

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 08.10.2022 20:47:50
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2774d16f3e0eef36f0b6

МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
«ЮЗГУ»

Кафедра электроснабжения

Проректор по учебной работе
Локтинова О.Г.
« 30 » 2022 г.
УТВЕРЖДАЮ
государственный университет
(ЮЗГУ)
1034637015786
МИНСК • ВИННИЦА • ИИПАЛТИН



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания по выполнению практических занятий для студентов
направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

УДК 621.313

Составитель А.С. Чернышев

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент А.С. Романченко

Электрические машины: методические указания по выполнению практических работ для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.С. Чернышев. Курск, 2022. – 26 с. – Библиогр.: с. 26.

Содержат сведения по выполнению практических работ по дисциплине «Электрические машины».

Методические указания соответствуют требованиям программы, утвержденной учебно-методическим объединением для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,6 . Уч.-изд. л. . Тираж 50 экз.

Заказ 2023 Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Практическое занятие № 1

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ

Цель работы: освоить методику определения коэффициента трансформации.

Коэффициент трансформации обмоток трансформатора проверяется путем одновременного измерения напряжения обмоток высшего и низшего напряжения по схемам на рис. 1 при помощи вольтметров класса не ниже 0,5. Измерения производятся для всех обмоток на всех ответвлениях. Для трехобмоточных трансформаторов допускается проверка коэффициента трансформации поочередно между двумя парами обмоток, при этом проверку рекомендуется делать на тех обмотках, между

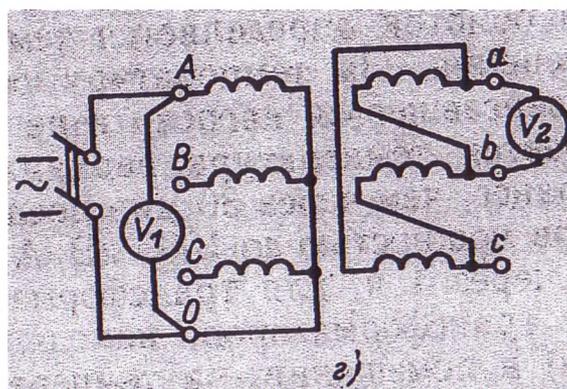
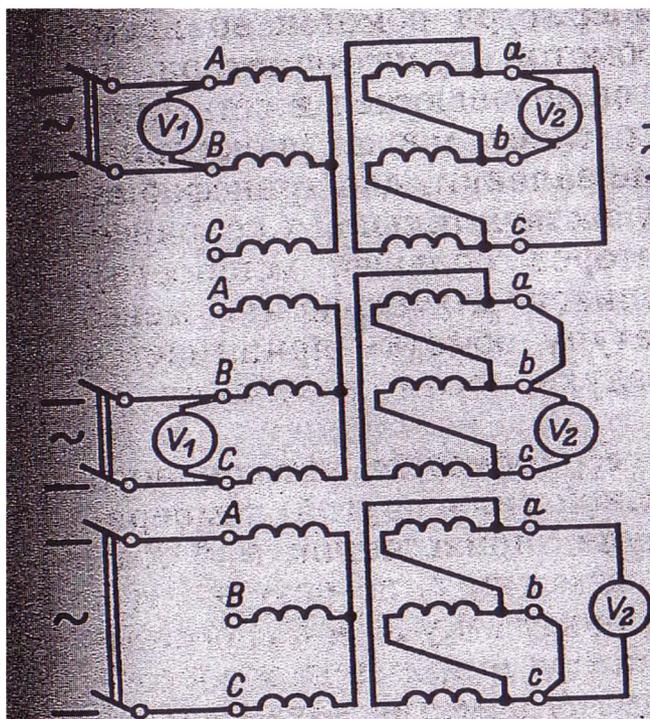
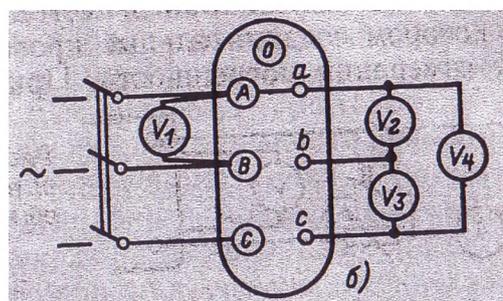
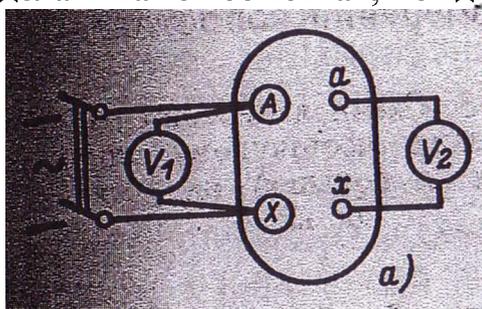


Рис. 1. Измерение коэффициентов трансформации силовых трансформаторов.

a – однофазных; *б* – трехфазных по трехфазной схеме возбуждения; *в* – трехфазных по однофазной схеме возбуждения; *г* – трехфазных с нулевым выводом по однофазной схеме возбуждения.

которыми значения напряжения короткого замыкания наименьшие. Коэффициент трансформации может проверяться методом двух или более вольтметров. Это делается следующим образом: к одной из обмоток, как правило ВН, подводится напряжение сети и измеряется одним вольтметром. Другим вольтметром измеряется напряжение другой обмотки. Отсчет по вольтметрам делается одновременно. У трехфазного трансформатора коэффициент трансформации лучше всего измерять при трехфазном возбуждении четырьмя вольтметрами одного класса точности: одним вольтметром измеряется напряжение на обмотке ВН (после проверки симметричности линейных напряжений питающих сети), а тремя вольтметрами измеряются одновременно напряжения на трех фазах другой обмотки или между фазами (при отсутствии выведенного нуля обмотки). Коэффициент трансформации подсчитывается как отношение напряжения обмотки ВН (напряжения питания) к напряжениям отдельных фаз.

При однофазной схеме питания трансформатора с обмотками, соединенными по схеме «звезда – треугольник» без выведенного «нуля», для получения правильного результата фаза, на которой не производится измерение, закорачивается. В противном случае результат измерения искажается из-за того, что при производстве всех измерений, как показано на рисунках, в треугольнике проходят токи во всех трех обмотках. Коэффициент трансформации определяется между фазными напряжениями:

$$K_{1\phi} = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}; K_{2\phi} = \frac{U_{BC}}{U_{bc}}; K_{3\phi} = \frac{U_{AC}}{U_{ac}};$$

где K_{ϕ} – фазный коэффициент трансформации, т. е. отношение фазного напряжения на стороне ВН к фазному напряжению на стороне НН.

От фазного коэффициента нетрудно перейти к обычному определяемому линейному:

$$K_{л} = K_{\phi} \sqrt{3}.$$

Если трансформатор имеет нулевой вывод, благодаря которому возможно возбуждение одной фазы обмотки, то закорачивания не требуется, так как в этом случае остальные фазы обмотки со стороны треугольника не искажают результат измерения. Коэффициент трансформации и в этом случае измеряется фазный:

$$K_{1\phi} = \frac{U_{A0}}{U_{ab}}; K_{1\phi} = \frac{U_{A0}}{U_{bc}}; K_{1\phi} = \frac{U_{C0}}{U_{ac}}.$$

Коэффициент трансформации, полученный при контрольных измерениях, не должен отличаться от заводских данных более чем на 2%. По общей закономерности изменения сопротивления постоянному току и коэффициента трансформации делается вывод о состоянии переключателя. Для трансформаторов с регулировкой под напряжением допускается, кроме того, отличие в пределах значения ступени регулирования.

Практическое занятие № 2

ПРОВЕРКА ГРУПП СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы: изучить методику определения номера группы трехфазного трансформатора.

Одним из условий параллельной работы трансформаторов является идентичность групп соединения их обмоток, определяемых полярностью обмоток, схемой их соединения и чередованием фаз подаваемого на обмотки напряжения. В связи с этим одной из важных проверок трансформаторов является определение полярности обмоток у однофазных трансформаторов и групп соединения (в заводском исполнении) трехфазных трансформаторов, что служит основой в дальнейшем для оценки и обеспечения идентичности групп параллельно включаемых трансформаторов подачей на них при монтаже соответствующих фаз напряжения.

При оценке групп соединения силовых трансформаторов исходят, кроме принципа, заложенного в определение однополярности, из следующих основных предпосылок.

1. Выводы обмоток стороны высшего напряжения (ВН) обозначаются всегда прописными буквами A, B, C, X, Y, Z , а выводы обмоток низшего напряжения (НН) - буквами a, b, c, x, y, z .

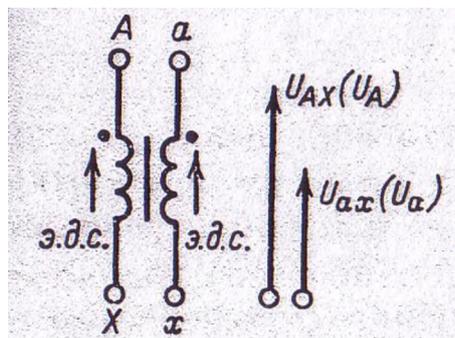


Рис. 2. Изображение однополярных выводов при одинаковом направлении намотки обмоток.

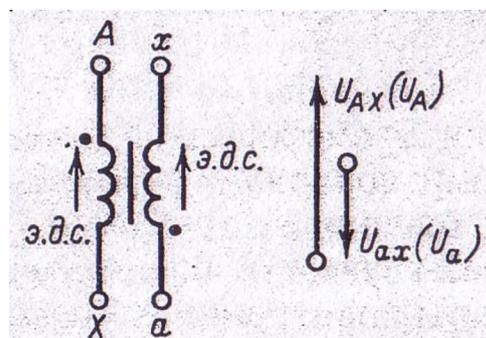


Рис. 3. Изображение однополярных выводов при различных направлениях намотки обмоток.

2. У обмоток, имеющих одинаковое направление намотки, все начала (определяемые однополярностью их) располагаются при изображении с одной стороны, а концы – с другой (рис. 2). У обмоток, имеющих разное направление намотки, начала и концы их располагаются с разных сторон (рис. 3).

3. Условно считается, что вектор первичного U_{AX} и вторичного U_{ax} напряжений и соответствующие им э. д. с. E_{AX} , E_{ax} имеют одно и то же направление,

если считать, что обе обмотки имеют одно и то же направление намотки, при этом положительному направлению обоих векторов соответствует обход обмоток от концов X, x к началу A, a . Если направления намотки разные, то, так как положительному направлению вектора э. д. с. соответствует обход обмотки высшего напряжения от конца X к началу A , вектор обмотки низшего напряжения изображается противоположным ему на 180° .

4. Начало обмоток и нулевой вывод располагается на крышках трансформаторов в последовательности $OABC, oabc$, слева направо, если смотреть на них со стороны выводов ВН.

5. Обмотка ВН считается первичной, НН – вторичной.

6. Векторная диаграмма линейных и фазных напряжений первичного напряжения считается исходной и во всех случаях неизменной независимо от схемы

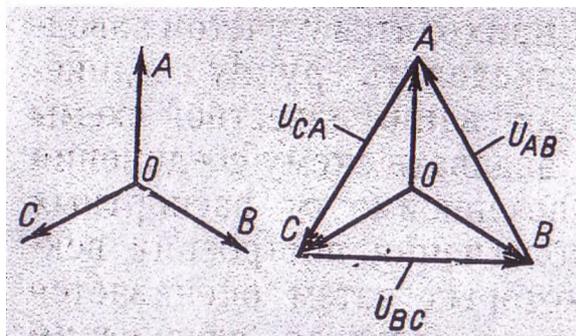


Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений.

соединения обмоток трансформатора и подключения его к сети. Чередование фаз сети согласно ГОСТ принимается $A - B - C$ (рис. 4).

7. У трехфазных трансформаторов обмотки соединяются в основном в звезду (Y) и в треугольник (Δ). В зависимости от схемы соединения обмоток (в звезду или в треугольник), от способа соединения выводов для образования треугольника и от порядка

подключения фаз напряжения сети к выводам возможно получение различных групп соединения. Группой соединения считается сдвиг по фазе линейного или фазного напряжения обмотки НН по отношению к одноименному линейному или фазному напряжению обмотки ВН. В зависимости от всех перечисленных факторов группы соединений трансформаторов могут отличаться друг от друга на $n \cdot 30^\circ$ (n – число в пределах 1-12). В связи с тем, что часовые деления циферблата часов составляют то же число, а угол между каждой парой часовых делений составляет также 30° , принято группы трансформаторов определять по часовой системе, считая вектор напряжения стороны ВН исходным и направленным на цифру 12. Вектор напряжения НН направляется при изображении группы на ту цифру циферблата часов, которая определяет группу. Первая группа означает, что вектор $U_{НН}$ опережает одноименный вектор ВН на 30° , вторая группа – что вектор $U_{НН}$ опережает на 60° и т.д.

В СССР выпускаются трансформаторы в основном двух групп – 12 (Y/Y) и 11 (Y/Δ), но в зависимости от подсоединения обмоток их к фазам системы встречаются также группы 1,5 и 7. Примеры различных групп соединения и соответствующие им векторные диаграммы показаны на рис.5. В практике наладочных работ приходится с учетом заводской маркировки и полярности определять группу соединения обмоток трансформатора на основании известной

схемы соединения обмоток и, наоборот, задавать схему соединения обмоток по требуемой группе независимо от паспортных данных трансформатора. Для облегчения построения векторных диаграмм, на основе которых затем оценивается в этих случаях группа, можно пользоваться следующим простым примером. Например, нужно установить группу трансформатора для случая *b* (рис. 5) соединения обмоток. Напряжение (или э. д. с.) обмоток ВН и НН стержня фазы *A* (аналогично *B* и *C*) могут или совпадать, или быть противоположны по фазе, так как обмотки располагаются на одном стержне магнитопровода. Определив предварительно полярность полярмером как для однофазных трансформаторов, убеждаемся в том, что для случая *b* одноименные по фазам обмотки имеют противоположное направление намотки. В соответствии с этим на векторной диаграмме строим вектор *ab* противоположным по фазе вектору U_A , вектор *bc* противоположным вектору U_B и вектор *ca* – вектору U_C на том основании, что со стороны треугольника линейные напряжения будут соответствовать по фазе фазному на стороне звезды.

Изобразив эти векторы, обозначают вершины треугольника, которые они составляют. Очевидно, вершины должны именоваться общими буквами, участвующими в наименовании двух соседних векторов (вершина сторон, образованных векторами *ab* и *bc*, должна называться *b*, и т. д.). Построив в треугольнике звезду фазных напряжений, нетрудно теперь определить фазный вектор напряжения стороны НН и сравнить его с одноименным на циферблате часов. Угол между U_A и U_a в разбираемом случае составляет 210° . Значит, группа при данном соединении обмоток данной полярности обмоток и наименовании фаз будет седьмая.

Аналогично можно рассуждать, но только в обратном направлении, если необходимо соединить обмотки так, чтобы получить необходимую (заданную) группу.

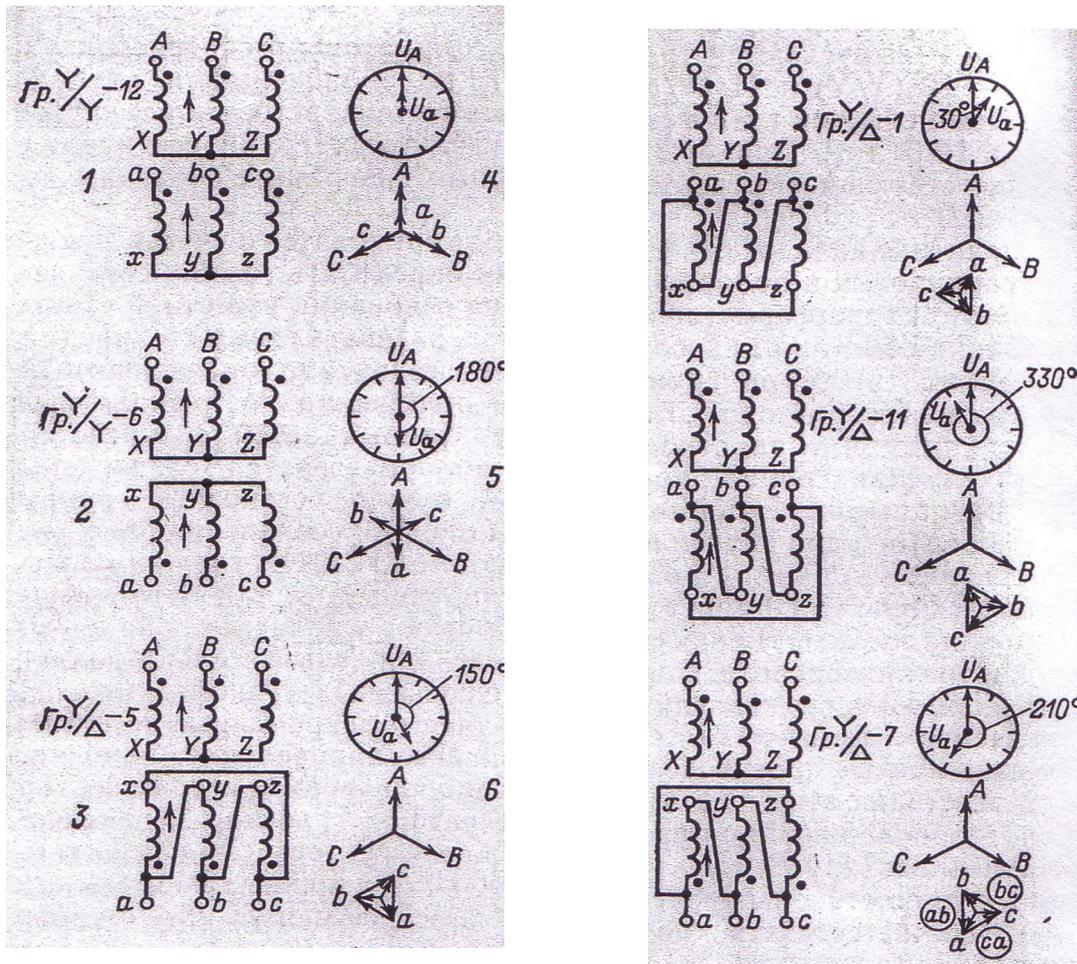


Рис. 5. Примеры схем соединения обмоток силовых трансформаторов. Точками обозначены согласно ГОСТ однополярные выводы. В случаях 1, 4, 5 – направление обмоток одинаковое, а в случаях 2, 3, 6 – разное. Стрелками показано направление э. д. с. обмоток.

Группу трансформаторов можно изменять, не делая никаких изменений в схеме соединения самих обмоток, только за счет циклической перестановки фаз напряжения со стороны ВН или НН. Очевидно, что если вместо фазы B на высокую сторону подсоединить фазу A , вместо C – фазу B , а вместо A – фазу C , то группа изменится по сравнению с исходной с седьмой на одиннадцатую. Аналогично, группа изменится на третью, если еще раз произвести циклическую перестановку фаз на фазу C подсоединить фазу A , на фазу A – фазу B , на фазу B – фазу C .

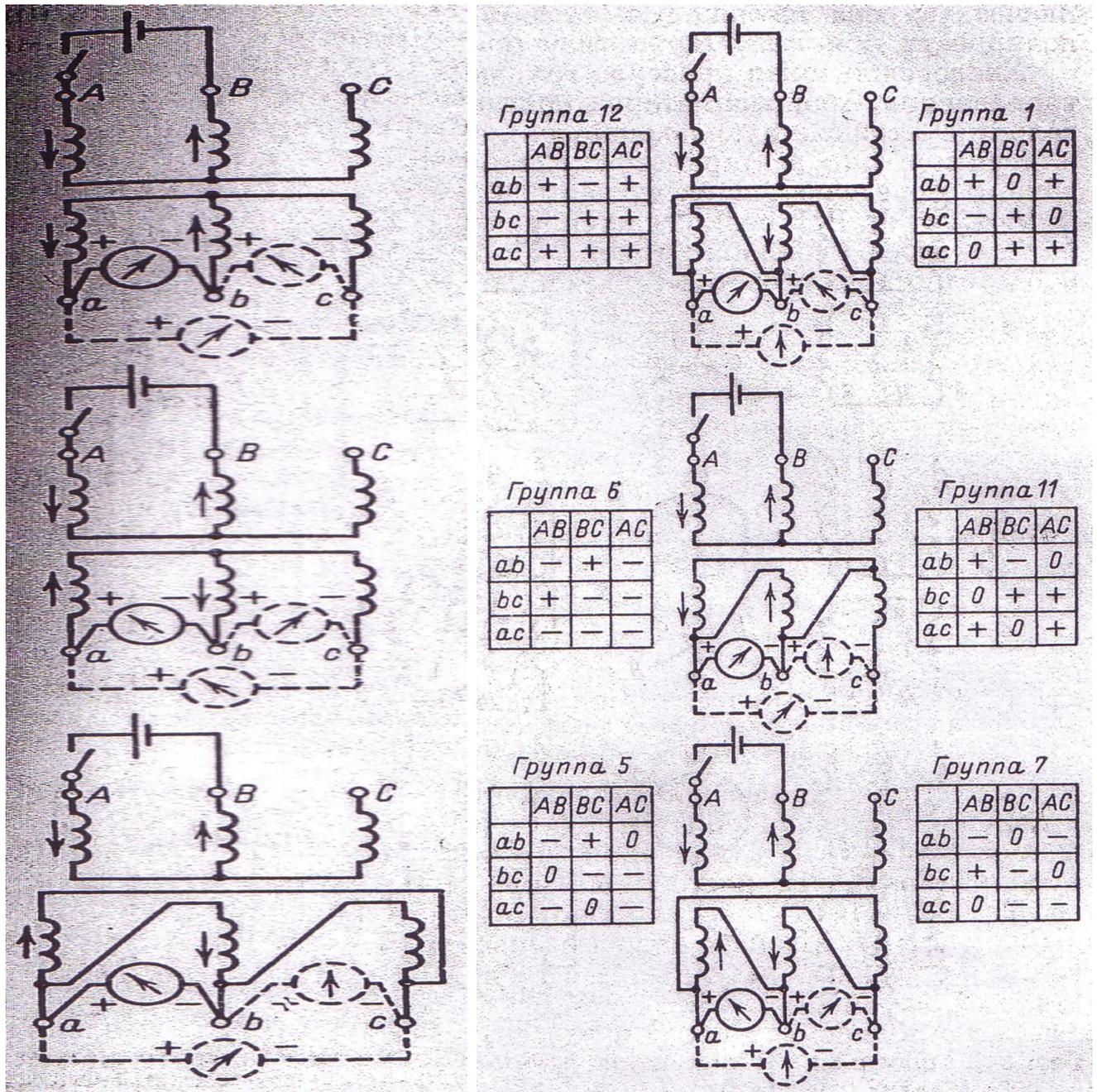


Рис. 6. Проверка группы соединения трансформаторов с помощью гальванометра (методом полярмера).

Практическое занятие № 3

ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРА И РАСЧЕТ ЕГО ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА

Цель работы: получить навыки выбора трансформаторов и расчета его параметров по данным каталога.

Выбор трансформатора производят по величине полной мощности, потребляемой трехфазными асинхронными двигателями в номинальном режиме.

Полная мощность, потребляемая одним двигателем равна

$$S_n = \frac{P_{2n}}{\eta_n \cdot \cos \varphi_n}, \quad (1)$$

Если $S_n \leq 3$ кВА расчет ведут для 100 двигателей, а если $S_n > 3$ кВА - расчет ведут для десяти двигателей. По рассчитанному значению полной мощности для 10 или 100 двигателей выбирают трансформатор таким образом, чтобы $S_{Тр} > S_{\Sigma ТАД}$. Тип трансформатора выбирают по справочной литературе.

Выбранный трансформатор должен иметь коэффициент нагрузки $1 > \beta > 0,8$. Если с помощью одного трансформатора невозможно обеспечить требуемый коэффициент нагрузки следует взять два трансформатора меньшей мощности, которые будут работать параллельно. Коэффициент нагрузки определяют следующим образом

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

где I_2 - ток, потребляемый двигателями;

$I_{2н}$ - номинальный ток вторичной обмотки трансформатора.

Ток, потребляемый двигателями, определяем по полной мощности и линейному напряжению питания двигателей

$$I_2 = \frac{S_n \cdot k}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}, \quad (3)$$

где S_n - полная номинальная мощность одного двигателя;

k - количество двигателей;

U - линейное напряжение питания двигателя.

Номинальный ток трансформатора

$$I_{2н} = \frac{S_{нТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{нн}}, \quad (4)$$

где $S_{нТ}$ - полная номинальная мощность трансформатора,

$U_{нн}$ - низшее напряжение трансформатора.

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 P_k}, \quad (5)$$

где P_x , P_k , S_H – каталожные данные трансформатора берутся из таблицы 1 (см. приложения), $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности всех подключаемых к трансформатору двигателей.

Процентное значение изменения вторичного напряжения трансформатора рассчитывается по формуле

$$\Delta u \% \approx \beta (u_{ка} \cos \varphi_2 + u_{кр} \sin \varphi_2), \quad (6)$$

В этой формуле $u_{ка}$ – процентное значение активной составляющей напряжения короткого замыкания, $u_{кр}$ – процентное значение реактивной составляющей напряжения короткого замыкания.

$$u_{ка} = u_k \% \cos \varphi_k, \quad (7)$$

где $\cos \varphi_k$ – коэффициент мощности трансформатора в режиме короткого замыкания.

В свою очередь

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} \quad (8)$$

где полная мощность потребляемая трансформатором в режим короткого замыкания равна

$$S_k = \frac{u_k \% \cdot S_H}{100}, \quad (9)$$

Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания определяется по формуле

$$u_{кр} = \sqrt{u_k^2 - u_{ка}^2} \quad (10)$$

Значение $\sin \varphi_2$, входящее в уравнение (2.6), определяет через $\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности ТАД по известным формулам тригонометрии.

Величина напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяется по формуле

$$U_2 = U_{HH} (1 - \Delta u \% / 100). \quad (11)$$

Полученное напряжение должно не более чем на 5% отличаться от напряжения питания двигателя. Если отклонение больше надо использовать трансформатор с РПН.

Практическое занятие № 4

ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы: освоить методику испытания силовых трансформаторов

Программы периодических, типовых, приёмочных и приёмо-сдаточных испытаний для силовых трансформаторов приведены в ГОСТ 11677. Программы периодических, типовых и приёмочных испытаний в основном совпадают и включают следующие операции: проверку коэффициента трансформации и группы соединения обмоток; определение сопротивления обмоток постоянному току; проверку тока и потерь холостого хода, потерь и напряжения короткого замыкания на основных ответвлениях обмоток; измерение сопротивлений нулевой последовательности; определение параметров изоляции; испытания на нагревание; стойкость к коротким замыканиям и на плотность бака; проверку уровня звука; испытания на стойкость к ударам толчков нагрузки и проб масла из бака масляного трансформатора; испытание устройств РПН в сборе с трансформатором.

При испытаниях на пробах масла определяют их пробивное напряжение. Для трансформаторов мощностью до 6,3 МВ*А класса напряжения до 35 кВ допускается пробы масла брать не реже одного раза в день из ёмкости, служащей для заливки масла в трансформаторы.

Проверка коэффициента трансформации. Измерение коэффициента трансформации проводится с большой точностью на всех ответвлениях обмотки и для всех фаз. Если такая проверка невозможна для отдельных ответвлений на собранном трансформаторе в связи с их недоступностью, то проверку выполняют до полной сборки трансформатора. В обмотках, состоящих из частей, соединённых параллельно, проверяют разницу количества витков этих частей на полностью собранном трансформаторе или, если это невозможно, до полной сборки. Проверяемые параллельные части обмотки соединяются последовательно так, чтобы ЭДС, наводимые в частях обмотки при возбуждении стержня магнитной системы, на которой они насажены, были направлены встречно.

В программу приёмо-сдаточных испытаний силовых трансформаторов входит большинство операций приведённой программы приёмных испытаний, за исключением измерения сопротивлений нулевой последовательности и испытаний на нагревание, на стойкость к коротким замыканиям, проб масла и устройств РПН в сборе с трансформатором. К свободным отводам последовательно соединённых частей обмотки подключают вольтметр с высоким (не менее 10 кОм) входным сопротивлением. Возбуждение магнитной системы осуществляется любой обмоткой (или обмотками), расположенной (или расположенными) на одном стержне с испытываемыми частями обмотки (или обмоток), кроме испытываемых.

Разница количества витков параллельных частей обмотки $n = U \cdot v / U_v$ (12)

где n – разница в количестве витков параллельных частей обмотки; U_v – напряжение, подводимое к возбуждаемой обмотке, В; U – напряжение на свободных отводах последовательно соединённых частей обмотки, В; v – количество витков возбуждаемой обмотки.

Полученное значение n следует округлить до целого (если n меньше 0,5, принять его равным нулю).

После первого этапа испытаний, если выявляется разница в количестве витков в параллельно соединённых частях обмотки, следует определить часть обмотки, содержащую большее количество витков. Это можно осуществить непосредственным измерением напряжений, наводимых в этих частях обмотки, и сопоставлением результатов измерений. Часть обмотки с большим числом витков можно найти и другим способом. К одной из частей обмотки последовательно присоединяют один виток того же направления намотки, что и остальные витки этой части, а затем повторяют необходимые для расчётов. При этом число n должно или увеличиваться на единицу (тогда заключают, что большее число витков больше в той части, к которой дополнительный виток не присоединяли).

Для обеспечения необходимой точности измерений сопротивление проводов цепи измерения не должно быть более 0,001 внутреннего сопротивления вольтметра.

Определение коэффициента трансформации трёхфазных трансформаторов характеризуется следующими особенностями. Обычно при испытаниях измеряют линейные напряжения, подключая трёхфазные первичные обмотки к источнику напряжения. Если имеется возможность, то допускается определять коэффициент трансформации по фазным напряжениям соответствующих фаз. При этом напряжение, подаваемое на первичные обмотки, может быть одно- или трёхфазным. Если трёхфазные трансформаторы имеют соединение Δ/Y и Y/Δ , то коэффициент трансформации по фазным напряжениям определяют при поочерёдном коротком замыкании фаз. При этом замыкают линейные зажимы одной из фаз, соединённых в треугольник, затем при однофазном питании обмотки определяют коэффициент трансформации оставшейся свободной пары фаз.

Для схемы Δ/Y и при питании со стороны звезды коэффициент трансформации равен $2k_f$, где k_f – фазный коэффициент трансформации. Для схемы Y/Δ и при питании со стороны треугольника коэффициент трансформации будет равен $0,5 k_f$. Аналогичные измерения проводят при коротких замыканиях двух других фаз.

Если линейные напряжения, подводимые к трёхфазному трансформатору, симметричны, т.е. отличие между наибольшим и наименьшим линейным напряжением не превышает 2%, производят измерения при трёхфазном питании первичной обмотки.

Для трёхобмоточных трансформаторов с расщеплёнными обмотками нет необходимости определять коэффициент трансформации для всех возможных вариантов. Достаточно проверить его для двух пар обмоток; при этом измерения на всех ответвлениях каждой из обмоток достаточно произвести один раз. Ряд трансформаторов имеет устройство переключения ответвлений обмоток с так называемым предызбирателем ответвлений, предназначенным для реверсирования регулировочной части обмотки или переключения грубых ступеней регулирования. В этом случае измерения допускается проводить при одном положении предызбирателя ответвлений, соответствующем меньшему из значений напряжений на регулируемой обмотке. Дополнительно можно провести по одному измерению на всех других положениях предызбирателя ответвлений. Измерения для определения коэффициента трансформации производят мостом или двумя вольтметрами. Для использования метода моста применяют специальные мосты или компенсационные установки, которые позволяют измерить коэффициент трансформации с точностью не менее четырёх значащих цифр. Метод двух вольтметров требует использования вольтметров класса 0,2. Применяемые при этом трансформаторы напряжения и добавочные резисторы также должны иметь класс не ниже 0,2. Измерения обоими вольтметрами производят одновременно. Подводимое при измерении напряжение не должно превышать номинальное напряжение трансформатора, но и не быть менее 1% от него.

Практическое занятие № 5

ИСПЫТАНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Цель работы: освоить методику испытания асинхронных машин.

Для асинхронных двигателей ГОСТ 183 предписывает программу приёмочных испытаний, определяющую измерения сопротивления изоляции обмоток по отношению к корпусу машины и между обмотками и сопротивлений обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии; определение коэффициента трансформации (для двигателей с фазным ротором); испытания изоляции обмоток на электрическую прочность относительно корпуса машины и между обмотками и на электрическую прочность трёхвитковой изоляции обмоток статора и фазного ротора; определение тока и потерь холостого хода, тока и потерь короткого замыкания; испытания машины при повышенной частоте вращения на нагревание; определение КПД, коэффициента мощности и скольжения; испытание на кратковременную перегрузку по току; определение максимального вращающего момента, минимального вращающего момента в процессе пуска, начального пускового вращающего момента и начального пускового тока (для двигателей с короткозамкнутым ротором); измерения вибраций и уровня шума. В программу приёмо-сдаточных испытаний асинхронных двига-

телей входят первые семь перечисленных операций программы приёмочных испытаний.

Рассмотрим методы испытаний, специфичные для асинхронных двигателей, остальные являются общими для всех видов электрических машин. *Определение коэффициента трансформации тока и потерь холостого хода и короткого замыкания.*

Определение коэффициента трансформации. Коэффициент трансформации находят, используя изменения линейных напряжений на клеммах обмоток статора и на кольцах неподвижного ротора с разомкнутой обмоткой. Для низковольтных электродвигателей (с номинальным напряжением до 660 В включительно) к обмотке статора подводят номинальное линейное напряжение, а для электродвигателей на большее номинальное напряжение допустимо определение коэффициента трансформации при пониженном напряжении. Коэффициент трансформации вычисляют как отношение напряжений статора $U_{\phi 1}$ и ротора $U_{\phi 2}$

$$k_T = U_{\phi 1} / U_{\phi 2} \quad (13)$$

Определение тока и потерь холостого хода. Эти испытания проводят в режиме холостого хода при установившемся тепловом состоянии частей электродвигателя. При опыте холостого хода измеряют линейное напряжение $U_{0л}$ между всеми фазами, частоту сети, линейный ток $I_{0л}$ статора в каждой фазе и потребляемую мощность.

Опыт холостого хода начинают с напряжения, равного 130% от номинального. Если двигатели выполнены с насыщенной магнитной цепью, то при указанном напряжении резко возрастает ток холостого хода. В этом случае допускается начинать опыт с напряжения, равного 110% от номинального. В процессе опыта обычно проводят 9 – 11 измерений при разных значениях линейного напряжения. Для правильного определения потерь в обмотке статора при опыте холостого хода необходимо непосредственно после опыта измерить сопротивление обмотки статора. Разделение потерь P_0 холостого хода на потери в обмотке статора, механические и в стали производится по методу, изложенному в литературе.

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3} U_{0л} I_{0л}) \quad (14)$$

Результаты опыта холостого хода обычно изображают графически – путём построения зависимостей потерь P_0 , фазного тока I_0 и коэффициента мощности $\cos \varphi_0$ в функции напряжения. При опыте холостого хода допускается не более чем на $\pm 2\%$ отклонение частоты сети от номинальной, но результаты измерений следует пересчитать на номинальную частоту. Для этого измеренные напряжения пересчитывают пропорционально первой степени частоты, потери в стали пропорционально степени 1,5 частоты и механические потери пропорционально квадрату частоты.

При приёмно-сдаточных испытаниях измеряют ток и потери холостого хода лишь при номинальном значении напряжения.

Определение тока потерь и короткого замыкания. При опыте короткого замыкания на статор подаётся напряжение, ротор затормаживается, а в случае фазного ротора обмотки закорачиваются накоротко на кольцах. Напряжение, подаваемое на статор, должно быть практически симметричным и номинальной частоты.

В процессе опыта одновременно измеряют подводимое напряжение, ток статора (линейный ток I_k короткого замыкания), потребляемую мощность P_k (кВт), начальный пусковой момент (для электродвигателей малой и средней мощности), а непосредственно после опыта определяют сопротивление r_{1k} обмотки статора между выводами, соответствующее температуре в конце опыта. Начальный пусковой момент $M_{п} = M_k$ (Н*м) измеряют при опыте динамометром или весами на конце рычага (которыми заторможён ротор), закрепляемыми шпонкой на свободном конце вала двигателя, или весами балансирной машины. Для электродвигателей большой мощности его определяют расчётно по измеренным потерям P_k короткого замыкания (численно равным мощности, потребляемой при опыте): $M_k = 0,9 \cdot 9550 \cdot P_{км2} / \pi c$

Потери (кВт) в обмотке ротора при опыте короткого замыкания

$$P_{км2} = P_k - P_{км1} - P_c$$

где $P_{км1}$ – потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания, кВт; P_c – потери в стали, определяемые из опыта холостого хода, кВт. Потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания $P_{км1} = I_{2k} r_{1k} / 1000$.

Для получения зависимостей (необходимых при приёмочных и других полных испытаниях) потребляемой мощности $\cos \phi_k$ и начального пускового момента M_k от напряжения U_k , приложенного к двигателю в режиме короткого замыкания, проводят 5...7 отсчётов при разных значениях этого напряжения.

В процессе приёмо-сдаточных испытаний ток и потери короткого замыкания измеряют при одном значении напряжения короткого замыкания $U_k = U_n / 3,8$, где U_n – номинальное напряжение двигателя. Во время проведения опыта короткого замыкания первый отсчёт рекомендуется проводить при следующих значениях напряжения короткого замыкания в зависимости от U_n :

$U_n, В$	127	220	380	440	500	660	3000	6000	10000
$U_k, В$	33	58	100	115	130	173	800	1600	2640

Второй отсчёт – при напряжении $(1 \pm 0,1) U_k$ (для электродвигателей малой и средней мощности); для электродвигателей большой мощности подавать при опыте номинальное напряжение обычно невозможно из-за больших пусковых токов, поэтому напряжение может быть ниже, но не меньше $0,4 U_n$. Требуемое напряжение U_k подаются начиная с минимального значения. Во избежание чрезмерного нагрева обмоток токами короткого замыкания рекомендуется отсчёт по приборам при каждом значении подведённого напряжения производить

за время не более 10с, а после отсчёта двигатель сразу отключать. Для двигателей с фазным ротором, для которых максимальный вращающий момент определяют из круговой диаграммы, ток короткого замыкания (при опыте короткого замыкания) должен быть не менее 2,5-кратного от номинального, чтобы правильно оценить насыщение путей потоков рассеяния при токах, соответствующих максимальному моменту. При испытании двигателей свыше 1000 кВт ток короткого замыкания должен быть не менее двукратного от номинального.

Практическое занятие № 6

ПОСТРОЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХ- ФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ (ТАД) ПО ДАН- НЫМ КАТАЛОГА

Цель работы: изучить методику расчета и построения механической характери-
стики ТАД по данным каталога

Под механической характеристикой двигателя понимается зависимость частоты вращения ротора от вращающего момента

$$n_2 = f(M)$$

Для расчета механической характеристики используют формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\max}}{s/s_k + s_k/s}, \quad (15)$$

где M_{\max} - максимальный вращающий момент, развиваемый двигателем;

s_k - критическое скольжение;

s - скольжение, соответствующее различным значениям вращающего момента.

При построении механической характеристики частоту вращения ротора двигателя определяют по значениям скольжения, используя формулу

$$n_2 = n_1(1-s), \quad (16)$$

где n_1 - частота вращения магнитного поля.

Расчет можно начать с определения номинального вращающего момента

$$M_n = 9550 \frac{P_{2n}}{n_{2n}}, \quad (17)$$

где P_{2n} - в кВт, а n_{2n} - в об/мин.

Значения номинальной мощности P_{2n} и номинальной частоты вращения n_n приведены в технических данных двигателей.

Затем, используя приведенные в таблицах 2-3 отношения $\frac{M_{\max}}{M_n}$ и $\frac{M_{\text{пус}}}{M_n}$, определяют максимальный и пусковой вращающий моменты.

Частоту вращения магнитного поля определяют по формуле

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (18)$$

частоту питающей сети принимают равной $f_1 = 50$ Гц, а количество пар полюсов p определяют из обозначения двигателя. Следует помнить, что в обозначении двигателя указывается количество полюсов, а не количество их пар. Затем определяют величину номинального скольжения как

$$s_n = \frac{n_1 - n_{2n}}{n_1}, \quad (19)$$

зная которую можно определить критическое скольжение s_k , входящее в формулу Клосса

$$s_k = s_n (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}), \quad (20)$$

где $k_M = M_{\max} / M_H$.

Для построения рабочего участка механической характеристики (участок 1-2 на рис.7) задаются в уравнении (15) рядом значений скольжения s в пределах $(0 \dots s_k)$ и рассчитывают величины моментов. В пояснительной записке приводят расчет одной из точек механической характеристики. Расчет остальных точек сводят в таблицу (не менее 7 точек).

s	-	$s_1 \dots$	$\dots s_k$
M	M_H		
n_2	об/мин		

На участке механической характеристики двигателя, соответствующему пуску и останову двигателя (участок 2-3 на рис.7) формула Клосса не справедлива. Для построения этого участка на оси моментов откладывают точку с координатами $M = M_{\text{пус}}, n_2 = 0$, которую соединяют с точкой рабочего участка механической характеристики с координатами $n_2 = n_k; M = M_{\max}$ прямой линией.

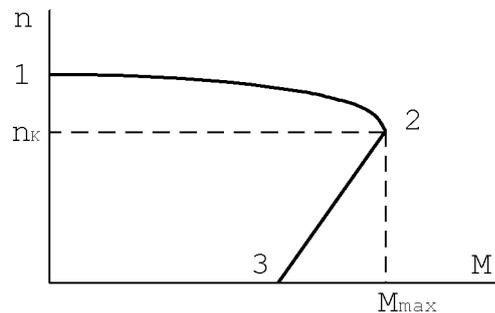


Рисунок 7. Механическая характеристика ТАД

При построении механической характеристики масштаб для обоих участков 1-2 и 2-3 по оси частоты вращения следует выдержать одинаковым.

Расчет вращающего момента двигателя при снижении напряжения питания на 10% по пункту 2.3 задания следует проводить следующим образом. При снижении напряжения питания на 10% к двигателю будет подведено напряжение $U = 0,9U_H$. Величина вращающего момента двигателя пропорциональна квадрату напряжения. Следовательно, можно составить пропорцию

$$\frac{M'_{\text{пус}}}{M_{\text{пус}}} = \frac{(0,9U_H)^2}{U_H^2}, \quad (21)$$

из которой и определяется новое значение пускового момента.

Практическое занятие № 7

ИСПЫТАНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Цель работы: освоить методику испытания синхронных машин.

Программы испытаний. Для синхронных машин программы приёмочных, приёмо-сдаточных, периодических и типовых испытаний устанавливает ГОСТ 183. Программа приёмочных испытаний включает следующие операции: измерения сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками и сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии; испытания при повышенной частоте вращения, изоляцию обмоток относительно корпуса и между обмотками на электрическую прочность; определение характеристики холостого хода, характеристики установившегося трёхфазного короткого замыкания (трёхфазных машин) или однофазного короткого замыкания (для однофазных машин) и тока третьей гармонической (если машина предназначена для работы при соединении обмотки статора в треугольник); измерение тока возбуждения в режиме ненагруженного перевозбуждённого двигателя при номинальном напряжении и номинальном токе статора (якоря) и определение U-образной характеристики (для машин с частотой 50 Гц и мощностью не более 1000 кВ*А); определение номинального тока возбуждения номинального изменения напряжения и регулировочной характеристики; испытания на кратковременную перегрузку по току; определение КПД; испытания на нагревание и механической прочности при ударном токе короткого замыкания; определение коэффициента искажения синусоидальности кривой линейного напряжения; опытное определение индуктивных сопротивлений и постоянных времени обмоток; определение начального, пускового, минимального и входного вращающих моментов, начального пускового тока синхронных компенсаторов (не имеющих пусковых двигателей); испытание электромашинного возбудителя по программе типовых испытаний машин постоянного тока; определение скорости нарастания напряжения возбудителя для синхронного генератора и синхронного компенсатора (для машин мощностью свыше 1000 кВ*А); проверка состояния уплотнений и определение утечки водорода (для машин с водородным охлаждением); измерение вибраций и уровня шума.

Кроме того, в стандартах на отдельные виды синхронных машин приведены дополнительные требования по программе испытаний (например ГОСТ 14965 «Генераторы трёхфазные синхронные с мощностью свыше 100 кВт. Общие условия»). В программу приёмо-сдаточных испытаний синхронных машин входят первые семь операций программы испытаний. Рассмотрим методы испытаний, специфичных для синхронных двигателей, остальные являются общими для всех видов электрических машин. *Принимаемые допущения и особенности обработки материалов испытаний.*

При проектировании и испытании электрических машин удобно выражать параметры и характеристики в относительных единицах. Этот метод широко применяется для синхронных машин; в качестве базисных значений принимают номинальное значение линейного напряжения U_n и полной мощности P_n . Тогда базисное значение тока $I_b = I_k = P_n / (\sqrt{3} U_n)$ Базисное значение полного сопротивления

$Z_b = U_n / (\sqrt{3} I_n)$. За базисные значения частоты тока или напряжений и угловой скорости машины принимают их номинальные значения $f_b = f_n$; $\omega_b = 2 \cdot f_n$. За базисное значение тока возбуждения при вычислении характеристик и построении диаграмм принимают ток возбуждения, соответствующий номинальному напряжению по характеристике холостого хода I_f^0 . Время выражается в секундах. Вращающий момент можно выражать в долях от номинального. Чтобы отличить величины в физических и относительных единицах, будем обозначать строчными буквами величины в относительных единицах и прописными – в физических.

Обозначения электромагнитных параметров соответствуют обозначениям, принятым в теории двух реакций. При этом предполагается, что дополнительно к обмотке возбуждения имеется по одному эквивалентному демпферному контуру по продольной и поперечной осям машины. Постоянные времени определяют, предположив, что соответствующие переходные составляющие токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону. Если кривая изменения рассматриваемой составляющей, полученная опытным путём, не является строго экспоненциальной, то в качестве эквивалентной постоянной времени принимается время, в течение которого эта составляющая уменьшается до $1/e = 0,368$ своего первоначального значения. Кривые затухания, соответствующие этим постоянным времени, могут рассматриваться как эквивалентные кривые, полученные по данным измерений.

При определении параметров машины по переходным функциям и частотным характеристикам ротор машины можно рассматривать как многоконтурный. Под понятием «Насыщенное значение параметра» будем в дальнейшем понимать его значение при номинальном напряжении (кроме синхронных индуктивных сопротивлений), а под понятием ненасыщенное – значение параметра при номинальном токе входа. Значение параметра машины при номинальном напряжении тока якоря соответствует магнитному состоянию машины при внезапном коротком замыкании на выводах обмотки якоря, которому предшествует работа машины в режиме холостого хода с номинальным напряжением при номинальной частоте вращения. Вместе с тем значение параметра машины при номинальном токе якоря соответствует магнитному состоянию ненасыщенной машины при протекании в обмотке якоря тока с номинальным значением основной гармонической составляющей. Поэтому очень важно для возможности сопоставления опытных параметров и постоянных времени машины указывать способ и значения тока и напряжения, при которых производилось их определение. Ещё одно правило, которого следует придерживаться при испытании

синхронных машин, - обмотки должны быть соединены по рабочей схеме и все параметры следует определять применительно к схеме соединения фаз якоря в звезду.

Определение характеристики холостого хода трёхфазного короткого замыкания, симметричности напряжения и тока третьей гармонической.
Определение характеристики холостого хода. Эта характеристика представляет собой зависимость напряжения обмотки якоря от тока возбуждения, которую обычно определяют при холостом ходе и номинальной частоте вращения машины в режиме генератора, но можно снимать эту характеристику и в режиме ненагруженного двигателя. При снятии характеристики измеряют ток возбуждения, линейное напряжение и частоту (или частоту вращения). Чтобы иметь возможность оценить третью гармоническую составляющую при соединении обмотки статора в звезду, измеряют также фазное напряжение, а при соединении в треугольник (если выведены начала и концы всех фаз) – фазный ток. При снятии характеристики холостого хода частота f (Гц) может несколько отличаться от номинальной f_n ; в этом случае истинное напряжение (В) холостого хода U_0 может быть найдено по измеренному U .

Практическое занятие № 8

ИСПЫТАНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: освоить методику испытания машин постоянного тока.

Программы испытаний. Наиболее полными испытаниями являются приёмочные. Для машин постоянного тока ГОСТ предписывает следующую программу приёмочных испытаний, по которой: измерения сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками и сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии; испытания при повышенной частоте вращения, изоляцию обмоток относительно корпуса и между обмотками на электрическую прочность межвитковой изоляции обмоток; определяют ток возбуждения генератора или частоту вращения двигателя при холостом ходе (для двигателей с последовательным возбуждением – при независимом возбуждении) и характеристики холостого хода, проверяют коммутацию при номинальной нагрузке и кратковременной перегрузке по току (для машин мощностью свыше 500 кВт допускается проводить это испытание в режиме короткого замыкания); определяют области безыскровой работы (для машин с добавочными полюсами) и КПД; измеряют вибрацию, биение коллектора, уровень радиопомех и шума.

В программу приёмо-сдаточных испытаний машин постоянного тока входят первые семь из перечисленных операций программы приёмных испытаний, а в отдельных случаях проводят измерение вибрации и уровня шума. Проверка состояния обмоток и коллектора до начала испытаний.

До начала испытаний машин постоянного тока следует проверить правильность соединений обмоток машины и состояние коллектора. Проверка правильности соединения обмоток между собой в собранной и подготовленной к испытанию машине заключается в том, чтобы определить, правильно ли обозначены начала и концы всех обмоток и правильно ли соединены эти обмотки между собой. В принципе понятия «начало» и «конец» у обмоток условны, поэтому следует оговорить, что считать началом обмотки. Для этого установлено следующее правило: если смотреть на машину со стороны приводного конца вала (а в машинах с двумя приводными концами вала – со стороны, противоположной коллектору), то при работе машины в режиме двигателя и вращении её по часовой стрелке ток во всех обмотках должен протекать от начала к концу. Началом обмотки якоря считается та часть обмотки, которая соединена со щётками той полярности, к которой присоединён положительный провод сети (это правило справедливо для генератора и двигателя). Щётки на коллекторе обычно располагают примерно против середины главных полюсов.

Полярность добавочных полюсов должна соответствовать следующему правилу: по направлению вращения двигателя после каждого главного полюса следует добавочный полюс той же полярности, а в генераторах – добавочный полюс противоположной полярности.

Правильность соединения обмоток проверяется и таким способом: при сохранении направления вращения машины при переходе режима работы двигателя к генератору или обратно ток в якоре и обмотках последовательной цепи должен изменить направление, а в обмотках параллельного или независимого возбуждения сохранить направление; при изменении направления вращения и сохранении режима работы машины (генератор и двигатель) ток должен изменить направление или в последовательной цепи, или в обмотках параллельного или независимого возбуждения.

Пользуясь перечисленными правилами, процедура проверки правильности маркировки выводов обмоток и их соединений может быть следующей. Первоначально любая щётка может быть условно принята положительной. Обычно петлевою обмотку выполняют прямоходной, а волновую – обратходной. В соответствии с таблицей против щёток положительной полярности должны находиться южные главные полюсы. Тогда при параллельной обмотке возбуждения может быть отмечен один из выводов этой обмотки, к которому должен быть присоединён положительный проводник питания для создания необходимой полярности главных полюсов. Такую же полярность должна создавать последовательная обмотка возбуждения, что позволяет разметить её начало и конец. Далее, учитывая, что в генераторе, если двигаться в направлении вращения, после главного полюса определённой полярности должен следовать добавочный полюс противоположной направленности, можно произвести маркировку начала и конца добавочного полюса. Проверка состояния поверхности коллектора до начала испытаний машины и затем, если это требуется, в процессе испытаний является весьма важной и ответственной операцией. Ос-

новные требования к поверхности коллектора: поверхность должна иметь правильную цилиндрическую форму, образующие цилиндра – строго прямолинейны; коллектор не должен создавать биения щёток из-за эллиптичности поверхности коллектора, которая может возникнуть от неправильной центровки при обточке коллектора, выступания или провала отдельных коллекторных пластин; изоляция между пластинами не должна выступать за рабочую поверхность коллектора; промежутки между пластинами должны быть свободны от стружек, всевозможных кусочков, пыли и т.п.; пластины не должны иметь острых краёв.

Практическое занятие № 9

ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Цель работы: освоить методику испытания электродвигателей малой мощности (микромашин).

Основные технические требования к электродвигателям малой мощности. К электродвигателям малой мощности относят электродвигатели с номинальной мощностью до 500 Вт. Они находят широкое применение в народном хозяйстве, в частности в бытовой технике и для целей автоматизации. К электродвигателям предъявляются следующие требования – коллекторные двигатели должны без повреждений и остановочных деформаций выдерживать в течение 2 минут следующие повышенные частоты вращения: на 50% сверх наибольшей номинальной – для двигателей с последовательным возбуждением; на 20% сверх наибольшей номинальной – для двигателей с параллельным или сменным возбуждением. Номинальные данные электродвигателей устанавливает ГОСТ, а также стандарты и технические условия. Для номинальных данных определены допусковые отклонения. Так, на напряжение питания установлен допуск $\pm 10\%$ номинального напряжения, на частоту питания $\pm 2,5\%$. Для асинхронных двигателей суммарное отклонение частоты и напряжения не должно превышать 10% номинального значения напряжения, а синхронные двигатели при указанных отклонениях напряжения и частоты не должны выпадать из синхронизма.

Допускаемые отклонения номинальной частоты вращения двигателей от номинальной при номинальном моменте и установившейся рабочей температуре обмоток не должны превышать следующих значений:

Вид двигателя.

Коллекторные смешанного возбуждения $\pm 20\%$

Коллекторные с последовательным возбуждением $\pm 20\%$

Коллекторные постоянного тока с параллельным возбуждением или с постоянными магнитами $\pm 15\%$

Универсальные коллекторные с ответвлением в обмотке возбуждения $\pm 20\%$

Универсальные коллекторные без ответвлений в обмотке возбуждения +5.-20%
Асинхронные $\pm 20\%$

Особое внимание в электродвигателях малой мощности уделяют требованиям по уровню звука и вибрациям. Для двигателей с подшипниками качения, а также для коллекторных двигателей с подшипниками скольжения средний уровень звука должен соответствовать классам 1, 2, 3 и 4. Основным является класс 1.

Средние значения уровня звука электродвигателей 1го класса на расстоянии 1 м от контура в зависимости от частоты вращения при номинальной мощности до 180 кВт (в числителе) и свыше 180 кВт (в знаменателе) составляют:

Частота вращения, об/мин	Средний уровень звука, дБ*А
До 1000	59/62
1000-1500	63/65
1500-2000	65/67
2000-3000	66/68
3000-8000	70/71
8000-15000	75/76
15000-18000	78/80
18000-24000	82/84

Двигатели классов 2,3 и 4 имеют средний уровень звука соответственно меньше на 5, 10 и 15 дБ*А от указанных. По эффективному значению вибрационной стойкости двигатели подразделяются на нормальную, повышенную и высокую точности.

Программы испытаний. Электродвигатели малой мощности, как и другие электрические машины, подвергаются определённым видам испытаний: приёмосдаточным, приёмочным, квалификационным, периодическим и типовым. Приёмосдаточные испытания проводят на каждом двигателе по следующей программе, включающей проверку: внешнего вида, присоединительных размеров, и биения выступающего конца вала, направления вращения вала, маркировки выводных проводов обмотки; измерение сопротивления обмоток постоянному току в практически холодном состоянии, сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса; испытание междувитковой изоляции на электрическую прочность; проверку уровня звука; определение тока и потерь холостого хода, тока и потерь короткого замыкания; проверку тока и частоты вращения при номинальной нагрузке и максимально допустимом значении напряжения управления; определение напряжения трогания и проверку коммутации в номинальном режиме и при кратковременной перегрузке по току. Определение токов и потерь холостого хода и короткого замыкания проводят для асинхронных и синхронных двигателей, определение напряжения трогания и проверку тока и частоты при номинальной нагрузке – для бесконтактных двигателей, проверку коммутации – для коллекторных двигателей.

Библиографический список

1. Электротехнический справочник. Т.2 / Под ред. проф. МЭИ И.П. Копылова и др./-М.: Энергоатомиздат, 1989. – 676 с.
2. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию Т.2 / Под ред. А.А. Федорова./ - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 697 с.
3. В.И. Читечян. Электрические машины. Сборник задач. – М.: Высшая школа, 1988. – 231 с.