#### 6.4.3 Измерение тока возбуждения ненагруженного двигателя в режиме перевозбуждения

Требуется определить ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению и номинальному току якоря ненагруженного синхронного двигателя, работающего в режиме перевозбуждения.

Для проведения опыта производят пуск синхронного двигателя в режиме холостого хода и устанавливают ток возбуждения, соответствующий  $\cos \varphi = 1$ , т.е. минимальному значению тока якоря. Затем увеличивают ток возбуждения до такого значения, чтобы ток в якоре стал равным номинальному и регистрируют показания приборов.

Если напряжение и ток при испытании отличаются от номинальных не более чем на  $\pm 15\%$ , допускается применять графический метод определения тока возбуждения, соответствующего номинальному напряжению и номинальному току. Последовательность проведения графических построений изложена в /1/.

#### 6.4.4 Определение номинального тока возбуждения и номинального изменения напряжения

Номинальный ток возбуждения следует определять методом непосредственной нагрузки. Допускается определение номинального тока возбуждения методом графического построения (построением диаграммы Потье).

Определение номинального тока возбуждения методом графического построения следует производить с использованием характеристик холостого хода и установившегося короткого замыкания и расчетного индуктивного сопротивления  $X_p$ .

По оси абсцисс откладывают вектор номинального тока якоря испытуемой машины  $i_n$ , а под углом  $\varphi_n$  к вектору тока – вектор номинального напряжения  $U_n$  (рисунок 6.2).

Из конца вектора напряжения перпендикулярно току откладывают вектор падения напряжения  $i_n X_p$ .

Падением напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря в большинстве практических случаев можно пренебречь. При необходимости его учитывают, отложив вектор падения напряжения в активном сопротивлении прямой последовательности обмотки якоря из конца вектора напряжения параллельно току якоря. На диаграмме этот вектор следует откладывать для генераторов по направлению вектора тока, для двигателей – в обратном направлении.

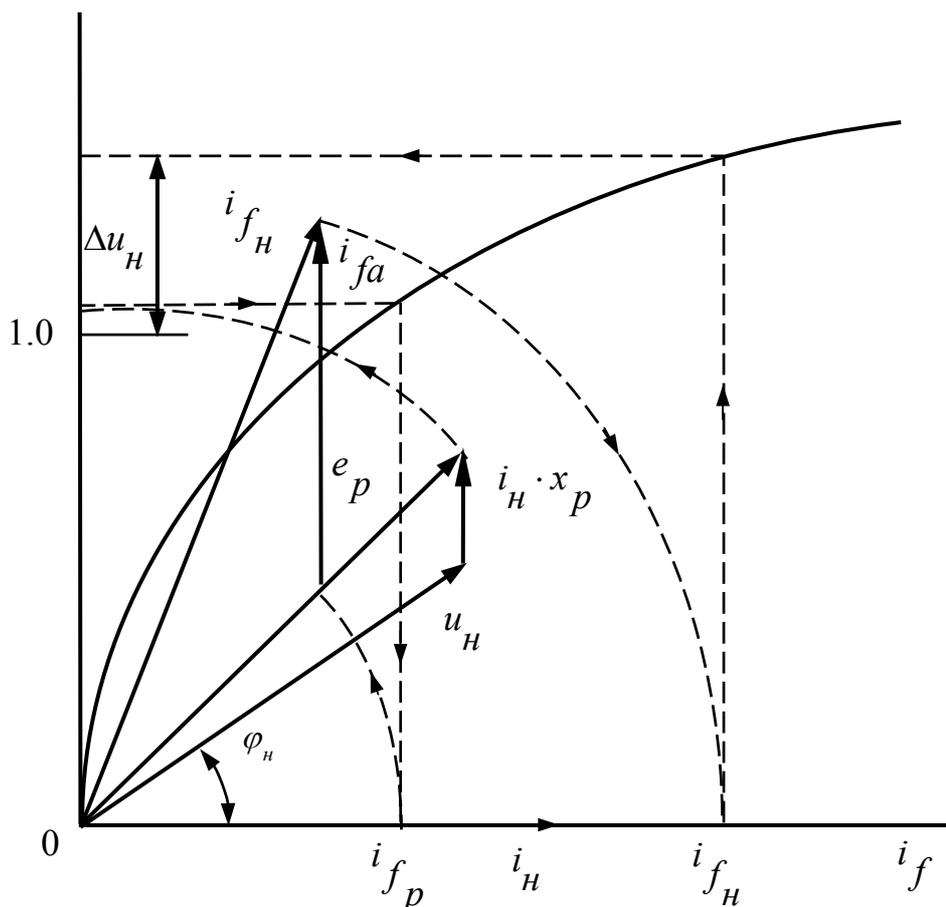


Рисунок 6.2 – Построение векторной диаграммы синхронной машины

Геометрическая сумма векторов номинального напряжения и падения напряжения на индуктивном сопротивлении  $X_p$  дает вектор ЭДС  $e_p$ . Вектор тока возбуждения  $i_{f_p}$ , создающего эту ЭДС, необходимо определять по характеристике ХХ и откладывать из начала координат по направлению вектора  $e_p$ .

По характеристике КЗ определяют составляющую тока возбуждения  $i_{f_a}$  (рисунок 6.3), компенсирующую реакцию якоря при токе короткого замыкания, равном номинальному току, и откладывают ее из конца вектора  $i_{f_p}$  вверх, перпендикулярно вектору тока якоря.

Геометрическая сумма двух найденных векторов тока возбуждения дает вектор номинального тока возбуждения  $i_{f_n}$ .

Если проведены опыты ХХ, КЗ и нагрузки при  $\cos \varphi = 0$ , то для получения индуктивного падения напряжения на характеристике ХХ следует нанести точку А, соответствующую нагрузке машины током  $i_n$  при напряжении  $U_n$  и  $\cos \varphi = 0$  (рисунок 6.3).

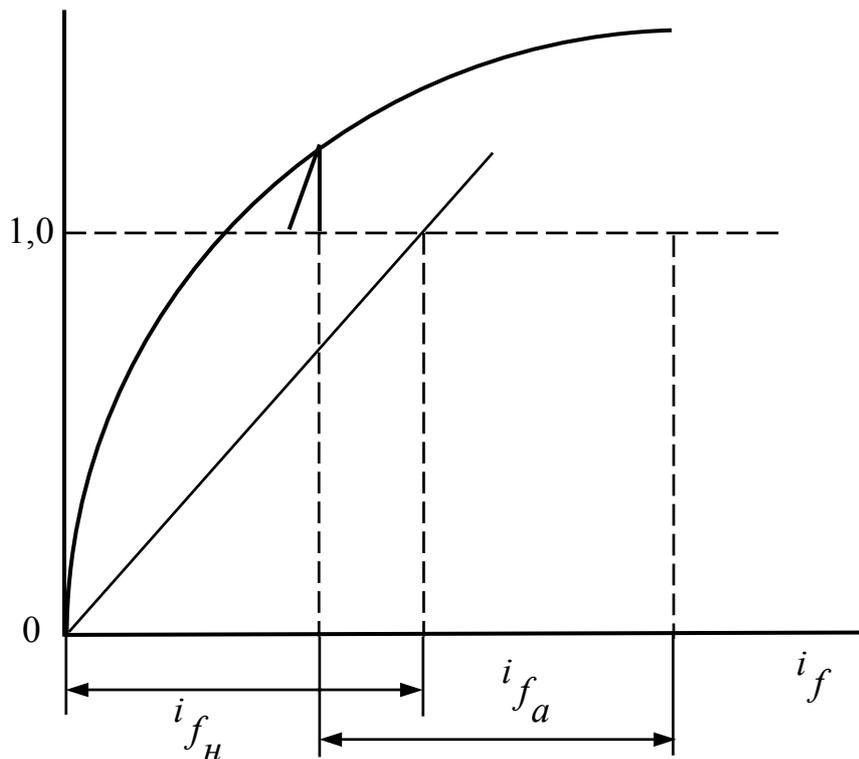


Рисунок 6.3 – Определение реакции якоря и индуктивного падения напряжения из опыта при  $\cos \varphi = 0$

Из точки А влево откладываем отрезок АF, равный току возбуждения  $i_{fk}$  при симметричном КЗ с током  $i_k = i_n$ . Через точку F проводится прямая FH, параллельная нижней прямолинейной части характеристики ХХ. Длина перпендикуляра НG, опущенного на отрезок АF из точки пересечения Н этой прямой с характеристикой ХХ, изображает индуктивное падение напряжения  $i_n X_p$ , а отрезок АG, отсекаемый этим перпендикуляром на прямой АF – составляющую тока возбуждения  $i_{fa}$ , уравновешивающую реакцию якоря.

## 6.5 Контрольные вопросы

6.5.1 В каких режимах испытывают синхронные машины?

6.5.2 Какими способами можно определить характеристику ХХ синхронной машины?

6.5.3 Как определить характеристику КЗ синхронной машины? Что при этом нужно измерять?

6.5.4 Как определяется номинальный ток возбуждения синхронной машины?

## Список использованных источников

- 1 **Жерве Г.К.**, Промышленные испытания электрических машин/Г.К. Жерве. – Л.: Энергоиздат, 1984. – 408 с.
- 2 **Редкоп А.П.**, Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Испытания и надежность электрических машин» для студентов специальности «Электромеханика»/А.П. Редкоп. – Оренбург: ОрПИ, 1989. – 50 с.
- 3 **Петров Г.Н.**, Электрические машины, Т.1./Г.Н. Петров. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
- 4 **Толкунов В.П.**, Теория и практика коммутации машин постоянного тока/В.П. Толкунов. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
- 5 **Котеленец Н.Ф.**, Испытания и надежность электрических машин/Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
- 6 **Котеленец Н.Ф.**, Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин/Н.Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 384 с.