

Министерство образования и науки Украины
Государственный университет “Одесская политехника”
Институт электромеханики и энергоменеджмента



В.П. Шевченко

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано кафедрой электрических машин как учебное пособие для студентов специальности 141 “Электроэнергетика, электротехника, электромеханика” специализации “Электрические машины и электрический транспорт” дневной и заочной форм обучения
(Протокол №1 от 28.08.20)

2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	6
1.1. Виды испытаний	6
1.1.1. Качество и показатели качества. Стандартизация методов испытаний	6
1.1.2. Промышленные и исследовательские испытания	7
1.1.3. Программа контрольных испытаний электрических машин	9
1.2. Методика проведения испытаний	15
1.2.1. Задачи методики и требования к ней	15
1.2.2. Точность методики	16
2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ И КПД	17
2.1. Потери в электрических машинах	17
2.1.1. Характеристики электрических машин	17
2.1.2. Методы нагрузки электрических машин	18
2.1.3. Общая характеристика потерь	19
2.2. Измерение КПД	20
2.2.1. Физическое обоснование методов экспериментального определения КПД	20
2.2.2. Методы непосредственного определения потерь и КПД	22
2.2.3. Методы косвенного определения потерь и КПД	23
3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	24
3.1. Измерение электромеханических параметров	24
3.1.1. Измерение вращающих моментов	24
3.1.2. Измерение частоты вращения	25
3.1.3. Измерение скольжения асинхронных электродвигателей	26
3.1.4. Измерение угла нагрузки синхронных машин	27
4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ	29
4.1. Общая характеристика датчиков температуры	29
4.2. Два способа измерения температуры при помощи термопар	33
5. БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ	40
6. ИЗМЕРЕНИЕ ШУМА И ВИБРАЦИИ	4н
6.1. Измерение шумовых характеристик	4н
6.2. Измерение вибрации	49
7. КОНТРОЛЬ И ПОДАВЛЕНИЕ РАДИОПОМЕХ	51
8. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	53
8.1. Принципы автоматизации испытаний	53
8.1.1. Причины необходимости автоматизации испытаний	53
8.1.2. Структура автоматизированных систем испытаний	54
8.1.3. Особенности методов экспериментального исследования	55
при автоматизации испытаний	55
8.1.4. Общие принципы автоматизации испытаний	56
8.2. Общая характеристика средств автоматизации испытаний	57
9. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ РЕМОНТЕ	58
9.1. Виды испытаний ЭМ	58
9.2. Испытание электродвигателей после текущего ремонта	69
9.2.1. Испытание изоляции обмоток ЭМ повышенным напряжением	69
9.2.2. Измерение тока холостого хода	61
9.2.3. Измерение сопротивления изоляции мегомметром	61
9.2.4. Определение технического состояния корпусной и межфазной изоляции	64
9.2.5. Определение технического состояния межвитковой изоляции обмоток статора АД с короткозамкнутым ротором	65
9.2.6. Сушка изоляции обмоток	66

9.2.7. Короткое замыкание в обмотках машин переменного тока	69
9.2.9. Диагностирование короткозамкнутых обмоток роторов разобранных асинхронных двигателей.....	70
9.2.9. Испытание активной стали статора	71
9.2.10.. Диагностирование обмоток якоря МПТ	74
9.2.11. Диагностирование обмоток возбуждения МПТ	75
9.2.13. Установка щеток на нейтраль.....	76
9.2.13. Диагностирование коллекторов и контактных колец	77
9.2.14. Контроль состояния щеточного механизма.....	78
9.3.15. Определение воздушного зазора	79
9.2.16. Измерение сопротивлений обмоток постоянному току	81
9.2.17. Испытания электрических машин после ремонта	84
9.2.18. Соединение обмоток МПТ	89
9.2.19. Маркировка выводов обмоток АД	90
10. ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ	93
10.1. Опыт холостого хода	93
10.2. Опыт короткого замыкания.....	95
10.3. Группы соединения трансформаторов	101
11. ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН	107
11.1. Опыт холостого хода	107
11.2. Опыт к.з.....	109
11.3. Расчет рабочих характеристик по Г-образной схеме замещения.....	110
11.4. Построение круговой диаграммы	112
12. ИСЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	116
12.1. Характеристика холостого хода	116
12.2. Характеристика короткого замыкания	117
12.3. Опытное определение сопротивления x_d	118
12.4. Отношение короткого замыкания	120
12.5. Нагрузочная характеристика	121
12.6. Опытное определение индуктивного сопротивления рассеяния	122
12.7 Практический метод определения сопротивления x_1	124
12.9. Внешние характеристики	125
12.9. Регулировочные характеристики	126
12.11.. Энергетическая диаграмма синхронного генератора.....	126
13. БАЛАНСИРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	129
13.1. Статическая балансировка	130
13.2. Динамическая балансировка.....	134
Литература	149

ВВЕДЕНИЕ

Процесс создания электрической машины состоит из двух этапов: проектирования и изготовления (производства). Проведение испытаний необходимо на любом из этих этапов.

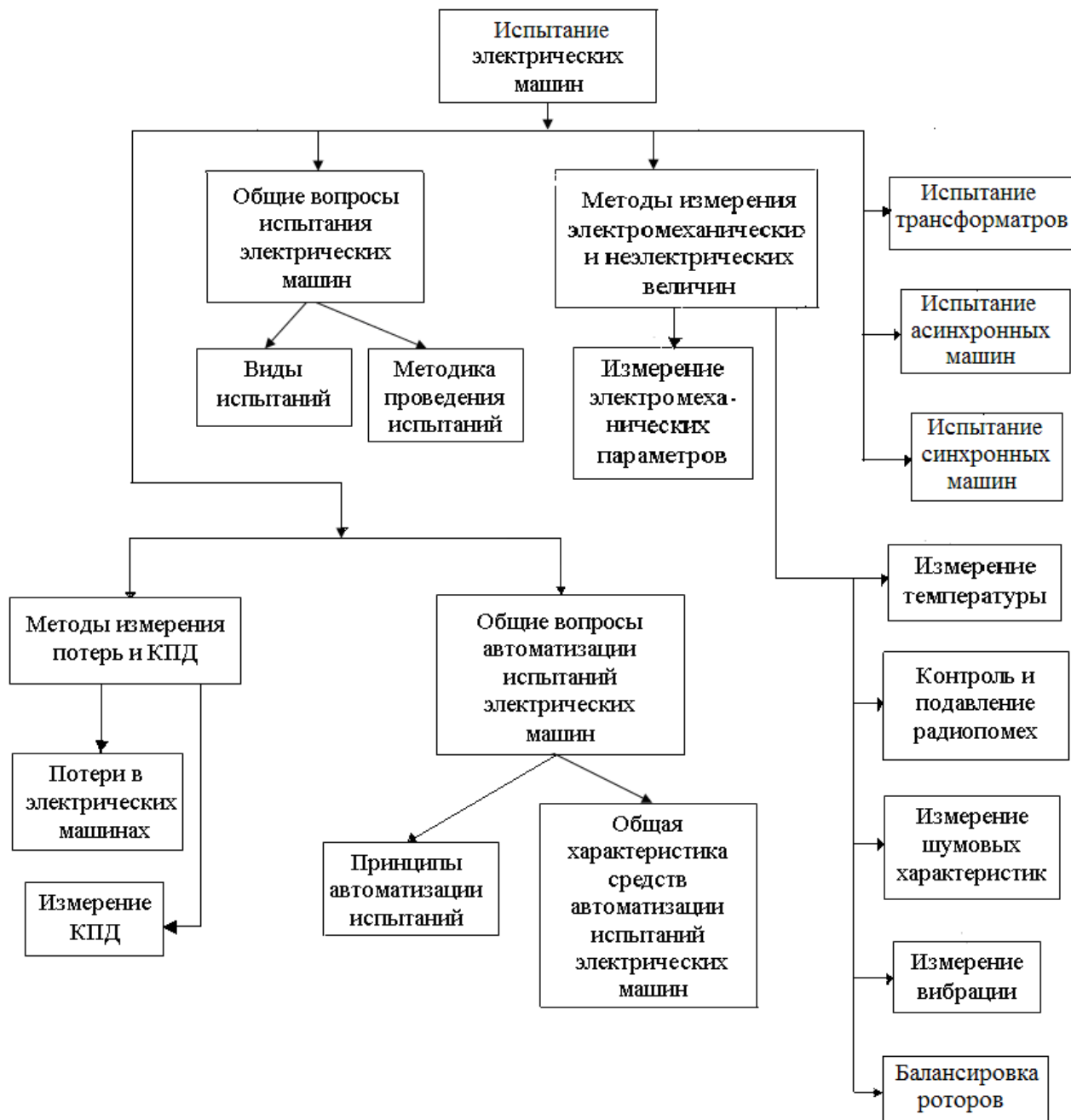
На стадии проектирования проводятся испытания макетных и опытных образцов для проверки соответствия выходных показателей и характеристик требованиям технического задания. Кроме того, в процессе доводки опытных образцов или подготовки к проектированию новой машины или новой серии часто возникает необходимость в проведении исследовательских испытаний с целью уточнения математических моделей.

На стадии изготовления испытания отдельных узлов электрической машины проводятся после завершения соответствующих технологических операций. После сборки машины испытания проводятся с целью проверки соответствия ее выходных показателей требованиям технических условий (ТУ) или соответствующих ГОСТов.

При эксплуатации, помимо систематического контроля параметров, электрические машины подлежат текущему или капитальному ремонту, после чего машина также должна быть испытана.

В любом из перечисленных случаев испытания проводятся в соответствии с определенной программой, которая должна быть составлена таким образом, чтобы можно было оценить все показатели и характеристики электрической машины, установленные техническими условиями или стандартами.

Очевидно, что точность (объективность) результатов испытаний в значительной степени зависит от методики испытаний. Практика показывает, что разные методы однотипных испытаний дают различные по точности результаты. Поэтому уже в первые государственные стандарты на электрические машины, кроме раздела “Технические требования”, был введен обязательный раздел “Методы испытаний”.



Структурно-логическая схема дисциплины

[содержание](#)

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. Виды испытаний

9.2.11. *Качество и показатели качества. Стандартизация методов испытаний*

Качество электрической машины это – совокупность ее свойств, позволяющая удовлетворять определенные требования при использовании электрической машины по назначению. Поэтому *показатели качества* электрической машины представляют собой количественную характеристику ее свойств.

Показатели качества можно разделить на группы: по назначению, надежности, технологичности, стандартизации и унификации, транспортабельности, безопасности эксплуатации, а также – по эстетическим, патентно-правовым и экологическим признакам.

Из перечисленных групп в связи с необходимостью проведения испытаний наиболее значимыми являются такие показатели качества как назначения и надежности.

Показатели назначения определяют технические возможности электрической машины, а также – эффективность ее эксплуатации. В эту группу входят такие показатели, как мощность, скорость вращения, КПД, коэффициент мощности и т.п.

Показатели надежности характеризуют способность электрической машины сохранять в течение определенного времени значения всех параметров в установленных пределах, определяющих ее способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Технические требования к показателям качества сформулированы в соответствующих стандартах. К ним относятся например такие, как надежность, уровень нагрева, энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), коэффициенты трансформации, коэффициенты (максимальный и начальный пусковой моменты, начальный пусковой ток, скорость нарастания напряжения возбуждения и другие), требования к электрической прочности изоляции обмоток, механической прочности вращающихся частей, работе щеточного узла, способности выдерживать кратковременные перегрузки, способности длительной или кратковременной работы в аномальных условиях, уровням шума и вибрации, а также – создаваемых индустриальных радиопомех.

По всем перечисленным, а также по ряду других требований к качеству электрической машины, в стандартах установлены количественные требования, а в ряде случаев – и допуски на них.

При испытаниях проверяется соответствие измеренных и расчетных показателей качества требованиям стандартов. В связи с важностью объективного определения показателей качества в настоящее время действует 25 государственных стандартов (ГОСТов) только на методы испытаний электрических машин.

При этом существуют стандарты, являющиеся общими для всех видов электрических машин, например: ГОСТ 11828-86 регламентирует отдельные общие

методы испытаний, ГОСТ 25000-81 устанавливает методы испытаний на нагревание, ГОСТ 25941-83 определяет методы определения потерь и КПД, ГОСТ 11929-87 устанавливает методы определения уровня шума, ГОСТ 12379-75 определяет методы оценки уровня вибрации и т.п.

Кроме перечисленных стандартов, распространяющихся на все виды электрических машин, разработаны *стандарты на методы испытаний отдельных видов электрических машин*, имеющих наибольшее распространение:

–ГОСТ 7217-79 устанавливает методы испытаний трехфазных асинхронных двигателей;

– ГОСТ 34784-77 определяет методы испытаний силовых трансформаторов;

– ГОСТ 10159-79 относится к методам испытаний электрических машин постоянного тока;

–ГОСТ 10169-77 регламентирует методы испытаний трехфазных синхронных машин.

Ряд испытаний электрических машин проводится только на предприятиях электротехнической промышленности, например испытания на надежность. В этих случаях в целях стандартизации методов испытаний разрабатываются так называемые отраслевые стандарты (ОСТы). Одним из таких стандартов является ОСТ 16-0.801.373-86 “Машины электрические вращающиеся средние свыше 56 до 355 габарита включительно. Двигатели асинхронные. Надежность. Методы ускоренных испытаний”.

1.1.2. Промышленные и исследовательские испытания.

Все существующие виды испытаний в соответствии с их целями условно разделяются на *промышленные и исследовательские*. В ходе первых подтверждаются (или нет) заложенные при проектировании качество и характеристики. Исследовательские же испытания позволяют уточнить физические процессы, происходящие в машине, и соответствующие им физические и математические модели.

В целях обеспечения процессов проектирования и производства электрических машин стандартами установлены следующие виды испытаний.

Приемосдаточные (контрольные) испытания (ПСИ), проводящиеся отделами технического контроля (ОТК) по каждой выпускаемой электрической машине для проверки соответствия ее по основным показателям требованиям ТУ, ГОСТ, ОСТ. Программа приемо-сдаточных испытаний формируется из отдельных пунктов программы приемочных таким образом, чтобы при минимальных затратах времени можно было установить соответствие конкретного экземпляра машины основным техническим требованиям.

Периодические испытания, проводящиеся периодически (раз в 2 – 3 года) ОТК или лабораториями на определенной части электрических машин для проверки соответствия их требованиям ТУ, ГОСТ, ОСТ. Программы этих испытаний значительно шире приемо-сдаточных программ и приближаются к программам приемочных испытаний. Сроки проведения периодических испытаний могут быть сокращены, если результаты приемо-сдаточных испытаний покажут, что качество выпускаемых машин ухудшается по сравнению с данными приемочных испытаний.

В этих случаях программа периодических испытаний составляется таким образом, чтобы могли быть выявлены причины этого ухудшения.

В отдельных случаях испытаниям, проводимым в целом по программам приемочных или с некоторым изъятием из них, придается специальное целевое назначение.

Типовые испытания, которые проводят только при изменениях конструкции, материалов или технологии, могущих повлиять на характеристики машины. Компенсация типовых испытаний обычно повторяет ряд пунктов приемочных, дающих возможность оценить конкретно те данные машины, на которые могли повлиять проведенные изменения. В программу могут быть также введены дополнительные испытания, отсутствующие в программе приемочных испытаний.

Приемочные испытания, которые проводят на опытном (опытных) образце (образцах) перед запуском в серийное производство. Число образцов, которое необходимо взять для проведения приемочных испытаний, устанавливается в стандартах на данный тип машин. Все последующие машины должны выпускаться компенсацией без изменения конструкции, технологии или применяемых для изготовления материалов.

Указанные выше виды испытаний предусмотрены ГОСТ 183-74 и относятся к **промышленным**.

Конструкторские испытания опытных или головных образцов новых типов электрических машин, проводящиеся лабораториями с целью определения соответствия образцов расчетным и конструктивным данным и выявления резервов конструкции.

Испытания на надежность предполагают получение надежностных характеристик электрической машины таких как вероятность безотказной работы, наработка на отказ, закон распределения отказов и т.п. Как правило, это весьма длительные испытания, которые проводятся до отказа большей части испытываемых машин. Это обстоятельство делает испытания на надежность дорогостоящими и им подвергается лишь малая часть выпускаемых машин.

В отдельных случаях испытаниям, проводимым в целом по программам приемочных или с некоторым изъятием из них, придается специальное целевое назначение. **Квалификационные** – испытания, проводимые особой комиссией над компенсациями образцами установочной серии или первой промышленной партии с целью проверки готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме.

Аттестационные – испытания, проводимые для оценки уровня качества продукции при ее аттестации.

В процессе эксплуатации крупных электрических машин в определенные сроки проводятся **эксплуатационные испытания**, целью которых является проверка исправности машины; их программы устанавливаются самим потребителем.

Специальные испытания проводятся дополнительно к приемочным или приемосдаточным испытаниям по специальным программам и имеют целью установление соответствия машины особым требованиям, определяемым стандартами или техническими условиями на машины данного вида и входящими из пределов требований общих стандартов.

Наиболее характерными задачами **исследовательских испытаний** являются: получение исходных данных для проектирования новых типов или технического

усовершенствования существующих; установление возможной экономии применяемых материалов и замены их другими материалами; разработка новых методов расчета и уточнение существующих; проверка влияния новых технологических процессов, применяемых при изготовлении машин, на их качества. В последние годы развиваются **испытания на математических моделях** с применением ЭВМ, т. Е. проводятся испытания без изготовления электрической машины.

В процессе производства электрической машины предусмотрен ряд испытаний ее отдельных ответственных узлов – проверка электрической прочности и сопротивления изоляции обмоток, проверка формы и качества поверхности коллектора, проверка чистоты охлаждающих каналов при непосредственном охлаждении обмотки, а также правильность схемы охлаждения, испытание отдельных механических частей машины на прочность (в частности испытание механической прочности роторов турбогенераторов и бандажей).

1.1.3. Программа контрольных испытаний электрических машин

Ниже приводится перечень испытаний, которым подвергается каждый из видов машин:

- а) измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;
- б) измерение сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии;
- в) испытание при повышенной скорости вращения;
- г) испытание изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками на электрическую прочность;
- д) испытание межвитковой изоляции обмоток на электрическую прочность.

Кроме того, у каждого вида машин постоянного тока (генераторы, двигатели и возбуждители):

- а) определяют величину тока возбуждения генератора или скорость вращения электродвигателя при холостом ходе (для двигателей с последовательным возбуждением опыт проводят при независимом возбуждении);
- б) проверяют номинальные данные машины (мощность, напряжение, ток, скорость вращения, коэффициент полезного действия);
- в) проверяют коммутацию при номинальной нагрузке и кратковременной перегрузке.

У синхронных машин (генераторы, двигатели, компенсаторы) определяют характеристики холостого хода и характеристики установившегося трехфазного короткого замыкания (трехфазных машин) или однофазного короткого замыкания (однофазных машин).

У асинхронных двигателей определяют коэффициент трансформации (для двигателей с фазным ротором), величину тока и потери холостого хода; величину тока и потери короткого замыкания.

Методы испытаний

Ниже рассматриваются установленные ГОСТ 11828—66 методы испытания параметров, общих для всех видов машин.

Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками. Измерение сопротивления изоляции обмоток производят до начала испытания машины при температуре обмотки, равной температуре окружающей среды. Для измерения сопротивления изоляции применяются мегомметры на 500 в для электрических машин с номинальным напряжением до 500 в включительно и мегомметры на 1000 в для электрических машин с номинальным напряжением свыше 500 в.

Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками производят поочередно для каждой независимой электрической цепи при соединении всех прочих цепей с корпусом машины.

Измерение сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии. Под практически холодным состоянием электрической машины понимается температура любой ее части, отличающаяся от температуры окружающей среды не более чем на $+3^{\circ}$. Измерение сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии может производиться одним из следующих методов: а) вольтметра и амперметра; б) одинарным или двойным мостом.

При измерении сопротивления одинарным мостом к измеряемому сопротивлению обмотки прибавляется сопротивление соединительных проводов и контактов. Во избежание получения большой погрешности применять его для измерения сопротивлений, меньших 1 Ом, не допускается. Измерения двойным мостом такого недостатка не имеют.

Во избежание нагрева обмоток при испытаниях не следует принимать \square омпенсу измерительного тока больше 15—20% номинального тока данной обмотки, а длительность его протекания — более 1 мин. Измерение сопротивления производят непосредственно на выводах обмоток.

Испытание машин при повышенной скорости вращения. Испытание производится с целью определения прочности электрической машины при аварийном повышении скорости вращения. Испытание при повышенной скорости вращения проводят как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Многоскоростные электрические машины испытываются при повышенной скорости вращения на наибольшей номинальной скорости. При испытании скорость вращения плавно повышается до испытательной и выдерживается при ней в течение 2 мин, а затем плавно понижается до полной остановки машины. Испытательные скорости вращения:

а) у электродвигателей переменного и постоянного тока с последовательным возбуждением на 20% больше наибольшей, указанной на щитке электродвигателя, но не ниже полуторной номинальной; б) у электродвигателей с регулировкой скорости вращения на 20% больше наибольшей, указанной на щитке электродвигателя;

в) у всех остальных электрических машин на 20% больше номинальной. Повышение скорости вращения испытуемой машины, работающей в режиме генератора, производится путем соответствующего повышения скорости вращения приводного двигателя.

При работе электрической машины в режиме двигателя скорость вращения у бесколлекторных машин переменного тока увеличивается за счет повышения частоты тока питания. После испытания необходимо тщательно осмотреть

вращающиеся части машины, которые не должны иметь повреждений и остаточных деформаций.

У машин, имеющих коллекторы или контактные кольца, рекомендуется измерять биение этих узлов до и после испытания.

Испытание изоляции обмоток на электрическую прочность относительно корпуса машины, между обмотками и между витками. Испытание изоляции обмоток электрической машины производится практически синусоидальным напряжением с частотой 50 Гц, т. е. таким напряжением, у которого коэффициент искажения синусоидальной кривой не превышает 5%. Величина испытательного напряжения устанавливается ГОСТ 183—66 в зависимости от типа, мощности и номинального напряжения машины. Оно колеблется от 500 до 8000 в (для высоковольтных машин), что превышает номинальное напряжение в 3–10 раз.

Испытательное напряжение должно прикладываться плавно или ступенями, не превышающими 5% его окончательного значения. Согласно стандарту испытание должно начинаться с напряжения, не превышающего одну треть испытательного напряжения, при этом время, допускаемое для его подъема от половинного до полного значения, должно быть не менее 10 сек.

Полное испытательное напряжение выдерживают в течение 1 мин, после чего плавно снижают до одной трети его значения, а затем отключают.

Стандартом для машин мощностью до 10 кВт включительно на номинальные напряжения до 525 В при массовом выпуске на конвейере допускается заменять вышеуказанное испытание испытанием в течение 1 сек при напряжении, повышенном на 20% против принятого для обычного испытания.

Испытанию изоляции относительно корпуса подвергают поочередно каждую электрически независимую цепь. Для этого один из выводов источника напряжения подключают к выводу испытываемой обмотки, а второй — к корпусу машины, который должен быть надежно заземлен, и к нему на время испытания должны быть присоединены все остальные обмотки машины. Годной считается обмотка, у которой при испытании не произошло пробоя изоляции или перекрытия ее скользящими разрядами.

Электрическая прочность изоляции обмотки между смежными витками испытывается повышенным напряжением, при приложении которого изоляция должна выдержать испытание в течение 5 мин.

Испытание производят при холостом ходе машины путем повышения подводимого (при испытании в режиме электродвигателя) или генерируемого (при испытании в режиме генератора) напряжения на 30% сверх номинального напряжения. Для электрических машин постоянного тока с числом полюсов более четырех испытательное напряжение определяется исходя из среднего напряжения между смежными коллекторными пластинами, равного 24 В.

Межвитковая изоляция трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором испытывается при неподвижном и разомкнутом роторе, а у двигателя с короткозамкнутым ротором — при холостом ходе.

Таблица 1.1 – Программа приемо-сдаточных и приемочных испытаний для машин средней и большой мощностей по ГОСТ 183-74

№ п/п	Вид испытаний и проверок	Тип машины		
		МПТ	СМ	АД

1	Проверка номинальных данных машины.	ПСИ	-	-
2	Испытание электромашинного возбуждателя по программе приемо-сдаточных испытаний машин постоянного тока.	-	ПСИ	-
3	Испытание при повышенной частоте вращения.	При ПСИ	При ПСИ	При
4	Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками.	При ПСИ	При ПСИ	При ПСИ
5	Определение коэффициента трансформации (для двигателей с фазным ротором).	-	-	При ПСИ
6	Испытание изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками на электрическую прочность.	При ПСИ	При ПСИ	При ПСИ
7	Испытание междувитковой изоляции обмоток якоря на электрическую прочность.	При ПСИ	При ПСИ	При ПСИ
8	Определение тока и потерь холостого хода.	-	-	При ПСИ
9	Определение тока и потерь короткого замыкания.	-	-	При ПСИ
10	Определение тока возбуждения генератора или частоты вращения двигателя при холостом ходе (для двигателей с последовательным возбуждением опыт проводят при независимом возбуждении).	При ПСИ	-	-
11	Измерение сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии.	При ПСИ	При ПСИ	При ПСИ
12	Проверка коммутации при номинальной нагрузке и кратковременной перегрузке по току.	При ПСИ	-	-
13	Определение характеристики холостого хода.	При	При ПСИ	-
14	Определение характеристики установившегося трехфазного короткого замыкания (трехфазных машин) или однофазного короткого замыкания (однофазных машин).	-	При ПСИ	-
15	Проверка состояния уплотнений и определение утечки водорода (для машин с водородным охлаждением).	-	При ПСИ	-
16	Измерение тока возбуждения в режиме ненагруженного перевозбужденного двигателя при номинальном напряжении и номинальном токе статора (якоря) и определение U-образной характеристики (для машин частотой 50 Гц и мощностью не более 1000 кВА).	-	При	-
17	Определение номинального тока возбуждения, номинального изменения напряжения и регулировочной характеристики.	-	При	-
18	Испытание на кратковременную перегрузку по току.	-	При	-
19	Определение рабочей (скоростной) характеристики (для двигателей).	При	-	-
20	Определение внешней характеристики (для генераторов).	При	-	-
21	Определение регулировочной характеристики (для генераторов и двигателей).	При	-	-

22	Испытание на нагревание.	При	При	При
23	Испытание механической прочности при ударном токе короткого замыкания.	-	При	-
24	Определение коэффициента искажения синусоидальности кривой линейного напряжения.	-	При	-
25	Опытное определение индуктивных сопротивлений и постоянных времени обмоток (для машин мощностью свыше 100 кВА).	-	При	-

Продолжение табл. 1.1

26	Испытание электромашинного возбудителя по программе типовых испытаний машин постоянного тока.	-	При	-
27	Определение тока третьей гармонической, если машина предназначена для работы при соединении обмотки статора в треугольник).	-	При	-
28	Определение скорости нарастания напряжения возбудителя для СГ и СК (для машин мощностью свыше 3000 кВА).	-	При	-
29	Определение начального пускового, минимального и входного вращающих моментов и начального пускового тока синхронных двигателей и начального пускового тока синхронных компенсаторов, не имеющих пусковых двигателей.	-	При	-
30	Определение области безыскровой работы (для машин с добавочными полюсами) и проверка качества коммутации.	При	-	-
31	Определение коэффициента полезного действия.	При	При	При
32	Определение коэффициента мощности и скольжения.	-	-	При
33	Испытание на кратковременную перегрузку по току.	-	-	При
34	Определение максимального вращающего момента.	-	-	При
35	Определение минимального вращающего момента в процессе пуска (для двигателей с короткозамкнутым ротором).	-	-	При
36	Определение начального пускового вращающего момента и начального пускового тока (для двигателей с короткозамкнутым ротором).	-	-	При
37	Измерение вибрации.	При	При	При
38	Измерение биения коллектора.	При	-	-
39	Измерение радиопомех.	При	-	-
40	Измерение уровня шума.	При	При	При

Таблица 1.2 – Программа типовых и приемо-сдаточных испытаний трехфазных трансформаторов по ГОСТ 11677-85

№ п/п	Вид испытаний и проверок	Вид испытания
1	Наружный осмотр и проверка на соответствие чертежам	ТИ ПСИ

2	Проверка коэффициента трансформации и группы соединения обмоток	ТИ ПСИ
3	Испытание пробы масла (жидкого диэлектрика) из бака трансформатора	ТИ ПСИ
4	Определение сопротивления обмоток постоянному току	ТИ ПСИ
5	Определение параметров изоляции	ТИ ПСИ

Продолжение табл. 1.2

6	Испытание электрической прочности изоляции одноминутным испытательным напряжением промышленной частоты	ТИ ПСИ
7	Испытание электрической прочности изоляции напряжением промышленной частоты с измерением частичных разрядов (для классов напряжения 150 кВ и выше)	ТИ ПСИ
8	Проверка тока и потерь холостого хода	ТИ ПСИ
9	Проверка тока и потерь короткого замыкания	ТИ ПСИ
10	Испытание бака трансформатора на плотность	ТИ ПСИ
11	Испытание устройств переключения ответвлений обмоток	ТИ ПСИ
12	Измерение сопротивления нулевой последовательности	ТИ
13	Испытание внутренней изоляции грозowymi импульсами напряжения	ТИ
14	Испытание электрической прочности воздушных промежутков	ТИ
15	Испытание на нагревание	ТИ
16	Испытание на стойкость при коротком замыкании (для трехфазных трансформаторов мощностью до 125 МВ*А включительно)	ТИ
17	Испытание бака на механическую прочность	ТИ
18	Испытание активной части на механическую прочность	ТИ
19	Проверка уровня звука	ТИ

1.2. Методика проведения испытаний

1.2.1. Задачи методики и требования к ней

Методика испытаний призвана обеспечить необходимую и достаточную точность определения искомой величины.

Точность методики промышленных испытаний должна давать возможность уверенного определения отклонения значений контролируемых величин не хуже

чем (1/5...1/10) допуска установленного на них. Так например, если допуск на сопротивление обмотки составляет 5 %, то точность измерения сопротивления должна быть не хуже 1 %.

Для исследовательских испытаний требуемая точность зависит от конкретных задач. В любом случае она определяется минимальным изменением исследуемого параметра, которое должно быть измерено.

Если искомая величина является функцией нескольких переменных, например $Y = f(x_1, x_2, x_3)$, то в методике должно быть предусмотрено отдельное определение их влияния на эту функцию: все параметры должны быть контролируемыми и регулируемыми. Проводится серия опытов при изменении поочередно в заданных пределах одного из параметров и постоянстве остальных. Полученное в результате семейство кривых определяет Y для всех x .

В числе факторов, влияющих на исследуемый параметр, могут оказаться также и случайные (помехи), например связанные с условиями испытаний и вызывающие обусловленную ими погрешность. Методика должна предусматривать возможность сведения этой погрешности к минимальной одним из следующих способов.

Первый способ заключается в поддержании, если это возможно, влияния побочных факторов на неизменном уровне. Если это условие невыполнимо, то в изучении, например путем моделирования, влияния этих факторов на исследуемую величину, контроле их уровня и внесении соответствующих корректив в результаты измерения.

Примером второго способа уменьшения подобной погрешности является контроль температуры при измерении сопротивления обмоток в практически холодном состоянии и приведение его значений к единой стандартной температуре.

Наиболее сложным является планирование массовых испытаний в тех случаях, когда исследуемые параметры сами являются случайными величинами, например – результатом не поддающихся прямому контролю технологических факторов или воздействующих в процессе испытания побочных факторов, которые также носят случайный характер.

В этом случае при проведении испытаний может быть использована так называемая теория планирования эксперимента, являющаяся разделом теории математической статистики. Планирование эксперимента это – процедура определения числа опытов и условий их проведения, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. “Эксперимент” и “опыт” здесь надо понимать в широком смысле как математическое исследование закономерностей изменения выходных параметров при заданном изменении воздействующих факторов.

Во всех случаях выбора методики должен быть проведен тщательный анализ предельных погрешностей, формирующих общую погрешность.

1.2.2. Точность методики

Точность методики характеризуется наибольшей относительной погрешностью – погрешностью метода (ПМ).

Под погрешностью метода понимается погрешность в определении искомой величины, которая состоит из погрешности, связанной со способом ее выявления

(ПВ), и погрешности, которую дает применяемая измерительная система (ПИ), состоящая из датчика, измерительного тракта и измерительного прибора.

Погрешность способа выявления (ПВ) определяется влиянием на датчик измерительной системы посторонних воздействий, что связано с выбором режима испытаний, способом измерения и вычисления искомой величины (прямое или косвенное).

Важно подчеркнуть, что простое суммирование погрешностей дает необоснованно завышенную погрешность. Наиболее вероятное значение погрешности метода определяется уравнением

$$ПМ \approx \sqrt{ПВ^2 + ПИ^2}$$

При испытаниях электрических машин возникает необходимость в измерении электрических и неэлектрических величин. Требования к измерительным приборам и способам измерения определяются ГОСТ 11828-86 “Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний”.

Для измерения электрических величин (напряжения, силы тока, мощности, сопротивления и т.п.) при частотах до 400 Гц включительно должны применяться электроизмерительные приборы класса точности не ниже 0,5, а для измерения сопротивления изоляции обмоток – класса точности не ниже 2,5. При частотах свыше 400 Гц класс точности измерительных приборов должен быть не ниже 2,5.

Необходимая точность измерений достигается при условии, что приборы, коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов тока и напряжения выбираются таким образом, чтобы измеряемые значения параметров электрических машин находились в пределах (30...95)% шкалы приборов.

При определении мощности трехфазных машин способом двух ваттметров измеряемые токи и напряжения должны быть не ниже 30 % от номинальных токов и напряжений применяемых приборов.

Если при испытаниях измерения производятся более чем одним прибором, то отсчеты по всем приборам для каждого измерения рекомендуется производить одновременно.

При проведении приемосдаточных испытаний машин массового выпуска стремятся максимально механизировать и автоматизировать процесс испытаний, используя автоматические схемы измерений. В этих случаях допускается применение *отдельных* электроизмерительных приборов с классом точности не ниже 1,5 при условии, что максимальная ошибка измерения не превысит 8 % от значения допускаемого отклонения на контролируемый параметр. Для измерения частоты до 60 Гц в этих случаях допускается применение частотомеров класса точности не ниже 2,0, а для измерения более высоких частот – класса точности 2,5.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите причину, по которой возникла необходимость в стандартизации методов испытания электрических машин.
2. Что понимается под качеством электрической машины?
3. Перечислите основные группы показателей качества электрических машин.
4. Какие группы показателей качества электрических машин требуют проведения испытаний?

5. Назовите основные параметры, входящие в группу показателей назначения.
6. Дайте общую характеристику показателей надежности.
7. Какова цель проведения промышленных испытаний?
8. Назовите задачи исследовательских испытаний.
9. В чем заключается главная задача методики испытаний?
10. Назовите основное требование к точности промышленных испытаний.
11. Чем характеризуется точность методики проведения испытаний?
12. Какой класс точности должны иметь измерительные приборы при проведении промышленных испытаний?

[содержание](#)

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ И КПД

2.1. Потери в электрических машинах

2.1.1. Характеристики электрических машин

Под характеристикой электрической машины понимается функциональная зависимость между величинами, определяющими ее свойства, как правило представляемая в наглядной графической форме.

Наибольший интерес представляют характеристики, определяющие эксплуатационные свойства электрических машин. Эти характеристики могут быть определены непосредственно из опыта или получены аналитически, например на основании схем замещения. Основные их виды представлены в табл. 2.1.

Перечисленные в табл. 2.1. характеристики относятся к установившимся режимам работы.

К числу основных характеристик неустановившихся режимов работы двигателей относятся пусковые характеристики: $M = f(t)$, $n = f(t)$, $I = f(t)$.

Таблица 2.1 – Характеристики электрических машин

Режим работы	Название характеристики	Функциональная зависимость
Генераторный	Внешние Регулировочные Нагрузочные	$U = f(I)$ $I_B = f(I)$ $U = f(I)_B$
Двигательный	Механическая* Электромеханические* U – образные (для СД)*	$n = f(M)$ $I, \cos \varphi = f(M)$ $I = f(I)_B$
Генераторный и двигательный	Энергетическая* КПД*	$P_1 = f(P_2)$ $\eta = f(P_2)$

К основным характеристикам неустановившихся режимов работы двигателей относятся пусковые характеристики: $M = f(t)$, $n = f(t)$, $I = f(t)$.

Неустановившиеся режимы работы генераторов характеризуются изменением напряжения во времени $U = f(t)$ при внезапном нагружении или отключении нагрузки и зависимостью тока от времени при внезапном коротком замыкании $I_K = f(t)$. Наряду с этим важным эксплуатационным показателем генераторов является качество энергии, характеризующее в первую очередь, стабильностью по частоте, форме и амплитуде кривой напряжения (для генераторов переменного тока), а также – значением пульсационных составляющих напряжения (для генераторов постоянного тока).

2.1.2. Методы нагрузки электрических машин

С целью уменьшения расхода электроэнергии во всех случаях, где это целесообразно, а для крупных машин – всегда, при испытаниях должна применяться система возврата энергии, прошедшей через испытываемую машину, в сеть. Различают системы *возврата энергии* и *взаимной нагрузки*.

В первом случае нагрузка испытываемой машины (или ее привод) могут компенсироваться с помощью электрической машины другого типа или даже другого рода тока. При этом места потребления и возврата энергии отделены друг от друга относительно длинной энергетической цепочкой, в которой имеют место потери.

В случае взаимной нагрузки для испытания используются две близкие по мощности, а еще лучше – одинаковые электрические машины, из которых одна работает двигателем, а другая – генератором. Точки отбора и возврата энергии при этом совпадают, и из сети потребляется лишь мощность равная потерям в этих двух машинах.

2.1.3. Общая характеристика потерь

В электрических машинах можно выделить следующие составляющие потерь: механические ($\Delta p_{\text{мех}}$), магнитные или потери в стали ($\Delta p_{\text{ст}}$), электрические в основных обмотках ($\Delta p_{\text{м}}$), электрические потери на возбуждение ($\Delta p_{\text{в}}$), электрические потери в щеточных контактах ($\Delta p_{\text{щ}}$), добавочные потери при нагрузке ($\Delta p_{\text{д}}$).

Определение перечисленных составляющих известно из курса “Электрические машины”. Однако для нахождения потерь при испытаниях необходима конкретизация в их определении.

Механические потери обусловлены трением всех видов во вращающихся частях машины, в частности: в подшипниках, подпятниках и уплотнениях вала, щеток о коллектор и контактные кольца, вращающейся части машины о среду заполняющую полость машины, в каналах вращающейся части обусловленных работой вентилятора, водяных и масляных насосов и иных механизмов, связанных с валом машины и предназначенных для ее обслуживания. Как следует из сказанного, точное аналитическое их определение практически исключено.

Магнитные потери (потери в стали) обусловлены гистерезисом и потерями от вихревых токов при перемагничивании сердечника якоря, а также – вихревыми токами на поверхностях сердечников от различного рода пульсаций магнитного поля и вихревыми токами от потоков рассеяния во всех прочих частях машины (активных и конструктивных). За исключением первой группы перечисленных потерь в стали, все остальные относятся к категории так называемых добавочных потерь в стали. Их точная оценка очень сложна, а порой просто невозможна.

Электрические потери в основных обмотках определяются как $I^2 R$, где R – суммарное сопротивление обмотки якоря и других обмоток, соединенных последовательно с обмоткой якоря, I – ток в цепи обмотки якоря. Сопротивление обмоток измеряется на постоянном токе и пересчетом приводится к расчетной рабочей температуре, которая составляет: 75°C для классов изоляции A, E, B и 115°C для классов изоляции F и H .

В случаях, когда измерение сопротивления практически невозможно из-за малого его значения, допустимо вычисление сопротивления по геометрическим размерам соответствующих обмоток. Если же невозможность измерения обусловлена недоступностью (например, обмотки к.з. роторов асинхронных двигателей), компенсируются косвенные методы определения потерь в таких обмотках. Например, электрические потери в обмотке ротора асинхронного двигателя определяются как

$$\Delta p_{M2} = s \cdot P_{ЭМ},$$

где $P_{ЭМ} = P_1 - \Delta p_{ст} - \Delta p_{M1}$.

Потери на возбуждение определяются как $I_B^2 \cdot R_B$, где R_B – сопротивление цепи обмотки возбуждения и создаются током возбуждения I_B как в самой обмотке возбуждения, так и в постоянно соединенных с ней сопротивлениях, служащих для ограничения или регулирования тока возбуждения. Если же обмотка возбуждения питается непосредственно от напряжения на выводах возбуждаемой машины, то потери на возбуждение вычисляются как произведение этого напряжения на ток возбуждения.

Электрические потери в щетках выделяются в переходных контактах щеток на коллекторе или контактных кольцах и равны произведению тока на падение напряжения в переходном контакте (ΔU), условно принимаемом не зависящем ни от тока ни от полярности контакта и равным (на один контакт): для угольных и графитных щеток 1 В , для металлоугольных и металлографитных $0,3 \text{ В}$.

Добавочные потери при нагрузке связаны в основном с вихревыми токами в активных и конструктивных частях машины от полей рассеяния, создаваемых током нагрузки. Оценить точно эти потери достаточно сложно, а порой невозможно. Поэтому для всех машин эти потери в соответствии с ГОСТом оцениваются приближенно в процентах от номинальной электрической мощности – отдаваемой для генераторов и подводимой для двигателей. Они составляют: в машинах постоянного тока некомпенсированных 1%, в компенсированных, синхронных и асинхронных – 0,5%. При нагрузках, отличных от номинальной, добавочные потери устанавливают пропорционально квадрату тока в рабочих обмотках.

Потери и КПД электрических машин определяются прямым или косвенным методом. Прямой метод менее точен, чем косвенный, поэтому его рекомендуют применять лишь для электрических машин с относительно малым значением КПД – не более 85 %. Недостаточная точность этого метода объясняется большей относительной погрешностью при сопоставлении близких по величине параметров (подводимой и отдаваемой мощности), в связи с большей точностью косвенного метода его можно применить и для электрических машин со значениями КПД менее 85 %.

2.2. Измерение КПД

2.2.1. Физическое обоснование методов экспериментального определения КПД

Под коэффициентом полезного действия (КПД) любой машины понимается отношение полезной (отдаваемой) мощности (P_2) к затрачиваемой (подводимой) активной мощности (P_1) обычно выражаемое в процентах

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \text{ \%}.$$

В случае генератора полезной мощностью является отдаваемая им электрическая мощность, которая легко поддается непосредственному измерению, а затрачиваемой мощностью – подводимая к нему механическая мощность, определение которой сопряжено со значительной погрешностью.

В случае двигателя полезной мощностью является трудно измеряемая механическая мощность, а затрачиваемой – подводимая электрическая мощность. При любом направлении преобразования энергии неизбежны различного рода потери. Если обозначить общую величину потерь через $\Sigma\Delta p$, то полезная мощность будет равна

$$P_2 = P_1 - \Sigma\Delta p$$

или же затрачиваемая мощность запишется как

$$P_1 = P_2 + \Sigma\Delta p.$$

В таком случае можно получить следующие удобные для экспериментального определения уравнения для КПД:

– для двигателя $\eta = 1 - \frac{\Sigma\Delta p}{P_1}$

– для генератора $\eta = 1 - \frac{\Sigma\Delta p}{P_2 + \Sigma\Delta p}.$

В соответствии с уравнениями для КПД ГОСТ 25941-83 оговаривает два вида методов его определения:

1. *Методы непосредственного определения*, когда производится измерение как отдаваемой, так и подводимой мощностей.
2. *Методы косвенного определения*, когда измерению подвергается либо какая-нибудь из мощностей и потери (в сумме или порознь), либо только потери, а измерение мощностей вообще не производится.

Второй вид методов в принципе отличается большей точностью, чем первый, при котором КПД рассматривается как отношение двух более или менее близких друг к другу величин, одна из которых является к тому же механической мощностью “плохо” поддающейся измерению.

Поэтому методы непосредственного определения КПД могут применяться только в тех случаях, когда КПД настолько низок, что возможные ошибки измерения в особенности механической мощности перестают играть существенную роль.

Кроме того, найденное таким образом значение КПД зависит от состояния, в котором находилась машина в момент его определения, в частности, от температуры обмоток. Поэтому для одной и той же машины различные опыты могут дать различное значение КПД.

По указанным причинам стандарт предписывает применение методов первого вида для машин с гарантированным значением КПД не выше 50 %.

Как отмечалось выше потери, возникающие в электрической машине, зависят не только от режима ее работы, но в известной степени и от температуры ее частей.

Для возможности сравнения различных машин друг с другом при определении КПД косвенными методами принято относить КПД к некоторой условной температуре, называемой расчетной рабочей температурой.

Каким бы методом не производилось измерение КПД, машина при этом должна быть во вполне собранном и совершенно исправном состоянии.

От КПД определенного одним из указанных методов в качестве главного экономического показателя машин для номинальной нагрузки или некоторой ее части и являющегося, как было указано, величиной условной, следует отличать \square омпенсательный КПД при произвольной нагрузке и фактической температуре частей машины в момент его определения.

2.2.2. Методы непосредственного определения потерь и КПД

Для непосредственного определения потерь и КПД используются следующие методы.

Метод измерения механической мощности. Механическая мощность на валу машины определяется как произведение измеренного вращающего момента на угловую скорость вращения. Эта мощность в случае двигателя является отдаваемой, а в случае генератора – подводимой. Вращающий момент и скорость вращения определяются одним из описанных ниже методов.

Метод измерения электрической мощности. Он применяется при определении потерь и КПД агрегата, состоящего как минимум из двух механически соединенных машин (двигатель – генератор). С помощью электроизмерительных приборов находят подводимую и отдаваемую электрические мощности. Их разность определяет полные потери в машинах.

Его частный случай, называемый методом двигатель – генератора (метод Г – Д), состоит в том, что две одинаковые машины сопрягаются на одном валу и одна из них работает двигателем, а другая – генератором.

Электрическая мощность, подводимая к двигателю и электрическая же мощность, отдаваемая генератором, измеряются электроизмерительными приборами. Тогда имеем:

для КПД двигателя $\eta_{\text{д}} = \frac{P_{2\text{д}}}{P_{1\text{д}}}$;

для КПД генератора $\eta_{\text{г}} = \frac{P_{2\text{г}}}{P_{1\text{г}}}$.

Общий КПД, очевидно, равен их произведению

$$\eta_{\text{дг}} = \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{г}} = \frac{P_{2\text{д}}}{P_{1\text{д}}} \cdot \frac{P_{2\text{г}}}{P_{1\text{г}}} = \frac{P_{2\text{г}}}{P_{1\text{д}}}.$$

В предположении, что КПД обеих машин примерно одинаковы, можно получить его значение в виде

$$\eta_{\text{д}} \approx \eta_{\text{г}} \approx \sqrt{\frac{P_{2\text{г}}}{P_{1\text{д}}}}.$$

Метод принципиально пригоден для машин всех видов, но практически наиболее удобен для машин постоянного тока.

Метод тарированной вспомогательной машины. Испытуемая машина соединяется с тарированной машиной. В зависимости от того двигателем или генератором является испытуемая машина, тарированная машина должна быть соответственно генератором или двигателем.

Тарирование вспомогательной машины, т.е. определение подводимой и отдаваемой ее мощностей, производится (для повышения точности) методом отдельных потерь.

При испытании двигателя его КПД находят как отношение мощности отдаваемой тарированной машиной и потерь в ней к мощности подводимой к испытуемой машине.

При испытании генератора его КПД определяется как отношение мощности отдаваемой испытуемой машиной к разности между мощностью подводимой к тарированной машине и потерями в ней.

2.2.3. Методы косвенного определения потерь и КПД

Косвенные методы определения потерь и КПД, называемые также методами отдельных потерь, основаны на том, что расчетным или опытным путем находят отдельно каждый вид потерь, суммируют их, а КПД определяют по уравнениям (*) или (**).

Используются следующие методы косвенного определения потерь и КПД.

Метод взаимной нагрузки. Данный метод состоит в том, что две одинаковые машины сопрягаются на одном валу и работают друг на друга, одна в режиме двигателя, другая – в режиме генератора.

Тогда сумма потерь в одной машине может быть найдена как

$$\Sigma \Delta p = \frac{P_1 - P_2}{2}.$$

Метод пригоден главным образом для машин постоянного тока. В принципе он может быть использован и для синхронных машин, однако осуществление его в этом случае настолько сложно, что практически не применяется.

Метод отдельных потерь. Этот метод является наиболее точным из всех рассмотренных и пригоден для электрических машин всех видов.

Каждый вид потерь определяется отдельно способами специфическими для конкретного вида машины.

При этом, как правило, потери в стали и механические определяются из опыта холостого хода, основные потери в цепях рабочих обмоток вычисляются по измеренным значениям сопротивлений обмоток и токам заданным или определенным из опытов нагрузки и т.п.

Преимущество косвенных методов определения КПД, особенно метода отдельных потерь, перед другими методами состоит в том, что вероятная относительная ошибка в измерении мощности имеет примерно одинаковый порядок как при непосредственном измерении отдаваемой и подводимой мощностей, так и при измерении отдельных потерь. Но поскольку отдельный вид потерь составляет лишь \square олую долю отдаваемой или подводимой мощности, то относительная ошибка при определении КПД косвенными методами может быть оценена по крайней мере во столько раз меньшей во сколько раз в среднем измеряемые потери меньше суммы измеряемых подводимой и отдаваемой мощностей.

Вопросы для самоконтроля

Что понимается под характеристикой электрической машины?

2. Перечислите основные эксплуатационные характеристики генераторов в установившемся режиме работы.

3. Назовите основные эксплуатационные характеристики двигателей в установившемся режиме работы.

4. Какие эксплуатационные характеристики относятся к неустановившимся режимам работы генераторов?

5. Перечислите основные эксплуатационные характеристики неустановившихся режимов работы двигателей.

6. Назовите способы нагружения электрических машин.

7. Какие виды потерь в электрических машинах не поддаются аналитическому определению?

8. Как учитываются добавочные потери в электрических машинах при нагрузке?

9. Назовите группы методов определения потерь и КПД электрических машин.

10. В каком случае КПД электрической машины допускается определять непосредственными методами?

11. Назовите методы непосредственного определения КПД.

12. Перечислите методы косвенного определения КПД.

[содержание](#)

3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В процессе испытания электрических машин приходится определять большое количество неэлектрических величин. Последние могут быть определены как электрическими, так и неэлектрическими способами.

Устройство для измерения неэлектрических величин электрическим способом в общем случае состоит из датчика и измерительного блока, включающего в себя усилитель, измерительный прибор и блок питания.

Усилитель в ряде случаев может отсутствовать. В некоторых случаях \square омпентель состоит из предварительного (катодного или эмиттерного повторителя) и основного блока. Такое разделение имеет место при установке датчиков на расстоянии от измерительного блока, где длинные кабели могут являться источниками помех. В этом случае катодный повторитель, обладающий большим входным и малым выходным сопротивлениями, располагается вблизи датчика, а длинный кабель подключается к низкоомной нагрузке повторителя, не оказывая заметного влияния на передачу сигнала к основному усилителю.

Измерительные приборы со стрелочными или цифровыми индикаторами (показывающие приборы) обладают тем преимуществом, что позволяют получать результат непосредственно в момент измерения. Регистрирующие приборы (самописцы, осциллографы, магнитографы и т.п.) требуют дополнительной ручной или \square ошинной обработки полученной информации.

Недостаток показывающих приборов состоит в том, что они могут быть применены только для статических или медленно изменяющихся процессов. Поэтому в ряде случаев целесообразно использовать как показывающие, так и регистрирующие приборы.

В качестве датчиков применяются резистивные, емкостные, пьезоэлектрические, электромагнитные, электронные или гальванические преобразователи механических величин в электрические.

3.1. Измерение электромеханических параметров

3.1.1. Измерение вращающих моментов

Из уравнения движения (уравнения равновесия моментов)

$$M = M_c + M_d = M_c + J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где M – вращающий момент на валу двигателя,

M_c – момент сопротивления механизма приводимого в движение,

M_d – динамический момент,

следует, что вращающий момент можно измерить статическим методом (при $M_d = 0$ и $M_c = const$); динамическим методом при разгоне двигателя (при $M_c = 0$) и методом суммарного момента ($M_c + M_d$), измеряя момент реакции статора испытуемого двигателя.

Статический метод измерения момента позволяет построить статическую механическую характеристику двигателя по точкам, измеряя величину момента для нескольких значений скорости вращения. Недостаток метода состоит в том, что при снятии отдельных точек механической характеристики, особенно при малой скорости вращения, двигатель нагревается и поэтому снижается точность измерений.

При статическом методе для определения вращающего момента используются специальные устройства – моментомеры различных конструкций. Наибольшее распространение получили тормозные моментомеры, состоящие из тормозного устройства и измерителя момента. Тормозное устройство может быть фрикционным, гидравлическим, аэродинамическим, электромашинным, электромагнитным и т.п. Измерительные устройства выполняются крутильными, маятниковыми, рычажными, компенсаторными.

Динамический метод определения вращающих моментов основан на измерении ускорения электродвигателя при разгоне от неподвижного состояния до номинальной скорости. В этом методе для увеличения времени разгона на валу испытуемого двигателя укрепляется маховик с большим моментом инерции. Динамический момент определяется акселерометрическим (с помощью датчиков угловых ускорений), тахометрическим (с помощью тахометров или частотных датчиков) или угловым (с помощью измерителя углового перемещения) методами.

При использовании метода суммарного момента измеряют реактивный момент, действующий на статор испытуемого двигателя. Результаты измерений могут быть представлены в виде осциллограмм.

3.1.2. Измерение частоты вращения

Измерение скорости вращения осуществляется следующими методами: прямого преобразования, сравнения и частотными.

Методы прямого преобразования заключаются в том, что скорость вращения определяют, используя известные зависимости, например центробежной силы, вращающего момента, ЭДС, давления и других величин от скорости вращения. Поэтому в этом методе применяют соответствующие тахометры.

Магнитные тахометры состоят из постоянного магнита соединенного с валом испытуемого двигателя и металлического (немагнитного) элемента (стакан, диск и т.п.) связанного с пружиной и стрелкой. При вращении магнита в неподвижном элементе индуцируется ток, который, взаимодействуя с магнитом, создает вращающий момент пропорциональный скорости вращения и , например угол закручивания пружины является мерой величины скорости вращения.

Магнитоэлектрические тахометры состоят из тахогенератора постоянного тока, линии связи и вольтметра, отградуированного в единицах скорости вращения. При постоянном магнитном потоке ЭДС тахогенератора пропорциональна скорости вращения.

Центробежные тахометры используют зависимость величины центробежной силы от угловой скорости

$$F = m \cdot l \cdot \omega^2,$$

где m – масса вращающегося тела, а l – расстояние от центра тяжести тела до оси вращения.

Гидравлический тахометр конструктивно представляет собой диск с радиальными и осевыми каналами, заключенный в герметически закрытую камеру, заполненную жидкостью. При вращении диска под действием центробежных сил увеличивается давление в камере. Давление измеряется гидравлическим

манометром, шкала которого нелинейна и градуируется опытным путем в единицах скорости вращения.

Методы сравнения основаны на сопоставлении измеряемой скорости вращения с эталонной, а поэтому являются более точными, чем методы прямого преобразования. Конструктивно тахометры, основанные на методе сравнения, можно разделить на фрикционные, стробоскопические и вибрационные.

Фрикционные тахометры работают на следующем принципе. Оператор изменяет передаточное отношение фрикционного вариатора до тех пор пока редуцированная скорость вращения эталонного двигателя не станет равной измеряемой.

Стробоскопический тахометр имеет ряд конструктивных решений. Наиболее удобны стробоскопы со световыми импульсами, которыми периодически освещается вал испытуемого двигателя. Частота световых импульсов регулируется электронным генератором таким образом, чтобы остановить вращение соответствующей метки на валу. Максимальная частота световых импульсов при этом будет соответствовать частоте вращения вала.

В вибрационных тахометрах производится сравнение измеряемой частоты вращения с резонансной частотой соответствующего вибратора.

Частотные методы состоят в преобразовании соответствующими датчиками измеряемой скорости вращения в частоту электрических импульсов, измеряемых частотомером.

Каждый из рассмотренных тахометров может иметь непосредственное соединение с валом испытуемого двигателя или – быть бесконтактным. Для испытания микроэлектродвигателей используются бесконтактные тахометры, поскольку они не создают дополнительную нагрузку на валу испытуемого двигателя, а следовательно не искажают результаты измерений.

3.1.3. Измерение скольжения асинхронных электродвигателей

Перечисленные методы измерения скорости вращения не могут быть применены для определения скольжения асинхронной машины, поскольку ведут к большой погрешности измерения. Это объясняется тем, что частота вращения ротора асинхронного двигателя при номинальной нагрузке весьма близка к частоте сети. Поэтому даже незначительная погрешность в измерении частоты вращения приведет к большой погрешности в определении скольжения.

Необходимую точность в определении скольжения можно получить измеряя непосредственно разность $(n_c - n)$, где n_c – скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость), а n – скорость вращения ротора.

Известно несколько способов измерения скольжения, основанных на указанном принципе: амперметром постоянного тока магнитоэлектрической системы (для асинхронных двигателей с фазным ротором), индукционной катушкой, стробоскопическим методом с применением газоразрядной лампы. Из перечисленных методов наиболее универсальным и удобным, а поэтому широко применяемым для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, является стробоскопический метод.

При использовании этого метода на торце вала испытуемого двигателя укрепляется легкий диск с нарисованными на нем секторами, зачерненными через

один, т.е. количество зачерненных секторов равно числу пар полюсов двигателя. Диск освещается газоразрядной лампой, питаемой напряжением той же частоты, что и испытываемый двигатель.

В газоразрядных лампах свечение наступает тогда, когда приложенное напряжение превышает определенное значение, называемое порогом зажигания. Кроме того, свечение является поляризованным, т.е. в зависимости от направления тока светится один из электродов. Для удобства проведения измерений целесообразно в цепь лампы включить диод. Тогда диск будет освещаться только одной вспышкой за период. В таком случае при частоте вращения ротора, совпадающей с частотой питающего напряжения, ротор при освещении его газоразрядной лампой будет казаться неподвижным (случай синхронного вращения). В асинхронном двигателе из-за скольжения зачерненные сектора диска будут казаться медленно вращающимися в сторону противоположную вращению вала. Если за произвольно взятый промежуток времени t (с) сосчитать количество оборотов N любого из секторов на диске, то скольжение будет равно

$$s = \frac{N}{t \cdot f_1} = \frac{f_2}{f_1}.$$

Для получения более четкого изображения секторов на вращающемся диске питание газоразрядной лампы следует производить не синусоидальным, а пилообразным напряжением, включив последовательно с ней дроссель насыщения.

3.1.4. Измерение угла нагрузки синхронных машин

Поскольку фаза ЭДС синхронной машины жестко связана с угловым положением индуктора, определение угла нагрузки (θ) при нагружении машины сводится к определению угла поворота вала относительно вектора напряжения.

При холостом ходе в генераторном режиме и, если механические потери относительно малы, то и в двигательном режиме, угол нагрузки равен нулю. Это позволяет определить точку его отсчета.

Наиболее просто угол нагрузки может быть определен с помощью строботометра. При этом способе на вращающуюся вместе с ротором деталь наносится метка, освещаемая стробоскопом с частотой вспышек, синхронизированной с частотой напряжения синхронной машины.

При работе машины с постоянной нагрузкой метка остается неподвижной. При изменении нагрузки она смещается на угол, соответствующий изменению нагрузки.

Для отсчета угла нагрузки в цепь синхронизации вспышек стробоскопа включается небольшой измерительный фазорегулятор (фазовращатель), выполненный например на базе трехфазного сельсина с угловой шкалой поворота ротора.

При холостом ходе синхронной машины фазовращатель ставится на нулевую отметку шкалы и против метки на детали, связанной с валом, на неподвижной части синхронной машины ставится соответствующая метка.

При нагрузке метка на вращающейся части смещается относительно неподвижной. Поворотом ротора фазовращателя метки совмещаются и таким образом угол отсчитывается по шкале фазовращателя.

Необходимо иметь в виду, что чем больше пар полюсов имеет синхронная машина, тем меньший физический (геометрический) угол соответствует электрическому углу, в которых измеряется угол нагрузки. Поэтому для получения достаточно точных отсчетов для размещения метки должны выбираться детали большого диаметра.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите наиболее удобный и распространенный способ измерения неэлектрических величин.
2. В каких случаях в качестве индикаторов могут быть использованы показывающие электроизмерительные приборы?
3. На базе какого уравнения построены все существующие методы измерения вращающего момента?
4. Что представляет собой статический метод измерения вращающего момента? Его достоинства и недостатки.
5. Какой из методов измерения вращающих моментов проще всего реализуется на практике?
6. Назовите достоинство метода измерения суммарного момента.
7. Перечислите существующие методы измерения скорости вращения вала электрической машины.
8. На каком принципе основаны методы измерения скорости вращения, называемые методами прямого преобразования?
9. Какой из методов измерения скорости вращения, относящийся к группе методов прямого преобразования, нашел наибольшее практическое применение?
10. Назовите группу методов измерения скорости вращения, обеспечивающую наибольшую точность.
11. Какие два метода измерения скорости вращения наиболее популярны?
12. По какой причине существующие методы измерения скорости вращения не могут быть использованы при измерении скольжения асинхронных двигателей?
13. Какой принцип лежит в основе методов измерения скольжения асинхронных двигателей?
14. Каким методом измеряется угол нагрузки синхронных машин?

[содержание](#)

4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температуру обмоток определяют при испытаниях двигателей на нагревание. Испытания на нагревание производят для определения абсолютной температуры или превышения температуры обмоток или частей электродвигателя относительно температуры охлаждающей среды при номинальной нагрузке.

Срок службы изоляции сокращается вдвое, если температура, при которой она работает, на 8°C превышает предельную для данного класса нагревостойкости.

ГОСТ 8865-70 устанавливает следующие классы нагревостойкости электроизоляционных материалов и характерные для них предельные температуры.

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Предельная температура θ , °C	90	105	120	135	155	180	>180

Испытание на нагревание может осуществляться при непосредственной нагрузке и косвенным методом (нагревание от основных потерь). Испытания производят до установившейся температуры при неизменной нагрузке. За установившуюся принимают температуру, которая в течение одного часа изменяется не более, чем на 1 °C. В качестве нагрузки при испытаниях на нагревание применяют различные устройства, наиболее простые из них различные тормоза (колодочные, ленточные и т.д.), а также нагрузки, обеспечиваемые генератором, работающим на реостат.

При испытаниях на нагревание определяют не только абсолютную температуру, но и превышение температуры обмоток над температурой охлаждающей среды (табл. 4.1).

4.1. Общая характеристика датчиков температуры

В качестве датчиков температуры или теплоприемников нашли наибольшее применение термопары – приборы, основанные на явлении термоэлектричества. Термопара представляет собой сплав разнородных металлов (или сплавов), например медь – константан, хромель – алюмель, и т.п. Следует иметь в виду, что термопары измеряют не температуру места установки спая, а превышение температуры места установки над температурой окружающей среды, т.е. температуру противоположной пары электродов, к которым подключается измерительный прибор.

Термометры сопротивления (терморезисторы) относятся к одним из наиболее точных преобразователей температуры. В частности, платиновые термометры сопротивления позволяют измерять температуру с погрешностью 0,001°C. Для измерения температуры применяются металлы, обладающие высокостабильным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), т.е. линейной зависимостью сопротивления от температуры. К таким материалам относятся платина и медь.

Таблица 4.1. Предельно допустимые превышения температур частей двигателей

Части двигателя	Предельно допустимые превышения температуры, $\Delta\theta$ °C, при изоляционных	Метод измерения температуры

	Материалах класса нагревостойкости					
	A	E	B	F	H	
Обмотки переменного тока двигателей 5000 $kB \cdot A$ и выше или с длиной сердечника 1 м и более	60	70	80	100	125	Сопротивления температурных индикаторов, уложенных в пазы
То же, но менее 5000 $kB \cdot A$ или с длиной сердечника менее 1 м	50*	65*	70**	85**	105**	Термометра или сопротивления.
Стежневые обмотки роторов АД	65	80	90	110	130	Данные приведены для измерения методом термометра.
Контактные кольца, сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с обмотками	60	70	80	90	110	Термометра или сопротивления.

Продолжение табл. 4.1

То же, не соприкасающиеся с обмотками	60	75	80	110	125	Термометра или температурных индикаторов, уложенных в пазу
---------------------------------------	----	----	----	-----	-----	--

* – при измерении методом сопротивления допускаемая температура увеличивается на 10 °С; ** – то же, на 15°С; *** – то же, на 20°С.

Терморезисторы делят на металлические и полупроводниковые. Выбор материала для терморезистора определяется химической инертностью его к измеряемой среде и стабильностью ТКС. Полупроводниковые терморезисторы отличаются от металлических меньшими габаритами и тем, что их ТКС отрицателен.

Следует иметь в виду еще одну характеристику термопар и термометров сопротивления – их инерционность, которая для различных их типов может колебаться в пределах от 9с до 4 мин.

Отдельную группу составляют измерители разового действия, к которым относятся теплочувствительные краски и легкоплавкие металлы. Эти измерители позволяют лишь ответить на вопрос превысила ли температура допустимое значение или нет.

Отдельную группу теплоприемников образуют сравнительно недавно разработанные низкотемпературные фотоэлементы (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы), работающие в инфракрасном спектре частот и позволяющие, таким образом, фиксировать температуру нагретого тела на расстоянии.

Как видно из табл.4.1, предусмотрены различные методы измерения температур в зависимости от конкретных условий и частей машины, у которых необходимо проводить измерения.

Метод заложенных теплоприемников.

Теплоприемниками, которые закладываются при изготовлении машины, могут служить термометры сопротивления, полупроводниковые терморезисторы, термопары.

Они обычно закладываются в места машины, где ожидаются наибольшие температуры. Конструктивно они выполняются либо пластинчатыми либо цилиндрическими. Пластинчатые закладываются в пазы машин, а цилиндрические применяются для измерения температуры охлаждающей среды.

Метод встроенных теплоприемников.

В отличие от метода заложенных теплоприемников, которые служат для контроля температуры как при испытаниях, так и при эксплуатации, в рассматриваемом методе теплоприемники встраиваются в отдельные части электрической машины лишь на время испытаний.

Метод термометра

Методом термометра определяют температуру поверхности в точке приложения (поверхность корпуса, подшипников, лобовых частей обмотки), температуру окружающей среды и воздуха, поступающего и выходящего из двигателя. Применяют как ртутные, так и спиртовые термометры. Вблизи сильных переменных магнитных полей следует применять только спиртовые термометры, так как в ртути вводятся вихревые токи, искажающие результаты измерения. Для лучшей передачи теплоты от узла к термометру резервуар термометра обертывают фольгой, а затем прижимают к нагретому узлу. Для теплоизоляции термометра поверх фольги накладывают слой ваты или войлока, но так, чтобы последний не попал в пространство между термометром и нагретой частью двигателя. При измерении температуры охлаждающей среды термометр следует помещать в закрытый металлический стаканчик, заполненный маслом и защищающий термометр от лучистой теплоты, испускаемой окружающими тепловыми источниками и самой исследуемой машиной, и от случайных потоков воздуха. При измерении температуры наружной охлаждающей среды несколько термометров располагают в разных точках вокруг исследуемой машины на высоте, равной половине высоты машины, и на расстоянии (1–2)м от нее. За температуру охлаждающей среды принимают среднее арифметическое значение показаний этих термометров.

Метод термопары,

Широко применяемый для измерения температур, используется в основном в машинах переменного тока. Термопары закладывают в пазы между слоями

обмоток и на дно паза, а также в других труднодоступных местах. Термопары образуют две изолированные друг от друга проволоки из разных материалов. Материалы выбирают в зависимости от значения измеряемой температуры. Для измерения температур в ЭМ обычно применяют медно-константановые термопары, состоящей из медной и константановой проволок диаметром около 0,5 мм. Одна пара концов термопары спаяна между собой. Места спая обычно помещают в ту точку, где необходимо измерить температуру (горячий спай), а другую пару концов подключают либо непосредственно к зажимам чувствительного милливольтметра с большим внутренним сопротивлением, либо к переходной сборке зажимов, от которой отходят медные проводники к измерительному прибору. В том месте, где ненагреваемый конец константановой проволоки соединяется с медным проводником (на клемме измерительного прибора или на переходной клемме), образуется так называемый холодный спай термопары. На поверхности контакта двух металлов (константана и меди) возникает ЭДС, пропорциональная температуре в месте контакта, при чем на константане образуется минус, а на меди плюс. ЭДС возникает как на горячем, так и на холодном спае термопары. Однако поскольку температуры спаев разные, то и значения ЭДС различные, а так как в контуре, образованном термопарой и измерительным прибором, эти ЭДС направлены навстречу друг другу, то милливольтметр всегда измеряет разность ЭДС горячего и холодного спаев, соответствующую разности температур. Опытным путем установлено, что ЭДС медно-константановой термопары составляет 0,0416 мВ на 1 °С разности температур горячего и холодного спаев. В соответствии с этим можно отградуировать шкалу милливольтметра в градусах Цельсия. Так как термопара фиксирует только разность температур, то для определения абсолютной температуры горячего спае следует к показаниям термопары прибавить температуру холодного спае, измеренную термометром.

Метод сопротивления

Определение температуры обмоток по их сопротивлению постоянному току часто используется для измерения температуры обмоток. Метод основан на свойстве металлов изменять свое сопротивление в зависимости от температуры.

$$\theta_{\Gamma} = \frac{R_{\Gamma} - R_{\text{X}}}{R_{\text{X}}} (235 + \theta_{\text{X}}) + \theta_{\text{X}}$$

Для определения повышения температуры, °С, производят измерения сопротивления обмотки практически в холодном и нагретом состояниях и производят вычисления по формулам

для меди
$$\Delta\theta = \frac{R_{\Gamma} - R_{\text{X}}}{R_{\text{X}}} (235 + \theta_{\text{X}}) + (\theta_{\text{X}} - \theta_0)$$

для алюминия
$$\Delta\theta = \frac{R_{\Gamma} - R_{\text{X}}}{R_{\text{X}}} (245 + \theta_{\text{X}}) + (\theta_{\text{X}} - \theta_0)$$

где $\Delta\theta$ – превышение температуры обмотки, °С;

R_{X} - сопротивление в практически холодном состоянии, Ом;

R_{Γ} - сопротивление в нагретом состоянии, Ом;

θ_x – температура обмотки в холодном состоянии, °С;

θ_T - температура обмотки в горячем состоянии, °С;

θ_{0o} – температура охлаждающей среды, °С.

Следует учитывать, что от момента отключения до начала замеров проходит некоторое время, в течение которого обмотка успевает остыть. Поэтому для правильного определения температуры обмоток в момент отключения, т.е. в рабочем состоянии двигателя.

4.2. Два способа измерения температуры при помощи термопар

Термопара является простым, широко используемым компонентом для измерения температуры. Эта статья представляет общий обзор термопар, описывает стандартные проблемы, возникающие при разработке с их использованием, и предлагает два решения для обработки сигнала. Первое решение сочетает и компенсацию эталонного спае, и обработку сигнала в одной аналоговой ИС для удобства и лёгкости использования; второе решение разделяет компенсацию эталонного спае и обработку сигнала для большей гибкости и точности измерения температуры с цифровым выходом.

Теория термопары

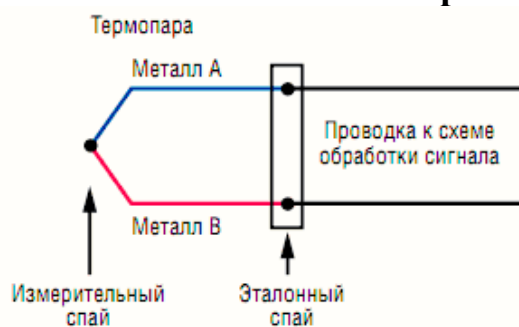


Рис. 4.1.
Термопара

Термопара, показанная на рис.4.1, состоит из двух проводников разнородных металлов, соединённых вместе на одном конце, называемом измерительным («горячим») спае. Другой конец, где проводники не соединены, подключен к дорожкам схемы обработки сигнала, обычно сделанным из меди. Это переход между металлами термопары и медными дорожками называется эталонным («холодным») спае.

Напряжение, генерируемое эталонным спае, зависит от температуры и на измерительном, и на эталонном спае. Поскольку термопара является дифференциальным устройством, а не прибором для измерения абсолютной температуры, температура эталонного спае должна быть известной, чтобы получить точные показания абсолютной температуры. Этот процесс известен как компенсация эталонного спае (компенсация холодного спае).

Термопары используются в стандартных промышленных методах экономически эффективного измерения температуры в широком диапазоне с приемлемой точностью. Они используются в разнообразных применениях вплоть до +2500°C в бойлерах, водонагревателях, печах и самолетных двигателях, и т.д. Наиболее популярной термопарой является термопара типа К, состоящая из хромеля и алюмели (□омпки сплава никеля, содержащие хром и алюминий, магний и кремний соответственно), с температурным диапазоном от -200 до +1250°C.

Почему используется термопара

Преимущества

Температурный диапазон. Наиболее реальные температурные диапазоны – от криогеники до выхлопа реактивного двигателя – могут быть перекрыты при помощи термопар. В зависимости от использованного металла проводников, термопара способна измерять температуру в диапазоне от -200 до +2500°C.

Надёжная. Термопары являются прочными приборами, невосприимчивыми к удару и вибрации и подходящими для использования в опасных окружающих условиях.

Быстрый отклик. Благодаря небольшим размерам и низкой теплоёмкости, термопары быстро откликаются на изменения температуры, особенно если воздействию подвергается измерительный спай. Они могут реагировать на быстро изменяющуюся температуру в пределах нескольких сотен миллисекунд.

Отсутствует саморазогрев. Поскольку термопары не требуют энергии питания, они не подвержены саморазогреву и от природы безопасны.

Недостатки

Сложная обработка сигнала. Необходима существенная обработка сигнала, чтобы преобразовать напряжение термопары в полезные показания температуры. Традиционно обработка сигнала требовала больших затрат времени, чтобы избежать привнесённых погрешностей, которые снижали точность.

Точность. Кроме внутренних неточностей в термопарах, обусловленных их металлургическими свойствами, измерение при помощи термопары является настолько точным, насколько точно может быть измерена температура эталонного спаия, традиционно в пределах (1...2)°C.

Подверженность коррозии. Поскольку термопары состоят из двух разнородных металлов, в некоторых окружающих условиях коррозия с течением времени может привести к ухудшению точности. Следовательно, им может потребоваться защита, а уход и техническое обслуживание являются неотъемлемыми процедурами.

Подверженность помехам. При измерении изменений сигнала на уровне микровольт, помехи от паразитных электрических и магнитных полей могут быть проблемой. Скручивание пары проводов термопары может значительно снизить наводку от магнитного поля. Использование экранированного кабеля или укладка проводов в металлический лоток и защитный экран могут снизить наводку от электрического поля. Измерительное устройство должно обеспечивать фильтрацию сигнала либо на аппаратном, либо на программном уровне, с интенсивным подавлением частоты сети (50 или 60 Гц) и её гармоник.

Проблемы измерения при помощи термопар

По многим причинам нелегко преобразовать напряжение, генерируемое термопарой, в точные показания температуры: сигнал напряжения является

Тип термопары	Коэффициент термоЭДС. $\text{мкВ}/^\circ\text{C}$	небольшим, взаимосвязь температура-напряжение является нелинейной, эталонный спай требует компенсации, а термопары могут создавать проблемы заземления. Давайте рассмотрим эти проблемы по очереди.
E	61	<u>Сигнал напряжения мал.</u> Большинство
J	52	общеупотребительных термопар относятся к типам
K	41	J, K и T. При комнатной температуре их напряжение
N	27	изменяется на $52 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$, $41 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ и $41 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$
R	9	соответственно. Другие, менее известные типы
S	6	имеют даже меньший температурный коэффициент
T	41	напряжения. Этот небольшой сигнал требует каскада с большим усилением перед

аналого-цифровым компенсационным. Таблица 4.1 сравнивает чувствительности различных типов термопар.

Таблица 4.1. Коэффициент термоЭДС для различных типов термопар при 25°C

Поскольку сигнал напряжения является небольшим, схема обработки сигнала обычно нуждается в усилении 100 В/В или около этого – фактически простое согласование сигнала. Более трудным может быть распознавание истинного сигнала из помех, собираемых выводами термопары. Выводы термопары являются длинными и часто прокладываются в электрически зашумленном окружении. Помехи, считанные выводами, могут легко поглотить ничтожный сигнал термопары.

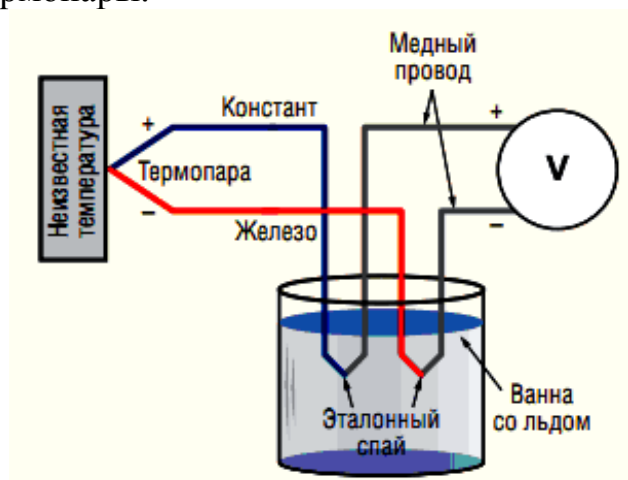


Рис. 4.2.
Первичная цепь
железно-константановой
термопары

Компенсация эталонного спаия. Температура эталонного спаия термопары должна быть известной, чтобы получить точные показания абсолютной температуры. Когда термопары использовались впервые, это делали путём содержания эталонного спаия в ванне со льдом. Рис. 4.2 изображает цепь термопары с одним концом при неизвестной температуре и другим концом в ванне со льдом (0°C). Этот метод был использован для исчерпывающего исследования параметров различных типов термопар, следовательно, почти все таблицы термопар используют 0°C в качестве эталонной температуры.

Однако содержание эталонного спаия термопары в ванне со льдом является непрактичным для большинства систем измерения. Вместо этого большинство систем используют технологию, называемую компенсацией эталонного спаия (также известную как компенсация холодного спаия). Температуру эталонного спаия

измеряют при помощи другого термочувствительного прибора – обычно микросхемы, тер-мистора, диода или RTD (резистивного датчика температуры).

Отсчёт напряжения термопары затем корректируют для отображения температуры эталонного спая. Важно, чтобы эталонный спай был считан как можно более точно – с точностью датчика температуры, содержащегося при той же самой температуре, что и эталонный спай. Любая погрешность в определении температуры эталонного спая отразится на конечном отсчёте показаний термопары.

Для измерения образцовой температуры доступны различные датчики:

- *термисторы*. Они имеют быстрый отклик и небольшой корпус; однако они нуждаются в линеаризации и имеют ограниченную точность, особенно в широком диапазоне температур. Они также требуют тока для возбуждения, который может вызывать саморазогрев, приводящий к дрейфу. Общая точность системы в сочетании с обработкой сигнала может быть недостаточной;
- *резистивные датчики температуры (RTD)*. Резистивные датчики температуры являются точными, стабильными и достаточно линейными, однако размер корпуса и стоимость ограничивают их применение в системах управления технологическими процессами;
- *удалённые термодиоды*. Это диоды, используемые для считывания температуры вблизи разъёма термопары. Формирующий кристалл преобразовывает напряжение на диоде, которое пропорционально температуре, в аналоговый или цифровой выходной сигнал. Его точность ограничена примерно $\pm 1^\circ\text{C}$;
- *интегрированный датчик температуры*. Интегрированный датчик температуры – автономная ИС, которая считывает температуру локально, – должен быть тщательно установлен вблизи эталонного спая и может сочетать компенсацию эталонного спая и обработку* сигнала. Достижимы точности в пределах малых долей 1°C .

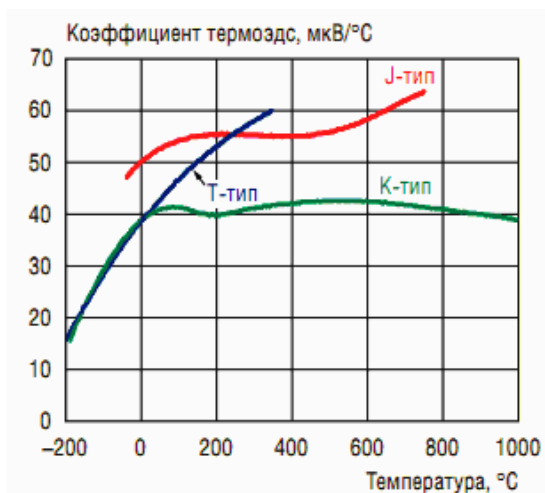


Рис. 4.3.
Измерение чувствительности термопары с температурой

Сигнал напряжения является нелинейным. Наклон графика характеристики термопары изменяется в зависимости от температуры. Например, при 0°C выход термопары T-типа изменяется на $39 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$, но при 100°C наклон возрастает до $47 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$.

Существуют три стандартных метода компенсации нелинейности термопары. Выбрать часть графика, которая является относительно плоской, и аппроксимировать наклон как линейный в данной области – подход, который работает особенно хорошо для измерений в ограниченном диапазоне температур. Не требуются сложные вычисления. Одной из причин, по которой термопары K- и J-

типа являются популярными, является то, что они имеют большие промежутки температуры, для которых возрастающий наклон чувствительности (коэффициент термоЭДС) остаётся фактически постоянным (рис. 4.3).

Другим подходом является сохранение в памяти просмотрной таблицы, которая соотносит набор напряжений термопары с её относительной температурой. Затем используется линейная интерполяция между двумя ближайшими пунктами таблицы для получения других значений температуры.

Третьим подходом является использование уравнений высокого порядка, которые моделируют поведение термопары. Хотя этот метод имеет наибольшую точность, он также является самым затратным по вычислениям. Для каждой термопары существуют два набора уравнений. Один набор преобразовывает температуру в напряжение термопары (полезное для компенсации эталонного спая). Другой набор преобразовывает напряжение термопары в температуру. Таблицы термопар и уравнений высокого порядка для термопар могут быть найдены на интернет-странице <http://srdata.nist.gov/its90/main/>. Все эти таблицы и уравнения основаны на температуре эталонного спая 0°C. Компенсация эталонного спая должна быть использована, если он находится при любой другой температуре.

Требования к заземлению. Промышленность выпускает термопары и с изолированными, и с заземлёнными наконечниками для измерительного спая.

Практические схемы с термопарами. Обработка сигнала термопары является более сложной, чем обработка в других системах измерения. Время, необходимое для разработки и отладки обработки сигнала, может увеличить время выхода изделия на рынок. Ошибки в обработке сигнала, особенно в части компенсации измерительного спая, могут привести к более низкой точности. Две описанные ниже схемы посвящены этим проблемам.

Первая описывает простое аналоговое интегрированное аппаратное решение, сочетающее прямое измерение термопары с компенсацией эталонного спая при помощи единственной ИС. Второе решение подробно рассматривает схему компенсации эталонного спая на основе программного обеспечения, обеспечивающую повышенную точность для измерения термопары и гибкость в использовании термопар многих типов.

Схема измерения №1

Рис. 4.4 показывает схему для измерения термопары типа К. Она основана на применении усилителя термопары AD8495, который специально разработан для термопар типа К.

Это аналоговое решение оптимизировано для минимального времени разработки: Оно имеет простой тракт для сигнала и не требует написания кода программы.

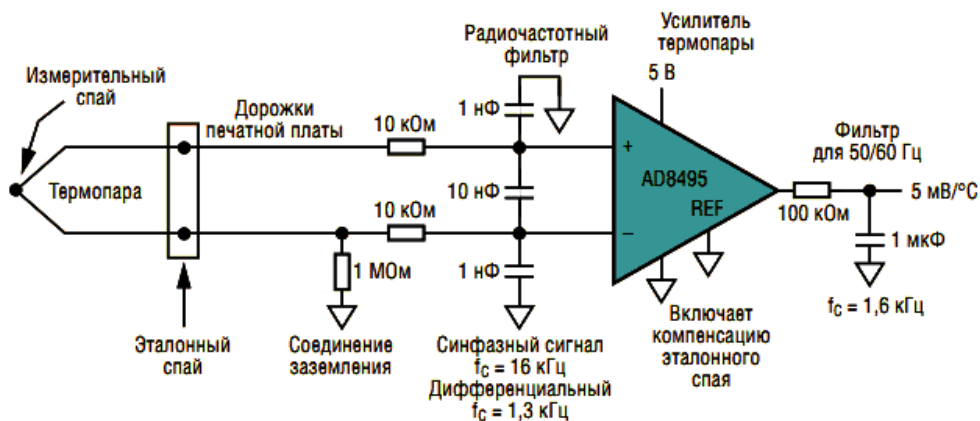


Рис. 4.4.
Схема
измерения №1

Как этот простой сигнальный тракт удовлетворяет требованиям обработки сигнала для термопар К-типа?

Усиление и выходной масштабный коэффициент. Малый сигнал термопары \square омпенвается AD8495 в 122 раза, обеспечивая выходную чувствительность 5 мВ/°С (200°С/В).

Подавление помех. Высоочастотные синфазные и дифференциальные помехи удаляются внешним радиочастотным фильтром. Низкочастотные синфазные помехи подавляет измерительный усилитель AD8495. Любой оставшийся шум удаляется внешним фильтром при последующей обработке.

Компенсация эталонного спая. Усилитель AD8495, который содержит температурный датчик для компенсации изменений окружающей температуры, должен быть установлен вблизи эталонного спая, чтобы работать при той же температуре для точной компенсации эталонного спая.

Коррекция нелинейности. Усилитель AD8495 откалиброван для получения выхода 5мВ/°С на линейном участке графика термопары К-типа, с погрешностью линейности менее чем 2=С в диапазоне температур -25.-400°С. Если необходим более широкий температурный диапазон, указание по применению AN-1087 от компании Analog Devices описывает, как может быть использована просмотревая таблица или уравнение в микропроцессоре для расширения диапазона температур.

Эксплуатация изолированных, заземлённых и незащищённых термопар. Рис. 4.4 показывает подсоединённый к земле резистор 1 Мом, который учитывает все типы наконечников термопар. Усилитель AD8495 (Рис. 4.4) был специально разработан, чтобы обеспечить измерение на уровне нескольких сотен милливольт ниже потенциала земли при использовании одного источника питания, как показано на схеме. Если ожидается большая разность в потенциалах заземления, усилитель AD8495 также может быть использован с двойным источником питания.

В таблицу 2 сведены характеристики интегрального аппаратного решения, использующего микросхему AD8495.

Таблица 4.2. Сводка характеристик для схемы измерения №1

Тип термопары	Диапазон температуры измерительного спая	Диапазон температуры эталонного спая	Точность при 25°С	Потребляемая мощность
К	-25...400°С	0...50°С	±3°С (группа А) ±1°С (группа С)	1,25 мВт

Схема измерения №2, оптимизированная для точности и гибкости измерения

Рис. 4.5 показывает схему для измерения термопары J-, K- и T-типа с большой степенью точности. Эта схема включает высокоточный АЦП для измерения малых напряжений термопары и высокоточный датчик для измерения температуры эталонного спая. Оба прибора управляются по интерфейсу SPI от внешнего микроконтроллера.

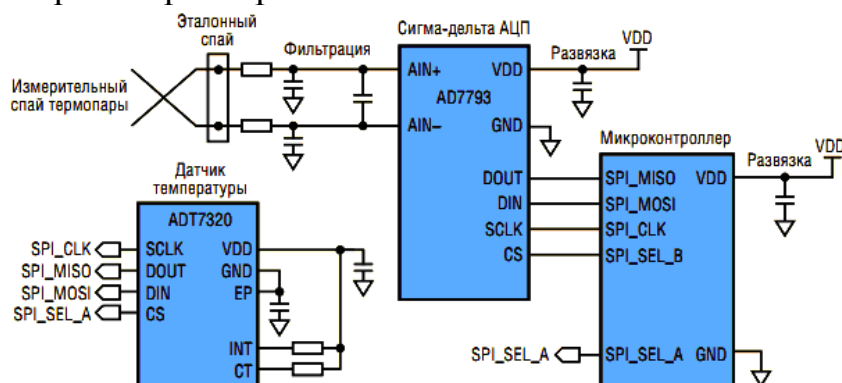


Рис. 4.5.
Схема
измерения №2

Как эта конфигурация удовлетворяет требованиям обработки сигнала, приведённым ранее?

Удалить помехи и усилить напряжение. Микросхема AD7793 является высокоточным аналоговым входным интерфейсом с малым потреблением и используется для измерения напряжения термопары. Выход термопары фильтруется внешним способом и подсоединяется к набору дифференциальных входов, AIN1(+) и AIN1(-). Затем сигнал поступает на коммутатор, буферный усилитель и измерительный усилитель, который усиливает малый сигнал термопары, и на АЦП, который преобразовывает сигнал в цифровой.

Корректировка нелинейности. Микросхема ADT7320 обеспечивает превосходную линейность в своём паспортном диапазоне температур (-40... 125°C), не требующую коррекции или калибровки пользователем. Её цифровой выход, таким образом, может считаться точным представлением состояния эталонного спая. Чтобы определить фактическую температуру термопары, это эталонное измерение температуры должно быть преобразовано в эквивалентное термоэлектрическое напряжение при помощи уравнений, предоставленных Национальным институтом стандартов и технологии (NIST). Затем это напряжение добавляется к напряжению термопары, измеренному микросхемой AD7793) а итог переводится обратно в температуру термопары, снова при помощи уравнений NIST.

Таблица 4.3 суммирует характеристики схемы измерения эталонного спая на основе программных средств с использованием информации NIST.

Таблица 4.3. Сводка характеристик для схемы измерения №2

Тип термопары	Диапазон температуры измерительного спая	Диапазон температуры эталонного спая	Точность	Потребляемая мощность
J, K, T	Полный диапазон	-11...85°C -20...105°C	±0.2°C ±0,25°C	3 мВт 3 мВт

Термопары позволяют надёжно измерять температуру в достаточно широком диапазоне.

Первое решение (схем №1) сосредотачивается на уменьшении сложности измерения посредством технологии аппаратной аналоговой компенсации эталонного сая. Это приводит к простому сигнальному тракту, не требующему программирования, с учётом интеграции, предоставленной усилителем термопары AD8495, обеспечивающего выход сигнала $5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$, который может быть подан на аналоговый вход разнообразных микроконтроллеров.

Второе решение (схем №2) обеспечивает высочайшую точность измерения и также позволяет использовать различные типы термопар. Технология компенсации эталонного сая программным способом опирается на высокоточный цифровой датчик температуры ADT7320, чтобы обеспечить более точное измерение компенсации эталонного сая, недостижимое до сегодняшнего дня. Микросхема ADT7320 поставляется полностью откалиброванной и по техническим условиям соответствует диапазону температур $(-40 \dots 125)^\circ\text{C}$. Абсолютно понятная, в отличие от измерения традиционным термистором или резистивным датчиком, она не требует ни затратного этапа калибровки после монтажа платы, ни ресурсов процессора или памяти с калибровочными коэффициентами или процедурами линеаризации. Потребляя только микроватты мощности, эта ИС избегает проблем саморазогрева, которые ухудшают точность традиционных решений с резистивным датчиком.

[содержание](#)

5. БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Все электроприборы работают за счет прохождения через них электрического тока, который дополнительно нагревает проводники и оборудование. При этом в нормальном режиме эксплуатации создается баланс между повышением температуры и отводом ее части в окружающую среду.

При нарушениях качества контактов ухудшаются условия прохождения тока и повышается температура, которая может стать причиной неисправности. Поэтому в сложных электротехнических устройствах, особенно на высоковольтном оборудовании предприятий энергетики, осуществляется периодический контроль нагрева токоведущих частей.

Для устройств, находящихся под высоким напряжением, измерения осуществляются бесконтактным методом на безопасном расстоянии.

Принципы дистанционного измерения температуры

У любого физического тела происходит движение атомов и молекул, которое сопровождается излучением электромагнитных волн. Температура объекта влияет на интенсивность этих процессов и о ее величине можно судить по значению теплового потока.

Бесконтактное измерение температуры основано на этом принципе.

Источник обследования с температурой «Т» излучает в окружающее пространство тепловой поток «Ф», который воспринимается тепловым датчиком, удаленным от источника тепла. После него преобразованный внутренней схемой сигнал выдается на информационное табло «И» (рис. 5.1).

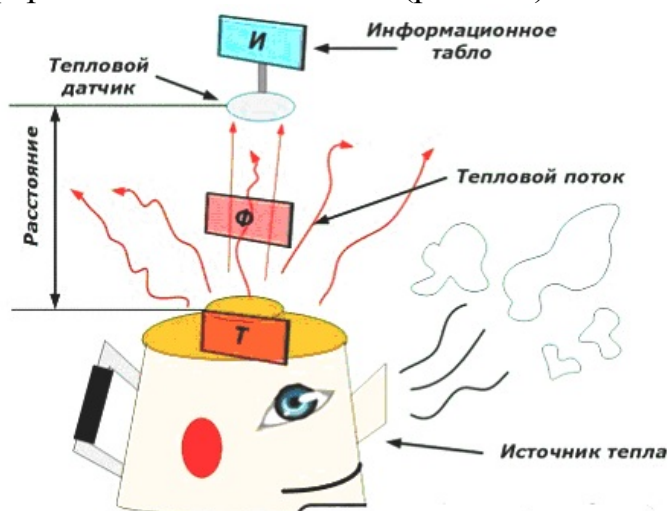


Рис. 5.1.
Принцип
бесконтактного
измерения
температуры

Приборы измерения температуры, осуществляющие ее замер по инфракрасному излучению, называют инфракрасными термометрами либо сокращенным названием «пирометры».

Для их точной работы важно правильно определить диапазон измерения на шкале электромагнитных волн (рис. 5.2), который составляет область примерно 0,5...20 мкм.

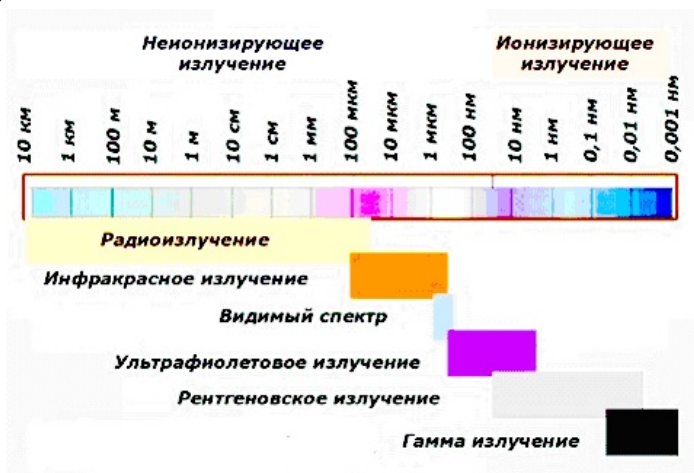


Рис. 5.2.
Шкала
электромагнитных волн

Факторы, влияющие на качество измерения

Погрешность пирометров зависит от комплекса факторов:

- поверхность наблюдаемой площади объекта должна быть в зоне прямого обзора;
- пыль, туман, пар и другие предметы между тепловым датчиком и источником тепла ослабляют сигнал, как и следы загрязнения на оптике;
- структура и состояние поверхности исследуемого тела влияют на интенсивность инфракрасного потока и показания измерителя температуры.

Влияние третьего фактора объясняет график изменения коэффициента излучения от длины волны для . черного, серого и цветного оттенков (рис 5.3).

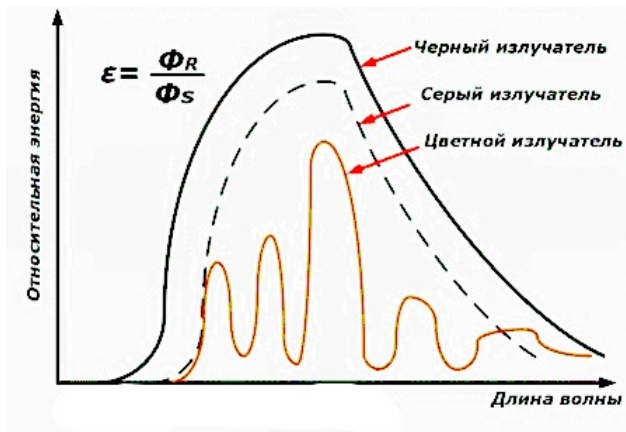


Рис. 5.3.
Коэффициент
излучения
материала

Способность инфракрасного излучения Φ_S черного материала берется за основу сравнения других изделий и принимается равным 1. Коэффициенты всех остальных реальных веществ Φ_R становятся меньше 1.

На практике пирометры пересчитывают излучение реальных объектов на показатели идеального излучателя.

Также на измерение оказывают влияние:

длина волны инфракрасного спектра, на которой проводится замер;
температура исследуемого вещества.

Как устроен бесконтактный измеритель температуры

По способу вывода информации и ее обработки приборы удаленного контроля нагрева поверхностей подразделяют на пирометры и тепловизоры.

Устройство пирометров

Условно состав этих приборов по блочно можно представить (рис. 5.4):

- инфракрасным датчиком с оптической системой и зеркальным световодом;
- электронной схемой, преобразующей полученный сигнал;
- дисплеем, на котором отображается температура;
- кнопкой включения.

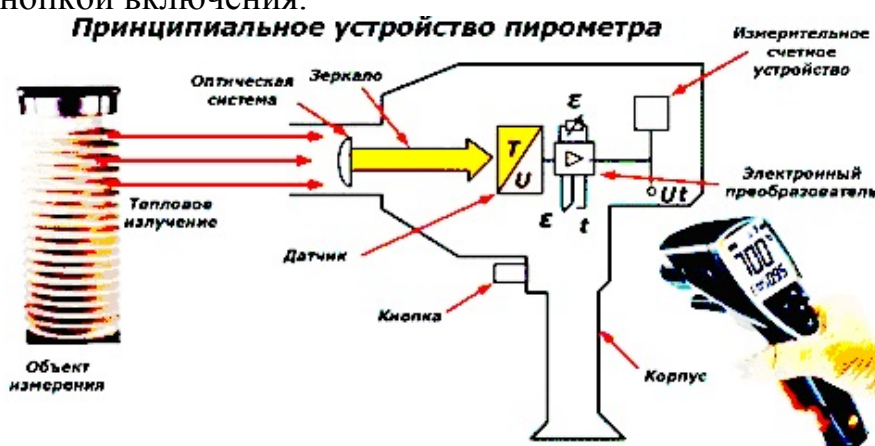


Рис. 5.4.
Принципиальное
устройство
пирометра

Поток теплового излучения фокусируется оптической системой и зеркалами направляется на датчик первичного преобразования тепловой энергии в электрический сигнал с величиной напряжения, прямо пропорциональной инфракрасному излучению.

Вторичное преобразование электрического сигнала происходит в электронном устройстве, после которого измерительно-счетный модуль осуществляет вывод информации на дисплей, как правило, в цифровом виде.

На первый взгляд кажется, что пользователю для замера температуры удаленного объекта достаточно:

- включить прибор нажатием на кнопку;
- навести на исследуемый объект;
- снять показания.

Однако, для точного измерения необходимо не только учесть факторы, влияющие на показания, но и правильно выбрать расстояние до объекта, которое определяется оптическим разрешением прибора.

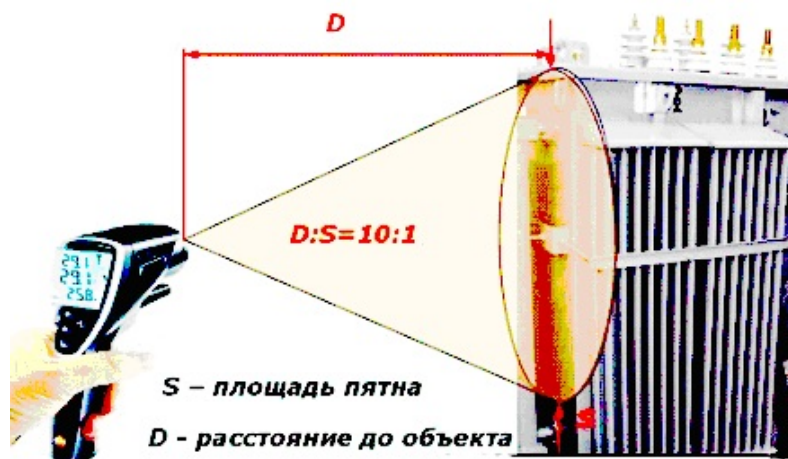


Рис. 5.5.
Оптическое разрешение пирометра

Пирометры обладают различными углами обзора, характеристикой которых для удобства пользователей выбраны соотношения между расстоянием до объекта измерения и площадью охвата контролируемой поверхностью. В качестве примера на рис 5.5 приведено соотношение 10:1.

Поскольку эти характеристики прямо пропорциональны между собой, то для точного измерения температуры необходимо не только правильно навести прибор на объект, но и подобрать расстояние для выбора площади измеряемой зоны.

Тогда оптическая система будет обрабатывать тепловой поток от нужной поверхности без учета влияния излучения окружающих предметов.

С этой целью усовершенствованные модели пирометров оснащаются лазерными целеуказателями (рис. 5.6), которые помогают навести термодатчик на объект и облегчить определение площади контролируемой поверхности. Они могут иметь разные принципы работы и обладать неодинаковой точностью наведения.

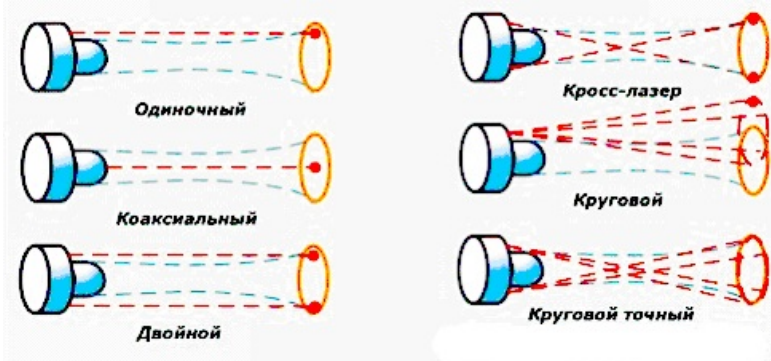


Рис. 5.6.
Принцип использования лазерных целеуказателей

Одиночный лазерный луч лишь приблизительно указывает место центра контролируемой зоны и позволяет определить ее границы неточно. Его ось смещена

относительно центра оптической системы пирометра. За счет этого вводится погрешность параллакса.

Коаксиальный способ лишен этого недостатка — луч лазера совпадает с оптической осью прибора и точно указывает центр измеряемой площади, но не определяет ее границы.

Указание размеров контролируемого участка предусмотрено в целеуказателе с **двойным лазерным лучом**. Но при маленьких расстояниях до объекта допускается ошибка, вызванная первоначальным сужением области чувствительности. Этот недостаток сильно проявляется на объективах с короткофокусным расстоянием.

Целеуказатели с кросс-лазером улучшают точность работы пирометров, оснащенных объективами с коротким фокусом.

Одиночный круговой лазерный луч позволяет определить зону контроля, но он тоже обладает параллаксом и завышает показания прибора на коротких дистанциях.

Круговой точный лазерный целеуказатель работает наиболее надежно и лишен всех недостатков предшествующих конструкций.

Пирометры отображают информацию о температуре методом тексто-цифрового вывода на дисплей, которая может дополняться другими сведениями.

Устройство тепловизоров

Конструкция этих измерительных приборов температуры напоминает устройство пирометров. У них в качестве приемного элемента потока инфракрасного излучения работает гибридная микросхема (рис. 5.7).

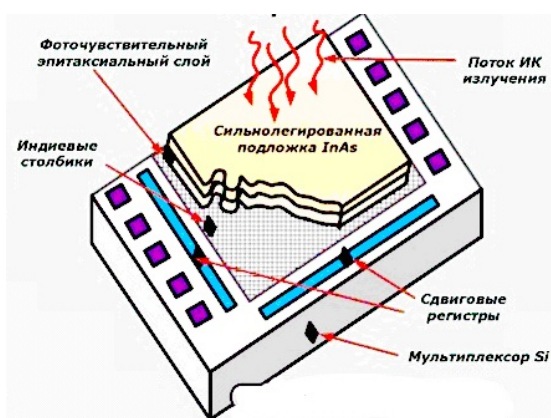


Рис. 5.7.
Устройство гибридной микросхемы

Она своим фоточувствительным эпитаксиальным слоем через сильнолегированную подложку воспринимает ИК поток.

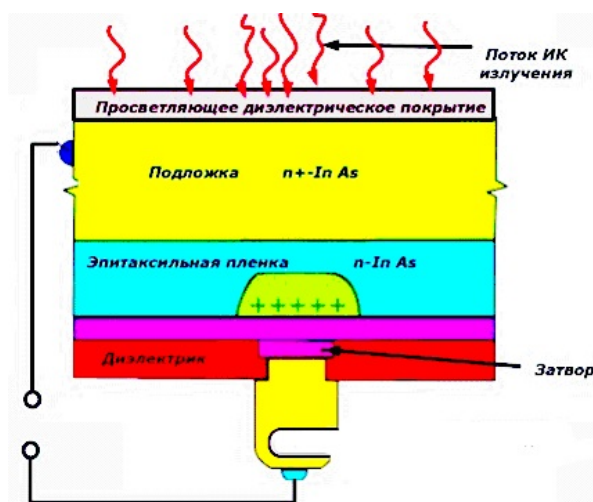


Рис. 5.8.
Устройство приемника тепловизора

Тепловая чувствительность тепловизоров на основе матричных детекторов позволяет измерять температуру с точностью до 0,1 градуса. Но, такие высокоточные устройства используются в термографах сложных лабораторных стационарных установок.

Все приемы работы с тепловизором выполняются так же, как и с пирометром, но на его экране выводится картинка электротехнического оборудования, представленная уже в переработанном цветовом диапазоне с учетом состояния нагрева всех деталей (рис. 5.9).



Рис. 5.9.
Работа тепловизора

Рядом с термическим изображением размещается шкала перевода цветов в линейку температур.

При сравнении работы пирометра и тепловизора можно увидеть разницу:

- пирометр определяет среднюю температуру в контролируемой им области;
- тепловизор позволяет оценить нагрев всех составных элементов, расположенных в наблюдаемой им зоне.

Особенности конструкций бесконтактных измерителей температуры

Описанные выше устройства представлены мобильными моделями, позволяющими выполнять последовательные замеры температуры на многих местах работы электрического оборудования:

- вводах силовых и измерительных трансформаторов и выключателей;
- контактах разъединителей, работающих под нагрузкой;
- сборках систем шин и секций высоковольтных распределительных устройств;
- в точках соединения проводов воздушных линий электропередач и других местах коммутации силовых цепей.

Однако, в отдельных случаях выполнения технологических операций на электрооборудовании сложные конструкции бесконтактных измерителей

температуры не нужны и вполне можно обойтись простыми моделями, установленными стационарно.

В качестве примера можно привести метод измерения сопротивления обмотки ротора генератора при работе с выпрямительной схемой возбуждения (рис. 5.10). Поскольку в ней наводятся большие переменные составляющие напряжения, то контроль ее нагрева осуществляется постоянно.

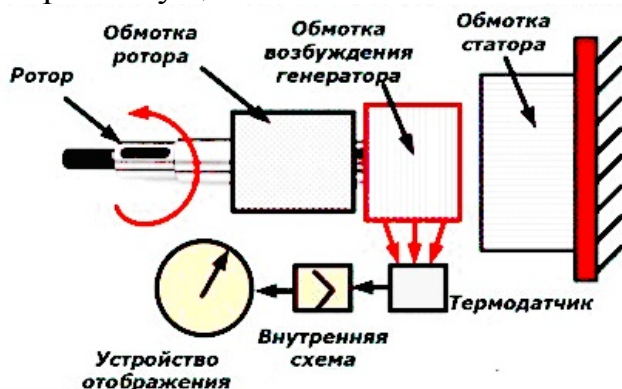


Рис. 5.10.
Принцип
стационарного
измерения
температуры
бесконтактным
методом

Дистанционный замер и отображение температуры у обмотки возбуждения происходит на вращающемся роторе. Термодатчик стационарно располагается в наиболее благоприятной зоне контроля и воспринимает направленные на него тепловые лучи. Сигнал, обработанный внутренней схемой, выводится на устройство отображения информации, которое может быть оборудовано стрелочным указателем и шкалой.

Схемы, работающие по этому принципу, отличаются относительной простотой и надежностью.

В зависимости от назначения пирометры и тепловизоры подразделяют на устройства:

- высокотемпературные, предназначенные для измерения сильно нагретых объектов;
- низкотемпературные, способные контролировать даже охлаждение деталей при морозе.

Конструкции современных пирометров и тепловизоров могут оборудоваться системами связи и передачи информации через шину RS-232 с удаленными компьютерами.

Контрольные вопросы

1. Опишите принцип дистанционного измерения температуры
2. Какие факторы, влияют на качество измерения?
3. Опишите принцип преобразования теплового потока пирометром
4. Опишите типы лазерных целеуказателей

[содержание](#)

6. ИЗМЕРЕНИЕ ШУМА И ВИБРАЦИИ

6.1. Измерение шумовых характеристик

Шумы, возбуждаемые аэродинамическими, магнитными и механическими факторами, а также – подшипниками и щетками, образуют общий шум электрической машины. Звуковые частоты охватывают диапазон от 16 до 20000 Гц. Аэродинамический шум появляется в результате турбулентного (вихревого) движения газообразной охлаждающей среды при вращении ротора и вентилятора электрической машины. Отражающиеся от вращающейся поверхности завихрения, вызывают широкополосный шум, энергия которого спектрально распределена по всему диапазону слышимости.

Шум вентилятора в основном зависит от окружной скорости. Так у электрических машин с окружными скоростями свыше 60 м/с общий уровень шума компенсируется в большинстве случаев только аэродинамическим вихрем вентилятора.

К аэродинамическим шумам относятся и так называемые сиренные эффекты, возникающие когда сжатый вентилятором воздух или газ наталкивается на такие препятствия как ребра корпуса или подшипниковых щитов, крепящие болты или другие подобные детали. В случае равномерного шага лопаток вентилятора основная частота сиренного звука составляет, Гц

$$f = k_{л} \cdot n,$$

где $k_{л}$ – число лопаток.

Магнитный шум появляется вследствие возникновения вынужденных колебаний статора и ротора под действием знакопеременных электромагнитных сил, имеющих периодический характер. Магнитный шум в основном обусловлен радиальными усилиями, пропорциональными квадрату магнитной индукции в воздушном зазоре машины. Из-за сложного характера распределения магнитного поля в воздушном зазоре магнитный шум также является широкополосным.

Шум подшипников обуславливается главным образом небалансом и неточностью изготовления подшипников качения. Интенсивность шума возрастает с увеличением диаметра подшипников, скорости вращения, сил одностороннего магнитного тяжения и неуравновешенности ротора. Основная частота шума, обусловленного небалансом подшипников, не превышает частоту вращения ротора, т.е. приходится на нижний диапазон слышимости. Неточность изготовления подшипников приводит к появлению шума с частотой, превышающей частоту вращения ротора и пропорциональной количеству деформированных элементов подшипника.

Шум щеток возникает при скольжении их по коллектору и зависит от качества поверхности коллектора, состояния притирки щеток, их давления на коллектор. В составляющих шума щеток наиболее выраженные звуки обусловлены периодическим прохождением коллекторных пластин под щетками. Частота этих звуков пропорциональна частоте вращения и количеству коллекторных пластин, поэтому шум щеток – высокочастотный.

Шум, возбуждаемый механическими факторами, возникает вследствие распространения вибрации подшипников или внутренних частей машины на большие площади фундаментов или кожухов. Этот “структурный” шум преобразуется в аэродинамический и излучается в окружающую среду. Если причиной вибрации является плохая балансировка ротора, то шум в большинстве

случаев является низкочастотным, так как нижняя граница диапазона слышимости 16 Гц соответствует частоте вращения 960 об/мин .

Звук называется воспринимаемые человеческим ухом изменения давления в окружающей среде (в воздухе, воде или иных средах), поскольку звук это – волновые колебания частиц упругого тела.

Частота колебаний, как отмечалось ранее, имеет диапазон $(16 \dots 20000) \text{ Гц}$. Звук в разных средах распространяется с различными скоростями, например при температуре 20°C эта скорость составляет: в воздухе – 340 м/с , в воде – 1500 м/с , в металлах в среднем – 5000 м/с , в резине – 50 м/с .

При распространении звука в воздухе возникают продольные волны, создающие сжатие и разряжение, т.е. добавочное давление по отношению к среднему давлению в воздухе. Пульсация добавочного давления называется звуковым давлением (p), которое измеряется в Паскалях ($\text{Па} = \text{Н/м}^2$). При распространении звуковой волны происходит передача энергии. Количество звуковой энергии, передаваемой в течение одной секунды, называется звуковой мощностью (P). Звуковая мощность, передаваемая через единицу поверхности перпендикулярной распространению волны, называется интенсивностью звука (I).

Свойство среды оказывать сопротивление распространению звуковой волны называется акустическим сопротивлением.

Максимальные и минимальные звуковые давление, мощность и интенсивность, воспринимаемые человеком как звук, называются пороговыми.

Нижний порог чувствительности среднего человеческого уха (порог слышимости) на частоте 1000 Гц , принятой за стандартную, характеризуется звуковым давлением около $p_{\min} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$, что соответствует звуковой мощности $P_{\min} = 10^{-12} \text{ Вт}$ и интенсивности звука $I_{\min} = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$.

Верхний порог чувствительности (порог болевого ощущения) на частоте 1000 Гц составляет $p_{\max} = 2 \cdot 10^2 \text{ Па}$ и ему соответствуют $P_{\max} = 10^2 \text{ Вт}$ и $I_{\max} = 10^2 \text{ Вт/м}^2$.

Весь обширный диапазон значений звукового давления, мощности и интенсивности выражают не многозначными числами, а десятичными логарифмами отношения их значений к значениям, соответствующим порогу слышимости при эталонной частоте.

Эти отношения соответственно называются: уровень звукового давления (L_p), уровень звуковой мощности (L_P) и уровень интенсивности звука (L_I). Они измеряются в относительных единицах, которую условно называют децибел (дБ).

Методы измерения уровня шума и вибрации при промышленных испытаниях изложены в ГОСТ 11929—87 и 12379—75. Эти стандарты не устанавливают методы определения шума и вибраций в нестационарных процессах — пуски, реверсы, торможения и др. По уровню шума электрические машины разделены на четыре класса. К классу 1 относят машины, к которым не предъявляют требования по ограничению уровня шума, а также машины, разработанные до 1985 г. И доработка которых до класса 2 нецелесообразна; к классу 2 — машины экспортного исполнения и вновь разрабатываемые машины, к классу 3 — малошумные машины с малошумными подшипниками качения и глушителями вентиляционного шума, к классу 4 — особо малошумные машины, в которых дополнительно предусмотрено

пониженное использование активных материалов и установка звукоизолирующего кожуха. Предельные значения уровней шума машин классов 2, 3, 4 должны быть ниже уровней шума машин класса 1 на 5, 10 и 15 дБ соответственно.

Прибор для измерения шума (уровня звука или звукового давления), состоящий из микрофона, усилителя, частотных фильтров и индикатора, называется шумомером.

В зависимости от точности измерения шумомеры делятся (ГОСТ 17187—81) на 4 класса: 0,1,2,3.

Шумомеры 0-го и 1-го классов предназначены для точных измерений (частоты 20 Гц — 12,5 кГц), 2-го класса — для измерений нормальной точности (частоты 20 Гц — 8 кГц) и 3-го класса — для ориентировочных измерений (частоты 31,5 Гц — 8 кГц).

Шумомер имеет характеристики коррекции (частотные характеристики), обозначаемые буквами *A*, *B*, *C*, *D*. Указанные характеристики отражают субъективное восприятие шума человеческим ухом.

Обычно применяют частотную характеристику *A*, при которой разность показаний шумомера (в дБ) для двух различных шумов примерно равна разности уровней их громкости при восприятии на слух, что лучше всего учитывает степень физиологического воздействия.

Микрофон шумомера преобразует акустическую энергию в электрическую. При измерении шумов находят применение пьезоэлектрические, электродинамические и конденсаторные типы микрофонов.

Шумомер показывает уровень интенсивности звука (дБ), но не регистрирует частотного спектра. Измерение спектра амплитуд шума производят с помощью мплизатора частот, который состоит из входного усилителя, корректирующих цепей, избирательного и выходного усилителей.

Эти методы устанавливает ГОСТ 11929-86. Они позволяют определить следующие шумовые характеристики: уровень звуковой мощности, средний уровень звука на расстоянии 1 м от наружного контура машины, средний уровень звукового давления на расстоянии 1 м от наружного контура машины и показатель направленности звука.

6.2. Измерение вибрации

Измерение вибрации электрических машин позволяет контролировать ее качество и надежность, а также решать вопросы диагностики, амортизации и виброизоляции.



Рис. 6.1.
Виброметр цифровой
WINTACT WT63B

Периодическая вибрация может характеризоваться несколькими колебательными параметрами одновременно.

К параметрам линейной вибрации относятся перемещение (смещение), скорость, ускорение, резкость, сила и мощность. К параметрам угловой вибрации – угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение, угловая резкость, момент сил. К параметрам обоих видов вибрации относятся фаза, частота и коэффициент нелинейных искажений.

Мгновенное значение координаты точки при колебательном движении называется смещением (s).

Первая производная смещения по времени называется скоростью, вторая – ускорением, третья – резкостью.

Для гармонического процесса смещение описывается уравнением

$$s = s_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi),$$

где s – смещение в момент времени t , s_0 – амплитудное значение смещения, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота колебаний, φ – начальная фаза колебаний.

Тогда амплитудные значения смещения, скорости и ускорения связаны омпенсациеи

$$a_0 = \omega \cdot v_0 = \omega^2 \cdot s_0.$$

Для количественной оценки амплитудных значений вибрации можно использовать различные значения. Обозначим a, s, v одним общим символом X . Физическая величина X для периодического процесса характеризуется четырьмя значениями: двойной амплитудой, пиковым значением, средним и среднеквадратическим значениями.

Все приводимые ниже математические определения относятся к величине вибрации $X(t)$, где X – мгновенное значение параметра, пределы интегрирования от t до $(t + T)$, где $T = 2\pi / \omega$.

Двойная амплитуда показывает полный размах колебаний и является важным параметром, тогда как смещение при колебаниях детали машины является критическим с точки зрения максимально допустимых механических напряжений и зазоров.

Пиковое значение – максимальное значение внутри интервала T . Оно эффективно при оценке кратковременных механических воздействий, например ударов и т.п.

Среднее значение

$$X_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [X(t)] dt$$

показывает временное развитие исследуемой вибрации, но его практическое применение ограничено вследствие того, что оно не имеет никакой связи ни с какой омпеческой величиной этих колебаний.

Среднеквадратическое значение

$$X_{\text{СКВ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} [X(t)]^2 dt}$$

является самой важной характеристикой, так как в ней учитывается временное развитие исследуемых колебаний и оно непосредственно отражает связь с энергией, а, следовательно, – с разрушающей способностью этих колебаний.

Абсолютные значения смещения, скорости и ускорения измеряются в *мкм*, *мм/с* и *мм/с²*, соответственно.

Относительные значения (уровень) скорости (v^*) и ускорения (a^*) могут выражаться в относительных единицах – децибелах и рассчитываться по уравнениям:

$$v^* = 20 \lg\left(\frac{v}{v_0}\right),$$

где v – измеренная величина скорости, а $v_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ *мм/с* – условный нулевой уровень скорости;

$$a^* = 20 \lg\left(\frac{a}{a_0}\right),$$

где $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ *мм/с²* – условный нулевой уровень ускорения.

Как отмечалось выше, измерение вибрации электрических машин (методы измерения) проводится в соответствии с ГОСТ 12379-75 для машин массой (0,5...2000) *кг* и частотой вращения (600...30000) *об/мин*, а для машин массой свыше 2000 *кг* – по ГОСТ 20815-75.

Основной измеряемой величиной является среднеквадратическое (эффективное) значение скорости, которое определяется в диапазоне частот от рабочей частоты до 2000 *Гц*.

В ряде случаев дополнительно требуется проведение спектрального анализа, а если в диапазон измерения входят частоты свыше 2000 *Гц*, то необходимо и определение вибрационного ускорения.

Результаты измерения могут быть выражены в абсолютных или в относительных единицах.

Для оценки вибрации собранных электрических машин устанавливается восемь классов: 0,28; 0,45; 0,70; 1,10; 1,80; 2,80; 4,50; 7,00. Индексы классов соответствуют максимально допустимой для данного класса эффективной вибрационной скорости в *мм/с*.

В качестве измерительной аппаратуры используются вибрационные приборы с виброизмерительными датчиками, а также – октавные и третьоктавные фильтры. Виброизмерительные датчики жестко крепятся к испытываемой машине (на штифтах, специальной мастике или с помощью постоянных магнитов).

При определении вибрации рекомендуется применять упругую установку электрической машины. Машина должна устанавливаться в таком положении, в котором она эксплуатируется, если ее положение при эксплуатации может быть любым, испытания проводятся при горизонтальной установке. Контроль вибрации обычно производится при номинальной скорости, а для машин с регулируемой скоростью – при номинальной и максимальной рабочих скоростях вращения.

Вопросы для самоконтроля

Каков стандартный диапазон слышимости человеческого уха?

2. Перечислите источники шума, генерируемого электрическими машинами.
3. Назовите главные характеристики звука.
4. Что следует понимать под звуковым давлением?
5. Чем определяется интенсивность звука?
6. Что представляют собой пороговые характеристики звука?
7. По какой причине характеристики звука измеряются в относительных единицах?
8. Как определяется уровень интенсивности звука?
9. Что такое децибел?
10. С какой целью производится измерение вибрации электрических машин?
11. Назовите основные параметры линейной вибрации.
12. Какими значениями может быть охарактеризована любая физическая величина периодического процесса?
13. Какой параметр прежде всего подлежит определению при измерении (оценке) вибрации?

[содержание](#)

7. КОНТРОЛЬ И ПОДАВЛЕНИЕ РАДИОПОМЕХ

Источниками промышленных радиопомех (РП) в электрических машинах являются электромагнитные поля токов высокой частоты (с крутым фронтом изменения во времени), возникающие в скользящих контактах, особенно при омпенсационных процессах.

Источниками радиопомех могут быть также входящие в состав электрической машины устройства с полупроводниковыми элементами, регуляторы и т.п. Энергия радиопомех может излучаться как через зажимы машины, так и непосредственно в окружающее пространство.

В первом случае она может быть охарактеризована напряжением (и мощностью), измеряемым на зажимах электрической машины, а во втором – напряженностью электрического поля и мощностью излучения, измеряемыми с помощью антенны.

При этих измерениях устанавливаются мощности указанных величин в децибелах, т.е. логарифмы их отношений к пороговым значениям, соответствующим “нулевым” уровням.

Радиопомехи могут проявляться в полосе частот $(0,01...1000) МГц$. Применительно к электрическим машинам они контролируются в полосе частот $(0,1...30) МГц$ (напряжение, $мкВ$) и $(0,1...300) МГц$ (напряженность электрического поля, $мкВ/м$).

Уровень помех, создаваемых коллекторными машинами, определяется главным образом качеством коммутации и коммутационными параметрами (зависит в частности от числа витков в секции). Кроме того он зависит от емкости обмоток и соединительных элементов по отношению к земле, а также – от их индуктивности в диапазоне частот радиопомех. Явно выраженной зависимости уровня радиопомех от мощности машины не установлено.

Основные положения, определяющие методы испытания источников промышленных радиопомех, устанавливают ГОСТ 16842-82 и ГОСТ 11001-80. Для электрических машин, работающих в сетях жилых домов и вне этих

сетей, допустимые уровни радиопомех (в \square омпенсац) регламентируются нормами 1-72 и 9-72, соответственно. Их перевод (из L , дБ) в напряжение (U , мкВ) производится по формуле

$$U = 10L/20 .$$

Защита от радиопомех осуществляется включением между зажимами электрической машины и ее корпусом (землей) конденсаторов емкостью $(0,05 \dots 2) \text{ мкФ}$.

Ориентировочные данные о емкости конденсаторов, включаемых между зажимами якоря и корпусом ($C_{\text{я}}$) и зажимами параллельной обмотки возбуждения и корпусом ($C_{\text{ш}}$), в зависимости от мощности машины при допуске уровне помех до 103 мкВ на частоте $0,16 \text{ МГц}$ приведены в таблице 7.1:

Рабочее напряжение конденсаторов, включаемых на зажимы якоря, выбирается в $(1,5 \dots 2)$ раза большим, чем максимальное рабочее напряжение машины. Для конденсаторов, присоединяемых к зажимам параллельной обмотки, это отношение повышается до $(2 \dots 3)$ с учетом возможных перенапряжений на зажимах этой обмотки при ее отключении.

Таблица 7.1 Значения емкости конденсаторов

Емкость, мкФ	Мощность, кВт				
	До 2	2...5	5...50	50...100	1000...5000
$C_{\text{я}}$	0,1...0,2	0,25	0,5	1,...1,5	2
$C_{\text{ш}}$	0,1...0,2	0,25	0,25	0,25	0,25

При выборе рабочего напряжения конденсаторов, в особенности у низковольтных машин, должно быть учтено также напряжение измерителей сопротивления изоляции (мегаомметров), которыми производится профилактическая проверка установки без отключения конденсаторов.

В некоторых случаях конденсаторы включаются не только на выходные зажимы, но и непосредственно между щеткодержателем и корпусом. Большое значение при этом имеет длина соединительных проводов: чем они длиннее, тем больше индуктивность и хуже защита.

При включении конденсаторов защиты от радиопомех между зажимами (щеткодержателями) и металлическим корпусом двигателя последний может оказаться под напряжением относительно земли. Поэтому в тех случаях, когда возможно \square осание руками незаземленного корпуса, емкостной ток (при переменном токе) не должен превышать 1 мА , а ток утечки (при постоянном токе) – 5 мА (значения, при которых не создается неприятных ощущений).

Этим требованиям отвечает суммарная емкость защитных конденсаторов $0,013/0,023 \text{ мкФ}$ при напряжениях $220/127 \text{ В}$, соответственно.

Для устройств, касающихся кожного покрова (например электробритвы, машинки для стрижки волос и т.п.) этот ток не должен превышать $0,3 \text{ мА}$.

Лучшим решением с точки зрения техники безопасности при отсутствии заземления является изолирование двигателя от корпуса прибора, куда он встроен, либо применение защитного пластикового корпуса.

Подбор схемы защиты и входящих в нее элементов производится обычно экспериментально.

Вопросы для самоконтроля

1. Что является источником радиопомех в электрических машинах?
2. Какими физическими параметрами характеризуются радиопомехи в электрических машинах?
3. Назовите диапазон частот, в котором могут проявляться радиопомехи.
4. От каких параметров зависит уровень помех, создаваемых коллекторными машинами постоянного тока?
5. Каким образом осуществляется защита от радиопомех?
6. Чем определяется величина суммарной емкости конденсаторов, включаемых между щеткодержателями и корпусом машины?

[содержание](#)

8. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИСПЫТАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

8.1. Принципы автоматизации испытаний

8.1.1. Причины необходимости автоматизации испытаний

1. Практика показывает, что затраты времени на проведение контрольных операций при изготовлении электрических машин в среднем составляет до 13 % от общей трудоемкости.

Усредненные нормы времени на проведение приемосдаточных испытаний одной электрической машины средней мощности составляют 3...35 часов (для разных типов). На проведение периодических испытаний одной электрической машины уже требуется (48...250) часов. Средние нормы времени на обработку результатов приемосдаточных испытаний одной машины составляют (0,6...4) часа, а периодических испытаний – (40...90) часов.

Столь высокая трудоемкость испытаний заставляет искать пути ее снижения.

Таким образом, одно из возможных направлений автоматизации испытаний электрических машин связано с обеспечением их серийного производства, что омпенсует, кроме отмеченных выше задач, обеспечить сбор объективных статистических данных, а следовательно – эффективный контроль технологического процесса.

2. Постоянное повышение требований к технико-эксплуатационным характеристикам электрических машин привело к чрезвычайно обширной номенклатуре показателей качества. Соответствующие требования к этим показателям равно как и к методам их оценки отражены в многочисленных государственных стандартах. Таким образом, существует объективная необходимость в проведении:

– длительных и непрерывных (круглосуточных) испытаний на надежность, требующих систематического контроля большой группы разнообразных параметров с одновременным их анализом;

– испытаний, требующих применение сложной аппаратуры, предполагающей высокую квалификацию обслуживающего персонала, что например характерно для определения виброакустических характеристик электрических машин.

В перечисленных случаях требуется обработка (часто оперативная) больших массивов информации с использованием специфического математического аппарата теории вероятности и математической статистики. По понятным причинам применение в этих условиях “ручных” методов оказывается малоэффективным.

3. При испытаниях электрических машин широкое применение находят косвенные методы. Они используются в двух случаях:

– когда требуемый параметр или характеристика не могут быть найдены прямым измерением;

– при определении технико-эксплуатационных характеристик электрических машин, непосредственное испытание которых экономически невыгодно или технически затруднительно.

Иными словами это можно сформулировать как необходимость получения полной информации об объекте испытаний при ограниченном наборе исходных данных. К подобным же методам прибегают и в целях сокращения объема испытаний.

4. Возрастающая сложность основного оборудования, систем управления и контроля уже в настоящее время приводят к значительному увеличению объема работ, связанных с эксплуатационным обслуживанием (профилактика, проверки, ремонты и т.п.) электрических машин. Техническое обеспечение процесса дефектации при ремонте электрических машин обуславливает необходимость их разборки для окончательной оценки состояния. Все это связано с затратами труда, времени, а также с экономическими потерями, вызываемыми вынужденным простоем основного оборудования. Следовательно, развитие и совершенствование диагностики электрических машин должно основываться на применении методов, обеспечивающих определение их технического состояния в процессе функционирования. В связи с многообразием эксплуатационных факторов, влияющих на работу машины, и большим числом параметров, характеризующих ее состояние, система контроля должна осуществлять непрерывное определение указанных параметров и выполнять их сравнение с допустимыми или пороговыми значениями.

8.1.2. Структура автоматизированных систем испытаний

Автоматизация испытаний позволяет:

– уменьшить трудоемкость подготовки и проведения испытаний, включая и процесс обработки экспериментальных данных;
повысить точность и достоверность результатов;
сократить число испытателей;

– улучшить условия труда, в том числе – усилить меры по технике безопасности.

Комплексная автоматизация испытаний предполагает взаимосвязанную автоматизацию. Поэтому в системах автоматизированных испытаний можно выделить следующие три подсистемы:

1. Автоматическое измерение контролируемых величин, их обработку и сравнение с допустимыми значениями, выдачу протоколов испытаний.

2. Механизация операций по перемещению изделий, подключение и отключение питающих и измерительных цепей, соединение и разъединение с нагрузочными или приводными установками.

3. Систему управления, обеспечивающую необходимую последовательность и синхронизацию операций в соответствии с программой испытаний.

8.1.3. Особенности методов экспериментального исследования при автоматизации испытаний

В автоматизированных измерительных системах находят применение как прямые, так и косвенные методы измерений.

При прямых методах используются первичные измерительные преобразователи, осуществляющие преобразование измеряемой физической величины в постоянное напряжение или ток с последующим их преобразованием в цифровой код и вводом его в ЭВМ. Однако выпускаемые в настоящее время измерительные преобразователи из-за ограниченности частотного диапазона не обеспечивают высокой точности, в частности при несинусоидальных сигналах.

Широкое внедрение микроЭВМ открывает новые возможности для автоматизации исследований и испытаний электрических машин. Их использование позволяет не только автоматизировать процессы управления режимами испытаний, сбора данных при проведении опытов, обработки их результатов, получения документов в виде протоколов и графиков, но и, наряду с возможностью использования косвенных методов, – отказаться от традиционных методов измерения контролируемых величин.

Суть этого заключается в прямом измерении мгновенных значений сигналов, записи их в память ЭВМ и проведении необходимых вычислений, в результате которых на экран видеотерминала или на печатающее устройство выдаются значения физических параметров.

Например, действующие значения напряжения, тока, активной мощности и коэффициента мощности определяются по уравнениям:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot dt} ;$$
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) \cdot dt} ;$$
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt ;$$
$$\cos\varphi = \frac{P}{U \cdot I} ,$$

где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока в момент времени t , T – период измеряемого сигнала.

Такой подход к построению измерительных каналов обеспечивает сокращение аппаратных средств за счет уменьшения контролируемых параметров и высокую точность измерения, в том числе и сигналов несинусоидальной формы.

С точки зрения упрощения и удешевления систем автоматизированных испытаний желательно, чтобы максимальное число испытаний проводилось методами, не требующими соединения с валом испытуемой машины. В основе таких методов лежит измерение скорости вращения и ее изменения (при пуске, выбеге и т.п.) с помощью, например фотодиодов и обработки этих данных с помощью электронных схем (дифференцирующие и интегрирующие цепочки).

8.1.4. Общие принципы автоматизации испытаний

Автоматизация испытаний может быть успешной лишь в том случае, если она предусматривается уже на стадии проектирования электрической машины, при разработке технологии изготовления и технологии контроля на всех операциях, при разработке технических условий на машину и программы ее испытаний. При проектировании электрической машины должна быть обеспечена доступность ко всем местам подключения токоведущих элементов схемы испытания и ко всем местам установки измерительных преобразователей.

Наибольшую эффективность автоматизация приемосдаточных испытаний будет обеспечивать в том случае, когда имеется хорошо отлаженный технологический процесс с устойчивой технологией. В этом случае программа ПСИ может быть существенно упрощена в связи с переводом некоторых видов испытаний наиболее трудных для автоматизации (например, испытание под нагрузкой) в категорию выборочных, т.е. периодических. При этом возможно также сокращение времени некоторых видов испытаний, например таких, как проверка электрической прочности изоляции и т.п. В полной мере также должна использоваться такая возможность уменьшения трудоемкости и энергоемкости ПСИ как выбор простейших параметров, например параметров холостого хода и короткого замыкания, сочетание которых определяет значения нормируемых параметров, также применение искусственных методов нагружения, не требующих механического соединения испытуемой машины с нагрузочным устройством.

Оценка контролируемых параметров может производиться двумя способами:

- для таких испытаний как проверка сопротивления изоляции, испытание ее электрической прочности, испытание на отсутствие межвитковых коротких замыканий, результаты испытаний могут оцениваться по способу “годен-негоден” (да-нет) путем сравнения измеренного значения с заданным;
- для изучения или контроля стабильности технологического процесса могут использоваться также измерение и фиксация значений контролируемого параметра, если оно выходит за пределы допуска, или измерение и фиксация контролируемых параметров независимо от того попадают они в зону допуска или нет, но с отметкой о годности или негодности на основе автоматического сравнения с заданными предельными значениями.

8.2. Общая характеристика средств автоматизации испытаний

Во всяком экспериментальном исследовании можно выделить несколько основных типовых блоков.

1. Экспериментальная установка с объектом, воспроизводящие исследуемый процесс или явление.
2. Для задания и выдерживания необходимых значений параметров объект снабжается системой управления. При этом, как правило, цифровая информация преобразуется в аналоговую с помощью цифроаналоговых преобразователей (ЦАП).
3. Следующей по основному потоку движения информации является измерительная система. Измеряемыми величинами являются физические величины ($U, I, P, t, \varphi, l, p, f$ и т.п.).

Первоначальными источниками информации о значениях измеряемых величин служат датчики. Чаще всего датчики выдают сигнал в аналоговой форме (непрерывный во времени). Если сигнал, получаемый от датчика, не является электрическим, его преобразуют в токовый или потенциальный; если сигнал слабый, его усиливают.

Сигналы от датчиков поступают на измерительные устройства. Обычно измерительные устройства, применяемые в автоматизированных системах, имеют цифровую индикацию и цифровое представление результата на выходе. Узел, переводящий аналоговую информацию в цифровую, носит название аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Иногда для экономии оборудования одни и те же измерительные устройства могут обслуживать большое число датчиков. Поочередное подключение датчиков к компентелю и измерительной части осуществляется коммутатором.

4. Одной из самых ответственных частей системы является узел обработки информации и управления. Он включает в себя процессор, оперативное запоминающее устройство и систему математического обеспечения.

Процессор осуществляет обработку данных по заданному алгоритму, т.е. по заданному набору формальных правил, описывающих способ преобразования исходных данных для получения результата.

Запоминающее устройство имеет иерархическую структуру. В оперативной его части (ОЗУ) содержатся данные для обработки, программы обработки и промежуточные результаты. Во внешних запоминающих устройствах (ВЗУ) хранятся результаты, образующие банк данных.

5. Обязательными являются устройства ввода-вывода и общения с экспериментатором на дисплее (для удобства восприятия данных), а также – устройства вывода данных на основе алфавитно-цифровой печати (АЦПУ) и графопостроителя. Формы и способы представления информации на входах и выходах различных устройств могут не совпадать.

Соединение устройств между собой осуществляется посредством интерфейсов. Интерфейс это – стандарт на сопряжение двух блоков, определяющий число сопрягаемых линий, назначение каждой линии, содержание информации, передаваемой по каждой линии, направление передачи, кодировку информации, временные и амплитудные характеристики сигналов по каждой линии, типы разъемов. Главный интерфейс системы – это стык между ЭВМ и измерительной частью.

В автоматизированных системах в случае, если какие-либо узлы или блоки системы, подключаемые к ЭВМ, не имеют стандартного интерфейса, они подключаются через переходники (адаптеры).

Функционально законченные элементы системы, имеющие одинаковый интерфейс входа-выхода, называются модулями. При наличии типовых модулей разного назначения система может быть составлена из них полностью или частично. Аналогичная картина выявляется и в части программного обеспечения. Оформляя типовые программы обработки данных, отображения данных, управления объектом и т.д. в виде модулей, можно из таких модулей составить программу для автоматизации эксперимента выбранными средствами или использовать эти модули как часть создаваемой системы программного обеспечения.

При сборке автоматизированной системы используются модули различного типа: датчики сигналов, усилители, измерители, коммутаторы, интерфейсы, хранители информации (запоминающие устройства); модули обрабатывающие, регистрирующие, отображающие информацию в виде удобном для восприятия и т.п.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите причины, обуславливающие необходимость автоматизации испытаний электрических машин.
2. Что позволяет обеспечить автоматизация испытаний?
3. Какие подсистемы должны быть в системе автоматизации испытаний?
4. Дайте характеристику особенностей экспериментальных методов, используемых в автоматизированных системах испытаний.
5. Какой подход к измерению контролируемых параметров позволяет существенно сократить аппаратные средства и повысить точность результатов испытаний в случае их автоматизации?
6. Назовите две составляющие, обеспечивающие успешность и эффективность автоматизации приемосдаточных испытаний.
7. Перечислите возможные упрощения в проведении автоматизированных приемосдаточных испытаний.
9. Назовите главные структурные блоки типовой схемы автоматизированных экспериментальных исследований.

[содержание](#)

9. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ РЕМОНТЕ

9.1. Виды испытаний ЭМ

В настоящее время около 50 % эксплуатируемого парка электродвигателей составляют машины, которые были капитально отремонтированы по крайней мере один раз. Естественно, что к КР предъявляются серьезные технические требования в отношении надежности и технических характеристик отремонтированных машин. Для обеспечения необходимого качества все ремонтируемые двигатели проходят ряд испытаний, которые можно разделить на три группы:

- предремонтные испытания;
- промежуточные испытания (операционные) – в процессе ремонта;
- сдаточные испытания.

Цель предремонтных испытаний – определить, какие узлы машины являются дефектными и подлежат ремонту или замене.

Предремонтные испытания и измерения включают в себя измерения геометрических размеров узлов и деталей, величин механических износов и отклонений (эксцентриситет, биение, конусность), а также в необходимых случаях электрические испытания (измерение сопротивления изоляции и сопротивления обмоток при постоянном токе, проверка электрической прочности изоляции и состояния сердечника статора, определение величины потерь в стали).

Промежуточные испытания служат для того, чтобы в процессе ремонта на различных его стадиях выявить допущенные при ремонте неисправности, примененные дефектные материалы, узлы и своевременно выполнить необходимые исправления, так как дефекты, обнаруженные при сдаточных испытаниях, требуют для исправления затраты больших средств.

В объем промежуточных испытаний при ремонте входит обычно испытание электрической прочности изоляции запаянных и вновь изготовленных обмоток как до укладки (проверяется витковая и общая изоляции), так и после укладки обмотки в пазы (до соединения и пайки) и, наконец, после пайки и изолировки соединений. Испытывается также электрическая прочность изоляций бандажей, лобовых частей обмотки, стяжных и крепежных болтов, контактных колец. После пайки схемы обычно проверяют ее правильность. После пропитки и сушки проверяют сопротивление изоляции всей обмотки относительно корпуса и между фазами обмотки.

Технические условия на ремонт электрических машин устанавливают два вида испытаний после капитального ремонта (сдаточные): контрольные и типовые.

Контрольным испытаниям подвергаются все электрические машины, отремонтированные без изменения мощности или частоты вращения, то есть электрические \square шины, у которых при ремонте сохранены электрические и магнитные нагрузки. В объем контрольных испытаний АД после ремонта входит:

- измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками;
- измерение сопротивления обмоток при постоянном токе;
- определение тока и потерь холостого хода;
- определение тока и потерь короткого замыкания;
- испытание при повышенной частоте вращения (только при замене обмотки ротора или бандажей);
- испытание межвитковой изоляции обмоток на электрическую прочность;
- испытание изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками на электрическую прочность;
- определение коэффициента трансформации (для АД с фазным ротором);
- обкатка электродвигателей на холостом ходу (определение выбега электродвигателя).

Если ремонт крупных АД производится на месте их установки, то, кроме перечисленных, при контрольных испытаниях необходимо провести опробование под полной нагрузкой в течение 24 ч.

В объем типовых испытаний, которому подвергаются ЭМ, отремонтированные с изменением мощности или частоты вращения, либо машины, поступившие в ремонт без заводских щитков и выпущенные после ремонта с номинальными данными,

определенными расчетом, входят, кроме объема контрольных испытаний, так же испытания на нагревание и кратковременную перегрузку по току. Кроме того, при типовых испытаниях определяют значения КПД, $\cos\phi$, скольжения, M_{\max} , M_{\min} в процессе пуска, начальный $M_{\text{пуск}}$ и $I_{\text{пуск}}$.

При проведении сдаточных испытаний должна соблюдаться приведенная последовательность операций. При всех испытаниях для измерения электрических величин должны применяться приборы необходимого класса точности – 0,5. Исключение составляют измерения сопротивления изоляции мегомметром и мощности в трехфазной сети одним ваттметром (допускается применять ваттметр класса «1»). Для обеспечения необходимой точности приборы следует подбирать так, чтобы измерение электрических величин находилось в пределах 25...95 % шкалы. Если при испытаниях производятся измерения по нескольким приборам, необходимо показания всех приборов снимать одновременно.

9.2. Испытание электродвигателей после текущего ремонта

9.2.11. Испытание изоляции обмоток ЭМ повышенным напряжением

Повышенным напряжением (частота 50 Гц) испытывают изоляцию каждой фазы обмотки относительно корпуса ЭМ при заземленных других фазах(табл. 9.1). Обмотки ЭМ должны выдерживать испытание повышенным напряжением в течение 1 мин.

При испытаниях напряжение плавно повышается на 1..2 % испытательного напряжения в секунду до значения, указанного в табл. 17.1 (n – порядковый номер текущего ремонта), затем выдерживается в течение 1 мин и плавно снижается. Разрешается отключать напряжение, если оно составляет не более 30% $U_{\text{исп}}$. Изоляция считается выдержавшей испытание, если не наблюдались ее пробой, частичные разряды, появление дыма или газов, резких колебаний напряжения и увеличение тока через изоляцию.

Таблица 9.1

Значение $U_{\text{исп}}$ при испытаниях после текущего ремонта

Машина или ее часть	Значение $U_{\text{исп}}$
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором при напряжении $U_{\text{H}} \leq 500\text{В}$	$2U_{\text{H}} + 1000 - 50n$
Синхронные генераторы при $U_{\text{H}} \leq 500\text{В}$	Обмотка статора - $2U_{\text{H}} + 1000 - 50n$ Обмотка возбуждения - $1500 - 50n$
Генераторы постоянного тока	Обмотка якоря - $2U_{\text{H}} + 1000 - 50n$
Роторы асинхронных и синхронных машин	1 Мом на 1кВ, но не менее 0,5 Мом

Продолжение табл. 9.1

Сварочные трансформаторы	
--------------------------	--

$U_H = 220B$	$220 + 1500 - 50n$
$U_H = 380B$	$380 + 2000 - 50n$

9.2.2. Измерение тока холостого хода

Собирают схему включения двигателя и обкатывают его на холостом ходу (табл. 9.2) при номинальном напряжении.

Таблица 9.2

Время обкатки электрических машин зависит от мощности двигателя

Мощность двигателя, кВт	Время обкатки не менее
До 1	5 мин
От 1 до 10	15 мин
Свыше 10 до 100	30 мин
100 ... 1000	5 мин
Свыше 1000	2 ч

В процессе обкатки измеряют ток холостого хода, предельные значения которого (в процентах номинального тока) не должны быть больше значений, указанных в табл. 9.3.

Таблица 9.3 – Предельные значения тока холостого хода АМ ($I_0 / I_H \cdot 100\%$)

Мощность электродвигателя, кВт	Частота вращения, об/мин				
	3000	1500	1000	750	500
0,1...0,5	60	75	85	90	-
0,51...1	50	70	75	80	90
1,1...5	45	65	70	75	85
5,1...10	40	60	65	70	80
10,1...25	30	55	60	65	75
25,1...50	20	50	55	60	70
50,1...100	-	40	45	50	60

9.2.11. Измерение сопротивления изоляции мегомметром

Сопротивление изоляции измеряют мегомметром напряжением 500 В для двигателей с $U_{1H} < 500 В$ включительно и 1000 В – для двигателей с $U_{1H} > 500 В$. , при $U_{1H} > 1000 В$ – мегомметром с напряжением 2500 В. Ручку мегомметра следует вращать со скоростью примерно 120 об/мин. При измерении сопротивления изоляции крупных машин показания мегомметра увеличиваются постепенно и из следует отсчитывать через 15 (R_{15}) и 60 сек (R_{60}) с начала вращения рукоятки. После окончания испытаний остающийся на обмотке потенциал высокого напряжения необходимо снять путем ее заземления на 1 мин. При этом заземляющий проводник подсоединяется к корпусу ЭМ а затем к выводу обмотки.

Отсчет сопротивления изоляции следует производить дважды: через 15 и 60 с после появления на обмотках напряжения, при котором производятся измерения. В результате измерений помимо сопротивления изоляции, соответствующему измерению через 60с (R_{60}), определяют коэффициент абсорбции $k_{аб} = R_{60} / R_{15}$, который для неувлажненной изоляции не менее $k_{аб} \geq 3$.

Минимальные значения сопротивления изоляции машин при температуре 10-30 °С приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4 – Величина сопротивления изоляции электрических машин при температуре 10-30 °С

Испытуемый объект	Напряжение мегомметра, <i>кВ</i>	Сопротивление изоляции, <i>Мом</i>
Сопротивление изоляции машин постоянного тока		
Между обмотками и каждой обмотки относительно корпуса	1	0,5
Бандажей якоря (кроме возбuditелей)	1	Не нормируется
Бандажей якоря возбuditеля	1	1
Сопротивление изоляции электродвигателей переменного тока до 1 <i>кВ</i>		
обмотки статора	1	0,5
обмотки ротора синхронного электродвигателя и электродвигателя с фазным ротором	0,5	0,2
Сопротивление изоляции электродвигателей переменного тока выше 1 <i>кВ</i>		
обмотки статора	2,5	6,0
обмотки ротора	1	0,5

Наименьшее допустимое сопротивление изоляции (R_{60}) обмоток высоковольтных машин переменного тока мощностью до 5000 *кВт* на номинальное напряжение до 10,5 *кВ* должно соответствовать нормам, приведенным в табл. 9.5 машин постоянного тока - в табл. 9.6.

Таблица 9.5 – Допустимое сопротивление изоляции обмоток R_{60} высоковольтных машин переменного тока

Температура обмотки, °С	R_{60} , <i>Мом</i> , при номинальном напряжении, <i>кВ</i>		
	3	6	10
10	96	190	30
20	48	96	160
40	24	48	80
60	12	24	40
80	6	12	20
100	3	6	10

Таблица 9.6 – Допустимое сопротивление изоляции обмоток R_{60} машин постоянного тока

Температура обмотки, °С	$R_{60}, \text{Мом},$ при номинальном напряжении, В			
	220	460	750	900
10	2,7	5,3	9,3	10,8
20	1,85	3,7	6,3	7,5
40	0,85	1,75	2,9	3,5
60	0,4	0,8	1,35	1,6
70	0,3	0,5	0,9	1
75	0,22	0,45	0,75	0,9

Для машин мощностью выше 5000 кВт, а также для машин на номинальное напряжение выше 10,5 кВ наименьшее допустимое сопротивление изоляции, измеренное при температуре $\theta=75^\circ\text{C}$, должны быть не менее, Мом

$$R_{\text{из}} \geq \frac{U_{1\text{H}}}{1000 + 0,01 S_{\text{H}}}, \quad (9.1)$$

где $U_{1\text{H}}$ - номинальное напряжение, В; S_{H} - номинальная мощность, кВт·А (для машин постоянного тока, кВт).

В то же время сопротивление должно быть не менее 0,5 Мом.

Расчетная рабочая температура двигателей равна 75°C для классов нагревостойкости изоляции А, Е, В и 115°C для классов F, H. Кроме того, известно, что сопротивление изоляции уменьшается вдвое при повышении температуры на каждые 20°C (полные или неполные). Поэтому, если сопротивление измерялось при температуре θ ниже рабочей, его необходимо увеличить.

Минимальное сопротивление изоляции при температуре θ

$$R_{\text{из}\theta} \geq R_{\text{из}} \cdot 2^h, \quad (9.2)$$

где $R_{\text{из}}$ - сопротивление изоляции, рассчитанное по (4.1), но равное не менее 0,5 Мом;

$$h = (\theta_{\text{раб}} - \theta) / 20 \quad (9.3)$$

округляется до ближайшего большого целого числа.

Пример. Определить возможность дальнейшей эксплуатации двигателя, если сопротивление изоляции (класс F) обмоток статора, измеренное при $\theta = 24^\circ\text{C}$, составляет 15 Мом ($U_{\text{H}} = 660 \text{ В}$; $S_{\text{H}} = 200 \text{ кВт}\cdot\text{А}$).

Из (9.1) сопротивление изоляции при рабочей температуре составляет

$$R_{\text{из}} = \frac{660}{1000 + 0,01 \cdot 200} \approx 0,659 \text{ Мом.}$$

Поскольку $R_{\text{из}} > 0,5 \text{ Мом}$, то для расчета принимается $R_{\text{из}} = 0,659 \text{ Мом}$.

При классе нагревостойкости изоляции F рабочая температура $\theta_{\text{раб}} = 115^\circ\text{C}$, поэтому коэффициент $h = (115 - 24) / 20 = 4,55$. Принимаем $h = 5$.

Минимально допустимое сопротивление изоляции при температуре $\theta = 24^\circ\text{C}$ должно быть

$$R_{\text{из}\theta} = 0,659 \cdot 2^5 \approx 21,1 \text{ Мом..}$$

Поскольку измеренное значение сопротивления изоляции ($R_{из}=15 \text{ Мом}$) меньше минимально допустимого при температуре $\theta = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ($R_{из\theta}=21,1 \text{ Мом}$), дальнейшая эксплуатация двигателя без ремонта обмоток невозможна.

9.2.11. Определение технического состояния корпусной и межфазной изоляции

Диагностическими параметрами оценки технического состояния изоляции обмоток ЭМ на напряжение до 660 В относительно корпуса являются следующие характеристики токов утечки: абсолютное значение; асимметрия в фазах; приращение при увеличении напряжения; стабильность при увеличении напряжении (отсутствии бросков колебаний). При этом следует:

1. Заземлить обмотки двух фаз АД (рис. 9.1,а), а обмотку свободной фазы омпенсчить к прибору или к схеме. Схема должна позволять плавно регулировать напряжение от 200 В до 2500 В;

R – для защиты схемы от возможных токов короткого замыкания;

C – для сглаживания пульсаций выпрямленного тока.

2. Включить прибор или схему, плавно повысить напряжение на обмотке двигателя до 1200 В и определить ток утечки. Плавно повысить напряжение до 1800 В и сделать отсчет тока утечки. При повышении напряжения до 1800 В не должны омпендаться колебания и броски тока утечки, абсолютное значение которого при напряжении 1800 В не должно превышать 150 мкА ($I_{y1800} \leq 150 \text{ мкА}$).

3. Вычислить относительное приращение токов утечки (прибор ВС-23 или схема для измерения тока утечки) при подъеме напряжения от 1200 В до 1800 В как отношение разности показаний микроамперметра ($I_{y1800} - I_{y1200}$) к показанию микроамперметра при 1200 В. Относительное приращение токов

$$\Delta I_y = \frac{I_{y1800} - I_{y1200}}{I_{y1200}} \leq 1. \quad (7.4)$$

4. Измерить относительное приращение токов утечки для остальных фаз.

5. При напряжении 1800 В вычислить коэффициент асимметрии токов утечки изоляции фаз обмоток как отношение тока утечки $I_{y \max}$ фазы, имеющей наибольшее значение, к току утечки $I_{y \min}$ фазы с наименьшим значением.

$$k_a = \frac{I_{y \max}}{I_{y \min}} \leq 2. \quad (7.5)$$

6. Проанализировать полученные результаты, если изоляция обмотки не удовлетворяет хотя бы одному из перечисленных условий, электродвигатель подлежит разбору. После определения причины ухудшения изоляции решается вопрос текущего или капитального ремонта.

По результатам испытания можно построить график зависимости токов утечки от значения подводимого напряжения (рис.9.1, б, в).

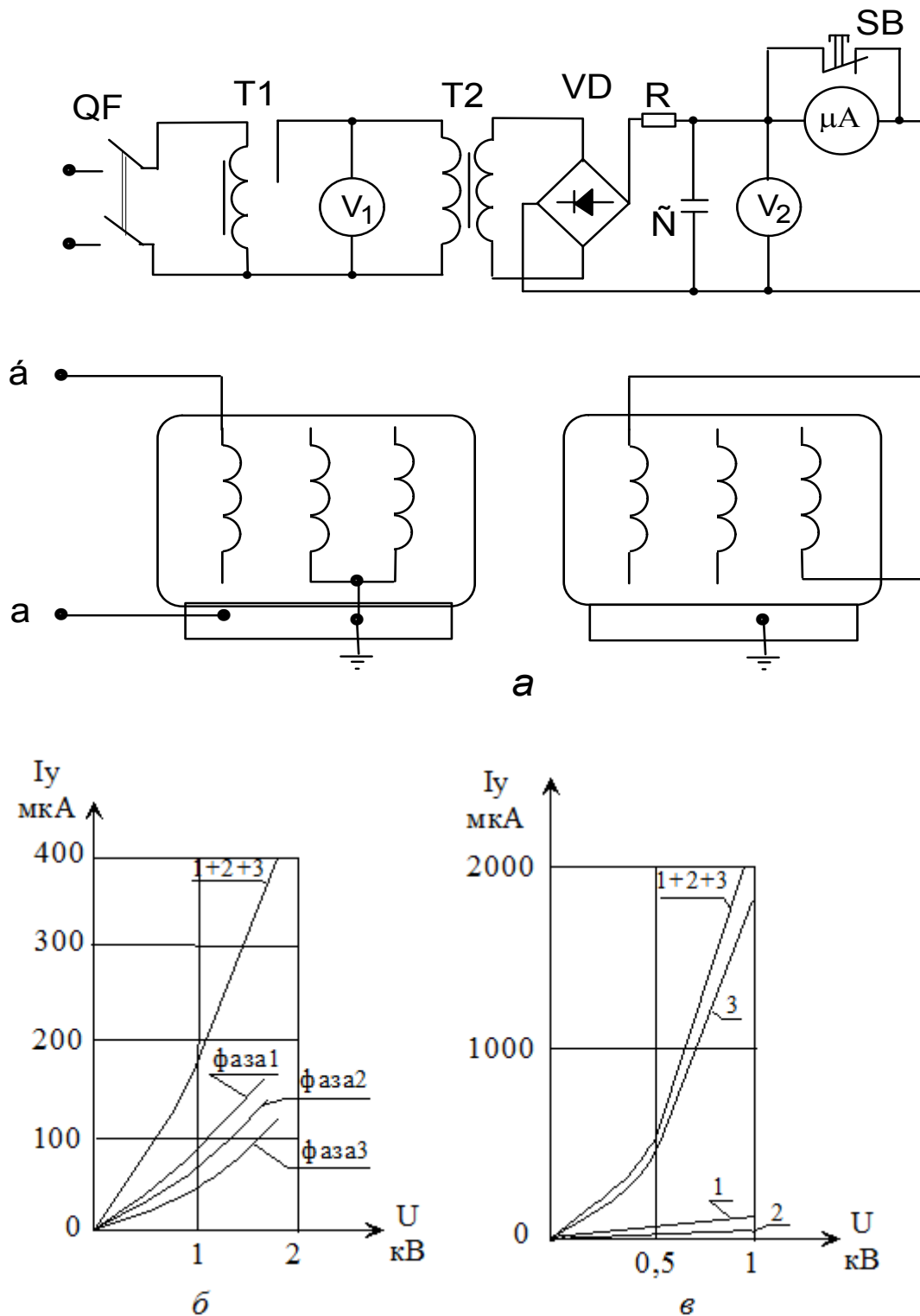


Рис. 9.1.

Измерение корпусной и межфазной изоляции:
 а – схема испытания; б – исправная изоляция
 фаз обмотки; в – неисправная изоляция 3-й фазы

9.2.5. Определение технического состояния межвитковой изоляции обмоток статора АД с короткозамкнутым ротором

Повреждение межвитковой изоляции обмотки является одной из наиболее широко распространенных причин отказов ЭМ. Основной параметр, определяющий техническое состояние изоляции – уровень ее электрической прочности.

Напряжение пробоя неповрежденных проводов с эмалевой изоляцией составляет $4\div 6$ кВ. Так как пробивное напряжение в месте возникновения дефекта достаточно велико (400 В и более), а перенапряжения в витках обмоток ЭМ кратковременны и возникают не часто, то с момента возникновения дефекта и до полного виткового замыкания проходит значительное время, достаточное для обнаружения дефекта.

Все выпускаемые аппараты разработаны для обнаружения виткового замыкания разобранных ЭМ. Методика диагностирования межвитковой изоляции собранных ЭМ основана на принципе измерения магнитной асимметрии обмоток. К АД подводится высокочастотное напряжение (от аппарата ВЧФ-5-3) не более 600 В, после чего напряжение повышается до 1500 В. Медленно проворачивая ротор АД рычагом из изоляционного материала на углы $5-10^\circ$, измеряют разность падений напряжений ΔU на испытуемых фазах.

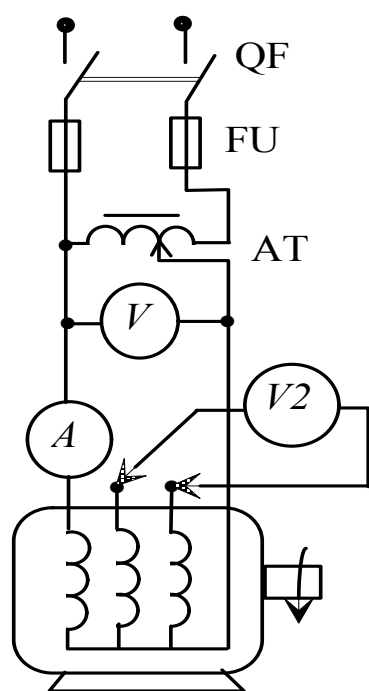


Рис. 9.2 Схема диагностики витковой изоляции

При наличии виткового замыкания показания вольтметра V_2 будут отличаться от нуля во всех положениях ротора.

При отсутствии виткового замыкания показания вольтметра V_2 будут отличаться от нуля только в некоторых положениях ротора, что обусловлено магнитной и возможной электрической асимметрией обмоток

Увеличение количества исследуемых положений ротора повышает достоверность полученных результатов.

После измерения необходимо отключить обмотку одной фазы и подключить обмотку непроверенной фазы. Произвести аналогичные испытания. При выявлении дефектов в межвитковой изоляции обмотка подлежит капитальному ремонту.

Диагностику электрических машин можно выполнять, используя портативный прибор ИДО-07, предназначенный для контроля обмоток.

Он позволяет обнаружить:

- междувитковые замыкания;
- обрыв фазы;
- неправильное соединение фаз трехфазной обмотки;
- межвитковые замыкания в катушках, уложенных в пазы статора;
- неудовлетворительное состояние изоляции относительно корпуса и между обмотками.

ИДО-7 позволяет выявить дефекты трехфазной обмотки в собранном виде, а также выявить дефекты распределенной обмотки статора или ротора разобранной машины напряжением до 1000В.

9.2.6. Сушка изоляции обмоток

Сушке подлежат обмотки, изоляция которых имеет большие токи утечки ($80 \div 50$ мкА), но при этом коэффициент их асимметрии не превышает 2 и при повышении напряжения не наблюдаются колебания или скачки токов утечки.

При отсутствии средств для измерения токов утечки необходимость сушки определяют измерением сопротивления изоляции мегомметром. При этом сушат обмотки, сопротивление изоляции которых менее $0,5$ Мом (при 20°C). Обмотки статора и фазного ротора подлежат замене, если при капитальном ремонте или после сушки сопротивление изоляции менее $0,5$ Мом при 20°C .

Изоляцию можно сушить несколькими способами: в сушильном шкафу, токовым и индукционным нагревом.

1. В сушильном шкафу сушат при температуре $80 \div 90^\circ \text{C}$ в течение $7 \div 10$ ч. Изоляция считается высушенной, если ее сопротивление не изменяется в течение $2 \div 3$ ч.

2. Для сушки токовым нагревом корпус электродвигателя заземляют и подключают через понижающий трансформатор к сети. В начале сушки через обмотку пропускают ток $60 \div 80$ % номинального значения. Во время сушки контролируют температуру обмотки и сопротивление изоляции. Токовым нагревом допускается сушка обмоток. Сопротивление изоляции которых не менее $0,1$ Мом.

3. Для сушки изоляции обмоток индукционным методом на станину статора наматывают намагничивающую обмотку с числом витков

$$w_{\text{нам}} = 45 \cdot 10^4 \cdot U_{\text{нам}} / (B_a \cdot Q_c), \quad (7.6)$$

где $U_{\text{нам}}$ - напряжение на намагничивающей обмотке, В;

B_a - индукция в станине ($B_a = 0,6 \div 0,8$ Тл);

Q_c - площадь сечения активной стали статора, см^2

Ток в намагничивающей обмотке

$$I_{\text{нам}} = \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot (Iw)_{\text{уд}} / w_{\text{нам}}, \quad (7.7)$$

где $D_{\text{ср}}$ - средний диаметр витка намагничивающей обмотки, см;

$(Iw)_{\text{уд}}$ - удельная МДС намагничивания (табл. 9.7)

Во время сушки контролируют сопротивление изоляции и температуру обмотки.

Таблица 9.7 – Значения удельной МДС

Индукция B_a , Тл	Удельная МДС для магнитопроводов из стали	
	электротехническая	легированная
0,5	1,5	0,7...0,85
0,6	2,2	1...1,2
0,7	2,75	1,3...1,45
0,8	3,7	1,7...2

У электродвигателей, обмотки которых намотаны проводом с волокнистой изоляцией (типа ПВД) после сушки обмотки пропитывают в изоляционных лаках. Для пропитки статор в вертикальном положении опускают в ванну с лаком,

выдерживают до прекращения выделения пузырьков воздуха, но не менее 10 мин, поднимают, дают стечь лаку, после чего сушат в сушильном шкафу при температуре $105 \div 110^{\circ}C$ в течение указанного времени (табл. 9.8).

Таблица 9.8 – Время сушки

Лак	Время сушки в шкафу, ч
МЛ-92	1
БТ-987	6
БТ-988	3

В результате сушки сопротивление изоляции при температуре $75^{\circ}C$ должно быть не менее значений, приведенных в табл. 9.9.

Таблица 9.9 – Наименьшие допустимые сопротивления

изоляция обмоток ЭМ при $t = 75^{\circ}C$ после сушки

Машина или ее часть	Наименьшее допустимое сопротивление изоляции
Статоры машин переменного тока	
$U_H \leq 1000B$	0,5 Мом на 1кВ рабочего напряжения
$U_H > 1000B$	1 Мом на 1кВ
Якоря машин постоянного тока при $U_H \leq 750B$	1 Мом на 1кВ
Роторы асинхронных и синхронных машин	1 Мом на 1кВ, но не менее 0,5 Мом
Электродвигатели напряжением $U_H > 3000B$	
Статоры	1 Мом на 1кВ
Роторы	0,2 Мом на 1кВ

При сопротивлении изоляции ниже 0,1 Мом сушка производится внешним нагревом или продувкой сухим горячим воздухом ($70 \div 80$) $^{\circ}C$. В качестве нагревателей могут применяться лампы накаливания, электронагревательные элементы, калориферные установки.

При сопротивлении изоляции выше 0,1 Мом сушка производится электрическим током, для чего обмотка якоря с катушками дополнительных полюсов подключается на пониженное напряжение, составляющее $3 \div 5\%$ номинального. При этом ток должен быть равен $50 \div 60\%$ номинального значения. Последовательная обмотка возбуждения машин постоянного тока должна обязательно отключаться.

9.2.7. Короткое замыкание в обмотках машин переменного тока

Возможны следующие замыкания: • между витками одной катушки; • между катушками или катушечными группами одной фазы; • между катушками разных фаз.

Основным признаком, по которому можно найти замыкание в обмотках переменного тока, является нагрев короткозамкнутого контура. Для этого необходимо ощупать обмотку после её отключения. Чтобы найти дефект в фазном

роторе асинхронного двигателя, ротор затормаживают и включают статор в сеть. В случае замыкания значительной части обмотки ротора или двигателя большой мощности испытание рекомендуется производить при пониженном напряжении. В некоторых случаях короткозамкнутую часть обмотки можно сразу определить по внешнему виду – по обуглившейся изоляции.

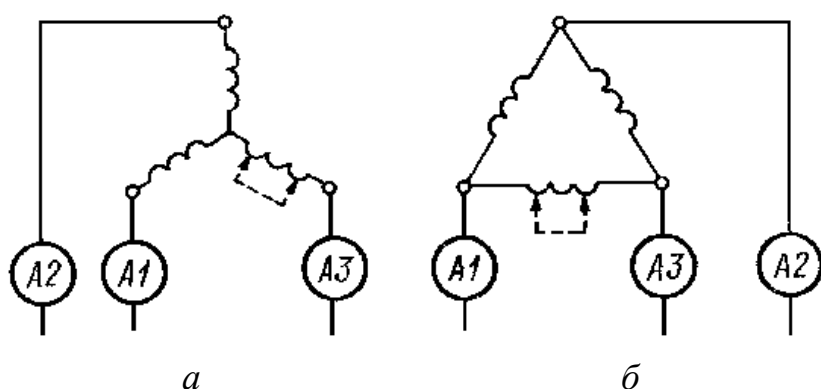


Рис. 9.3.
Пояснение признаков замыкания в обмотках при соединении звездой – (а) и треугольником – (б)

При наличии параллельных ветвей в обмотке короткое замыкание в одной из ветвей фазы может вызвать нагрев и другой ветви, не имеющей короткого замыкания, так как последняя оказывается замкнутой витками дефектной ветви обмотки.

Фазу, имеющую замыкание, можно найти по несимметрии потребляемого тока из сети. При соединении обмотки звездой (рис. 9.3, а) в фазе, имеющей замыкание, ток I_3 будет больше, чем в двух других фазах.

При соединении обмотки треугольником (рис. 9.3, б) линейные токи I_1 , I_3 будут больше, чем линейный ток I_2 .

Опыт определения дефектной фазы рекомендуется производить при пониженном напряжении (1/3–1/4 номинального). В случае асинхронного двигателя с фазным ротором обмотка последнего может быть разомкнута, а в случае асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором или же в случае синхронного двигателя ротор может вращаться или быть заторможенным.

При проведении опыта с синхронным двигателем в неподвижном состоянии его обмотка возбуждения должна быть замкнута накоротко или же на разрядное сопротивление.

Фаза, имеющая замыкание, может быть определена по значению ее сопротивления постоянному току, измеренного мостом либо по методу амперметра-вольтметра; меньшее сопротивление будет иметь фаза с замыканием.

Если же нет возможности разъединить фазы, то производят измерения трех междуфазных сопротивлений. В случае соединения фаз звездой (рис. 9.3, а) наибольшим будет междуфазное сопротивление, измеренное на концах фаз, не имеющих замыканий; два других сопротивления будут равных между собой и будут меньше первого. В случае соединения фаз треугольником (рис. 9.3, б) наименьшее сопротивление будет на концах фазы, имеющей замыкание; два других измерения дадут большие значения сопротивления, причем оба они будут одинаковы.

9.2.8. Диагностирование короткозамкнутых обмоток роторов разобранных асинхронных двигателей

Для определения технического состояния короткозамкнутых обмоток роторов разобранных АД существует много способов и приборов. Один способ, который не требует специального оборудования, - принцип порошково-магнитной дефектоскопии. Заключается он в том, что по стержням пропускают ток 300...500 А, который создает сильное магнитное поле. По конфигурации поля ориентируется металлический магнитный порошок (опилки), располагаемый тонким слоем на бумаге. Вдоль целых стержней порошок размещается сплошными полосками, а в местах обрыва стержней в полосках порошка прерывается.

8.2.9. Испытание активной стали статора

Цель испытания – проверка отсутствия замыканий между листами и вызванных этими замыканиями местных перегревов. Оно дает возможность оценить величину потерь в стали и определить исправность сердечника в собранном виде. Испытание проводят индукционным методом при вынутом роторе и значении индукции в спинке статора $B_j = 1 \text{ Тл}$. На статор намагничиваются (рис. 9.4) две обмотки – намагничивающая и контрольная.

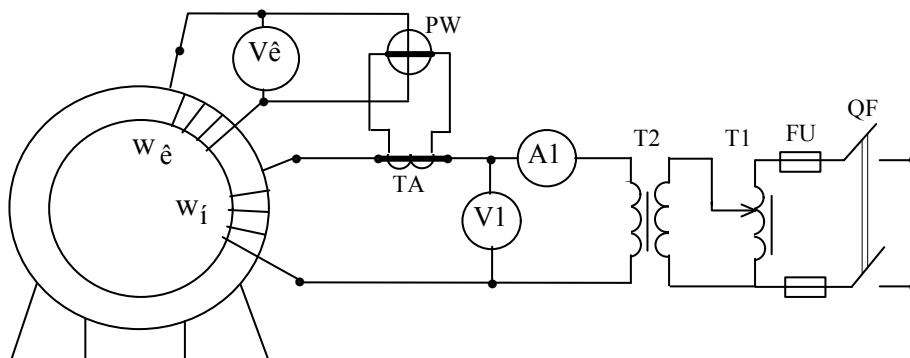


Рис. 9.4. Схема испытания активной стали статора

Намагничивающая обмотка выполняется проводом ПР или ПРГ сечением по табл. 9.9.

Таблица 9.9 – Зависимость Q_{np} от $I_{нам}$

$Q_{np}, \text{ мм}^2$	6	10	16	25	35	50
$I_{нам}, \text{ А}$	30	45	60	85	105	130

Допускается применение обмоточного провода, дополнительно изолированного пропитанной в лаке хлопчатобумажной лентой. При отсутствии провода необходимого сечения намагничивающую обмотку можно выполнить из нескольких параллельных проводников.

Применение свинцованного или бронированного кабеля недопустимо. Во избежание повреждения изоляции обмотки ее следует накладывать на прокладки из электрокартона. Статор и его обмотку заземляют

Число витков намагничивающей обмотки (при $B_j = 1 \text{ Тл}$)

$$w_{\text{нам}} = \frac{U_{\text{нам}} \cdot 10^4}{4.44 \cdot f \cdot S_c}, \quad (9.9)$$

где S_c - площадь сечения активной стали, см^2

Мощность, потребляемая намагничивающей обмоткой, $\text{кВ} \cdot \text{А}$,

$$P_{\text{нам}} = U_{\text{нам}} \cdot I_{\text{нам}} \cdot 10^{-3}. \quad (9.10)$$

Число витков контрольной обмотки

$$w_k = w_{\text{нам}} \cdot U_k / U_{\text{нам}}. \quad (9.11)$$

где U_k - напряжение на зажимах контрольной обмотки, которое выбирается удобным для измерения. Значение напряжения на вторичной обмотке U_k зависит от значения индукции, поэтому если U_k отличается от расчетной величины, то следует уточнить индукцию по формуле, Тл

$$B_j = \frac{U_k}{4,44 \cdot f \cdot S_c \cdot w_k} 10^4, \quad (9.12)$$

По истечении 10 *мин* после начала испытания следует снять напряжение, проверить на ощупь нагрев стали по всей расточке статора и выбрать наиболее холодный зубец, наложить на него термопару (или термометр). Затем включить напряжение и через 10 *мин* вновь снять его, определить наиболее нагретый зубец и установить на нем термопару. Остальные термодпары (или термометры) устанавливаются равномерно по диаметру расточки и длине. На участке стали, повергавшемся ремонту, термодпары устанавливают обязательно. После закладки термодпар включают напряжение в течение 90 *мин* ведут прогрев стали записывая через 10 *мин* показания датчиков.

Испытания следует немедленно прекратить, если в процессе нагрева температура какой-либо точки достигла 100°C , а также при появлении дыма или искрении.

По показанию ваттметра определяют потери в стали:

$$\Delta p_c = P_1 (1/B_j)^2 \quad (9.13)$$

и удельные потери, Вт/кг

$$\Delta p_{y\delta} = \Delta p_c / G_c, \quad (9.14)$$

где G_c - масса активной стали статора, кг

Техническое состояние стали считается удовлетворительным, если удельные потери не более $2,5 \text{ Вт/кг}$ для повышено- и высоколегированной марок стали и менее $5,5 \text{ Вт/кг}$ для слабо – и среднелегированной марок стали.

По истечении 90 *мин* максимальный перегрев зубцов относительно окружающей среды не должен превышать 45°C , а наибольшая разность температур в наиболее холодном и горячем зубцах должна быть не более 30°C .

9.2.10. Диагностирование обмоток якоря МПТ

Для обнаружения витковых замыканий в секциях и обрывов и в них компенсируют метод падения напряжения, не требующий специального оборудования. Этот метод используют для петлевой и волновой обмоток и он особенно удобен при исследовании якоря с уравнительными соединениями. Метод сводится к следующему. К двум смежным коллекторным пластинам 1 (рис. 9.5) подводят постоянным ток с помощью пары щупов 3, а второй парой щупов 2 измеряют падение напряжения на этой паре коллекторных пластин.

В случае петлевой обмотки при наличии замыкания в секции, сопротивление ее меньше и падение напряжения на ней меньше, чем на другой паре пластин, между которыми нет замыкания. При этих изменениях сила тока должна быть одинаковой. В случае простой волновой обмотки меньшее падение напряжения свидетельствует о наличии замыкания в секциях обмотки, присоединенных к исследуемой паре пластин.

Указанным выше способом исследуют весь якорь и сравнивают результаты измерений. Иногда при исследовании якорей с уравнительными соединениями могут получиться значительные отклонения в падениях напряжения между отдельными пластинами и при исправной обмотке якоря. В этом случае наблюдается компенсаторное изменение падений напряжения.

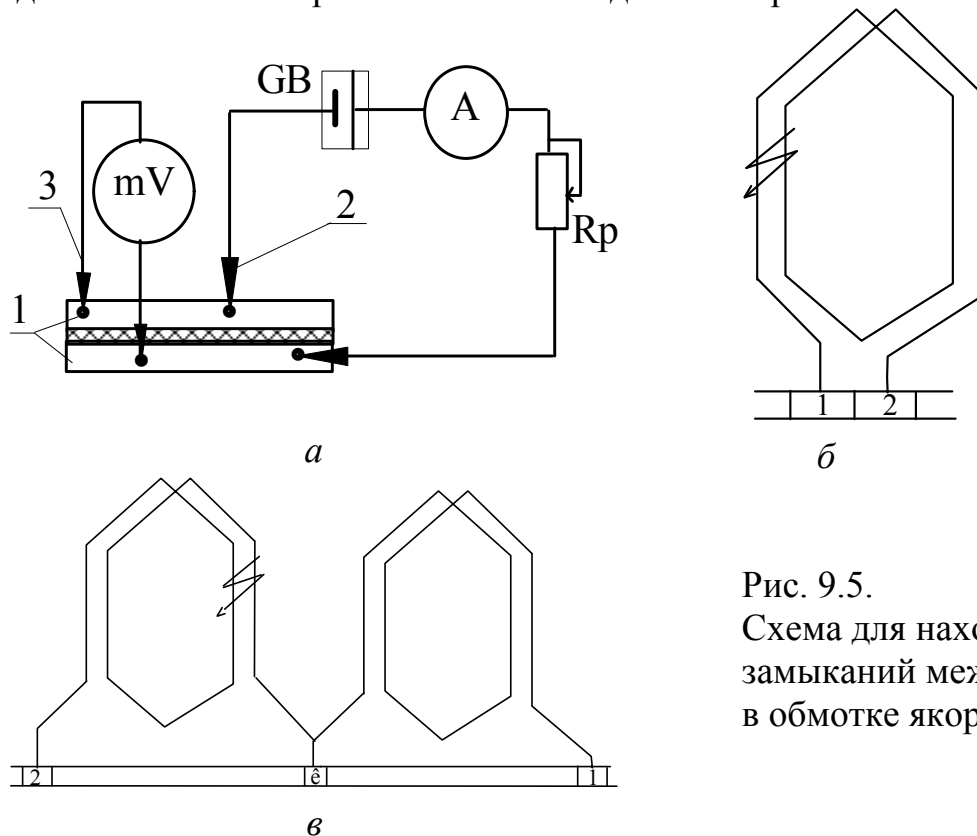


Рис. 9.5.
Схема для нахождения замыканий между витками в обмотке якоря

В качестве источника тока удобно применять батарею аккумуляторов, но можно также использовать сеть напряжением 110 и 220 В постоянного тока. Для уменьшения силы тока последовательно с якорем включают реостат 4 позволяющий регулировать силу тока. Для измерения падения напряжения следует пользоваться милливольтметром с соответствующим пределом измерений. В случае необходимости падение напряжения можно отрегулировать путем изменения силу питающего тока посредством реостата. Чтобы не повредить милливольтметр, следует сначала прикладывать к коллектору щупы 3, обеспечив их надежный контакт с коллектором, можно прикладывать щупы 2.

Отнимать от коллектора следует сначала щупы 2, а затем щупы 3. Если отнимать сначала щупы 3, возникает значительная ЭДС самоиндукции, которая выведет миллиамперметра из строя. То же может получиться при плохом контакте щупов 3.

Проверять на витковое замыкание якоря небольших габаритов с петлевой и волновой обмотками можно способом испытательных электромагнитов. На электромагниты 1 (рис. 9.6,а), имеющие обмотку, устанавливаются якорь 2. Обмотка электромагнита питается переменным током 50 Гц или повышенной частоты. При прохождении по обмотке тока создается магнитный поток, который замыкается через якорь. Если в обмотке якоря имеется межвитковое замыкание, то в замкнутых витках 3 пойдет ток большой силы и вызовет их нагрев.

Межвитковое замыкание также можно обнаружить, если провести по пазам якоря стальной пластиной 4 (рис. 9.6,б)

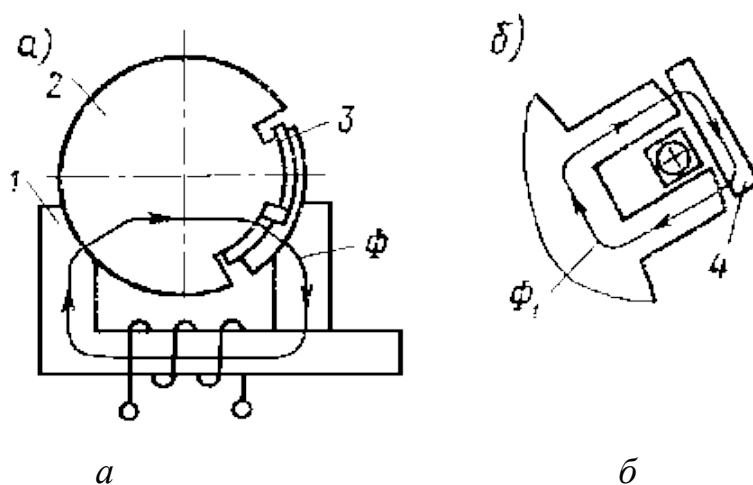


Рис. 9.6. Схема установки для проверки якорной обмотки на витковое замыкание (а) и способ обнаружения паза с короткозамкнутым витком (б)

При прохождении паза с короткозамкнутыми витками пластина притянется к ним. Способом испытательных магнитов нельзя проверять межвитковые замыкания в «лягушечных» обмотках и петлевых обмотках с уравнительными соединениями, так как в них всегда имеются короткозамкнутые контуры.

Для определения места обрыва в обмотке можно пользоваться тем же способом, которым определяют витковые замыкания в якоре.

При наличии обрыва или плохого контакта падения напряжения больше между пластинами, к которым присоединена дефектная секция. Если исследуется якорь с петлевой обмоткой, то при наличии обрыва прибор показывает наибольшее отклонение лишь при одной паре пластин; при волновой обмотке наибольшее отклонение имеется на нескольких парах пластин, находящихся попарно на расстоянии коллекторного шага друг от друга.

Методом падения напряжения пользуются для определения качества паяк обмотки. Пайки можно считать хорошими, если разница сопротивлений между отдельными пластинами коллектора не превышает 10% для небольших машин и 5% для ответственных и крупных машин. Увеличение сопротивления (или падения напряжения при неизменном токе) между некоторыми смежными коллекторными пластинами указывает на плохую пайку; необходимо все места паяк, относящихся к этим пластинам, перепаять.

При дефектации определяют отсутствие замыкания обмотки якоря на корпус, которое можно определить мегомметром или контрольной лампочкой.

Место замыкания обмотки на корпус можно найти способом питания обмотки якоря постоянным током то постороннего источника тока (рис. 9.7)

Подбор всех элементов схемы такой же, как при определении замыканий в обмотке. Источник тока присоединяется к коллектору в случае петлевой обмотки – двух диаметрально противоположных точках, в случае волновой – к пластинам, находящимся на расстоянии половины коллекторного шага. Один проводник от милливольтметра присоединяют к валу якоря, а концом другого проводника поочередно касаются всех коллекторных пластин. Отклонение стрелки прибора происходит только при наличии замыкания.

Если исследуется якорь с петлевой обмоткой, то по мере приближения пластины, присоединяемой к прибору, к пластине, соединенной с корпусом, показания прибора уменьшаются. При волновой обмотке изменение показаний милливольтметра по мере перемещения присоединяемой к нему пластины происходит периодически, соответственно его перемещению на половину шага по коллектору; меньшие показания наблюдаются на пластинах обхода, секции которого замкнут на корпус.

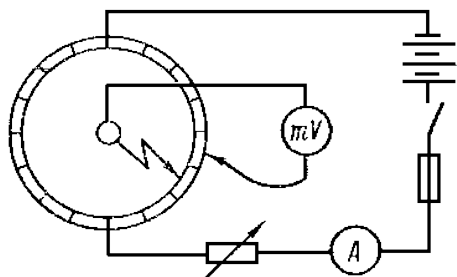


Рис. 9.7.
Схема для нахождения места соединения обмотки якоря с корпусом

При плохом контакте обмотки на корпус, например при весьма низком сопротивлении изоляции, этот способ не дает удовлетворительных результатов, и в этом случае применяют метод «прожигания». Коллектор обвязывают несколькими витками голой проволоки. Напряжение через предохранитель и реостат подают к проволоке и валу якоря.

Прохождение электрического тока через плохой контакт вызывает обгорание этого место, дугу и появление дыма. По этим признакам обнаруживается дефект и его место.

Иногда место замыкания на корпус можно найти, если «пошевелить» по очереди секции у подозрительных мест и одновременно измерять сопротивление изоляции мегомметром.

9.2.11. Диагностирование обмоток возбуждения МПТ

При дефектации индуктора проверяют надежность крепления полюсов, межполюсное соединения, состояние сердечников полюсов и определяют испытаниями целостность обмоток. В катушках главных полюсов возможны также дефекты: пробой изоляции на корпус, витковое замыкание, обрыв в местах паяк. В компенсационных обмотках и обмотках добавочных полюсов встречается один дефект – пробой на корпус. Чтобы найти катушку, замкнутую на корпус, через обмотку пропускают постоянный ток. Один конец вольтметра присоединяют к

корпусу, а вторым касаются соединительных перемычек между полюсами (рис. 9.8). Наименьшее показание вольтметра наблюдается с обеих сторон катушки, замкнутой на корпус.

Для нахождения обрыва или плохого контакта в катушке параллельной обмотки к ней подводят нормальное напряжение и вольтметром касаются поочередно выводных концов каждой катушки (рис. 9.9). При наличии обрыва вольтметр, приключенный к зажимам поврежденной катушки, показывает полное напряжение сети. На остальных катушках вольтметр отклонений не имеет. При плохом контакте напряжение на зажимах поврежденной катушки больше напряжения на зажимах других катушек.

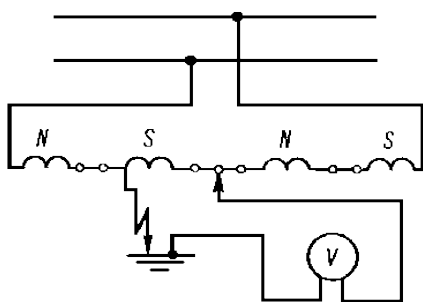


Рис. 9.8. Схема для нахождения обмотки полюса, соединенной с корпусом

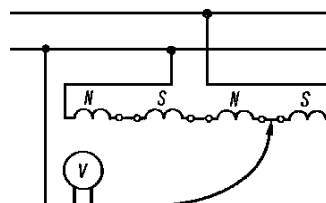


Рис. 9.9. Схема для нахождения обрыва в обмотке полюса

Более сложно определить витковое замыкание в катушке главных полюсов. Измерением величины сопротивления каждой катушки можно определить витковое замыкание большого числа витков.

Для определения замыкания малого числа витков имеется несколько способов. Рассмотрим один из них. Цепь возбуждения питают переменным током, при этом его значение не должно быть больше номинального тока. Катушка, имеющая короткозамкнутые витки, нагревается за счет циркуляции в короткозамкнутых витках большого тока.

Если на полюсах имеются металлические каркасы, которые являются короткозамкнутыми витками, дефектные катушки при испытании переменным током выявить трудно.

9,2.12. Установка щеток на нейтраль

Проверку правильного положения траверсы производят индуктивным методом при неподвижной машине после предварительной пришлифовки щеток к коллектору. Траверсу предварительно устанавливают против середины главных полюсов. Обмотку возбуждения отключают, к ней через реостат от аккумуляторной батареи (рис. 9.10) подводят постоянный ток.

Значение тока не должно превышать примерно 5-10 % номинального. К зажимам якоря присоединяют милливольтметр на 45-60 мВ с добавочным сопротивлением (желательно с нулем посередине).

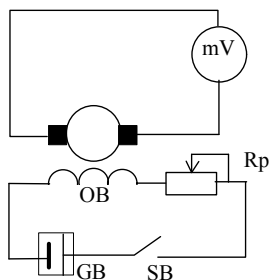


Рис. 9.10. Схема для установки траверсы

Затем производят замыкание и размыкание тока возбуждения. При этом в якоре индуцируется ЭДС трансформации и стрелка прибора отклоняется в ту или другую сторону в зависимости от положения щеток.

При щетках, находящихся на нейтрали, ЭДС должна быть практически равна нулю. Траверсу со щетками передвигают до тех пор, пока не будет достигнуто это положение щеток.

9.2.13. Диагностирование коллекторов и контактных колец

Коллектор - наиболее сложный узел электрических машин, как по числу элементов, так и по технологии изготовления. При работе ЭМ на коллектор действуют центробежные силы, вибрации и нагрев. Контактные кольца работают в менее напряженных условиях.

Для процесса диагностирования особо важное значение имеет осмотр коллектора. Потемневшие петушки коллектора свидетельствуют о нарушении пайки между коллекторными пластинами и выводами обмотки якоря. Наличие мест пробоя слоя политуры в виде светлых пятен с точками углубления свидетельствует о перегрузке по току. Если на коллекторе наблюдаются чередующиеся светлые и темные полосы, распределение тока между параллельно включенными щетками неравномерно.

Обычно при диагностировании ЭМ контролируют диаметр и биение коллекторов и контактных колец, профиль и состояние контактов в соединении коллекторных пластин с обмоткой.

Диаметр коллекторов и контактных колец измеряют, чтобы убедиться, не превысил ли износ коллекторных пластин допустимого значения. Допустимый минимальный диаметр коллектора определяют исходя из допустимой высоты коллекторных пластин (табл. 9.10).

Таблица 9.10 - Допустимый износ пластин коллекторов машин постоянного тока, мм

Диаметр коллектора	Высота пластины	Допустимый износ	Диаметр коллектора	Высота пластины	Допустимый износ
52	15,5	3,0	17,	30	6,0
64	15,	3,0	200	-	7,0
80	18,5	3,5	250	-	8,0
125	21,5	4,0	350	-	10,0

Минимальный диаметр D_{\min} контактных колец асинхронных электродвигателей с фазным ротором должен быть не менее значений, указанных в табл. 9.11.

Биение поверхности коллектора и контактных колец можно определить как при собранной ЭМ, так и после её разборки с помощью индикатора часового типа, закрепленного на штативе.

Таблица 9.11 - Минимальный диаметр контактных колец

$D_H, \text{мм}$	70	80	120	122	84
$D_{\min}, \text{мм}$	68	75	110,8	112,8	74

У собранной ЭМ медленно проворачивают якорь и следят за показанием индикатора. Якорь разобранной ЭМ устанавливают в центрах и также проворачивают вручную. Ножка индикатора должна быть перпендикулярна к поверхности коллектора или кольца. Значение биения определяют по разности между наибольшим и наименьшим показаниями индикатора: биение коллектора не должно превышать 0,02...0,05 мм, биение контактных колец - не более 0,3 мм. Допустимое значение биения коллектора:

$$\xi = 0,047 \cdot D_K^{0.16} / n_H, \quad (9.15)$$

где D_K - диаметр коллектора, мм;

n_H - номинальная частота вращения, мин^{-1} .

Биение коллектора и контактных колец устраняют протачиванием их поверхностей на токарных станках.

Контроль профиля - важный элемент диагностирования. Его необходимость обусловлена тем, что при эксплуатации встречаются случаи ослабления крепления коллекторных пластин, вследствие чего некоторые из них выступают над поверхностью коллектора. Кроме того, вследствие более быстрого износа коллекторных пластин по сравнению с миканитовыми прокладками, часто наблюдается выступание над поверхностью коллектора. Все это приводит к разрушению щеток. Глубина залегания миканитовых прокладок должна быть не менее 0,5 мм.

Большое значение имеет качество пайки обмотки якоря к коллекторным пластинам. Нарушение пайки определяют измерением падения напряжения в месте соединения коллекторной пластины с обмоткой якоря (рис. 9.11).

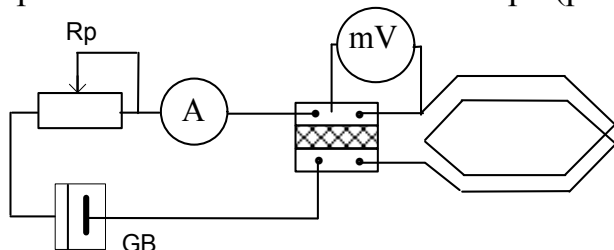


Рис. 9.11

При ухудшении контакта показания милливольтметра будут максимальны. Соединения проводов обмотки якоря с коллектором считается удовлетворительным, если отклонение показаний милливольтметра составляет не более $\pm 10\%$ среднего

значения (ΔU_{cp})

$$\Delta U_{cp} = \left(\sum_{i=1}^k \Delta U_i \right) / K,$$

(9.16)

где K – число коллекторных пластин.

9.2.14. Контроль состояния щеточного механизма

Состояние щеток определяется осмотром и измерением их высоты штангенциркулем. Щетки должны иметь блестящую поверхность. Зазоры между щеткой и обоймой (рис. 9.12, 9.13) указаны в таблице 9.12.

Таблица 9.12- Допустимые значения зазоров

Зазор	δ_{max} , мм	δ_{min} , мм
В направлении оси ЭМ - δ_l	0,5	0,2
В направлении вращения якоря - δ_v (В числителе при ширине щетки до 16 мм, в знаменателе - более 16 мм)	0,3 / 0,35	0,06 / 0,07

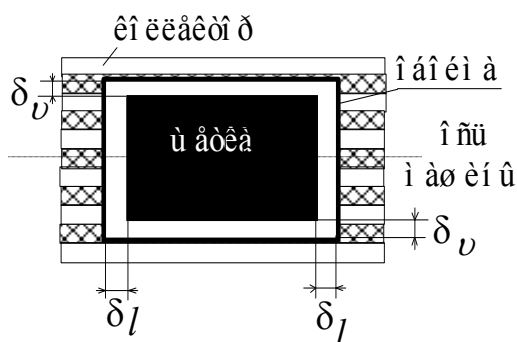


Рис. 9.12

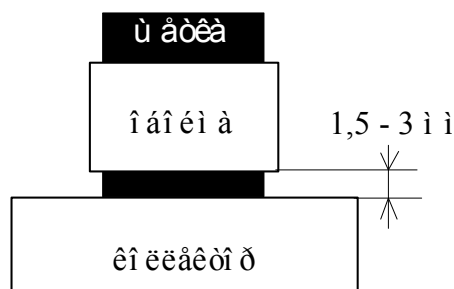


Рис. 9.13

На износ щеток большое влияние оказывает нажатие на щетку.

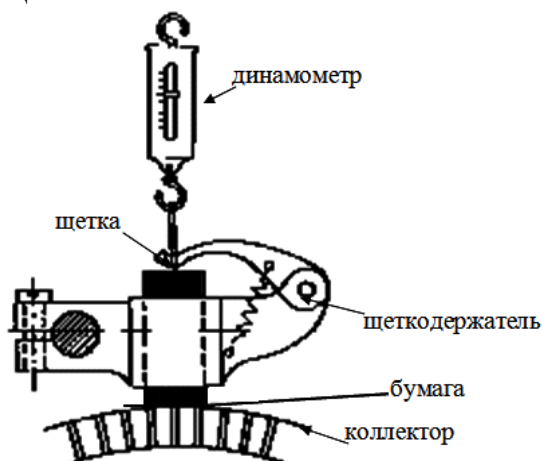


Рис. 9.14

Чрезмерное нажатие приводит к механическому износу щеток и коллектора, при недостаточном нажатии происходит электрический износ. Нажатие щеток контролируют с помощью динамометра (рис. 9.14). Пред измерением между коллектором и щеткой прокладывают ленточку тонкой бумаги. Курок динамометра

цепляют за курок или пружину щеткодержателя, чтобы при этом ось динамометра совпадала с продольной осью щетки, одновременно прилагая усилие к динамометру и полоске бумаги. Отсчет производится в момент, когда начинает освобождаться бумага. Обычно в ЭМ пружины должны обеспечить давление щетки в пределах $0,01 \dots 0,02 \text{ Мпа}$.

Сопротивление изоляции частей щеточного устройства ЭМ должно быть не менее 1 Мом на 1 кВ напряжения.

9.2.15. Определение воздушного зазора

Увеличение ориентировочно на 1% воздушного зазора (δ) АД приводит к повышению тока холостого хода на $0,6 \%$ и снижению $\cos\varphi$ на $0,3 \%$. При увеличении зазора на $15 \div 20 \%$ электродвигатель необходимо перематывать по новым обмоточным данным (см. пересчет АД при увеличении воздушного зазора). При увеличении зазора более, чем на 20% экономическая целесообразность ремонта становится сомнительной.

Помимо величины зазора существенное значение имеет степень его равномерности. Для АД неравномерность (определяемая как отношение зазора в точке к средней величине зазора) должна быть не более $\pm 10 \%$. Она является следствием выработки подшипников и режее - следствием эллиптичности статора и ротора. Для крупных машин значительная разница δ в горизонтальном и вертикальном положении обусловлена деформацией статора из-за недостаточной жесткости станины.

А собранном АД зазор следует измерять с двух сторон : со стороны коммутации схемы и с противоположной стороны с помощью щупа, вводимого через люки. С каждой стороны зазор измеряется в четырех точках, сдвинутых на 90° . Величина зазора определяется как среднеарифметическое всех замеров.

В двигателях, не имеющих специальных отверстий, зазор измеряют после их разборки.

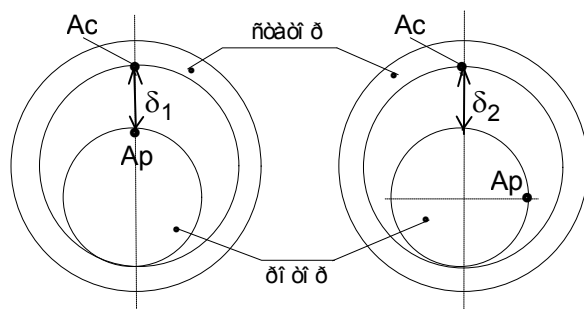


Рис. 9.15.
Измерение
величины
воздушного
зазора

Для этого ротор укладывают непосредственно на статор и измеряют зазор δ_1 против верхней точки расточки (рис. 9.15). Затем ротор проворачивают на 90° и снова измеряют зазор δ_2 . Воздушный зазор при работе АД $\delta = 0,25(\delta_1 + \delta_2)$.

Допустимые значения воздушного зазора для АД приведены в табл. 9.13 для МПТ - в табл.9.14.

Таблица 9.13 - Величина воздушного зазора АД

n, об/мин	Допустимый зазор АД (мм) при мощности, кВт									
	<0,2	0,2 -	1-	2,5-	5-	10-	20-	50-	100-	200-

		1	2,5	5	10	20	50	100	200	300
500÷1500	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,65	0,8	1
3000	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,65	0,8	1	1,25	1,5

Таблица 9.14 - Величина воздушного зазора МПТ

Мощность МПТ, кВт	Зазор под полюсом, мм		Мощность МПТ, кВт	Зазор под полюсом, мм	
	главным	добавочным		главным	добавочным
0,2...1	0,6	1	20...30	2	4
1...2	0,8	1	30...50	3	5
3...5	1	2,5	50...100	4	6
6...8	1	3	100...150	4,5	6
9...20	1,5	3			

9.2.16. Измерение сопротивлений обмоток постоянному току в холодном состоянии

Измерение проводится в практически холодном состоянии, при котором температура любой части электрической машины отличается от температуры окружающей среды не более чем на $\pm 3^{\circ}\text{C}$. От точности измерения сопротивлений обмоток в холодном состоянии зависит правильность определения ряда важнейших величин. При промышленных испытаниях электрических машин могут находить применение только те способы измерения сопротивлений, которые удовлетворяют следующим требованиям:

Достаточная точность измерений. Способ должен обеспечивать погрешность измерения сопротивления обмотки, не превосходящую той, с которой производится измерение ее температуры в практически холодном состоянии. При испытаниях, к которым предъявляются менее высокие требования, погрешность измерения сопротивления может быть допущена до $\pm 1\%$.

Быстрота выполнения измерений. В ряде случаев момент измерения должен быть отчетливо ориентирован во времени, что невозможно, если измерение требует кропотливых операций.

Измерения в соответствии с ГОСТ 11828-86 и ГОСТ 3484-88 рекомендуется проводить:

- методом вольтметра и амперметра;
- методом одинарного (Уинстона) или двойного (Томсона) моста;
- методом омметра логометрической системы.

Для измерения сопротивлений обмоток трансформаторов используются первые два метода.

Метод вольтметра и амперметра лучше всего удовлетворяет всем предъявляемым требованиям; при условии применения приборов соответствующего класса он обеспечивает требуемую точность, дает большую быстроту измерений и легко приспособливается к требованиям подвижности измерительного устройства. Что бы способ давал достаточно правильные результаты, необходимо соблюдение ряда условий:

1. Вольтметр должен присоединяться непосредственно к выводам объекта измерения; если для присоединения применяются иглы, то они должны быть хорошо заточенными и изготовленными из закаленной стали, чтобы прокалывать пленку окисла на поверхности металлов.

2. Число разъемных контактов в схеме должно быть минимальным, а все неразъемные следует надежно пропаивать.

3. Источником постоянного тока должна быть хорошо заряженная батарея аккумуляторов.

4. Каждое сопротивление следует измерять при нескольких различных значениях тока, переходя от больших к меньшим. Нормально число измерений берется равным трем; при испытании повышенной точности его рекомендуется брать не менее пяти, но при приемо-сдаточных испытаниях машин мощностью до 100 кВт допускается однократное измерение. Результаты измерений одного и того же сопротивления не должны отличаться от среднего из них более чем на 0,5 %, а за действительное значение принимается среднее арифметическое из результатов всех измерений, удовлетворяющих этому требованию.

5. Отсчеты по обоим приборам должны производиться одновременно по команде, подаваемой наблюдателем на вольтметре, показания которого менее устойчивы, чем показания амперметра, вследствие индуктивности, свойственной обмоткам электрических машин.

6. При измерении одного и того же сопротивления следует по возможности не изменять пределы измерения приборов.

7. Во избежание нагревания обмотки измерительным током значение последнего следует выбирать по данным обмотки так, чтобы адиабатное повышение температуры обмотки за время измерения не превосходило 1КОм; если же данные обмотки неизвестны, то значение измерительного тока должно быть не выше 20 % номинального тока обмотки, а длительность измерения – не более 1 мин. Если порядок измеряемого сопротивления известен, то пределы измерения обеих приборов могут быть установлены заранее, но цепь вольтметра в момент замыкания цепи тока должна быть разомкнутой. При подключении устройства к неизвестному объекту измерения и замыкании цепи тока амперметр и вольтметр должны быть предварительно включены на наибольшие пределы измерения. После замыкания цепи приспособление, регулирующее ток, ставится в положение наибольшего измерительного тока. Если при этом показание амперметра меньше 40 % его полной шкалы, то необходимо перейти на следующий меньший предел измерения, и так далее до тех пор, пока не будет получено удовлетворительное отклонение; подбор предела измерения вольтметра производится таким же способом. Когда пределы шкал обоих приборов установлены, приступают к отсчетам. После каждого отчета ток несколько понижается регулирующим приспособлением и производится следующий отсчет и т. д. Если обмотка обладает сильно выраженной индуктивностью, то на момент каждого перехода с высшей ступени измерительного тока на низшую необходимо размыкать цепь вольтметра, иначе ее можно повредить импульсами, индуктируемыми при резком понижении измерительного тока.

Схемы измерения сопротивления этим методом приведены на рис.9.16.

Если сопротивление вольтметра отличается от измеряемого сопротивления менее чем в 100 раз, то для исключения методической ошибки истинное значение сопротивления рассчитывается по формуле (1) :

$$R_1 = U / \left(I - \frac{U}{r_B} \right), \quad (9.17)$$

где U – измеренное падение напряжения, B ; I – измеренный ток, A ; r_B – входное сопротивление вольтметра, Ом.

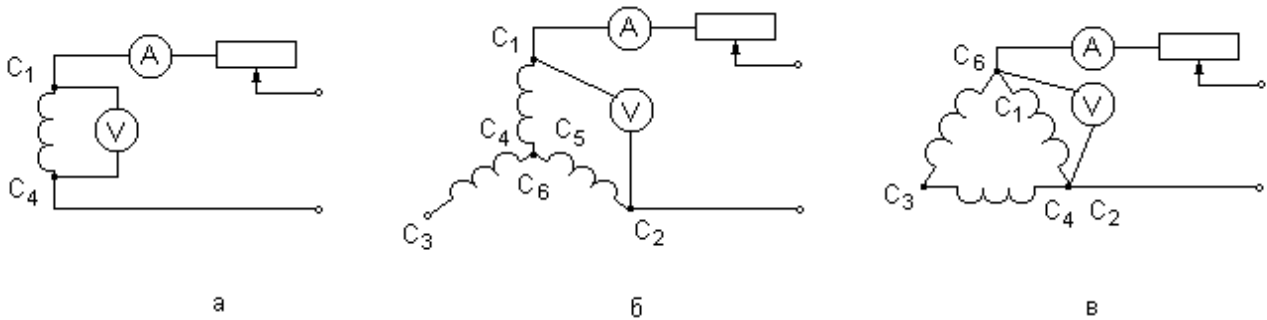


Рис.9.16. Схемы измерения сопротивления обмоток методом вольтметра и амперметра:
а – отдельная обмотка; б – при схеме Y ; в – при схеме Δ

Измерение сопротивления многофазных обмоток при наличии выводов начал и концов фаз производится по каждой фазе, а при наличии отдельных выводов от частей фаз – отдельно для каждой части (рис.9.16, а).

Если выводы начал и концов фаз отсутствуют, то сопротивление следует измерять между каждой парой линейных выводов.

При соединении фаз в звезду (рис.9.16, б) сопротивление фазы r_1 , прилегающей к выводу C_1 , определяется по формуле (2):

$$R_1 = (r_{31} + r_{12} - r_{23}) / 2, \quad (9.18)$$

где r_{31} , r_{12} , r_{23} – сопротивления, измеренные соответственно между выводами C_3 и C_1 , C_1 и C_2 , C_2 и C_3 , Ом.

При соединении фаз в треугольник сопротивление фазы R_1 между выводами C_1 и C_2 (рис.9.16, в) определяется по формуле:

$$R_1 = \frac{2r_{12} \cdot r_{23}}{r_{12} + r_{23} - r_{31}} - \frac{r_{12} + r_{23} - r_{31}}{2}. \quad (9.19)$$

По аналогичным формулам с круговой перестановкой соответствующих индексов рассчитываются сопротивления других фаз.

Когда сопротивление цепи вольтметра на данном пределе измерения настолько велико по сравнению с измеряемым сопротивлением, что потреблением тока в вольтметре можно пренебречь, искомое сопротивление R может быть найдено, как $R = U/I$. При использовании для измерений одинарного моста к искомому сопротивлению обмоток добавляется сопротивление контактов и соединительных проводов, в связи с чем одинарный мост рекомендуется применять при измерении сопротивлений, превышающих 1 Ом. Применение двойного моста обеспечивает наивысшую точность измерения сопротивлений.

Тепловое состояние различных частей обмотки контролируется с помощью датчиков температуры, устанавливаемых на обмотку. В этом случае за температуру

обмотки принимают среднеарифметическое значение показаний датчиков, если эти показания изменяются не более чем на 1°C в час и отличаются от среднего значения не более чем на 2°C .

Определение сопротивления обмоток постоянному току в практически холодном состоянии предусмотрено программой приемо-сдаточных испытаний, хотя большинство электрических машин не снабжаются датчиками температуры обмоток. В этом случае температуру обмоток определяют следующими способами:

в электрической машине, оборудованной датчиками температуры отдельных ее частей, за температуру обмотки принимают среднеарифметическое значение показаний датчиков, если оно не изменяется более чем на 1°C за 4 ч при изменении сопротивления обмотки не более чем на 0,5 %;

в электрической машине, не оборудованной датчиками температуры, температуру обмотки принимают равной температуре поверхности машины (корпуса), если эта температура изменяется не более чем на 1°C за 8 ч при изменении сопротивления обмотки за то же время не более чем на 0,5 %;

в электрической машине, не оборудованной датчиками температуры, температуру обмотки принимают равной температуре окружающей среды во время измерений, если перед этим машина находилась в нерабочем состоянии длительное время, в течение которого температура окружающей среды изменилась не более чем на 5°C .

9.2.17. Испытания электрических машин после ремонта

После ремонта производится обкатка машин и приемосдаточные испытания по нормам, приведенным в ПЭЭП. Заключение о пригодности к эксплуатации дается не только на основании сравнения результатов испытания с нормами, но и по совокупности результатов всех проведенных испытаний и осмотров. Значения полученных при испытаниях параметров должны быть сопоставлены с исходными данными, а также с результатами предыдущих испытаний электрической машины.

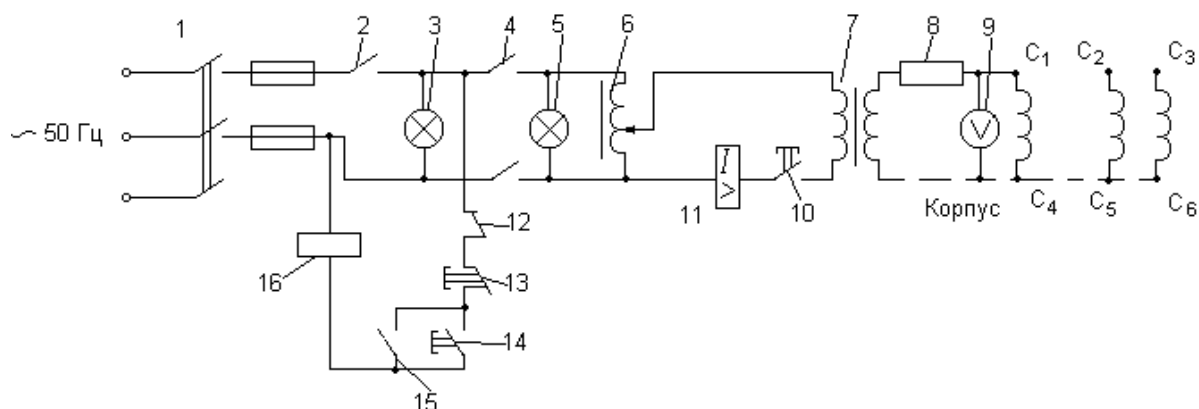


Рис. 9.17. Принципиальная схема установки для испытания изоляции электрических машин на электрическую прочность:

1 – рубильник; 2 – концевой выключатель; 3 и 5 – лампы; 4 и 15 – основные и вспомогательные контакты магнитного пускателя; 6 – регулировочный автотрансформатор; 7 – высоковольтный трансформатор; 8 – защитное сопротивление; 9 – вольтметр; 10 – кнопка; 11 – обмотка реле максимального тока;

12 – контакт этого реле; 13 – кнопка “СТОП”; 14 – кнопка “ПУСК”; 16 – магнитный пускатель.

Под исходными данными понимаются значения, указанные в паспорте машины, и протоколах испытаний завода-изготовителя, в стандартах и технических условиях. При отсутствии исходных данных в качестве таковых могут быть приняты значения параметров, полученные при приемосдаточных испытаниях или испытаниях по окончании восстановительного ремонта электрической машины.

После истечения гарантийного срока эксплуатации по специальной программе испытывают также электрические машины иностранных фирм.

Программой испытаний двигателей переменного тока после капитального ремонта предусмотрены следующие операции:

– испытание стали статора двигателей с обмотками из прямоугольного провода (удельные потери не более 5 Вт/кг , наибольший перегрев зубцов при $B_z = 1 \text{ Тл}$ не должен превышать 45°C , наибольшая разность перегрева различных зубцов при той же индукции — не более 30°C);

– измерение сопротивления изоляции обмоток статора, ротора, термоиндикаторов с соединенными проводами (если они имеются в данной машине) и подшипников;

– испытание обмоток статора и ротора при собранном двигателе повышенным напряжением промышленной частоты в течение 1 мин. Значения испытательных напряжений обмоток в процессе их изготовления и после сборки машины приведены в табл. 9.15...9.17. Результаты испытаний считаются положительными, если не наблюдалось скользящих разрядов, толчков тока утечки или нарастания его установившегося значения, пробоев или перекрытий и если сопротивление изоляции, измеренное мегомметром после испытаний, осталось прежним;

Испытание проводят синусоидальным напряжением частотой 50 Гц от испытательного трансформатора мощностью не менее 1 кВА на 1 кВ испытательного напряжения. Регулирование напряжения производится плавно или ступенями, не превышающими 5% от испытательного значения, путем регулирования напряжения, подводимого к первичной обмотке испытательного трансформатора. Испытания начинаются с напряжения, не превышающего $1/3$ от испытательного. Время увеличения напряжения от половинного значения до испытательного – не менее 10 с , испытательное напряжение выдерживается в течение 1 мин . После этого напряжение плавно снижают до $1/3$ от испытательного и отключают питание трансформатора.

Принципиальная схема установки для испытания проведена на рис. 9.17.

Основная часть установки – высоковольтный трансформатор 7, питающийся от сети через регулировочный автотрансформатор 6, который позволяет плавно поднимать напряжение от нуля на первичной обмотке трансформатора 7 и тем самым напряжение на испытуемой обмотке. Пробой изоляции сопровождается увеличением тока в обмотках трансформатора 7. Для его ограничения служит защитное сопротивление 9. Изоляция выдержала испытание, если не произошел ее пробой или перекрытие скользящими разрядами. Для обеспечения безопасности установка защищается металлическим заземленным ограждением. Испытательный трансформатор подключается к автотрансформатору через реле максимального

тока, предназначенного для отключения высоковольтного трансформатора при пробое изоляции обмотки испытуемой машины.

Испытанию изоляции на электрическую прочность относительно корпуса следует подвергать поочередно каждую цепь, имеющую отдельные выводы. При этом один вывод испытательного трансформатора 7 подключают к любому из выводов испытуемой обмотки (на рис. 6 к выводу C_1), а другой – вывод заземляют и подключают к заземленному корпусу машины, с которым при испытании обмотки C_1 - C_4 электрически соединяют обмотки $C_2 - C_5$ и $C_3 - C_6$.

Таблица 9.15 - Всыпные обмотки статора

Испытуемый элемент двигателя переменного тока с $U_n \leq 0,66$ кВ	Испытательное напряжение, кВ в зависимости от мощности P_n , кВт	
	0,2...10	10,1...1000
Обмотки после укладки в пазы до пайки межкатушечных соединений	2,5	3,0
Обмотки после пайки и изолировки межкатушечных соединений	2,3	2,7
Обмотки после пропитки и запрессовки обмотанного сердечника	2,2	2,5
Главная изоляция обмотки собранного двигателя переменного тока	$2U_n + 1,0$, но не менее 1,5	

Таблица 9.16 - Обмотки статора из прямоугольного провода

Испытуемый элемент обмотки двигателей	Испытательное напряжение для электродвигателей на номинальное напряжение, кВ							
	до 1000 кВт					свыше 1000 кВт		
	до 0,66	2	3	6	10	3	6	10
Отдельная катушка (стержень) перед укладкой	4,5	11,0	13,5	21,1	31,5	13,5	23,5	34,0
Обмотка после укладки в пазы до пайки между-катушечных соединений	3,5	9,0	11,5	18,5	29,0	11,5	20,5	30,0
Обмотки после пайки и изолировки соединений	3,0	6,5	9,0	15,8	25,0	9,0	19,5	27,0
Главная изоляция обмотки собранной машины	$2U_n + 1$ но не <1,5кВ	5,0	7,0	13,0	21,0	7,0	15,0	23,0

Таблица 9.17 - Обмотки ротора

Испытуемый элемент ротора асинхронных двигателей	Испытательное напряжение, кВ
1. Полная замена обмотки	
Отдельные стержни до укладки в пазы	$2U_{rot}^* + 3,0$
Стержни после укладки в пазы, но до соединения	$2U_{rot}^* + 2,0$
Обмотка после соединения, пайки и бандажировки	$2U_{rot}^* + 1,0$
Контактные кольца до соединения с обмоткой	$2U_{rot}^* + 2,2$

2. Частичная замена обмотки	
Оставшаяся часть обмотки после выемки заменяемых катушек, секций или стержней	$2U_{рот}^*$ (но не менее 1,2 кВ)
Вся обмотка после присоединения новых катушек, секций или стержней	$2U_{рот}^*$ (но не менее 1,0 кВ)

* $2U_{рот}^*$ - напряжение на кольцах неподвижного ротора с разомкнутой обмоткой при номинальном напряжении на статоре.

Программой испытаний машин переменного тока после капитального ремонта предусмотрены следующие операции:

– измерение сопротивлений обмоток статора и ротора постоянному току проводится для двигателей мощностью 300 кВт и более или для двигателей с $U_n > 3$ кВ, а также реостатов и пускорегулирующих резисторов. Отклонения сопротивления обмоток от паспортных данных и по фазам должно быть не более $\pm 2\%$, для реостатов — не более $\pm 10\%$;

– измерение воздушного зазора (если позволяет конструкция) в четырех сдвинутых на 90° точках (измеренные зазоры не должны отклоняться от среднего более чем на 10 %) и зазоров в подшипниках скольжения. Если зазор больше допустимого, (табл. 9.18) необходимо перезалить вкладыш подшипника;

Таблица 9.18 - Допустимые значения воздушного зазора в подшипниках скольжения

Номинальный диаметр вала, мм	Зазор, мкм. при частоте вращения, об/мин		
	до 1000	1000... 1500	более 1500
19...30	40...93	60... 130	140...280
31...50	50... 112	75... 160	170...340
51...80	65... 135	95... 195	200...400
81... 120	80... 160	120... 235	230...460
121... 180	100... 195	150... 285	260...530
181...260	120...225	180...300	300...600
261...360	140...250	211... 380	340...680
361...600	170...305	250...440	380...760

– испытание витковой изоляции обмоток из прямоугольного провода импульсным напряжением высокой частоты в течение 5...10 с. Значения испытательных напряжений приведены в табл. 9.18; – проверка работы двигателя на холостом ходу (для двигателей мощностью 100 кВт и более и напряжением 3 кВ и выше). Ток холостого хода не должен отличаться более чем на 10 % от указанного в каталоге при продолжительности испытания 1 ч;

Таблица 9.18 - Импульсное испытательное напряжение витковой изоляции обмоток статора

Тип изоляции витков	Амплитуда напряжения, В/виток	
	до укладки секций в пазы	после укладки и бандажировки
Провод ПВО	210	180

Провода ПБД, ПДА, ПСД	420	360
Провод ПБД с однослойной изоляцией из бумажной ленты	700	600
Провода ПБД и ПДА с изоляцией слоем микаленты через виток	700	600
То же, с прокладками миканита в пазовой части между витками	1000	850
Провод с однослойной изоляцией микалентой толщиной 0,13 мм вполнахлеста	1100	950
Провод ПБД с однослойной изоляцией шелковой лакотканью толщиной 0,1 мм вполнахлеста	1400	1200
Провода ПБД и ПДА с однослойной изоляцией микалентой толщиной 0,13 мм вполнахлеста или 1/3 нахлеста	1400	1200
Провод ПБД или ПДА с однослойной изоляцией микалентой толщиной 0,13 мм вполнахлеста и сверху слоем хлопчатобумажной ленты впритык	2100	1800
Провод ПДА, изолированный двумя слоями микаленты толщиной 0,13 мм вполнахлеста	2800	2400

– измерение вибрации подшипников для двигателей напряжением 3 кВ и выше и двигателей ответственных механизмов. Максимально допустимая амплитуда вибрации составляет 50, 100, 130 и 160 мкм для двигателей с частотой вращения соответственно 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин и менее;

– измерение разбега ротора в осевом направлении проводится для двигателей с подшипниками скольжения, двигателей ответственных механизмов и при выемке ротора в ходе ремонта (допустимый разбег не более 4 мм);

– проверка работы двигателя под нагрузкой для двигателей напряжением свыше 1 кВ или мощностью 300 кВт и более (величина нагрузки не менее 50% от номинальной);

– гидравлическое испытание воздухоохладителя (проводится в течение 5...10 мин при избыточном давлении 0,2...0,25 МПа);

– проверка исправности стержней короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных электродвигателей мощностью 100 кВт и более (все стержни должны быть целыми);

– проверка срабатывания защиты машин напряжением до 1000 В при питании от сети с заземленной нейтралью (проводится у машин с $U_n > 42 В$, работающих в опасных и особо опасных условиях, а также у всех машин с $U_n > 380 В$).

Программой испытаний машин постоянного тока после капитального ремонта предусмотрены следующие операции:

– измерение сопротивления изоляции обмоток и бандажей;

– испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты в течение 1 мин (табл. 9.19). Испытания не проводятся для машин мощностью до 200 кВт с напряжением до 440 В;

Таблица 9.19 - Испытательное напряжение промышленной частоты для изоляции машин постоянного тока мощностью более 3 кВт

Испытуемый элемент	Испытательное напряжение, кВ
--------------------	------------------------------

Обмотки машин постоянного тока $U_H \leq 100 В$	$1,6U_H + 0,8$
на $U_H > 100 В$ и $P_H \leq 1000 кВт$	$1,6U_H + 0,8$ (но не менее 1,2)
на $U_H > 100 В$ и $P_H > 1000 кВт$	$1,6U_H + 0,8$
Обмотки возбуждателей СГ	$8U_H$ (но не менее 1,2 и не более 2,8)
Обмотки возбуждателей СД и компенсаторов	$8U_H$ (но не менее 1,2)
Бандажи якоря	1,0
Реостаты и пускорегулирующие резисторы	1,0

– измерение сопротивления обмоток, реостатов и пускорегулирующих резисторов постоянному току в практически холодном состоянии. Значения сопротивлений обмоток возбуждения не должны отличаться от заводских значений более чем на 2 %, обмотки якоря – 10 %. В цепях реостатов и пускорегулирующих резисторов не должно быть обрыва цепей;

– снятие характеристик холостого хода и испытание витковой изоляции. Характеристика холостого хода снимается у генераторов (максимальное напряжение – 1,3 номинального; отклонение характеристики от заводской не нормируется). Продолжительность испытания витковой изоляции составляет 5 мин, а среднее напряжение между соседними коллекторными пластинами, если $2p > 4$, не должно превышать 24 В.

9.2.18. Соединение обмоток МПТ

Для машин постоянного тока выполняется проверка правильности соединения обмотки якоря и дополнительных полюсов. Двигатели постоянного тока имеют схемы соединения в соответствии с рис. 9.19.

Начало обмотки якоря Я1 всегда соединяется со щеткой положительной полярности. При проверке правильности соединения обмотки якоря и дополнительных полюсов определяется направление магнитных потоков якоря и ДП, которые должны быть направлены встречно. Схема испытания изображена на рис. 9.20.

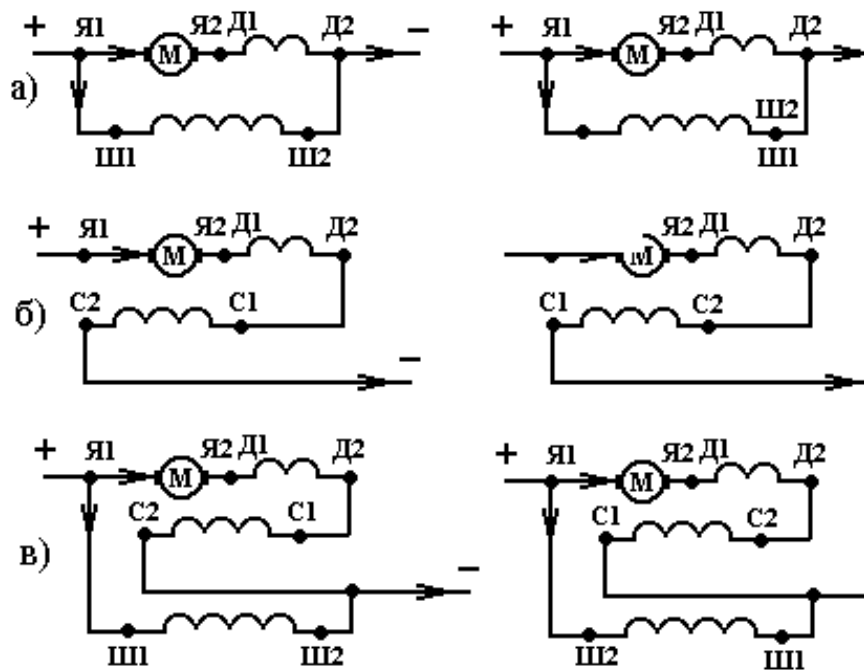


Рис. 9.19.
Схемы
соединения
обмоток
а- параллельно
б- последовательно
в- смешанное

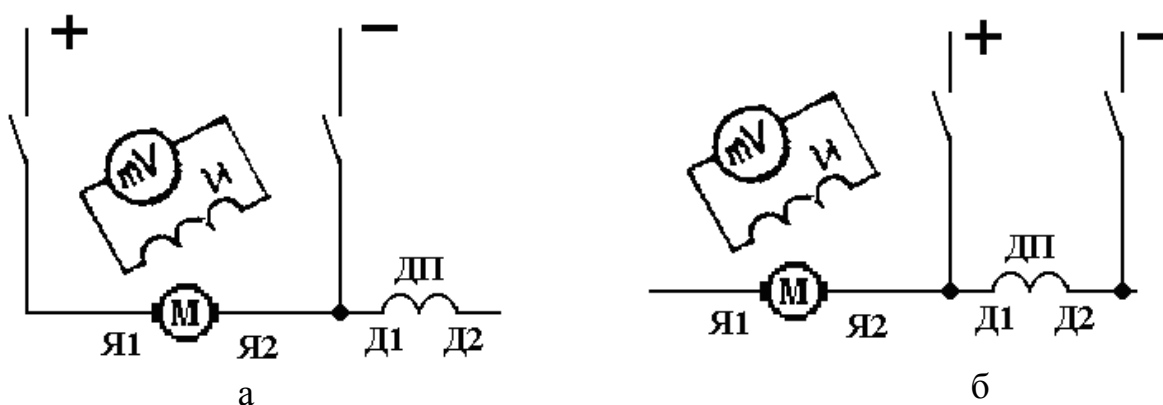


Рис. 9.20. Схемы проверки соединения обмоток
а- подключение обмотки якоря
б- подключение обмотки дополнительных полюсов

В зазор между якорем и полюсами вставляют катушку с большим числом витков (И). К обмотке якоря подводят такое напряжение, чтобы ток якоря не превышал 10% номинального значения, и, размыкая цепь, определяют направление отклонения стрелки милливольтметра.

Вслед за этим подают питание на обмотку ДП, соблюдая полярность в соответствии с рис. 9.20. Если отклонение стрелки милливольтметра противоположно отклонению при включении обмотки якоря, то обмотки якоря и дополнительных полюсов включены правильно.

При работе машины в качестве генератора главные и добавочные полюсы должны чередоваться так, чтобы по направлению вращения за любым главным полюсом находился разноименный добавочный

$$N - S_{\text{д}} - S - N_{\text{д}},$$

а в качестве двигателя - за главным находился одноименный добавочный

$$N - N_{\text{д}} - S - S_{\text{д}}.$$

Определение чередования полюсов внешним осмотром. При осмотре прослеживают за направлением протекания тока по обмотке и, пользуясь правилом буравчика, определяют полярность полюсов, задаваясь условным направлением тока. При использовании магнитной стрелки (рис. 9.21) обмотку питают током, стрелку подвешивают на тонкой нити и подносят поочередно к каждому полюсу.

О полярности полюсов судят по тому, какой конец магнитной стрелки притягивается к полюсу. В качестве магнитной стрелки могут быть использованы два стальных пера.

При разобранной машине магнитную стрелку подносят к внутренней поверхности полюсов, а при собранной машине - к полюсным наконечникам.

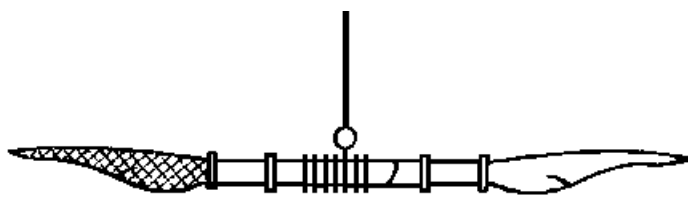


Рис. 9.21. Стальные перья в качестве магнитной стрелки.

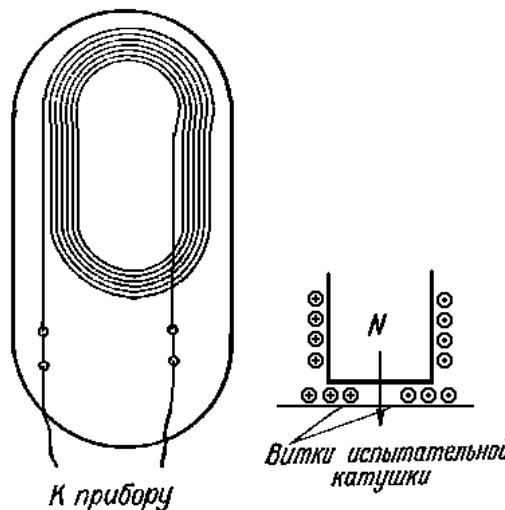


Рис. 9.22. Испытательная катушка для маркировки полюсов

✓ При неправильной полярности отдельных главных или добавочных полюсов. Используется испытательная катушка, которая представляет собой витки тонкой изоляционной проволоки, приклеенные к куску тонкого картона (рис. 9.22).

Концы катушки присоединяют к милливольтметру. В обмотку подают ток, а испытательную катушку вдвигают в зазор между якорем и полюсом и быстро ее выдергивают; стрелка прибора отклоняется в определенную сторону в зависимости от направления тока в обмотке полюса. При правильном чередовании полюсов направление отклонения стрелки милливольтметра будет так же чередоваться.

Если катушку невозможно поместить в зазор между полюсами, ее можно прикладывать к болтам, крепящим полюсы к станине.

9.2.19. Маркировка выводов обмоток АД

Обмотки машин переменного тока маркируются С1-С4, С2-С5, С3-С6.

Вначале с помощью мегомметра или контрольной лампы находят оба вывода первой, второй и третьей фаз. На один выход первой фазы, выбираемый произвольно вывешивают бирку, обозначающую начало фазы С1, на другой конец фазы С4. Конец первой фазы С4 соединяют с одним из выводов второй фазы. Между оставшимися свободным концом второй фазы (22) и началом фазы С1 включают вольтметр (рис. 9.23). На выводы третьей фазы подключают пониженное напряжение. Для АД с $U_H = 3000 \dots 6000 \text{ В}$ - это напряжение $220 \dots 380 \text{ В}$, а для АД с $U_H = 220/380 \text{ В}$ - приблизительно $60 \dots 70 \text{ В}$.

Если между началом первой фазы C1 и свободным выводом второй появится напряжение, примерно равное напряжению, подведенному к третьей фазе, то с концом первой, т.е. при $U_{C1-22} = U_{31-23} \Rightarrow$ зажим "21" \Rightarrow C2. Если напряжение равно нулю, то с концом первой фазы окажется соединенным коней второй фазы, т.е. при $U_{C1-22} = 0$ зажим "21" \Rightarrow C5.

Аналогично маркируют зажимы третьей фазы.

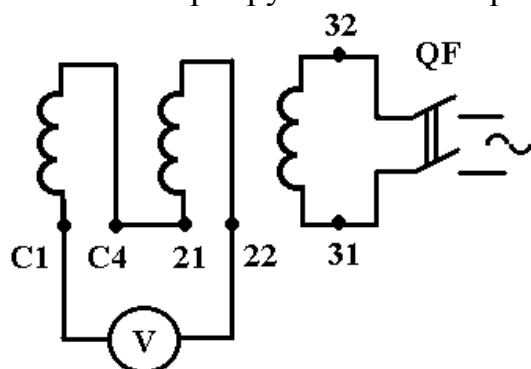


Рис. 9.23.

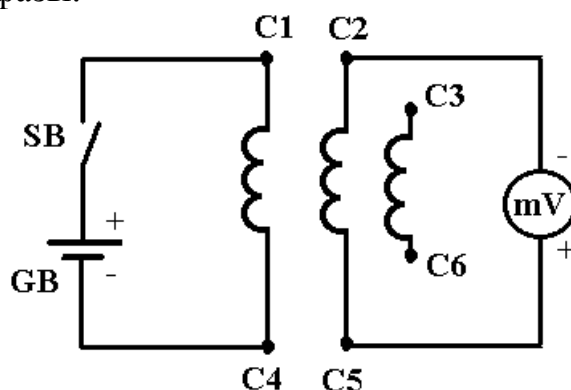


Рис. 9.24.

Начало концы можно определить также с помощью милливольтметра постоянного тока или гальванометра (рис.9.24). Для этого определяют выводы, принадлежащие каждой фазе. Один из концов первой фазы выбирается произвольно за начало C1, второй - за конец C4.

На выводы второй фазы подключают милливольтметр, а затем на выводы первой фазы - источник постоянного тока 2..4 В. При этом знак "+" подключают к началу фазы C1, знак "-" к концу фазы C4.

Если в момент подачи напряжения на первую фазу стрелка милливольтметра отклоняется вправо, следовательно, зажимы "+" милливольтметра соединен с концом фазы C5. Если же стрелка милливольтметра отклоняется влево при снятии сигнала, то зажим "+" вольтметра подключен к началу фазы C2.

Если двигатель имеет только три вывода, правильность соединения фаз проверяется подачей напряжения (пониженного, не более 10% U_n) на два зажима и измерением вольтметром напряжений между третьим выводом и каждым из двух выводов. Проверка производится трижды 1-2, 2-3, 3-1. При правильном соединении фаз измеряемые напряжения равны половине напряжения, приложенного к двум выводам в каждом из трех вариантов (рис. 9.25).

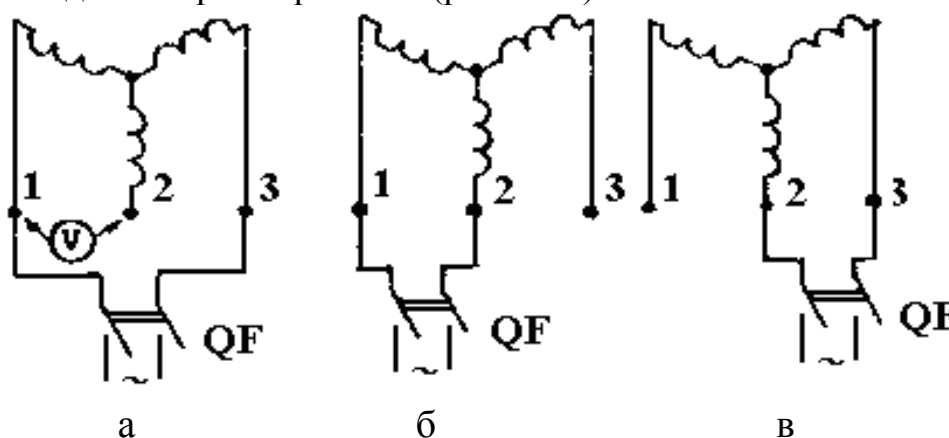


Рис. 9.25. Схемы маркировки зажимов обмоток, соединенных в звезду

Предположим, что фаза 2 вывернута. Тогда при питании по схеме рис. 6.4.,а $\Rightarrow U_{21} = U_{23}$; по схеме рис.6.4.,б $\Rightarrow U_{31} > < U_{32}$; по схеме 6.4.,в $\Rightarrow U_{12} > < U_{13}$.

Вывернутой оказывается та фаза, которая задействована во всех схемах, дающих неодинаковые показания вольтметров, то есть фаза 2.

Начала и концы фаз у мелких двигателей до 10 кВт можно определить пробным включением на холостом ходу. Сначала определяют выводы обмотки, принадлежащие к каждой из трех фаз произвольно выбирают начало и конец первой фазы.

Затем к концу С4 первой фазы присоединяют по одному зажиму второй и третьей фаз. На оставшиеся свободными три вывода (рис.9.26,а) питание и включают двигатель на холостом ходу. Если двигатель разворачивается нормально, работает без сильного шума и ток во всех трех фазах одинаков и составляет 40..60% номинального, то выводы фаз 2 и 3 соединены в общую точку и являются концами фаз.

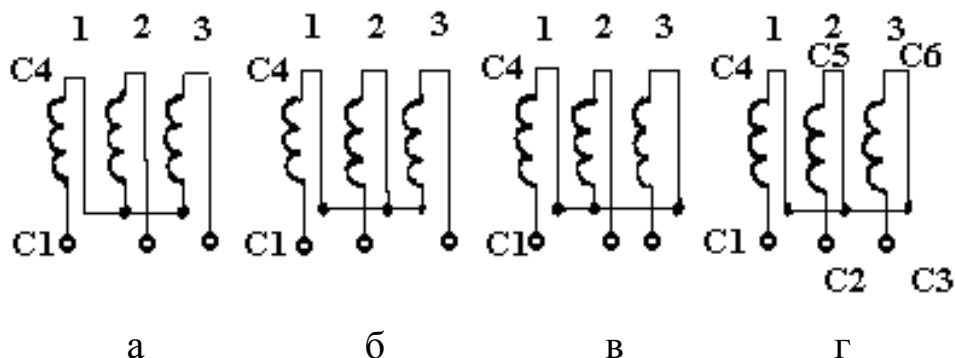


Рис. 9.26. Схемы маркировки зажимов обмоток АД мощностью до 10 кВт

Если же двигатель разворачивается с трудом, сильно гудит и токи в фазах различный, следует отключить двигатель, поменять (рис.9.26,б) местами выводы второй фазы. Если после этого двигатель будет работать ненормально, следует восстановить первоначальное подключение фазы 2 и изменить подключение фазы 3 (рис. 9.26,в). Если и после этого двигатель будет работать ненормально, следует, сохранив порядок подключения фазы 3, поменять подключение зажимов фазы 2 (рис. 9.26,г). В варианте, дающем нормальный запуск двигателя, в нулевую точку соединены концы фаз С4, С5, С6.

Таблица 9.20

Обозначения выводов обмоток машин переменного тока

Наименование и схема обмотки	Название выводов	ГОСТ 183-74		СТ СЭВ 3170-81	
		Начало	Конец	Начало	Конец
Обмотка статора					
Открытая схема	1-я фаза	C1	C4	U1	U2
	2-я фаза	C2	C5	V1	V2
	3-я фаза	C3	C6	W1	W2
Дополнительные выводы в фазах открытой схемы	1-ая фаза	--	--	U3,U4	
	2-ая фаза	--	--	V3,V4	
	3-я фаза	--	--	W3,W4	
Открытая схема для полразделения каждой фазы на две части	1-я фаза	1C1, 2C1	1C4, 2C4	U1, U5	U2, U6
	2-я фаза	1C2, 2C2	1C5, 2C5	V1, V5	V2, V6
	3-я фаза	1C3, 2C3	1C6, 2C6	W1, W5	W2, W6

Глухое сопряжение в звезду с выводом нейтрали	1-я фаза	C1	--	U	
	2-я фаза	C2	--	V	
	3-я фаза	C3	--	W	
	нейтраль	--	0	--	N
Глухое сопряжение в треугольник	1 вывод	C1	--	U	
	2 вывод	C2	--	V	
	3 вывод	C3	--	W	
Обмотка возбуждения индуктора синхронной машины		И1	И2	F1	F2
Вспомогательная обмотка двигателя однофазного тока		B1	B2	Z1	Z2
Вторичная обмотка (обычно ротор)	1-я фаза	P1	--	K	--
	2-я фаза	P2	--	L	--
	3-я фаза	P3	--	M	--
	нейтраль	--	0	--	N

Примечание 1. При наличии на какой-либо части машины двух или более одинаковых обмоток, не предназначенных для последовательного или параллельного соединения между собой, принимается такая же система обозначений, но с добавлением впереди цифр 1,2 и т.д.

2. Выводы обмоток АД с несколькими частотами вращения по СТ СЭВ 3170-81 также обозначаются с добавлением впереди цифр 1,2 ... причем цифре 1 соответствует наименьшая частота вращения; а по ГОСТ 183-74- с добавлением впереди соответствующих чисел полюсов: 2, 4, 6 и т.д.

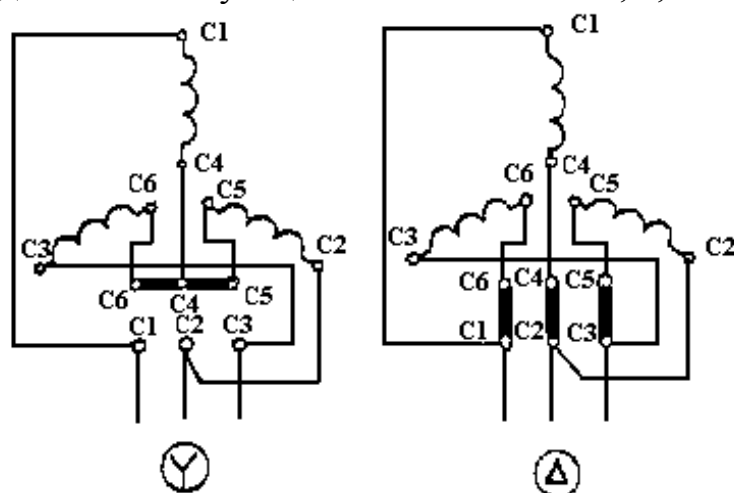


Рис. 9.27.

Буквенное обозначение выбирают на наконечниках или на колечках. В малых машинах, где оно затруднено, может применяться обозначение концов разноцветными проводами:

Начала фаз	Концы фаз
C1 - желтый	C4 - желтый
C2 - зеленый	C5 - зеленый + черные полоски
C3 - красный	C6 - красный

Расположение выводов обмоток на клеммной колодке и их коммутация при соединении обмотки статора в звезду и треугольник показаны на Рис.9.27

[содержание](#)

10. ИСПЫТАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ

10.1. Опыт холостого хода

Для проведения опыта холостого хода собирается схема (рис.10.1). Подводимое к трансформатору напряжение изменяется в диапазоне $U_{10} = 0 \dots 1,15U_{1H}$ и для 4-5 точек фиксируют значения U_{10}, I_0, P_0, U_{20} .

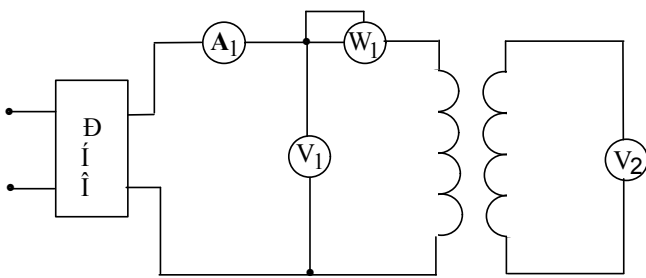


Рис. 10.1 Схема опыта

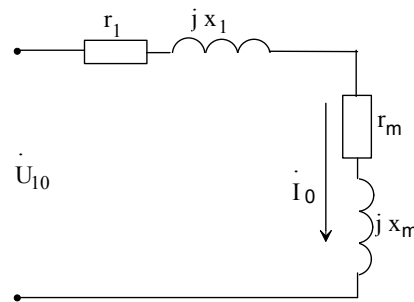


Рис. 10.2 Схема замещения

Схема замещения для режима холостого хода представлена на рис. 10.2. Для значения $U_{10} = U_{1H}$ можно рассчитать коэффициент трансформации

$$k = U_{1H} / U_{20}$$

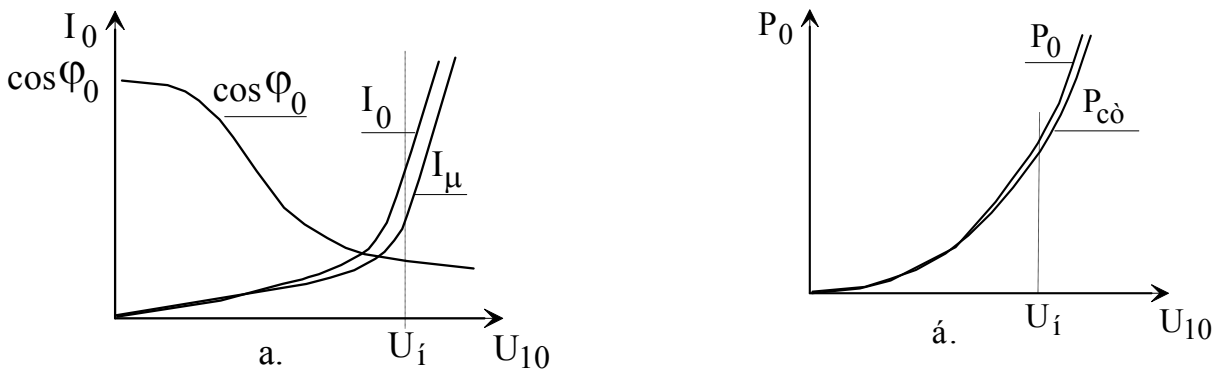


Рис. 10.3. Характеристики холостого хода

По данным опыта холостого хода, можно выполнить следующие расчеты:

$$Z_0 = Z_1 + Z_m = U_{10} / I_0;$$

$$r_0 = r_1 + r_m = P_0 / I_0^2;$$

$$x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$$

$$x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}; \quad \cos \varphi_0 = P_0 / U_{10} I_{10}; \quad I_{0a} = I_0 \cdot \cos \varphi_0;$$

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \varphi_0.$$

Характеристики холостого хода представлены на рис. 10.3.

Зависимость $I_\mu = f(U)$ на рис. 9.3,а повторяет характеристику намагничивания стали $H = f(B)$, полный ток холостой ход $\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + j\dot{I}_{0a}$.

Потери холостого хода $\Delta P_0 = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{э10}}$, где $\Delta P_{\text{ст}} \equiv B^2 \equiv U_{10}^2$, а $\Delta P_{\text{э10}} = I_0^2 r_1$, но т.к. ток холостого хода (I_0) мал, то считается, что потери холостого хода являются потерями в стали (рис. 10.3,б). С уменьшением напряжения U_{10} намагничивающая мощность уменьшается быстрее, чем потери в стали и,

следовательно, $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{P_0 + Q_0}}$ увеличивается (рис. 10.3,а). Для

трансформаторов средней и большой мощности, у которых ток холостого хода мал, можно пренебречь потерями в первичной обмотке и потоком рассеяния $\Phi_{\sigma 0}$ (т.к. МДС $I_0 w_1$ мала).

Тогда, пренебрегая значениями параметров первичного контура r_1 и x_1 , можно определить $z_m = U_{10} / I_0$; $r_m = P_0 / I_0^2$; $x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}$ и построить векторную диаграмму режима холостого хода (рис. 10.4).

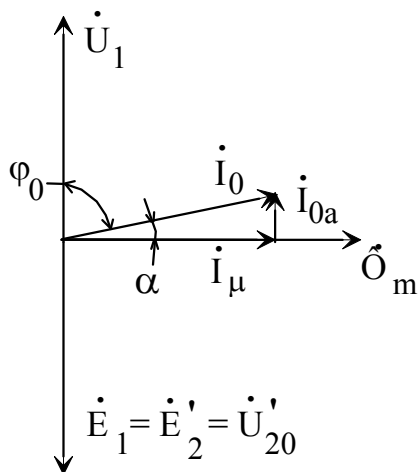


Рис. 10.4.
Векторная диаграмма
режима
холостого хода

Активная составляющая тока холостого хода I_{0a} не превышает 10% I_0

10.2. Опыт короткого замыкания

Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко (рис. 9.5) через амперметр, а на первичную подают такое напряжение U_K , при котором по

обмоткам протекают номинальные токи ($I_{1н}, I_{2н}$). Это напряжение называют напряжением короткого замыкания, которое принято выразить в процентах

$$U_{к\%} = \frac{U_{к}}{U_{н}} \cdot 100\%.$$

Обычно $U_{к}$ составляет (5...10)% номинального первичного напряжения.

Поскольку магнитный поток Φ пропорционален величине напряжения U_1 , а в режиме короткого замыкания $U_1 = (0,05...0,1)U_{1н}$, следовательно магнитный поток настолько мал, что током намагничивания можно пренебречь, т.е. положить $I_0 = 0$.

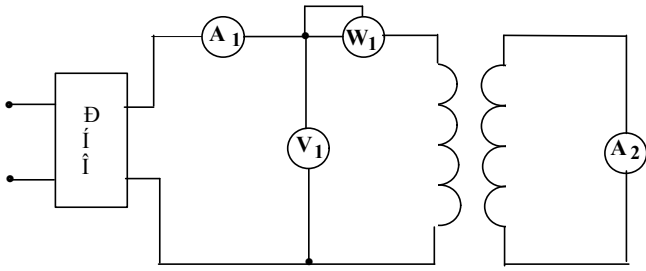


Рис. 10.5 Схема опыта

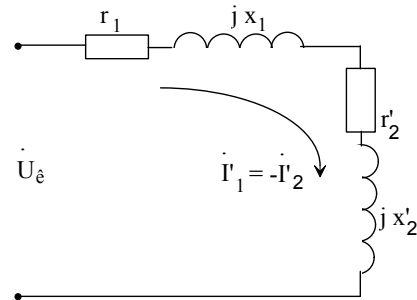


Рис. 10.6. Схема замещения

Поэтому схема замещения для режима короткого замыкания имеет вид, представленный на рис. 10.6, а система уравнений для опыта короткого замыкания

$$\begin{cases} \dot{U}_{к} = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_{1к}x_1 + \dot{I}_{1к}r_1 \\ 0 = \dot{E}_2 - j\dot{I}'_{2к}x'_2 - \dot{I}'_{2к}r'_2 \\ \dot{I}_{1к} = -\dot{I}'_{2к} \end{cases}$$

Исходной точкой опыта короткого замыкания является точка соответствующая номинальному напряжению короткого замыкания $\dot{U}_{к}$, т.е.

$$\dot{I}_{1к} = \dot{I}_{1н}, \quad \dot{I}'_{2к} = \dot{I}_{2н}$$

Поскольку магнитный поток в режиме короткого замыкания мал, то магнитная система трансформатора не насыщена и для построения характеристик достаточно снять данные для 3 точек и рассчитать значения

$$Z_{к} = Z_1 + Z'_2 = U_{к} / I_{к}; \quad r_{к} = r_1 + r'_2 = P_{к} / I_{к}^2; \quad x_{к} = x_1 + x'_2 = \sqrt{Z_{к}^2 - r_{к}^2};$$

$$\cos \varphi_{к} = P_{к} / U_{к} I_{к}.$$

Сопротивления первичной и вторичной обмоток принимаются равными $r_1 = r'_2 = r_{к} / 2; \quad x_1 = x'_2 = x_{к} / 2$.

По данным опыта КЗ можно построить характеристики короткого замыкания (рис.

10.7).

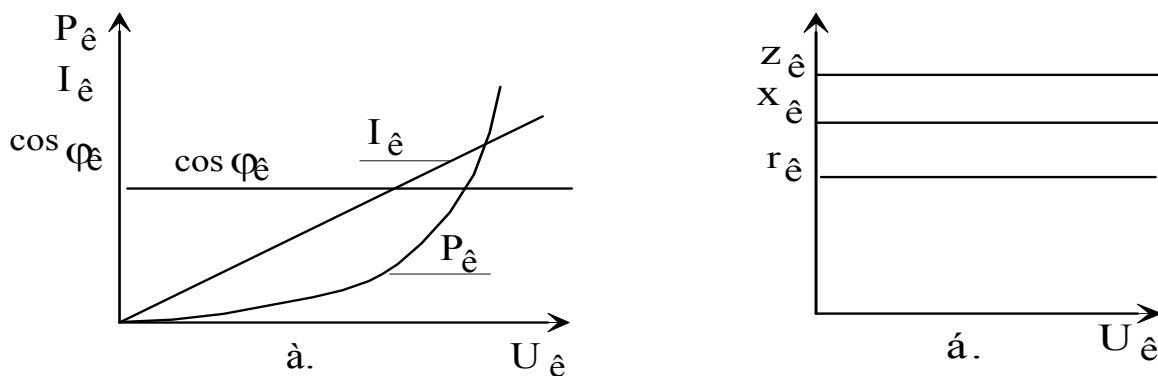


Рис. 10.7 Характеристики короткого замыкания

Индуктивные сопротивления короткого замыкания это сопротивления рассеяния, но т.к. магнитная система не насыщена ($\mu_{ст} = \infty$), то можно считать,

что $L_{\sigma} = \frac{\Psi_{\sigma}}{I} = \frac{w \cdot \Phi_{\sigma}}{I} = \frac{w \cdot F}{R_{\mu} \cdot I} = \frac{w^2}{R_{\mu_0}} = const$, т.е. индуктивное сопротивление

$x_k = const$. Поскольку можно считать, что опыт короткого замыкания происходит при установившейся рабочей температуре обмоток, то $r_k = const$, а следовательно $z_k = const$ (рис. 10.7,б), коэффициент мощности при этом $\cos \varphi_k = r_k / z_k = const$ (рис. 10.7,а).

Поскольку магнитная система не насыщена, то зависимость $I_k = f(U_k)$ представляет прямую линию (рис. 10.7,а), а характеристики $P_k = f(U_k)$ определяются соотношением $P_k = I_k^2 r_k \equiv U_k^2$, т.е. потери короткого замыкания являются потерями в обмотках трансформатора.

Системе уравнений электрического равновесия для режима КЗ соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 10.8.

Для схемы замещения опыта короткого замыкания (рис. 10.6) можно записать уравнение равновесия

$$\dot{U}_k = -\dot{I}'_2 r'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1$$

и построить векторную диаграмму (рис. 10.9).

Если подставить в уравнение равновесия значение тока $-\dot{I}'_2 = \dot{I}_1$, то можно построить треугольник короткого замыкания (рис. 10.10)

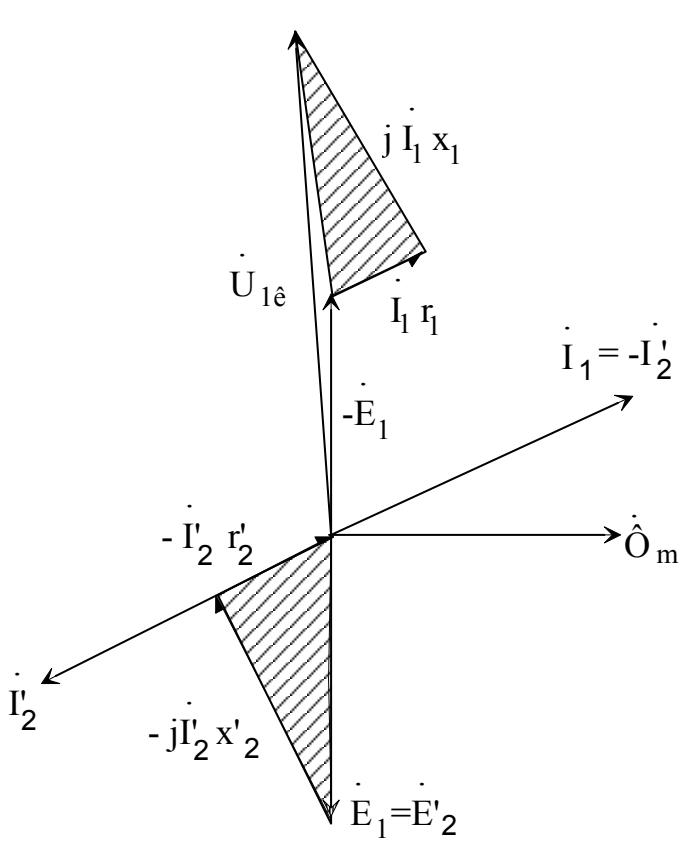


Рис. 10.8

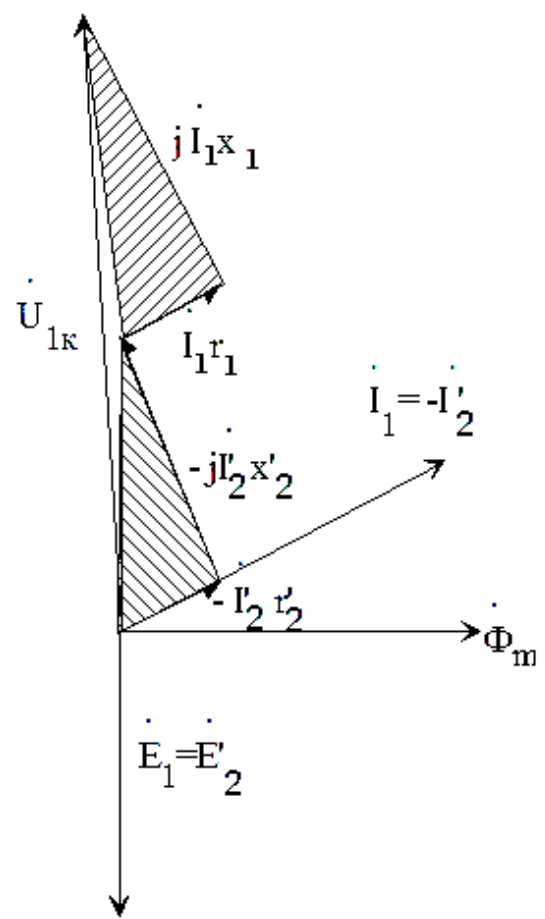


Рис. 10.9

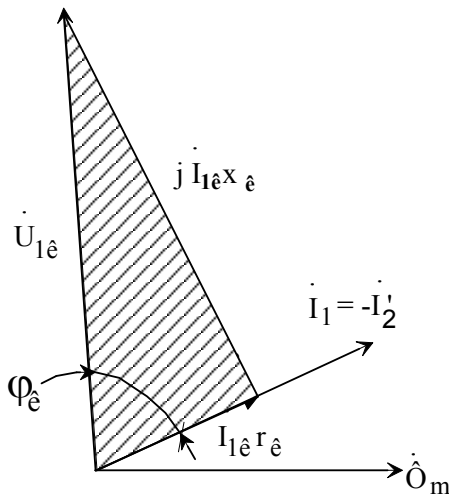


Рис. 10.10.
Треугольник КЗ

Составляющие напряжения короткого замыкания обычно выражают в процентах от величины первичного номинального напряжения т.е.

$$U_{ка} = \frac{I_{1н} \cdot r_k}{U_{1н}} \cdot 100\%,$$

$$U_{кр} = \frac{I_{1н} \cdot x_k}{U_{1н}} \cdot 100\%,$$

$$\dot{U}_K = \sqrt{\dot{U}_{Ka}^2 + \dot{U}_{Kp}^2} \text{ ,либо используя значение угла } \varphi_K$$

$$\dot{U}_{Ka} = \dot{U}_K \cdot \cos \varphi_K \text{ , } \dot{U}_{Kp} = \dot{U}_K \cdot \sin \varphi_K \text{ .}$$

Величина напряжения $U_{K\%}$ используется для расчета установившегося тока короткого замыкания при номинальном напряжении

$$I_K = \frac{U_H}{Z_K} = \frac{U_H}{\frac{U_K}{U_H} \cdot \frac{U_H}{100}} = \frac{100}{U_{K\%}} \cdot I_H$$

Если принять, что $U_{K\%} = 5...10\%$, то ток короткого замыкания при $U_K = U_H$ может достигать $I_K = (20...10)I_{1H}$.

10.3. Группы соединения трехфазных трансформаторов

10.3.1. Схемы соединения обмоток

Обмотки ТР могут соединяться в звезду (рис. 10.11), треугольник (рис. 10.12), зигзаг (рис. 10.13). Обозначения выводов обмоток: ВН: А-Х ; В-У ; С-З ,
НН: а-х; b-у; c-з

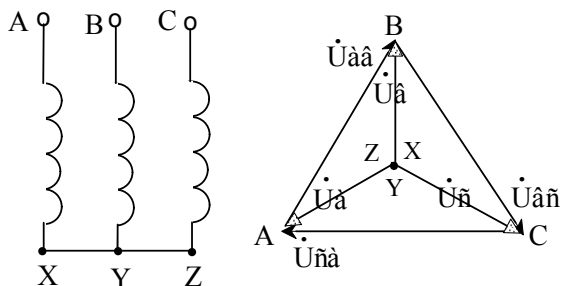


Рис. 10.11 Соединение звездой

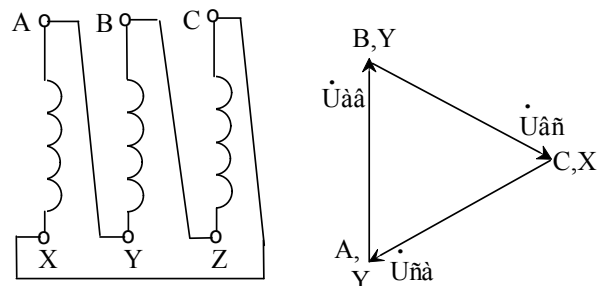


Рис. 10.12 Соединение треугольником

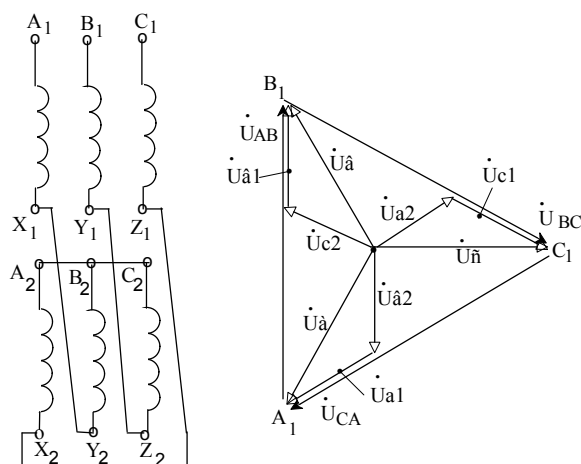


Рис. 10.13
Соединение
зигзаг

Из теории однофазных ТР известно, что при синусоидальном магнитном потоке ток намагничивания содержит ряд высших гармоник из-за нелинейности характеристики намагничивания, т.е.

$$i_0 = I_{01m} \cdot \sin \omega t + I_{03m} \cdot \sin 3\omega t + \dots$$

Для токов холостого хода трехфазного ТР можно записать

$$\begin{cases} i_{0A} = I_{01m} \sin \omega t + I_{03m} \sin 3\omega t + \dots \\ i_{0B} = I_{01m} \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_{03m} \sin 3(\omega t - 2\pi/3) + \dots \\ i_{0C} = I_{01m} \sin(\omega t - 4\pi/3) + I_{03m} \sin 3(\omega t - 4\pi/3) + \dots \end{cases}$$

Т.о. токи третьих гармонических во всех фазах совпадают по направлению, т. е

$$i_{03A} = i_{03B} = i_{03C} = I_{03m} \cdot \sin 3\omega t.$$

Это обстоятельство оказывает влияние на форму магнитного потока и кривой ЭДС.

Соединение обмоток по схеме Y_0/Y

Третьи гармоники тока намагничивания замыкаются по нулевому проводу, при этом ток холостого хода несинусоидален а, следовательно, синусоидален магнитный поток и индуцируемые им ЭДС.

Соединение обмоток по схеме Y/Y

Пути для замыкания третьих гармоник тока отсутствуют, следовательно кривая тока холостого хода синусоидальна (рис. 10.14, а). Кривая магнитного потока будет содержать третью гармонику и приобретает уплощенную форму (рис. 10.14, б). Несинусоидальными будут и фазные (рис. 10.14, а).

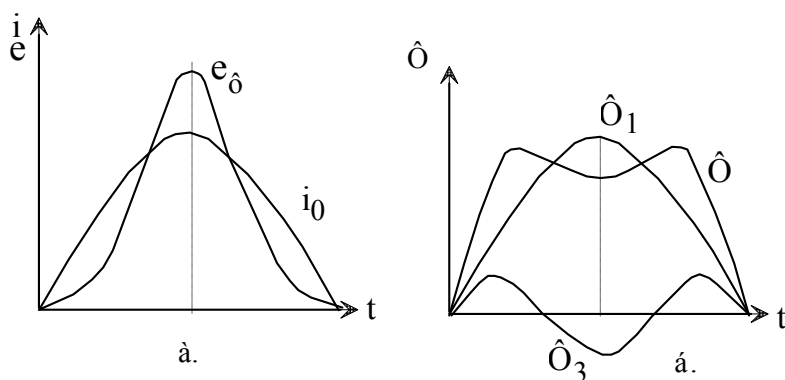


Рис. 10.14

Т.к. третьи гармоники во всех фазах совпадают по направлению, то в линейных ЭДС вторичных обмоток третьи гармоники отсутствуют и кривая

линейной ЭДС будет синусоидальной. В трехстержневом ТР третьи гармоники потока не могут замыкаться по магнитопроводу т.к. они совпадают по фазе. Поэтому они замыкаются по стержням, через воздух(масло), бак, воздух и снова по стержню магнитной системы ,проходя большую часть пути по воздуху ($\mu = \mu_0$). Поэтому в трехстержневом ТР потоки третьи гармоники малы и ЭДС мало отличается от синусоиды.

В групповом ТР третьи гармоники потока фаз замыкаются каждый по своей магнитной системе т.е. по пути с малым магнитным сопротивлением. Поэтому потоки третьих гармоник значительны и искажение фазных ЭДС недопустимо велико т.о. для группового ТР соединения Y/Y недопустимо.

Соединение обмоток по схеме Y/Δ

Несинусоидальные потоки первичной обмотки наводят в фазах вторичной обмотки ЭДС третьих гармоники. По контуру треугольника протекают токи третьих гармоники, которые создают магнитное поле 3 гармоники направленные по закону Ленца против потока третьих гармоники первичной обмотки. В результате чего результирующий магнитный поток практически синусоидален. Синусоидальны и вторичные фазные ЭДС.

10.3.2. Группы соединения трансформаторов

Схемы соединения обмоток Y, Δ, Z могут образовывать 12 групп соединений. Группа соединений в пределах каждой схемы отличается углом сдвига линейных ЭДС вторичных обмоток , относительно первичных линейных ЭДС.

Будем считать ЭДС положительной , если она действует от конца обмотки к началу .Обмотки НН и ВН сцеплены с одним и тем же магнитным потоком , следовательно ЭДС действуют в одном направлении (рис. 10.15,а). Следовательно векторы положительных направлений ЭДС совпадают по фазе. Если изменить маркировку зажимов (рис. 10.15,б), то направления ЭДС сохранятся, но положительное направления векторов ЭДС (от конца обмотки к началу) изменятся в обмотке НН на противоположное, т.о. вектора \dot{E}_{XA} и \dot{E}_{xa} будут иметь сдвиг 180^0 .

Для обозначения сдвига фаз обмоток вектора их линейных ЭДС употребляют стрелки часов (рис. 10.16).. При этом вектор линейного напряжения первичной обмотки (ВН) принимают за минутную стрелку и считают, что она всегда совмещена с цифрой 12 , а вектора ЭДС обмотки НН принимают за часовую стрелку. Минимальный угол сдвига векторов может быть $\alpha = 30^0$. Номер группы определяется углом сдвига вектора линейной ЭДС обмотки НН относительно вектора линейной ЭДС обмотки ВН, отсчитанным против часовой стрелки,

отнесенным к минимальному углу (30^0). В рассмотренном случае были нулевая на рис. 10.15,а ($\frac{0}{30^0} = 0$) и шестая на рис. 10.15,б ($\frac{180^0}{30^0} = 6$) группы соединения обмоток

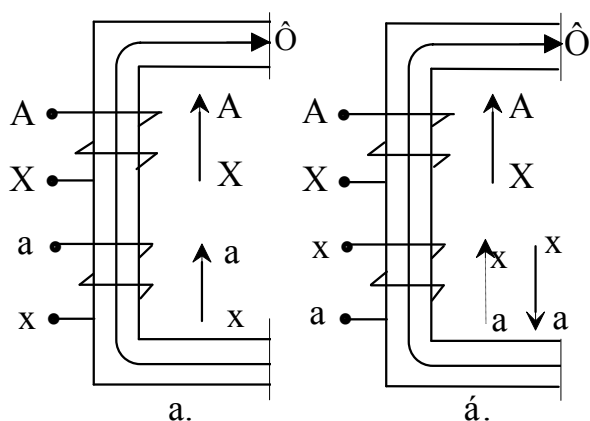


Рис. 10.15

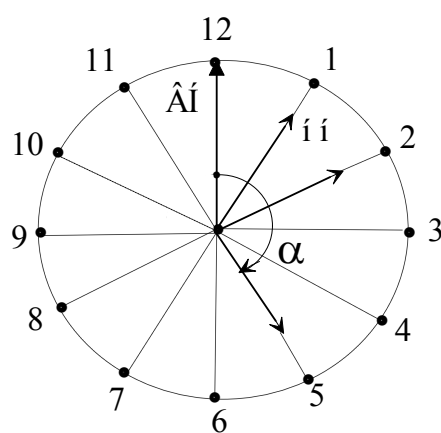


Рис. 10.16

Из рассмотрения рис. 10.15 можно сделать выводы:

- ✓ если обмотки НН и ВН расположены на одном стержне, то векторы фазных напряжений $U_{фа}, U_{фа}$ параллельны;
- ✓ если $(U_{фнн} \wedge U_{фвн}) = 0$, то маркировка зажимов обмоток НН и ВН совпадает;
- ✓ если $(U_{фнн} \wedge U_{фвн}) = 180^0$ то маркировка обмотки НН обратна маркировке обмотки ВН.

На практике приходится решать две задачи :

- ✓ определение номера группы ТР по заданной схеме соединения обмоток;
- ✓ построение схемы соединения обмоток по заданному номеру группы ТР.

Определение номера группы ТР по заданной схеме соединения обмоток.

При заданной схеме соединения обмоток ТР Y/Y (рис. 10.17) необходимо определить положительные направления векторов ЭДС всех фаз, построить звезду первичных фазных напряжений и определить вектор линейного напряжения \dot{U}_{AB} (рис. 10.17,а). Аналогичные построения выполняются для вторичной обмотки (рис. 10.17,б-с) и определяется угол сдвига (α) линейного напряжения вторичной обмотки ($\dot{U}_{ав}$) относительно вектора линейного напряжения первичной обмотки (\dot{U}_{AB}), отсчитываемый против часовой стрелки. Для схемы рис. 10.17,б это дает нулевую, а для рис. 10.17,с шестую группу.

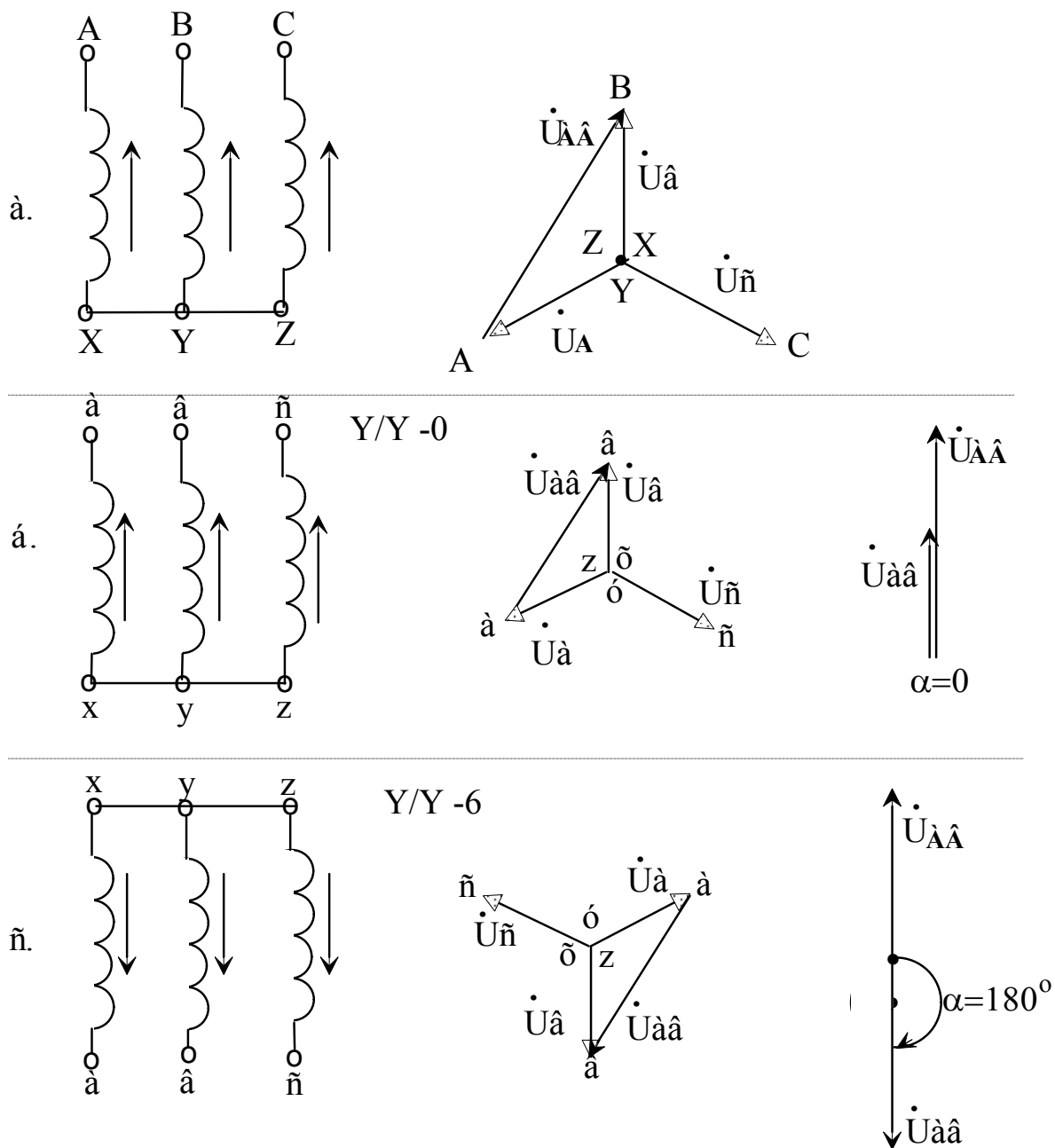


Рис. 10.17 Схемы соединения Y/Y-0, Y/Y-6

При заданной схеме соединения обмоток ТР Y/Δ (рис. 10.18) выполняется построение звезды первичных фазных напряжений (рис. 10.18,а) и треугольника векторов вторичных фазных напряжений, положение которых определяется положительным направлением ЭДС фаз (рис. 6.18,в-с). Сопоставление векторов линейных напряжений вторичной и первичной обмоток дает для рис. 10.18,в угол сдвига векторов $\alpha = 330^\circ$, что соответствует 11-й группе. Для рис. 10.18,с угол $\alpha = 150^\circ$, что определяет 5-ю группу трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ.

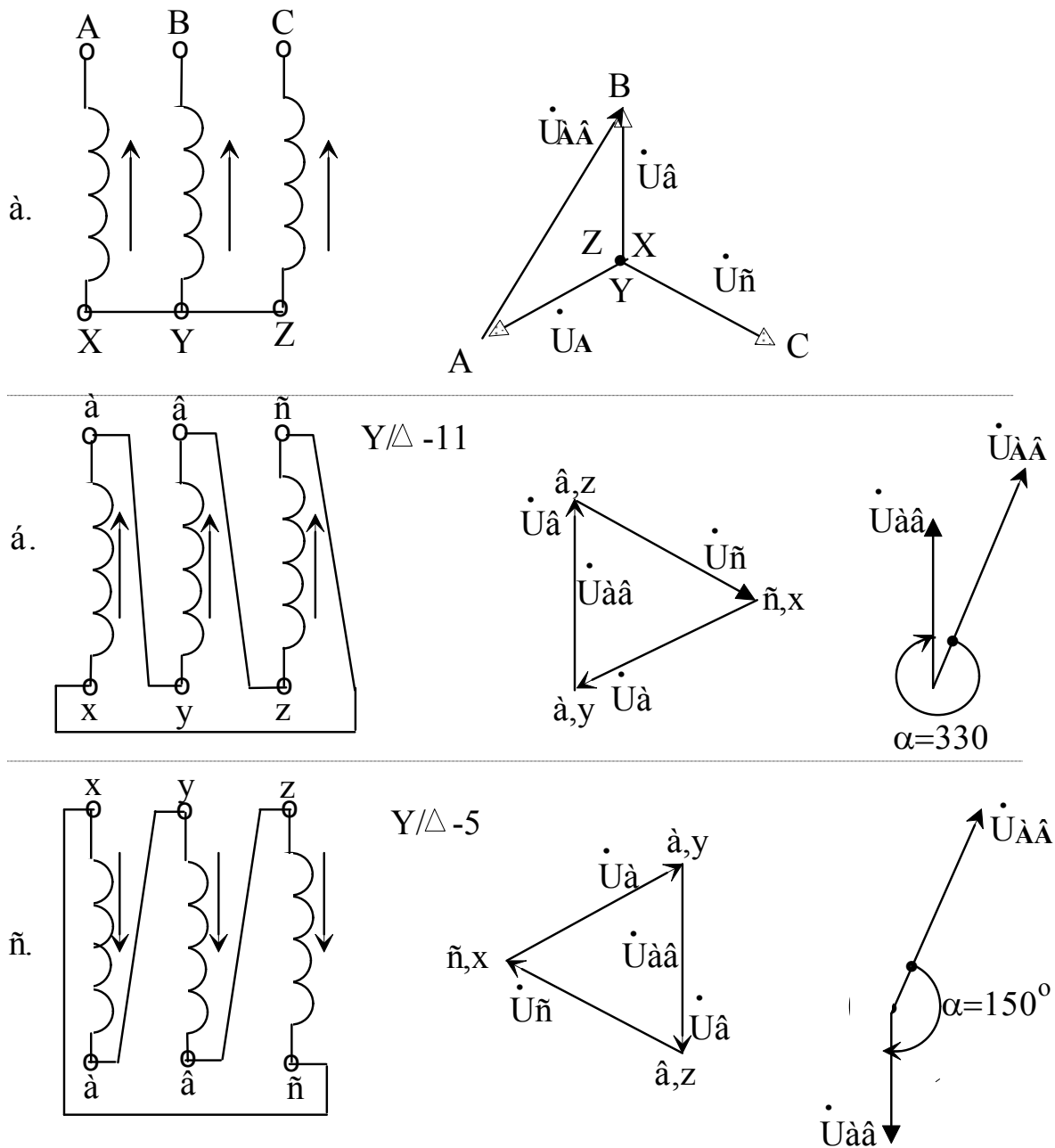


Рис. 10.18 Схемы соединения Y/Δ -11, Y/Δ -5

Построим схему соединения обмоток для заданной группы Y/Δ – 9.

Строим (рис. 10.19) звезду фазных и линейных напряжений первичной обмотки. Под углом $\alpha = 9 \cdot 30^\circ = 270^\circ$, отсчитанным по часовой стрелке, располагаем вектора линейных напряжений вторичного контура $\dot{U}_{\hat{a}\hat{b}}$, $\dot{U}_{\hat{b}\hat{c}}$, $\dot{U}_{\hat{c}\hat{a}}$, после чего строим треугольник линейных напряжений. Звезда фазных напряжений первичных обмоток и треугольник фазных напряжений вторичных обмоток дают возможность изобразить положительные направления ЭДС первичной и вторичной обмоток, исходя из чего строится схема соединения вторичной обмотки ТР. Во всех рассматриваемых примерах построения схема соединения первичной обмотки неизменна.

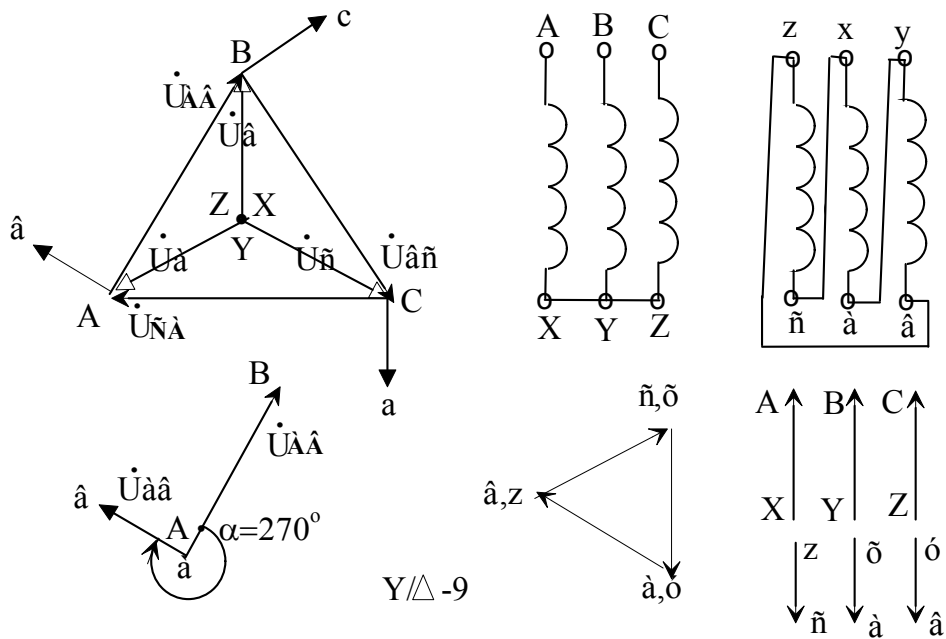


Рис. 10.19. Схема соединения Y/Δ-9

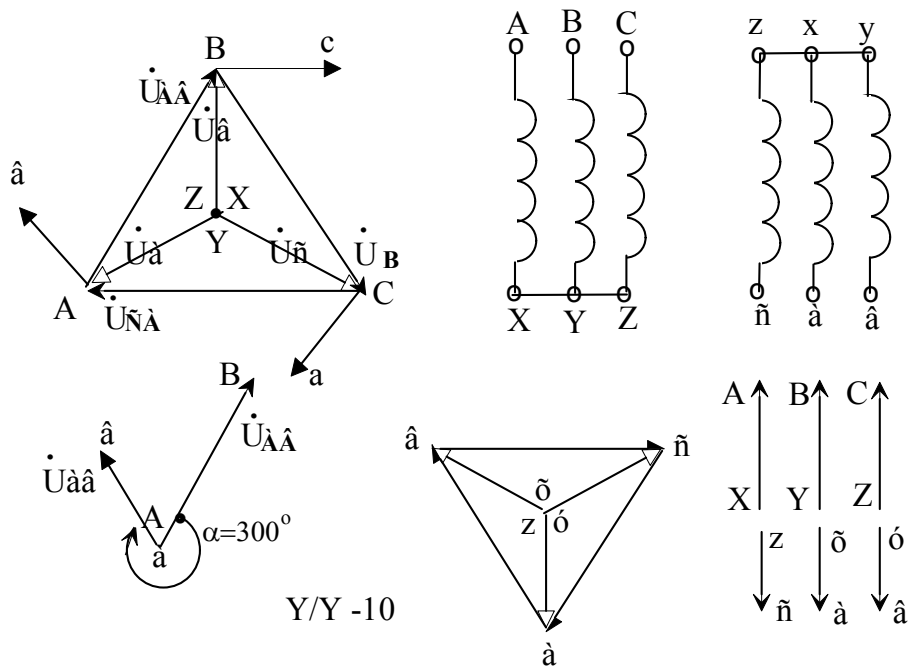


Рис. 10.20 Схема соединения Y/Y-10

При заданной группе соединений $Y/Y-10$ построения (рис. 9.20) выполняются в описанной выше последовательности с учетом угла между векторами линейных напряжений первичной и вторичной стороны ТР $\alpha = 10 \cdot 30 = 300^0$. Поскольку вторичные обмотки соединены в звезду, то для вторичного контура необходимо построить треугольник линейных и звезду фазных напряжений.

Основными группами соединения трехфазных трансформаторов являются

$Y/Y-0$ и $Y/\Delta-11$.

Приведенные построения позволяют сделать выводы:

- ✓ изменение маркировки обмоток НН позволяет достичь угла сдвига линейных ЭДС в 180^0 ;
- ✓ перенос обмотки НН на один стержень (по часовой стрелке) относительно обмоток ВН - на угол 120^0 ;
- ✓ одновременное изменение маркировки обмоток НН и перенос обмотки НН на один стержень - на угол 300^0 .

Таблица групп соединения

Четное значение угла α определяет четное значение шага изменения группы ТР. Поэтому для ТР со схемой Y/Y могут быть получены только четные группы - прямые 0,4,8 (рис. 10.21) и обратные 6,10,2 (рис. 10.22), а для ТР со схемой Y/Δ только нечетные - прямые 11,3,7 (рис. 10.23) и обратные 5,9,1 (рис. 10.24).

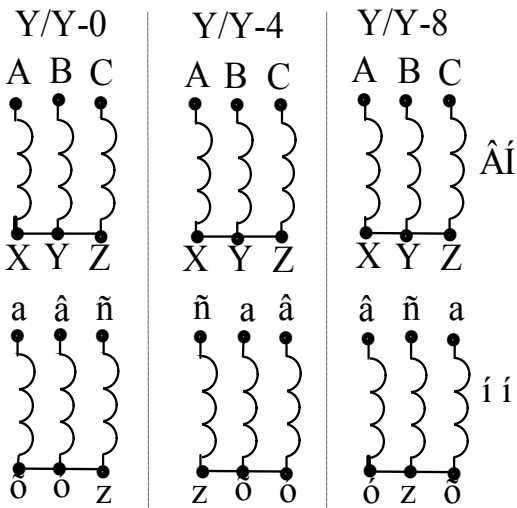


Рис. 10.21

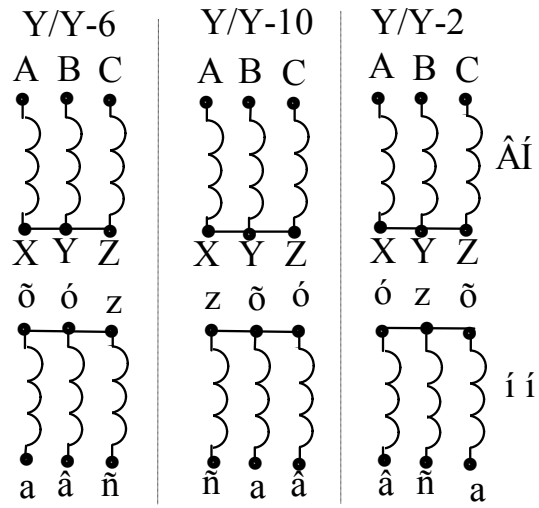
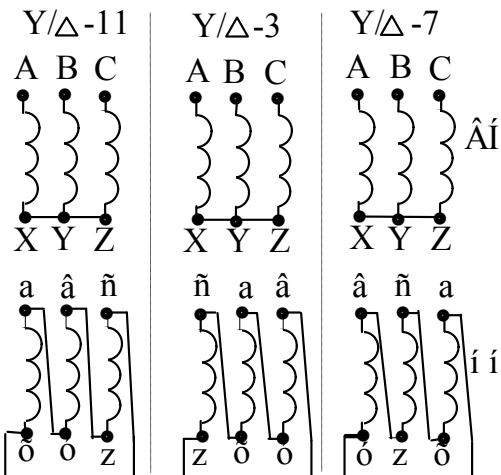


Рис. 10.22



10.23

Рис.

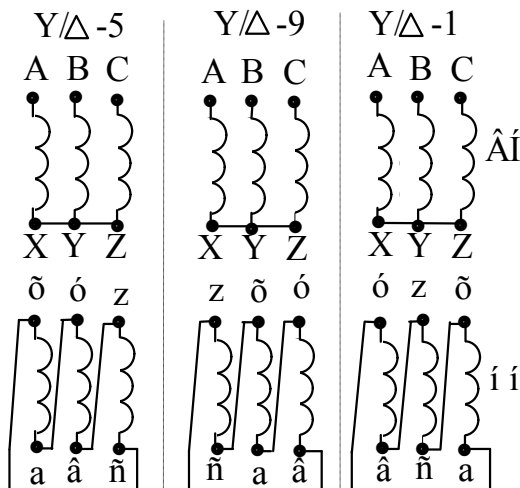


Рис.

11.. ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН

11..1. Опыт холостого хода

При работе двигателя без нагрузки и изменения фазного напряжения от $U_1 = (1,25 \dots 1,3)U_{1H}$ до $U_1 = (0,3 \dots 0,4)U_{1H}$. При этом записываются для всех 3х фаз значения тока I_{0a}, I_{0b}, I_{0c} , напряжения U_{0a}, U_{0b}, U_{0c} и потребляемой мощности P_{0a}, P_{0b}, P_{0c} . Напряжение снижается до тех пор, пока скольжение не начнет существенно увеличиваться.

Для расчетов принимаются среднеарифметические значения $I_{0\phi}, U_{0\phi}$.

Мощность холостого хода $P_0 = P_{0a} + P_{0b} + P_{0c}$. Мощность холостого хода

$$P_0 = \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} + m_1 \cdot I_{0р}^2 \cdot \eta_1, \text{ откуда } \Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} = P_0 - m_1 \cdot I_{0р}^2 \cdot \eta_1.$$

Поскольку потери в стали $\Delta p_{ст} = f(B^2) \approx f(U^2)$, а $\Delta p_{мех}$ не зависит от

подводимого напряжения, то зависимость $\Delta p_{ст} + \Delta p_{мех} = f(U^2)$ теоретически представляет прямую линию (рис. 11..1). Практически из-за наличия добавочных

потерь в стали характеристика отличается от прямолинейной. Рис.11..1 дает возможность разложить потери ХХ на составляющие – $\Delta p_{ст}$ и $\Delta p_{мех}$.

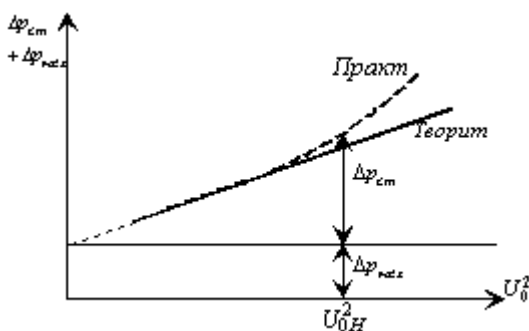


Рис. 11.1. Разделение потерь

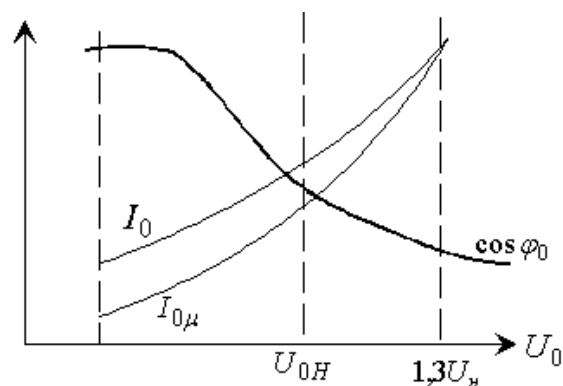


Рис. 11.2. Характеристики ХХ

Ток холостого хода $\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + j\dot{I}_{0\mu}$. Пока машина не насыщена ток $I_{0\mu}$ мал и $\cos \varphi_0 \approx const$, с ростом же насыщения $I_{0\mu}$ растет быстрее, чем I_{0a} (рис.11.2) и $\cos \varphi_0$ уменьшается. Кривая $I_{0\mu}$ при больших напряжениях U_0 совпадает с I_0 , при малых – отличается и должна идти в нуль. Для любой точки опыта:

$$\cos \varphi_{0i} = \frac{P_{0i}}{m_1 \cdot U_{0i} \cdot I_{0i}}; \quad I_{0ai} = I_{0i} \cdot \cos \varphi_{0i}; \quad I_{0\mu i} = I_{0i} \cdot \sin \varphi_{0i}$$

11.2. Опыт короткого замыкания

Опыт КЗ проводится при заторможенном роторе. Напряжение увеличивают до тех пор, пока ток статора не будет равен $I_{1k} = 3...4I_{1H}$. Эта точка является первой точкой опыта КЗ

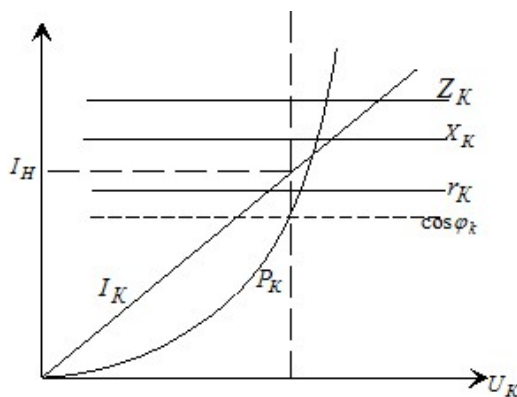


Рис. 11.3
Характеристики КЗ

. В процессе опыта фиксируют по одной фазе - I_{1k}, U_{1k}, P_{1k} . Для того, чтобы точки опыта снимались при одной температуре, опыт проводится быстро. Т.к. напряжение в опыте КЗ меньше номинального, то машина не насыщена и вполне достаточно 3 точек для построения характеристик. Последняя точка может соответствовать номинальному значению тока.

По данным опыта рассчитывают для каждой точки:

$$Z_{ki} = \frac{U_{k\phi i}}{I_{k\phi i}}; \quad r_{ki} = \frac{P_{k\phi i}}{I_{k\phi i}^2}; \quad x_{ki} = \sqrt{Z_{ki}^2 - r_{ki}^2}; \quad \cos \varphi_{ki} = \frac{P_{k\phi i}}{U_{1\phi i} \cdot I_{1\phi i}}$$

и строят характеристики (рис. 11.3).

Т.к. машина не насыщена, то зависимость $I_k(U_k)$ – прямолинейна.

$$P_k = m \cdot I_k^2 \cdot r_k \approx m \cdot U_k^2 r_k; (I_k \equiv U_k) \text{ При ненасыщенной магнитной системе}$$

$$Z_k, r_k, x_k(U_k) = const.$$

По характеристикам КЗ определяют $r_k, x_k, U_k, \cos \varphi_k$, соответствующие току

$$I_k = I_{1H} \text{ и приводят их к рабочей температуре (как правило } 75^0 C).$$

$$r_{k(75)} = r_k \frac{235 + 75}{235 + \theta_k}; x_{k(75)} = x_k \frac{235 + 75}{235 + \theta_k}$$

$$Z_{k75} = \sqrt{r_{k(75)}^2 + x_{k(75)}^2}; \cos \varphi_{k(75)} = \frac{r_{k(75)}}{Z_{k(75)}}$$

Ток КЗ соответствующий номинальному напряжению:

$$I_{kH(75)} = U_{1\phi H} / Z_{k(75)}$$

11.3. Расчет рабочих характеристик по Г-образной схеме замещения

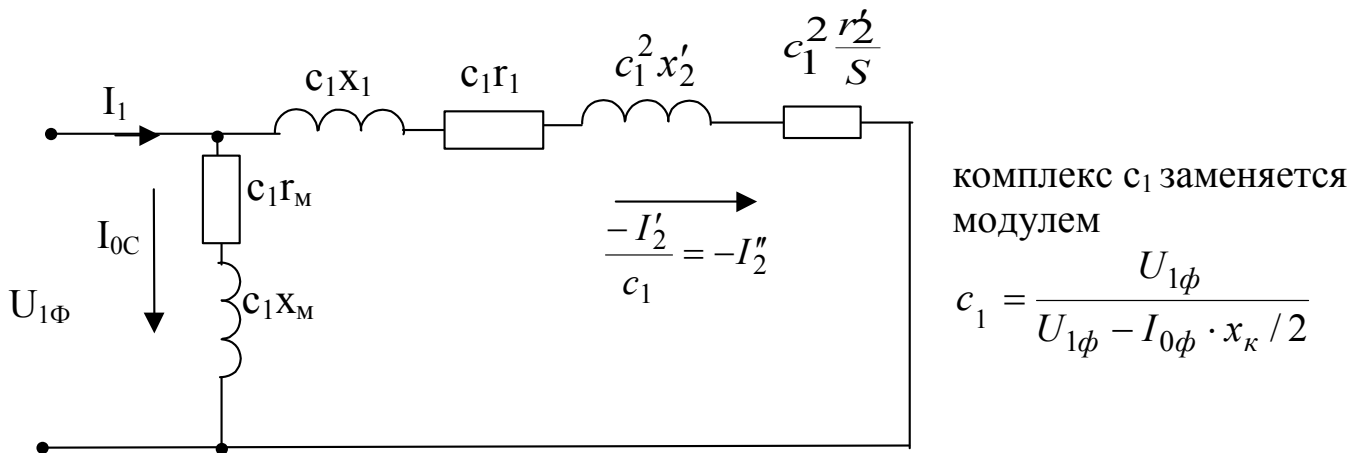


Рис. 11.4. Схема замещения

Параметры схемы замещения

$$r_1 \approx r'_2 = r_{k75} / 2; x_1 = x'_2 = x'_k / 2$$

Реактивная составляющая тока ХХ

$$I_{ocR} \cong I_{oR} = I_{op} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0}$$

Активная составляющая тока синхронизма

$$I_{ocA} = \frac{(\Delta P_{ct} + \Delta P_{mex}) + 3I_{ocR}^2 \cdot r_1}{3U_{1\phi H}}$$

Для расчета характеристик необходимо задаться скольжением (s) и выполнить расчет по следующему алгоритму

1. $n_2 = n_1 \cdot (1 - s)$
2. $R_3 = c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{s}$
3. $x_3 = c_1 x_1 + c_1^2 x_2'$
4. $z_3 = \sqrt{R_3^2 + x_3^2}$
5. $I_2'' = U_{1\phi H} / z_3$
6. $\cos \varphi_2'' = R_3 / z_3$
7. $\sin \varphi_2'' = x_3 / z_3$
8. $I_{1A} = I_{OCA} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2''$
9. $I_{1R} = I_{OCR} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2''$
10. $I_{1\phi} = \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1R}^2}$
11. $\cos \varphi_1 = I_{1A} / I_{1\phi}$
12. $P_1 = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos \varphi_1$
13. $\Delta p_{\partial 1} = 3 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot r_1$
14. $\Delta p_{\partial 2} = 3 \cdot I_2''^2 \cdot r_2'$
15. $\Delta p_0 = \Delta p_{cm} + \Delta p_{mex}$
16. $\Delta p_{\partial об} = 0.05 \cdot P_1$
17. $\sum \Delta p = \Delta p_{\partial 1} + \Delta p_{\partial 2} + \Delta p_0 + \Delta p_{\partial об}$
18. $P_2 = P_1 - \sum \Delta p$
19. $\eta = P_2 / P_1$
20. $P_{эм} = P_1 - \Delta p_{\partial 1} - \Delta p_{cm} \rightarrow P_{эм} = \frac{\Delta p_{\partial 2}}{s}$
21. $M_{эм} = P_{эм} / \omega_1 = P_{эм} \cdot p / 2\pi f_1$
22. $P_2' = P_{эм} - \Delta p_{\partial 2} \rightarrow P_2' = 3 \cdot I_2''^2 \cdot c_1 \cdot r_2' \frac{1-s}{s}$

Если выполнить расчеты (1...22) для ряда значений скольжения s , то можно построить рабочие характеристики.

- критическое скольжение

$$s_{кр} = \frac{c_1 \cdot r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_1')^2}}$$

- пусковой момент

$$M_{\Pi} = \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot r'_2}{2\pi \cdot f_1 \cdot \left[(r_1 + c_1 r'_2)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2 \right]}, \text{ Нм}$$

- максимальный момент

$$M_m = \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi H}^2}{2\pi \cdot c_1 \cdot 2\pi \cdot f_1 \cdot \left[(r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2})^2 \right]}, \text{ Нм}$$

- кратности пускового и максимального момента

$$\kappa_{\Pi} = M_{\Pi} / M_H ; \quad \kappa_m = M_m / M_H$$

Задавая значения скольжения из диапазона $S=0...1$ и используя формулу Клосса можно рассчитать механическую характеристику $M_{\text{э}}(s)$

$$M_{\text{э}} = \frac{2 \cdot M_m}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}$$

11.4. Построение круговой диаграммы.

По данным опытов ХХ и КЗ можно построить круговую диаграмму, по которой определяются рабочие характеристики.

- по рассчитанному току $I_{\text{кн}(75)}$, выбираем удобный масштаб тока m_i , так чтобы

$$I_{\text{кн}(75)} / m_i = 100...200 \text{ мм}$$

- рассчитываем масштаб мощности

$$m_p = m_1 \cdot U_{1\phi H} \cdot m_i, \text{ Вт/мм}$$

- рассчитываем значение угла

$$2\gamma_1 = \arctg \frac{I_{\text{оф}} \cdot r_{\text{k}(75)}}{U_{1\phi H}} ; \quad \sin 2\gamma_1 = 2 \frac{I_{\text{ср}} r_1}{U_{1\phi H}}$$

- проводим горизонтальную линию AC и под углом $2\gamma_1$ проводим линию AE .

- через точку A проводим луч $AD \perp AC$ (рис. 11.5).

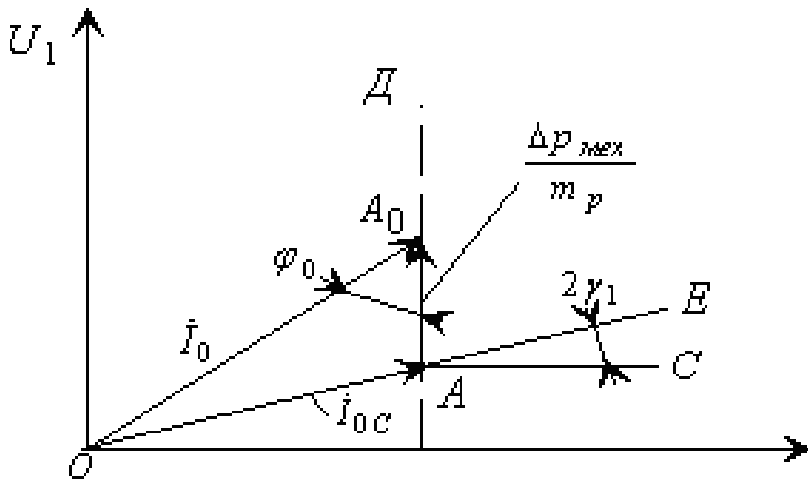


Рис. 11.5

- от точки A вдоль луча AD откладываем отрезок $\overline{A_0A} = \Delta p_{мех} / m_p$ и под углом φ_0 к лучу AD проводим отрезок $\overline{OA_0}$ – представляет собой ток холостого хода I_0 . Проводим отрезок \overline{OA} – ток идеального холостого хода (ток синхронизма) I_{0c} (рис. 11.5).

- из точки O параллельно лучу AD откладываем в произвольном масштабе вектор $U_{1\phi_n}$ и линию параллельно отрезку AC .

- под углом $\varphi_{k(75)}$ к вектору напряжения откладывается (Рис. 11.6) в масштабе m_i вектор тока $I_{кн(75)}$, отрезок $\overline{OK} = I_{кн(75)} / m_i$.

- точки A, K соединяем прямой. Из середины отрезка \overline{AK} восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с линией AE в точке O_1 , которая определяет центр основной (рабочей) окружности.

- через точки A и K проводится основная окружность с центром в точке O_1 .

- соединив точки A_0 и K получим линию A_0K – линию полезной механической мощности.

- определим угол α из выражения:

$$tg \alpha = \frac{r_{k(75)}}{2x_{k(75)}} \text{ или } tg \alpha = \frac{D \cdot m_i \cdot r_{k(75)}}{2 \cdot U_{1\phi_n}}, \text{ где } D - \text{ диаметр основной окружности в миллиметрах.}$$

Под углом α к линии AE проводим линию AM – линию электромагнитного момента и электромагнитной мощности. Масштаб электромагнитного момента (Hm/mm).

$$m_m = \frac{m_p \cdot 9,55}{n_1}, \text{ где } n_1 - \text{ частота вращения магнитного поля статора, об/мин.}$$

- через точку O провести полуокружность диаметром $of = 100 \text{ мм}$, которая служит для определения $\cos \varphi_1$.

- для построения шкалы скольжения необходимо:
- из точки K опустить \perp на линию AE , точку пересечения перпендикуляра с линией AM обозначить через P
- вдоль линии MA от точки M отложить отрезок $\overline{MN} = 50 \frac{KP}{AP}$
- через точку N провести \perp к радиусу O_1M .
- пересечение перпендикуляра с линией AM соответствует скольжению $S=0$.
- шкала скольжений строится в масштабе $5 \text{ мм} \setminus - 1\%$.

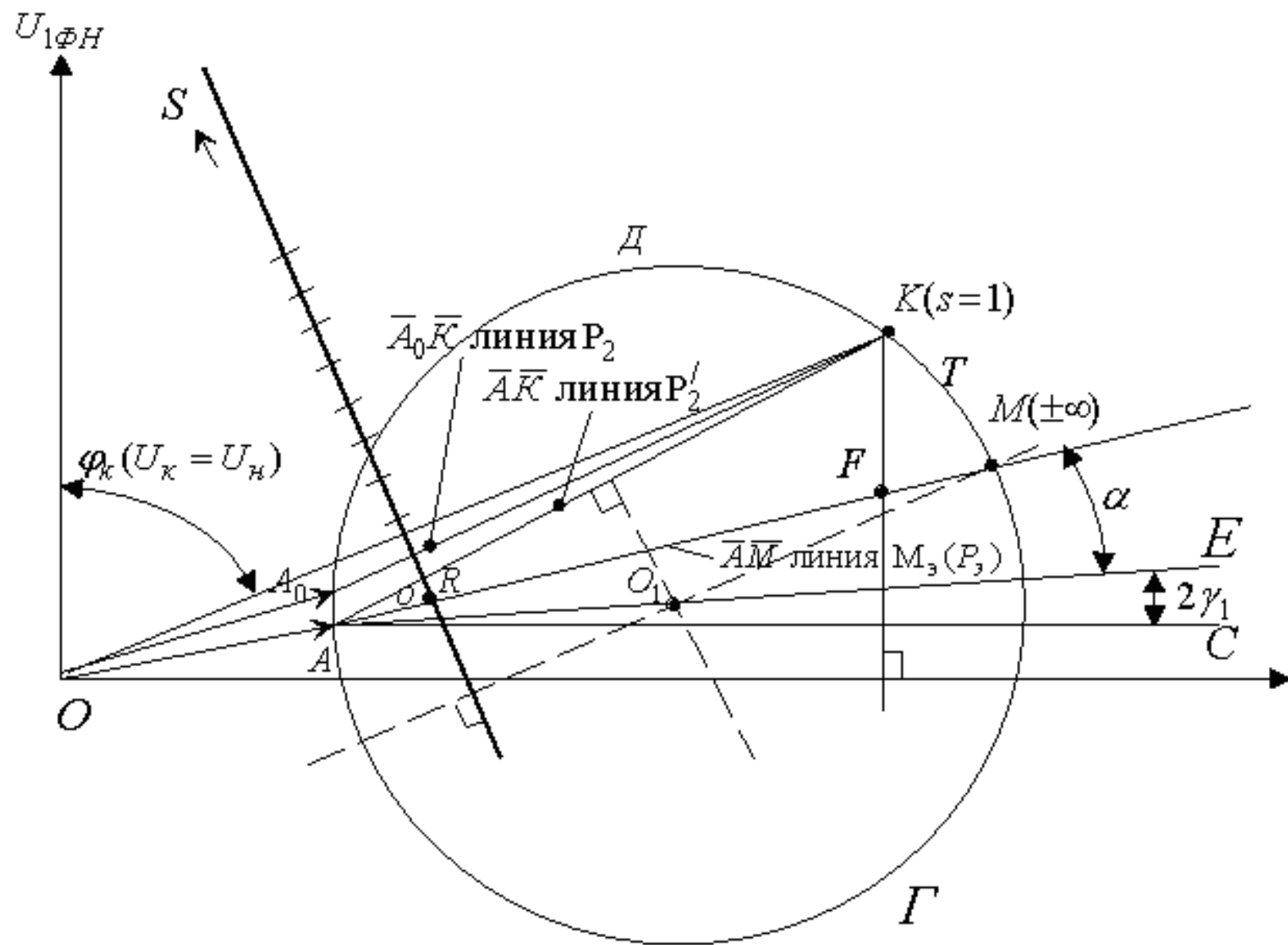


Рис. 11.6

Предположим, что двигатель работает в точке L на рис.11..7.

- Линия $LJ = I_1 \cdot \cos \varphi_1$ т.е. линия \perp напряжения

Это линия подведенной мощности, а

$$P_1 = \overline{LJ} \cdot m_p$$

- ток, потребляемый из сети $I_1 = \overline{OL} \cdot m_i$, ток $I_2'' = \frac{I_2'}{c_1} = \overline{AL} \cdot m_i$.

Если из точки L провести перпендикуляр к линии AE, то отрезки

- LG – механическая мощность на валу

$$P_2 = \overline{LG} \cdot m_p;$$

- LE – полная механическая мощность

$$P_2' = \overline{LE} \cdot m_p;$$

- LF – электромагнитная мощность

$$P_{эм} = \overline{LF} \cdot m_p, \quad M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \overline{LF} \cdot m_m$$

- Поскольку

$$P_э = P_2' + \Delta p_{э2}, \quad \text{то } \Delta p_{э2} = \overline{EF} \cdot m_p$$

- Полезная мощность на валу

$$P_2 = P_2' - \Delta p_{мех}, \quad \text{следовательно } \Delta p_{мех} = \overline{GE} \cdot m_p$$

- Коэффициент мощности определяется отрезком Of_1 в масштабе отрезка $Of = 1$

- Значение скольжения определяется точкой пересечения линии LM со шкалой скольжения

- Значение КПД более точно определяется как

$$\eta = P_2 / P_1 = \overline{LG} / \overline{LJ}$$

Задавшись рядом точек на окружности двигательного режима ($s = 0...1$) можно определить и построить рабочие характеристики.

- Если провести касательную параллельно линии электромагнитной мощности и определить точку L' , то отрезок $\overline{L'M'}$, лежащий на перпендикуляре к линии AE определит максимальный момент

$$M_m = \overline{L'M'} \cdot m_m$$

- Если из точки "K" опустить перпендикуляр на линию AE, то отрезок \overline{KP} определит величину пускового момента

$$M_{II} = \overline{KP} \cdot m_m$$

- Необходимо отметить, что значения M_m и M_{II} определяются с относительно большой погрешностью. Для более точного определения M_m и M_{II} необходимо дополнительно выполнить расчеты опыта КЗ и построить пусковую окружность, по которой определить значения M_m и M_{II} .

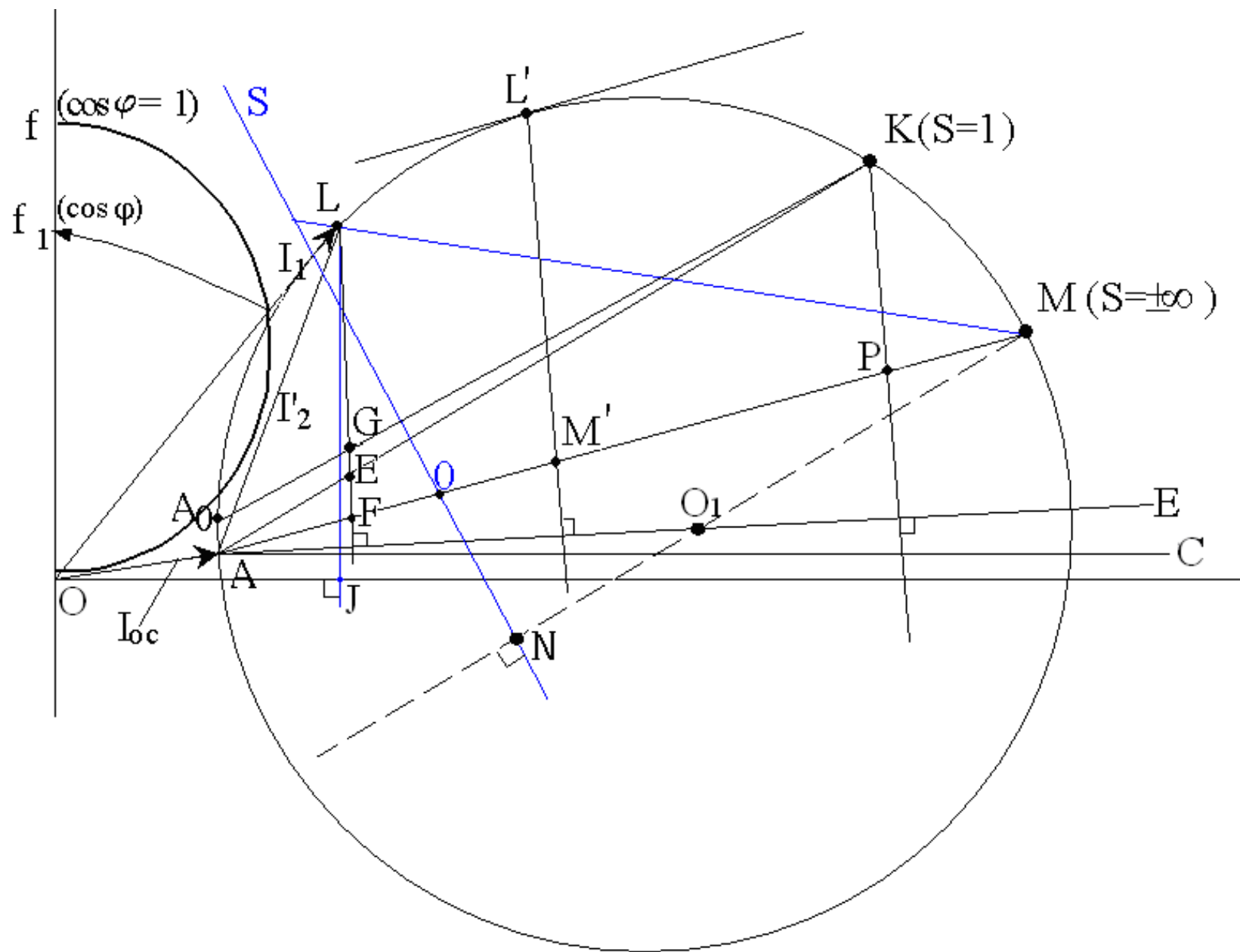


Рис. 11.7

12. ИСЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

12.1. Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода (ХХХ) представляет собой график зависимости напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода (ХХ) $U_1 = E_0$ от тока возбуждения I_B при $n_1 = const$.

ХХХ можно определить или из расчета магнитной цепи машины, или опытным путем.

Схема включения СГ для снятия характеристики ХХ приведена на рис. 11.1,а.

Если характеристики ХХ разных СГ изобразить в относительных единицах $E_0^* = f(I_3^*)$, то они будут мало отличаться от «нормальной» характеристики ХХ (рис. 12.1,б).

«Нормальная» ХХХ построенная по средним данным большого количества реальных характеристик генераторов и используется при расчетах СГ.

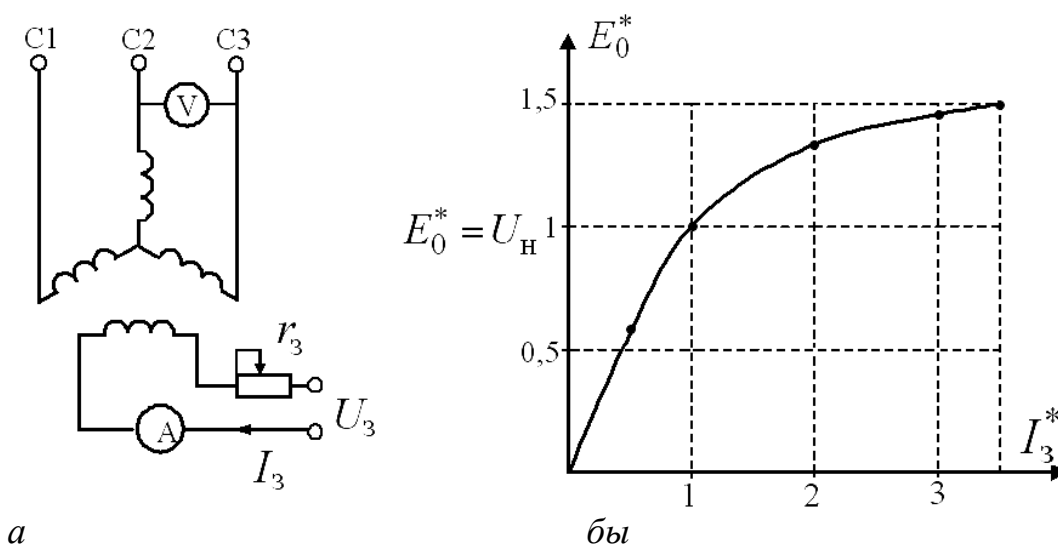


Рис. 12.1. Схема включения СГ в режиме ХХ –а, «нормальная» ХХХ –бы

Данные «нормальной» ХХХ приведенные в табл. 12.1. В таблице ЭДС и ток возбуждения приведенные в относительных единицах

$$E_0^* = \frac{E_0}{U_H}; \quad I_{30}^* = \frac{I_3}{I_{30}}. \quad (12.1)$$

Здесь I_{30} – ток возбуждения в режиме ХХ при $E_0 = U_H$.

Таблица 12.1 Значение ЭДС и тока возбуждения для «нормальной» ХХХ

Струм возбуждение	I_3^*	0,45	1,0	1,45	2	2,45	3	3,45
-------------------	---------	------	-----	------	---	------	---	------

Турбогенераторы	E_0^*	0,458	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,451
Гидрогенераторы	E_0^*	0,453	1,0	1,23	1,3	-	-	-

12.2. Характеристика короткого замыкания

Здесь рассматривается установившееся короткое замыкание (КЗ) для случая, когда все три фазы замкнуты непосредственно на зажимах генератора (рис. 11.2,а).

Характеристика КЗ – это зависимость установившегося тока трехфазного КЗ от тока возбуждения при постоянной частоте вращения ротора: $I_K = f(I_3)$ при $n = const$ (рис. 12.2,б). При вращении СГ ток возбуждения увеличивают до значения, при котором ток КЗ превышает номинальное значение тока статора не больше чем на 25 %, то есть $I_K = (0 \div 1,25) \cdot I_{1H}$.

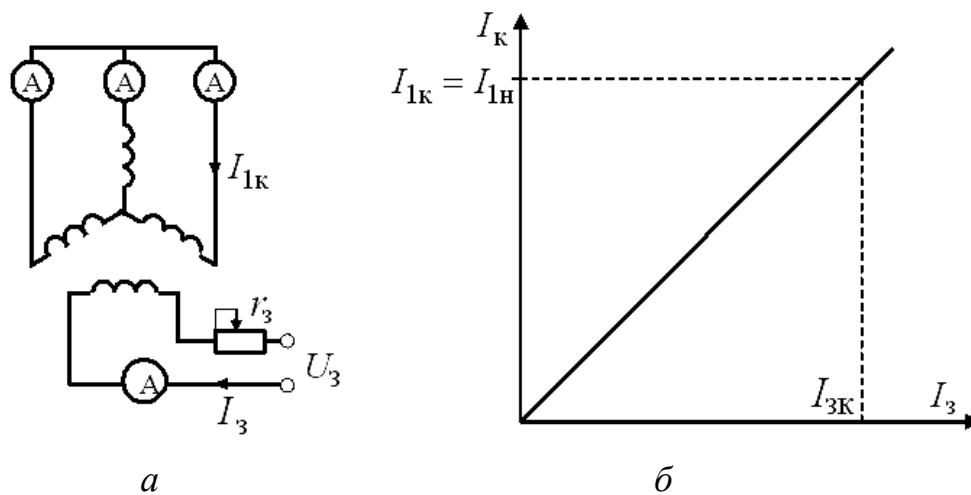


Рис. 12.2. Схема включения СГ в режиме КЗ –а;
характеристика КЗ –бы

Поскольку активное сопротивление обмотки статора мало ($r_1 \approx 0$), то можно считать, что при опыте КЗ обмотка якоря имеет только индуктивное сопротивление и ток КЗ отстает от ЭДС на угол $\psi = 90^\circ$. Поэтому $I_q = 0$, $I_1 = I_d = I_K$ и реакция якоря будет продольно размагничивающей.

Из-за действия размагничивающей реакции якоря, при коротком замыкании магнитная цепь машины слабо насыщена и поэтому характеристика $I_K = f(I_3)$ представляет собой линейную зависимость (рис. 12.2,б).

Уравнение электрического равновесия при $U = 0$ имеет вид

$$0 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma 1}, \quad (12.2)$$

где $\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d \cdot x_{ad} = j\dot{I}_K \cdot x_{ad}$ – ЭДС продольной реакции якоря;

$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 \cdot x_1 = -j\dot{I}_K \cdot x_1$ – ЭДС рассеяния.

С учетом последних выражений уравнения (11.2) приобретает вид

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_K \cdot x_{ad} + j\dot{I}_K \cdot x_1 = j\dot{I}_K \cdot x_d. \quad (12.3)$$

Этому уравнению отвечают векторная диаграмма, показанная на рис. 11.3, и схема замещения – на рис. 12.4.

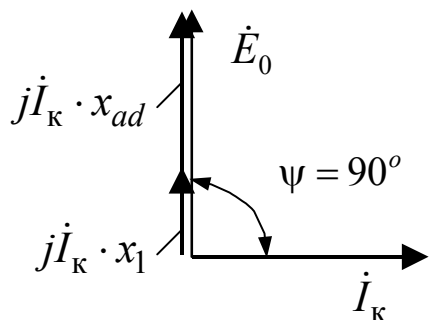


Рис. 12.3. Векторная диаграмма СГ при трехфазном КЗ

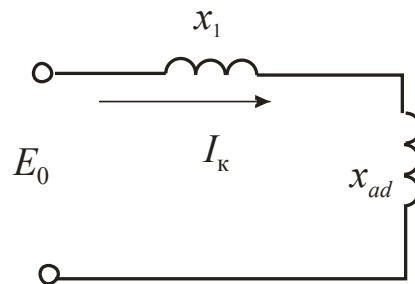


Рис. 12.4. Схема замещения СГ при трехфазном КЗ

12.3. Опытное определение сопротивления x_d

Продольное синхронное индуктивное сопротивление x_d можно определить по характеристикам ХХ и трехфазного КЗ. Из векторной диаграммы и схемы замещения для режима КЗ, приведенных на рис. 12.3 и рис. 12.4:

$$x_d = E_0 / I_k, \quad (12.4)$$

где $x_d = x_{ad} + x_1$.

Обычно находят ненасыщенное значение этого сопротивления и обозначают его $x_{d\infty}$.

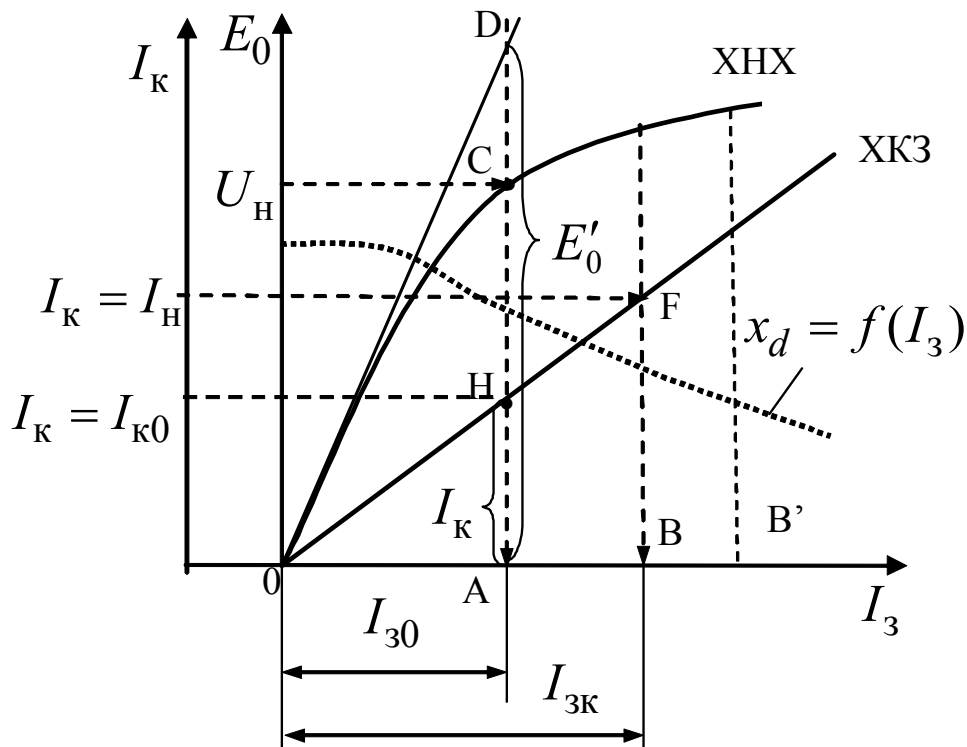


Рис. 12.5. Определение x_d

Если при U_H по ХХХ определить ток возбуждения I_{30} (рис 12.5), то при ненасыщенной магнитной системе (что имеет место в режиме КЗ) ЭДС E'_0 ,

соответствующая току I_{30} , определяется по спрямленной части характеристики XX. Искомая ЭДС E'_0 равняется отрезку \overline{AD} .

При этом же значении тока возбуждения I_{30} по характеристике КЗ определяют ток КЗ I_K . Он равняется отрезку \overline{AH} .

Ненасыщенное значение синхронное индуктивного сопротивления

$$x_{d\infty} = \frac{E'_0}{I_K} = \frac{\overline{AD}}{\overline{AH}} \quad (12.5)$$

Если взять значение E_0 на криволинейной части XXX, то насыщенное значение $x_{d_{\text{нас}}}$ равняется

$$x_{d_{\text{нас}}} = \frac{\overline{AC}}{\overline{AH}}. \quad (12.6)$$

Сделаем преобразование выражения (40.6)

$$x_{d_{\text{нас}}} = \frac{\overline{AC}}{\overline{AH}} \cdot \frac{\overline{AD}}{\overline{AD}} = \frac{x_{d\infty}}{k_{\mu d}}, \quad (12.7)$$

где $k_{\mu d} = \frac{\overline{AD}}{\overline{AC}}$ – коэффициент насыщения магнитной цепи.

При нагрузке СМ магнитная система насыщена, поэтому для определения свойств СМ необходимо пользоваться насыщенным значением $x_{d_{\text{нас}}}$, которое можно определить, зная ненасыщенное значение $x_{d\infty}$ и коэффициент насыщения для заданного тока возбуждения.

Величину синхронного индуктивного сопротивления обычно выражают в относительных единицах

$$x_d^* = \frac{x_d}{z_{\sigma}} = \frac{x_d \cdot I_H}{U_H} = \frac{E_0 \cdot I_H}{U_H \cdot I_K} = \frac{E_0^*}{I_K^*}, \quad (12.8)$$

где $E_0^* = \frac{E_0}{U_H}$, $I_K^* = \frac{I_K}{I_H}$ – относительные значения ЭДС холостого хода и тока КЗ.

Зависимость $x_d = f(I_3)$ можно построить, если определить x_d для ряда значений тока возбуждения I_3 (точки $B, B' \dots$). При увеличении насыщения значения x_d уменьшается (рис. 12.5).

12.4. Отношение короткого замыкания

Самым важным показателем синхронной машины *есть отношение короткого замыкания (ОКЗ)* – отношение постоянного тока КЗ $I_{\text{кз}}$ к

номинальному току якоря при токе возбуждении холостого хода I_{30} , то есть при возбуждении, которое при номинальной частоте вращения машины и разомкнутой обмотке якоря дает на зажимах машины номинальное напряжение (рис. 12.5)

$$OKЗ = \frac{I_{к0}}{I_H}. \quad (12.9)$$

Зная величину $OKЗ$, можно определить значение установившегося тока КЗ при возбуждении I_{30} холостого хода

$$I_{к0} = BKЗ \cdot I_H. \quad (12.10)$$

Для турбогенераторов $OKЗ = 0,4 \dots 0,7$, для гидрогенераторов $OKЗ = 1,0 \dots 1,4$. Итак, установившийся ток КЗ в СМ сравнительно небольшой и даже может быть меньше номинального.

Подставивши значение $I_{к0} = \frac{U_H}{x_d}$ в выражение (11.9), получаем

$$OKЗ = \frac{U_H}{I_H \cdot x_d} = \frac{1}{x_d^*}. \quad (12.11)$$

$OKЗ$ тем более, чем меньшее относительное значение x_d^* и больше величина воздушного зазора δ между статором и ротором.

Из сходства треугольников ОАН и ОВF на рис. 12.5 получаем

$$OKЗ = \frac{I_{к0}}{I_H} = \frac{\overline{АН}}{\overline{BF}} = \frac{\overline{ОА}}{\overline{ОВ}} = \frac{I_{30}}{I_{зк}}. \quad (12.12)$$

$OKЗ$ – это также отношение тока возбуждения, которое соответствует номинальному напряжению при холостом ходе I_{30} , к току возбуждения, который соответствует номинальному току статора при трехфазном коротком замыкании $I_{зк}$.

Величина $OKЗ$ важная при эксплуатации СМ. Она показывает кратность установившегося тока КЗ и определяет значение мощности, которой можно нагрузить генератор (статическая стойкость машины).

Малое значение $OKЗ$ соответствует большим значениям x_d , которое определяет большое падение напряжения при нагрузке и снижение предельной мощности генератора при данном возбуждении.

Большое значение x_d означает, что воздушный зазор между статором и ротором мал и проведение основного магнитного потока не требует большой МДС возбуждения, которые, в свою очередь, определяет компактность размеров ротора. СМ оказывается дешевле.

При большом воздушном зазоре $OKЗ$ имеет большое значение, что требует увеличения числа витков обмотки возбуждения и размеров ротора. Это

удорожает машину, но свойства ее улучшаются: меньшее значение x_d , меньшее падение напряжения при нагрузке, выше максимальная мощность при данном возбуждении (выше коэффициент статической стойкости).

12.5. Нагрузочная характеристика

Нагрузочная характеристика представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения $U_1 = f(I_3)$ при постоянных значениях тока якоря $I_1 = const$, коэффициента мощности $\cos \varphi = const$ и частоты вращения $n = const$.

Практическое значение имеет индукционная нагрузочная характеристика (ИНХ):

$$U_1 = f(I_3) \text{ при } \cos \varphi = 0 \text{ для } I_1 = I_{1H} = const \text{ (рис. 12.6).}$$

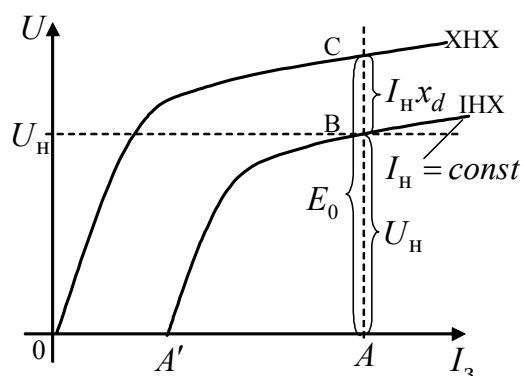


Рис. 12.6. Индукционная нагрузочная характеристика СГ

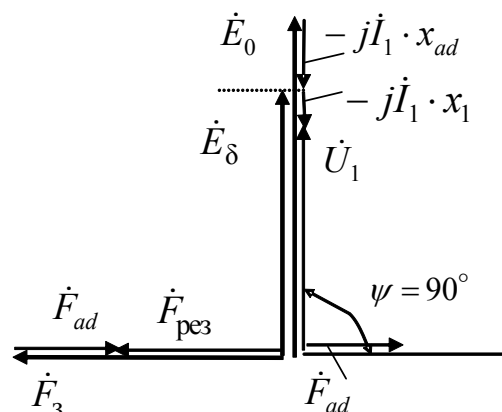


Рис. 12.7. Векторная диаграмма СГ при чисто индуктивной нагрузке $\psi = 90^\circ$

Нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики ХХ, потому что при одинаковых токах возбуждения напряжение на выходе генератора в режиме нагрузки меньше на величину падения напряжения $I_H \cdot x_d$.

Точка A' пересечения нагрузочной характеристики с осью абсцисс соответствует режиму трехфазного короткого замыкания при токе якоря, при котором снята ИНХ, то есть $I_k = I_H$ при $U_1 = 0$.

По характеристикам ХХ и индукционной нагрузочной (рис. 12.6) можно определить насыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления x_d .

По ИНХ при $U_1 = U_H$ определяют ток возбуждения $I_3 = \overline{OA}$. По характеристике ХХ этому току возбуждения соответствует ЭДС $E_0 = \overline{AC}$.

Согласно рис. 11.6

$$x_d = \frac{E_0 - U_H}{I_H} = \frac{\overline{AC} - \overline{AB}}{I_H} = \frac{\overline{BC}}{I_H}. \quad (11.13)$$

При снятии ИНХ в машине есть только продольная составляющая реакции якоря $F_{ad} = F_a \cdot \sin \psi$, потому что угол $\psi = 90^\circ$ и $F_{aq} = F_a \cdot \cos \psi = 0$.

Результирующая МДС

$$\dot{F}_{\text{рез}} = \dot{F}_z + \dot{F}_{ad}. \quad (12.14)$$

Уравнение напряжения при $r_1 = 0$:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{A}_{\sigma 1}, \quad \text{или} \quad (12.15)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 \cdot x_{ad} - j\dot{I}_1 \cdot x_1. \quad (12.16)$$

ЭДС E_δ , наведенная результирующим магнитным полем $F_{\text{рез}}$ (рис. 12.7)

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 \cdot x_{ad}. \quad (12.17)$$

Векторная диаграмма СГ при чисто индуктивной нагрузке представлена на рис. 12.7.

12.6. Опытное определение индуктивного сопротивления рассеяния

Индукционная нагрузочная характеристика вместе с ХХХ позволяют определить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря x_1 .

На рис. 12.8 показана векторная диаграмма СГ в режиме КЗ с учетом векторов МДС.

В режиме КЗ результирующая ЭДС, приведенная результирующим магнитным полем $F_{\text{рез}}$, равняется ЭДС рассеяние

$$\dot{E}_\delta = -j\dot{I}_1 \cdot x_1. \quad (11.18)$$

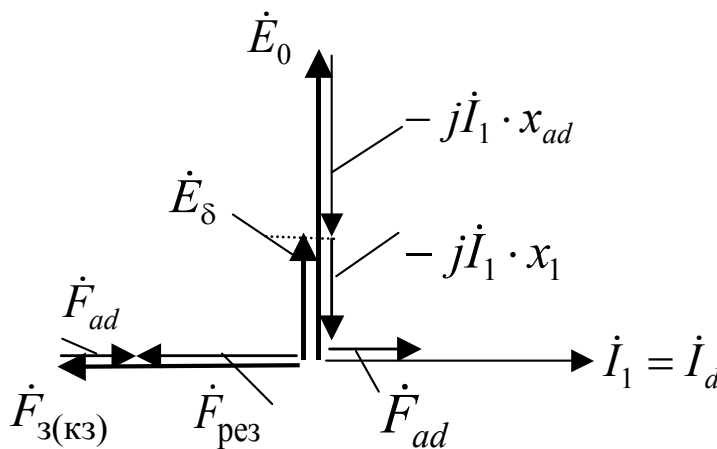


Рис. 12.8.
Векторная
диаграмма СГ
в режиме КЗ

МДС возбуждение в режиме трехфазного короткого замыкания $F_{з(кз)}$ идет частично на компенсацию МДС реакции якоря F_{ad} , а частично на

образование МДС рассеяние F_{δ} . Причем $F_{\delta} = F_{рез}$. Из векторной диаграммы на рис. 12.8 вытекает, что алгебраическая сумма МДС

$$F_{3(кз)} = F_{ad} + F_{рез}. \quad (12.19)$$

Отрезок OA от точки на ХХХ до точки на ИНХ (рис. 12.9) определяет МДС возбуждения $F_{3(кз)}$ в масштабе тока возбуждения

$$\overline{OA} \equiv F_{3(кз)}.$$

Отрезок BA определяет в масштабе тока возбуждения МДС продольной реакции якоря $\overline{BA} \equiv F_{ad}$. Тогда $\overline{OB} \equiv F_{\delta}$, а $\overline{BC} = E_{\delta}$.

Зная МДС F_{δ} , за ХХХ можно определить ЭДС E_{δ} .

Треугольник ABC на рис. 12.9 называют характеристическим.

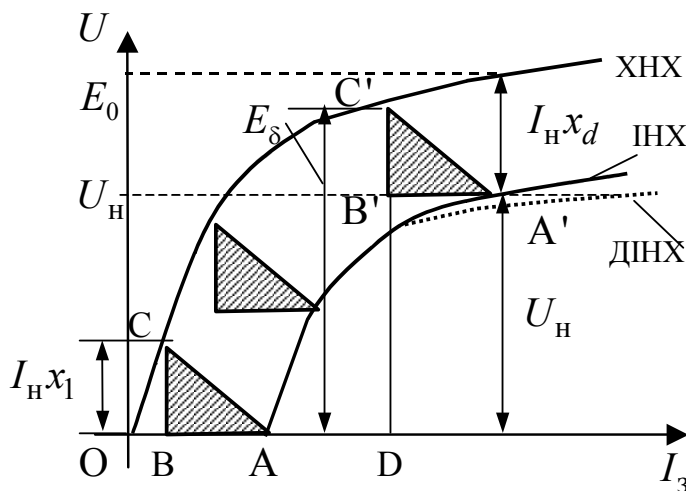


Рис. 12.9.
Построение
ИНХ с
помощью
характеристического
треугольника

Горизонтальный катет BA представляет МДС продольной реакции якоря в масштабе тока возбуждения, а вертикальный катет BC – ЭДС, необходимую для компенсации падения напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния $I_n \cdot x_1$ при номинальном токе $I_1 = I_n$.

Для любой другой точки ИНХ составляющая тока возбуждения, которая компенсирует действие размагничивающей продольной реакции якоря, остается неизменной, потому что $I_n = const$ и $I_n \cdot x_1 = const$.

Итак, ИНХ можно построить, если перемещать характеристический треугольник ABC так, чтобы вершина C шла по ХХХ (рис. 12.9). Точка A при этом опишет ИНХ. При номинальном напряжении характеристический треугольник займет положение $A'B'C'$ и результирующая ЭДС E_{δ} будет

$$E_{\delta} = U_n + I_n \cdot x_1, \quad (12.20)$$

то есть равняться ординате точки C' : $E_{\delta} = \overline{C'D}$.

Отрезок $\overline{B'C'} = I_n \cdot x_1$. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря

$$x_1 = \overline{B'C'} / I_n. \quad (12.21)$$

Опытная индукционная погрузочная характеристика (ОИНХ) не совпадает с расчетной ИНХ, построенной с помощью характеристического треугольника, а проходит ниже (пунктирная линия на рис. 12.9). Расхождение между опытной и расчетной характеристиками возникает из-за неточного учета потока рассеяния обмотки возбуждения при нагрузке, который вызывает повышение насыщения магнитной системы ротора.

12.7 Практический метод определения сопротивления x_1

По опытным характеристикам ХХ и ИНХ можно определить стороны характеристического треугольника. С этой целью при $U = U_H$ проводят прямую, параллельную оси абсцисс, и от точки A' на этой прямой откладывают отрезок $\overline{A'O'} = \overline{AO}$ (рис. 12.10).

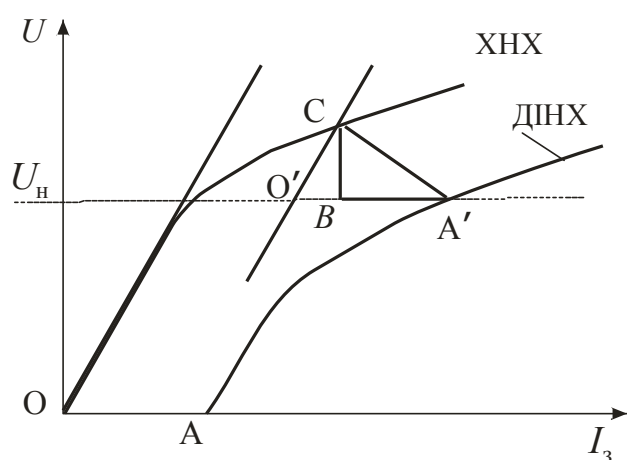


Рис. 12.10..
Определение
индуктивного
Сопротивления
Потье

Индуктивное сопротивление, найденное по такой методике, называют индуктивным сопротивлением Потье

$$x_{1p} = \frac{\overline{BC}}{I_H}. \quad (12.22)$$

Это сопротивление немного превышает действительное индуктивное сопротивление x_1 , обусловленное потоками рассеяния обмотки якоря,

$$x_{1p} = (1,05 \div 1,3) \cdot x_1. \quad (12.23)$$

Меньшие значения соответствуют неявнополусным генераторам.

Из выражения (12.23) находят значение x_1

$$x_1 = x_{1p} / (1,05 \div 1,1). \quad (12.24)$$

Расхождение x_1 и x_{1p} объясняется расхождением опытной и расчетной индукционных погрузочных характеристик.

12.9. Внешние характеристики

Внешняя характеристика СГ – это зависимость напряжения генератора от тока нагрузки

$$U_1 = f(I_1), \text{ при } I_3 = \text{const}, n = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}.$$

Напряжение на выходе генератора не остается постоянным с изменением нагрузки. Это происходит вследствие падения напряжения на сопротивлениях обмотки якоря $I_1 \cdot r_1$, $I_1 \cdot x_1$ и влияния реакции якоря.

Внешние характеристики могут быть изображены для случая постепенного увеличения нагрузки или для случая постепенного снятия нагрузки. На рис. 12.11 изображенные внешние характеристики для трех значений $\cos \varphi$.

Для всех характеристик исходной точкой была точка, соответствующая номинальному напряжению при номинальном токе якоря. Ток возбуждения, соответствующий этой точке, в дальнейшем при изменении тока якоря поддерживается неизменным.

При активно-индуктивной нагрузке ток якоря отстает от напряжения и реакция якоря имеет продольно размагничивающую составляющую.

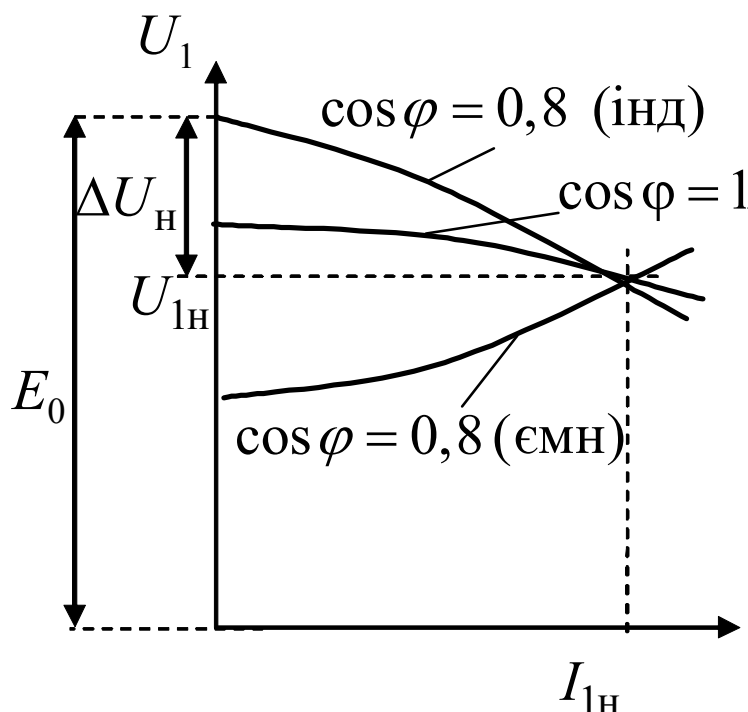


Рис. 12.11.
Внешние
характеристики
СГ

При уменьшении нагрузки напряжение U_1 увеличивается, потому что при уменьшении тока якоря уменьшается продольно размагничивающая составляющая реакции якоря

$$F_{ad} \equiv I_1 \cdot \sin \psi.$$

При активной нагрузке ($\cos \varphi = 1$) также имеет место составляющая продольно размагничивающей реакции якоря, но угол ψ меньше, чем в предыдущем случае. Поэтому увеличение напряжения с уменьшением тока нагрузка меньше.

В случае активно-емкостного нагрузки СГ ток якоря опережающий и реакция якоря носит продольно намагничивающий характер. Поэтому при уменьшении тока якоря уменьшается действие продольной намагничивающей

реакции якоря, что приводит к уменьшению напряжения на зажимах генератора.

Изменение напряжения при сбросе нагрузки при $I_3 = I_{3Н} = const$ и $n_1 = const$ определяют по выражению

$$\Delta U_H = \frac{E_0 - U_{1Н}}{U_{1Н}} \cdot 100 \%. \quad (12.25)$$

12.9. Регулировочные характеристики

Регулировочные характеристики – это зависимости $I_3 = f(I_1)$ при $U_1 = U_{1Н} = const$, $n_1 = const$, $\cos \varphi = const$.

Регулировочные характеристики показывают, как надо регулировать ток возбуждения СГ, чтобы при изменении нагрузки напряжение на зажимах генератора не менялась.

Вид регулировочных характеристик (рис. 12.12) объясняется характером действия реакции якоря.

Самое большое увеличение тока возбуждения необходимо при чисто индуктивной нагрузке, чтобы компенсировать продольно размагничивающую реакцию якоря.

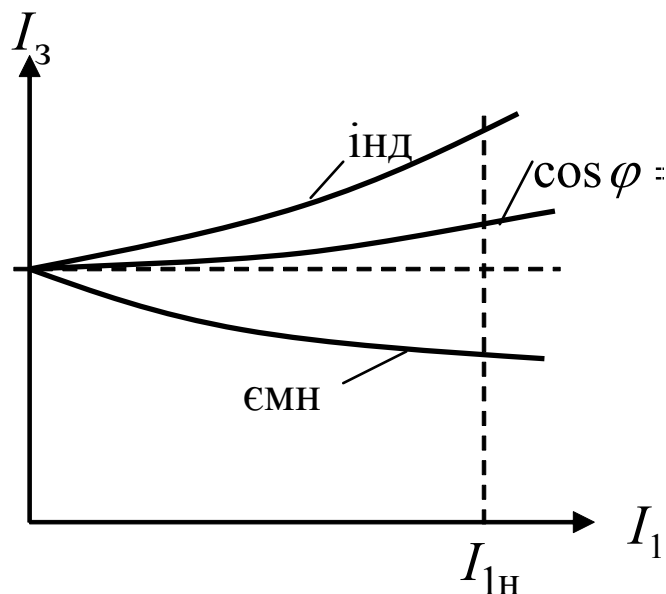


Рис. 12.12. Регулировочные характеристики СГ

При чисто емкостной нагрузке с ростом тока якоря увеличивается действие продольной намагничивающей реакции якоря, что приводит к необходимости уменьшения тока возбуждения СГ.

12.11.. Энергетическая диаграмма синхронного генератора

Преобразование энергии в СГ можно проиллюстрировать энергетической диаграммой, приведенной на рис. 12.13.

К валу СГ от первичного двигателя подводится механическая мощность

$$P_1 = M_1 \cdot \Omega, \quad (12.26)$$

где M_1 – момент первичного двигателя;

Ω – угловая частота обращения ротора СГ.

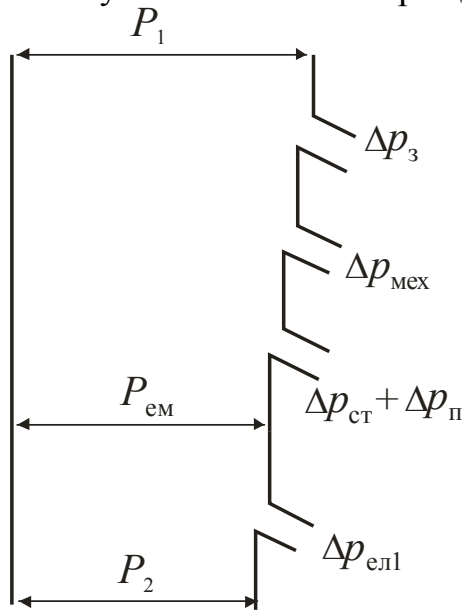


Рис. 12.13. Энергетическая диаграмма СГ

Часть этой мощности тратится на механические потери $\Delta p_{\text{мех}}$, то есть потери на трение в подшипниках, трение об воздух, трение щеток об контактные кольца

$$\Delta p_{\text{мех}} = 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{\vartheta_2}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{10^3 \cdot l_1}, \quad (12.27)$$

где l_1 – конструктивная длина сердечника статора, м,

ϑ_2 – линейная скорость на поверхности полюсного наконечника ротора, м/с

$$\vartheta_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta) \cdot n_1}{60}, \quad (12.28)$$

Потери в стали статора

$$\Delta p_{\text{ст}} = \Delta p_{\text{Г}} + \Delta p_{\text{вс}}, \quad (12.29)$$

где $\Delta p_{\text{Г}}$ – потери на циклическое перемагничивание стали (гистерезис)

$$\Delta p_{\text{Г}} = \kappa_{\text{Г}} \cdot \frac{f}{100} \cdot B^2, \quad (12.30)$$

$\kappa_{\text{Г}}$ – коэффициент, зависящий от марки стали: $\kappa_{\text{Г}} = 3,2 \dots 4,4$,

$\Delta p_{\text{вс}}$ – потери на вихревые токи

$$\Delta p_{\text{вс}} = \kappa_{\text{в}} \cdot \left(\frac{f}{100} \cdot B\right)^2 \cdot G_{\text{ст}}, \quad (12.31)$$

$\kappa_{\text{в}} = 1 \div 1,25$ – коэффициент, зависящий от толщины листов стали и ее качества.

Дополнительные потери в стали $\Delta p_{\text{п}}$, вызванные пульсацией поля вследствие зубчатой поверхности статора и ротора,

$$\Delta p_{\text{п}} = \kappa_{\text{п}} \cdot p \cdot b_{\text{п}} \cdot l_1 \left(\frac{Z_1 \cdot m}{10000}\right)^{1,5} \cdot [B_{\delta} \cdot t_1 \cdot (\kappa_{\delta} - 1)]^2 \cdot 10^{-6}, \quad (12.32)$$

где коэффициент $\kappa_{\text{п}}$ зависит от толщины листов полюса ротора

Толщина листа, мм	1,0	2,0	массивные
$\kappa_{\text{п}}$	4,6	8,6	23,3

$b_{\text{п}}$ – ширина полюсного наконечника, мм; Z_1 – число пазов статора;

κ_{δ} – коэффициент воздушного зазора; t_1 – зубцовое деление статора, мм.

B_{δ} – индукция в воздушном зазоре, Тл;

Потери на возбуждение при питании от отдельного возбудительного устройства

$$\Delta p_3 = I_3^2 \cdot r_3 + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_3, \quad (12.33)$$

где r_3 – сопротивление обмотки возбуждения при рабочей температуре,

$\Delta U_{\text{щ}} = 2B$ – падение напряжения в щеточном контакте.

Потери на возбуждение при возбуждении от ГПТ (возбудителя), расположенного на одном вале,

$$\Delta p_3 = \frac{I_3^2 \cdot r_{\text{оз}} + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{н}}}{\eta_3}, \quad (12.34)$$

$\eta_3 = 0,8 \dots 0,85$ – КПД возбудителя.

Механические, магнитные и потери на возбуждение относятся к потерям холостого хода

$$P_0 = \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{п}} + \Delta p_3. \quad (12.35)$$

Дополнительные потери при нагрузке

$$\Delta p_{\text{дод}} = 0,005 P_1. \quad (12.36)$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{ем}} = m \cdot E_0 \cdot I_1 \cdot \cos \psi. \quad (12.37)$$

Часть электромагнитной мощности тратится на электрические потери в обмотке якоря

$$\Delta p_{\text{ел1}} = m \cdot I_{1\text{н}}^2 \cdot r_1. \quad (12.38)$$

Мощность P_2 , которая осталась, отдается генератором в сеть

$$P_2 = P_1 - \Sigma \Delta p, \quad (12.39)$$

где суммарные потери

$$\Sigma \Delta p = \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_{\text{п}} + \Delta p_3 + \Delta p_{\text{дод}} + \Delta p_{\text{ел1}}. \quad (12.40)$$

Мощность $P_{2\text{н}}$ – полезная номинальная мощностью генератора

$$P_{2\text{н}} = m \cdot U_{1\text{н}} \cdot I_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_1. \quad (12.41)$$

Коэффициент полезного действия СГ

$$\begin{aligned} \eta_{\Gamma} &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma \Delta p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta p}{P_2 + \Sigma \Delta p} = \\ &= 1 - \frac{\Sigma \Delta p}{m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi + \Sigma \Delta p}. \end{aligned} \quad (12.42)$$

Зависимости $\eta = f(P_2)$ при $\cos\varphi = const$ приведенные на рис. 12.14.

КПД синхронного генератора зависит как от величины нагрузки, так и от ее характера, то есть от величины $\cos\varphi$.

С уменьшением $\cos\varphi$ при других неизменных параметрах КПД генератора уменьшается.

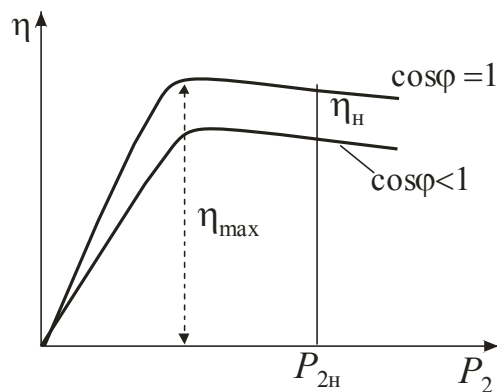


Рис. 12.14.
Зависимости
 $\eta = f(P_2)$

$\eta = 85 \div 95 \%$ — у машин средней мощности, $\eta = (96 \div 99)\%$ — у машин значительной мощности.

[содержание](#)

13. БАЛАНСИРОВКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Неуравновешенность ротора - состояние ротора, характеризующееся таким распределением масс, которое во время вращения вызывает переменные нагрузки на опорах ротора и его изгиб.

Статическая неуравновешенность ротора - неуравновешенность ротора, при которой ось ротора и его главная центральная ось инерции параллельны.

Моментная неуравновешенность ротора – неуравновешенность, при которой ось ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются в центре масс ротора.

Динамическая неуравновешенность ротора - неуравновешенность ротора, при которой ось ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются не в центре масс или перекрещиваются. Динамическая неуравновешенность состоит из статической и моментной неуравновешенностей.

Эксцентриситет массы - радиус-вектор центра рассматриваемой массы относительно оси ротора.

Точечная неуравновешенная масса - Условная точечная масса с заданным эксцентриситетом, вызывающая во время вращения ротора переменные нагрузки на опорах и его изгиб.

13.1. Статическая балансировка

Дисбаланс

Если представить, что вся масса ротора вместе с рабочим колесом сосредоточена в одной точке - центре масс (центре тяжести), но из-за неточности изготовления и неравномерности плотности материала (особенно для чугунных отливок) эта точка смещена на некоторое расстояние от оси вращения (Рис. 13.1).

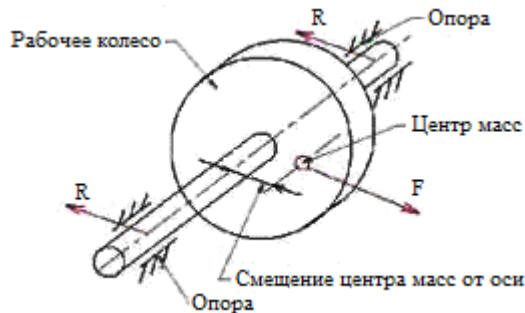


Рис. 13.1

При работе агрегата возникают силы инерции $-F$, действующие на смещенный центр масс, пропорциональные массе ротора, смещению и квадрату угловой скорости. Они-то и создают переменные нагрузки на опоры R , прогиб ротора и вибрации, приводящие к преждевременному выходу агрегата из строя. Величина равная произведению расстояния от оси до центра масс на массу самого ротора - называется статическим дисбалансом и имеет размерность [$г \cdot см$].

Задачей статической балансировки является приведение центра масс ротора на ось вращения путем изменения распределения массы.

Существуют способы статической балансировки, динамической балансировки роторов на станках и в собственных подшипниках. Балансируют самые различные ротора от гироскопов и шлифовальных кругов, до роторов турбин и судовых коленчатых валов. Создано множество приспособлений, станков и приборов с применением новейших разработок в области приборостроения и электроники для балансировки разных агрегатов. Что касается агрегатов, работающих в теплоэнергетике, то нормативной документацией по насосам, дымососам и вентиляторам предъявляются требования по статической балансировке рабочих колес и динамической балансировке роторов. Для рабочих колес применима статическая балансировка, т. к. при превышении диаметром колеса его ширины более чем в пять раз, остальные составляющие (моментная и динамическая) малы, и ими можно пренебречь.

Чтобы сбалансировать колесо нужно решить три задачи:

- 1) найти то самое «нужное место» - направление, на котором расположен центр тяжести;
- 2) определить, сколько «заветных грамм» противовеса необходимо и на каком радиусе их расположить;
- 3) уравновесить дисбаланс корректировкой массы рабочего колеса.

Приспособления для статической балансировки

Найти место дисбаланса помогают приспособления для статической балансировки. Их возможно изготовить самостоятельно они просты и недороги. Рассмотрим некоторые конструкции.

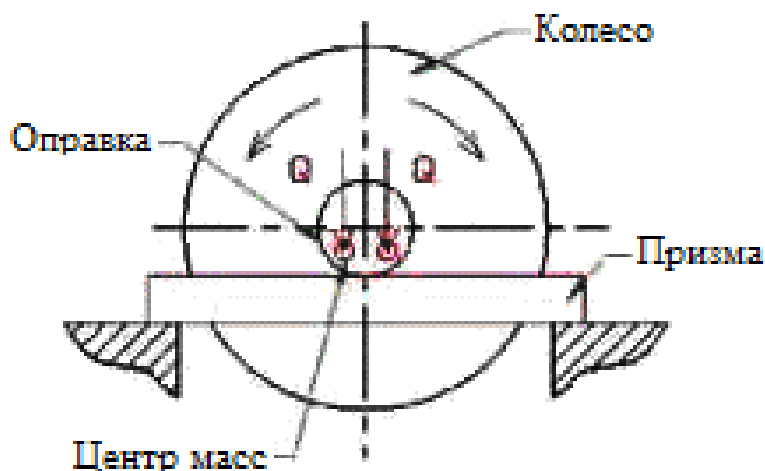


Рис. 13.2

Простейшим устройством для статической балансировки являются ножи или призмы (Рис. 13.2), установленные строго горизонтально и параллельно. Отклонение от горизонта в плоскостях параллельной и перпендикулярной оси колеса, не должно превышать $0,1$ мм на 1 м. Средством проверки может служить уровень «Геологоразведка 0,01» или уровень соответствующей точности. Колесо одевается на оправку, имеющую опорные шлифованные шейки (в качестве оправки, можно использовать вал, заранее проверив его точность). Параметры призм из условий прочности и жесткости для колеса массой 100 кг и диаметром шейки оправки $d = 80$ мм составят: рабочая длина $L = p \cdot d = 250$ мм; ширина около 5 мм; высота ($50 \dots 70$) мм.

Шейки оправки и рабочие поверхности призм должны быть шлифованными для снижения трения. Призмы необходимо зафиксировать на жестком основании.

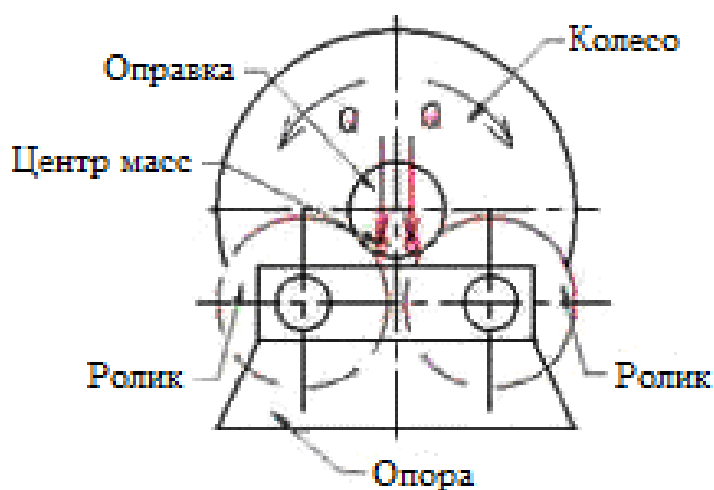


Рис. 13.3

Если дать колесу возможность свободно перекачиваться по ножам, то после остановки центр масс колеса займет положение не совпадающее с

нижней точкой, из-за трения качения. При вращении колеса в противоположную сторону, после остановки оно займет другое положение. Среднее положение нижней точки соответствует истинному положению центра масс устройства (Рис. 13.3) для статической балансировки. Они не требуют точной горизонтальной установки как ножи и на диски (ролики) можно устанавливать ротора с разными диаметрами цапф. Точность определения центра масс меньше из-за дополнительного трения в подшипниках качения роликов.

Применяются устройства для статической балансировки роторов в собственных подшипниках. Для снижения трения в них, которое определяет точность балансировки, применяют вибрацию основания или вращение наружных колец опорных подшипников в разные стороны.

Балансировочные весы.

Самым точным и в то же время сложным устройством статической балансировки являются балансировочные весы .

Конструкция весов для рабочих колес приведена на рис. 13.4. Колесо устанавливают на оправку по оси шарнира, который может качаться в одной плоскости. При повороте колеса вокруг оси, в различных положениях его уравнивают противовесом, по величине которого находят место и дисбаланс колеса.

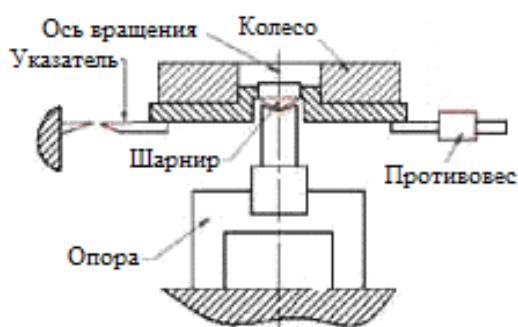


Рис. 13.4

Методы балансировки

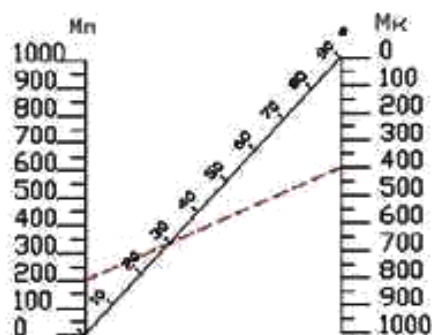


Рис. 13.5

Величину дисбаланса или количество граммов корректирующей массы определяют следующими способами:

-методом подбора, когда установкой противовеса в точке противоположной центру масс добиваются равновесия колеса в любых положениях;

-методом пробной массы - M_{Π} , которую устанавливают под прямым углом к «тяжелой точке», при этом ротор совершит поворот на угол j .
Корректирующую массу вычисляют по формуле $M_{\text{к}} = M_{\Pi} \cdot \text{ctg}(j)$ или определяют по номограмме (Рис. 13.5): через точку, соответствующую пробной массе на шкале M_{Π} , и точку, соответствующую углу отклонения от вертикали j , проводят прямую, пересечение которой с осью $M_{\text{к}}$ дает величину корректирующей массы.

В качестве пробной массы можно использовать магниты или пластилин.

Метод кругового обхода

Самым подробным и наиболее точным, но и наиболее трудоемким является метод кругового обхода. Он применим и для тяжелых колес, где большое трение мешает точно определить место дисбаланса. Поверхность ротора делят на двенадцать или более равных частей и последовательно в каждой точке подбирают пробную массу M_{Π} , которая приводит ротор в движение. По полученным данным строят диаграмму (Рис. 13.6) зависимости M_{Π} от положения ротора. Максимум кривой соответствует «легкому» месту, куда необходимо установить корректирующую массу $M_{\text{к}} = (M_{\Pi \text{max}} + M_{\Pi \text{min}}) / 2$.

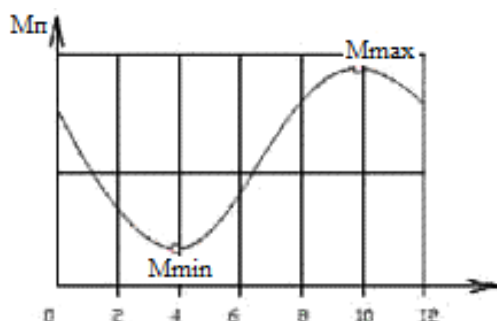


Рис.
13.6

Способы устранения дисбаланса

После определения места и величины дисбаланса его необходимо устранить. Для вентиляторов и дымососов дисбаланс компенсируется противовесом, который устанавливается на внешней стороне диска рабочего колеса. Чаще всего для крепления груза используют электросварку. Этот же эффект достигается снятием металла в «тяжелом» месте на рабочих колесах насосов (по требованиям ТУ допускается снятие металла на глубину не более 1 мм в секторе не более 180°). При этом корректировку дисбаланса стараются проводить на максимальном радиусе, т. к. с увеличением расстояния от оси, возрастает влияние массы корректируемого металла на равновесие колеса.

Остаточный дисбаланс

После балансировки рабочего колеса из-за погрешностей измерений и неточности устройств сохраняется смещение центра масс, которое называется остаточным статическим дисбалансом. Для рабочих колес вращающихся механизмов нормативная документация задает допустимый остаточный дисбаланс. Например, для колеса сетевого насоса 1Д1250 - 125 задается остаточный дисбаланс $175 \text{ г} \cdot \text{см}$ (ТУ 34 - 38 - 20289 - 85).

Сравнение методов балансировки на различных устройствах

Критерием сравнения точности балансировки может служить удельный остаточный дисбаланс. Он равен отношению остаточного дисбаланса к массе ротора (колеса) и измеряется в [мкм]. Удельные остаточные дисбалансы для различных методов статической и динамической балансировки сведены в таблицу 13.1.

Из всех устройств статической балансировки, весы дают самый точный результат, однако, это устройство самое сложное. Роликовое устройство, хотя и сложнее параллельных призм в изготовлении, но проще в эксплуатации и дает результат не многим хуже.

Основным недостатком статической балансировки является необходимость получения низкого коэффициента трения при больших нагрузках от веса рабочих колес. Повышение точности и эффективности балансировки можно достичь методами динамической балансировки роторов на станках и в собственных подшипниках.

Таблица 13.1

Устройство	Удельный остаточный дисбаланс, мкм
С призмами	10 .. 30
Роликовое двухдисковое	15 .. 25
Балансировочные весы	5 .. 10
Динамическая балансировка на станке	0,1 .. 1

Точная статическая балансировка - это **необходимая**, но иногда **не достаточная** основа надежной и долговечной работы агрегата.

[содержание](#)

13.2. Динамическая балансировка

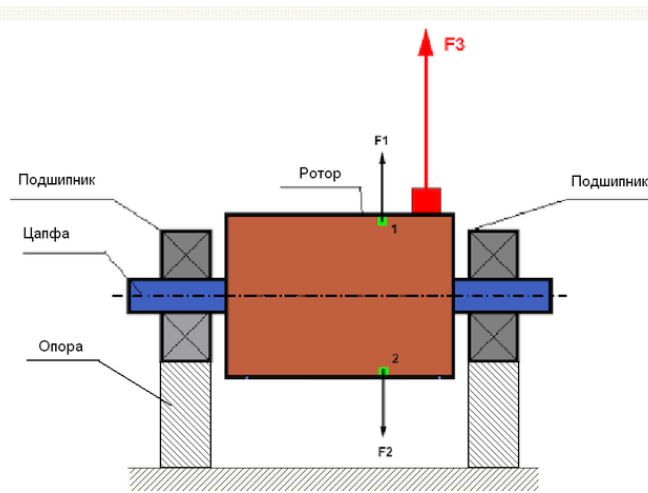


Рис.13.7. Ротор и действующие на него центробежные силы.

Ротор - это тело, которое вращается вокруг некоторой оси и удерживается своими несущими поверхностями в опорах. Несущие поверхности ротора передают нагрузки на опоры через подшипники качения или скольжения. Под несущими поверхностями подразумеваются поверхности цапф или поверхности их заменяющие.

Цапфа – часть вала или оси, на которой находится опора (подшипник). Цапфа, находящаяся на краю вала, называется шип, в средней части вала – шейка. Концевая цапфа, воспринимающая осевые нагрузки, – пята.

В идеально сбалансированном роторе его масса распределяется симметрично относительно оси вращения, т.е. любому элементу ротора можно поставить в соответствие другой элемент, расположенный симметрично относительно оси вращения. На каждый элемент ротора при вращении действует центробежная сила направленная в радиальном направлении (перпендикулярно к оси вращения ротора). В сбалансированном роторе центробежная сила, действующая на любой элемент ротора, уравнивается центробежной силой, действующей на симметричный элемент. Например на элементы 1 и 2 (на рис. 13.7 обозначены зеленым цветом) действуют центробежные силы F_1 и F_2 равные по величине и противоположные по направлению. Это верно для всех симметричных элементов ротора и таким образом суммарная центробежная сила, действующая на любой элемент ротора, уравнивается центробежной силой, действующей на симметричный элемент, и суммарная центробежная сила, действующая на ротор равна нулю и ротор является уравновешенным. Но если симметрия ротора нарушена (на рис.13.7 несимметричный элемент обозначен красным цветом), то на ротор начинает действовать неуравновешенная центробежная сила F_3 .

При вращении эта сила меняет направление вместе с поворотом ротора. Динамическая нагрузка, возникающая от действия этой силы передается на подшипники, что приводит к их ускоренному износу. Кроме того под действием этой переменной по направлению силы происходит циклическая деформация опор и фундамента, на котором закреплен ротор, то есть возникает вибрация. Для устранения дисбаланса ротора и сопутствующей ему вибрации

необходимо установить уравнивающие массы, которые восстановят симметрию ротора.

Балансировка роторов - это операция по устранению дисбаланса путем добавления уравнивающих масс.

Задачей балансировки является нахождение величины и места (угла) установки одной или нескольких уравнивающих масс.

Виды роторов и виды дисбаланса.

С учетом прочности материала ротора и величины действующих на него центробежных сил, роторы можно разделить на два вида - жесткие роторы и гибкие.

Жесткие роторы на рабочих режимах под действием центробежной силы деформируются незначительно и влиянием этой деформации в расчетах можно пренебречь.

Деформацией гибких роторов пренебречь уже нельзя. Деформация гибких роторов усложняет решение задачи балансировки и требует применения других математических моделей, по сравнению с задачей балансировки жестких роторов. Следует отметить, что один и тот же ротор на малых скоростях вращения может вести себя как жесткий, а при больших скоростях - как гибкий. В дальнейшем мы будем рассматривать только балансировку жестких роторов.

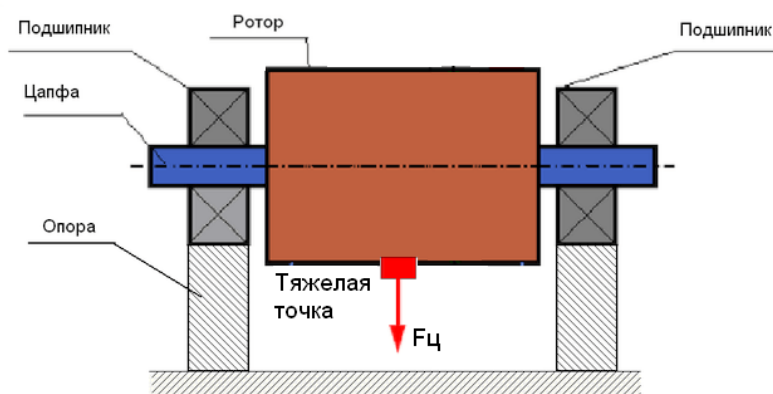


Рис. 13.8.
Статический дисбаланс ротора

В зависимости от распределения неуравновешенных масс по длине ротора можно выделить два вида дисбаланса - статический и динамический (моментный). Соответственно говорят о статической и динамической балансировке ротора.

Статический дисбаланс ротора проявляется без вращения ротора, то есть в статике, когда ротор под действием силы тяжести разворачивается "тяжелой точкой" вниз. Пример ротора со статическим дисбалансом приведен на рис. 13.8.

Под действием силы тяжести разворачивается "тяжелой точкой" вниз

Динамический дисбаланс проявляется только при вращении ротора.

Пример ротора с динамическим дисбалансом приведен на рис. 13.9.

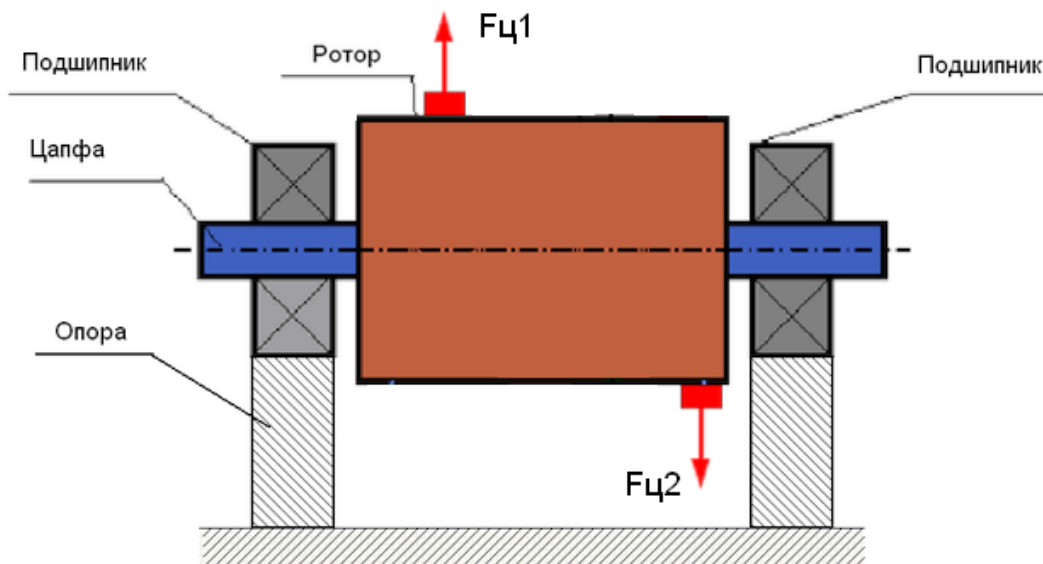


Рис. 13.9 Динамический дисбаланс ротора.
Силы $F_{ц1}$ и $F_{ц2}$ создают момент, стремящийся развернуть ротор.

В этом случае несбалансированные равные массы M_1 и M_2 находятся в разных плоскостях - в разных местах по длине ротора. В статическом положении, т.е. когда ротор не вращается на ротор воздействует только сила тяжести и массы уравнивают друг друга. В динамике при вращении ротора, на массы M_1 и M_2 начинают действовать центробежные силы $F_{ц1}$ и $F_{ц2}$. Эти силы равны по величине и противоположны по направлению. Однако, поскольку они приложены в разных местах вала по длине и не находятся на одной линии, эти силы не компенсируют друг друга. Силы $F_{ц1}$ и $F_{ц2}$ создают момент, приложенный к ротору. Поэтому такой дисбаланс еще называют моментным. Соответственно на подшипниковые опоры действуют нескомпенсированные центробежные силы, которые могут значительно превышать расчетные и уменьшать ресурс работы подшипников. Поскольку данный вид дисбаланса проявляется только в динамике при вращении ротора он называется динамическим. Его невозможно устранить в статике балансировкой "на ножах" или другими аналогичными способами. Для устранения динамического дисбаланса необходимо установить два компенсирующих груза, которые создадут момент равный по величине и противоположный по направлению моменту, возникающему от масс M_1 и M_2 . Компенсирующие массы не обязательно должны устанавливаться напротив масс M_1 и M_2 и быть равными им по величине. Главное, чтобы они создавали момент, полностью компенсирующий момент дисбаланса.

В общем случае массы M_1 и M_2 могут быть не равны друг другу, так что будет иметь место сочетание статического дисбаланса и динамического. Теоретически доказано, что для жесткого ротора для устранения его дисбаланса необходимо и достаточно установить два груза разнесенных по длине ротора.

Эти грузы будут компенсировать как момент, возникающий вследствие динамического дисбаланса, так и центробежную силу, возникающую вследствие несимметричности массы относительно оси ротора (статический дисбаланс).

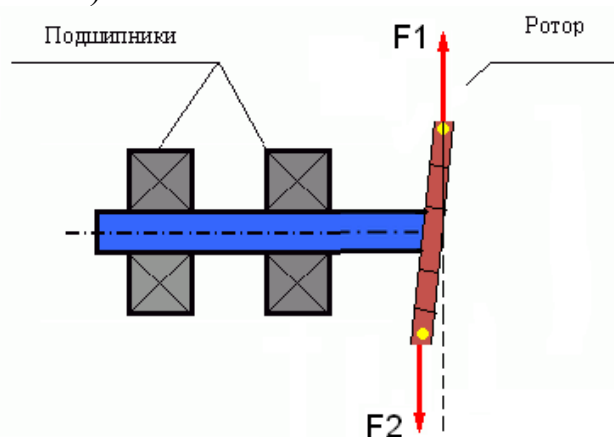


Рис.13.10
Динамический дисбаланс узкого ротора. Силы F_1 и F_2 не лежат на одной линии и не компенсируют друг друга.

Обычно динамический дисбаланс характерен для длинных роторов, типа валов, а статический - для узких. Однако, если узкий ротор установлен с перекосом относительно оси, или деформирован ("восьмерка"), то в этом случае будет возникать трудно устранимый динамический дисбаланс. (см. рис. 13.10), поскольку в этом случае сложно установить корректирующие грузы, создающие нужный компенсирующий момент.

Вибрация механизмов.

Вибрация - это реакция конструкции механизма на воздействие циклической возбуждающей силы. Эта сила может иметь разную природу.

- Центробежная сила, возникающая из-за неуравновешенности ротора - нескомпенсированная сила действующая на "тяжелую точку". Именно эта сила и вибрация ею вызванная устраняются балансировкой ротора.
- Силы взаимодействия, имеющие "геометрическую" природу и возникающие вследствие погрешностей изготовления и монтажа сопрягаемых деталей. Указанные силы могут, например, возникать вследствие некруглости шеек вала, погрешностей профилей зубьев в зубчатых передачах, волнистости беговых дорожек подшипников, расцентровки сопрягаемых валов и т.п. В случае некруглости шеек ось вала будет смещаться в зависимости от угла поворота вала. Хотя такая вибрация также проявляется на частоте вращения ротора, устранить ее балансировкой практически невозможно.
- Аэродинамические силы, возникающие при вращении рабочих колёс вентиляторов и других лопастных механизмов. Гидродинамические силы, возникающие при вращении рабочих колёс гидронасосов, турбин и т.п.
- Электромагнитные силы, возникающие при работе электрических машин в результате, например вследствие несимметричности обмоток ротора, наличия короткозамкнутых витков и. т.п. причин.

Величина вибрации (например её амплитуда A_B) зависит не только от величины возбуждающей силы F_B , действующей на механизм с круговой частотой ω , но и от жесткости k конструкции механизма, его массы m , а также коэффициента демпфирования C .

$$A_B = \frac{F_B}{\sqrt{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (C \cdot \omega)^2}}$$

Для измерения вибрации и балансиров механизмов могут использоваться датчики различных типов, в том числе:

- датчики абсолютной вибрации, предназначенные для измерения виброускорения (акселерометры) и датчики виброскорости;
- датчики относительной вибрации - вихретоковые или ёмкостные, предназначенные для измерения виброперемещения.

В некоторых случаях (когда это позволяет конструкция механизма) для оценки его вибронагруженности могут также использоваться датчики силы.

В частности они широко используются для измерения вибронагруженности опор дорезонансных балансировочных станков.

Вибрация - это реакция механизма на воздействие внешних сил. Величина вибрации зависит не только от величины силы, действующей на механизм, но и от жесткости конструкции механизма. Одна и та же по величине сила может приводить к разной вибрации. В механизмах с жесткой конструкцией опор, даже если вибрация и небольшая по величине, на подшипниковые узлы могут действовать значительные динамические нагрузки. Поэтому при балансировке механизмов с жесткими опорами применяют датчики силы, а не вибрации (виброакселерометры). Датчики вибрации применяют на механизмах с относительно податливыми опорами, когда действие неуравновешенных центробежных сил приводит к появлению заметной деформации опор и вибрации. Датчики силы применяют при жестких опорах, когда даже значительные силы, возникающие вследствие дисбаланса не приводят к появлению значительной вибрации.

Резонанс конструкции - фактор препятствующий проведению балансировки.

Жесткий (недеформируемый) ротор может быть в свою очередь установлен на жесткие или подвижные (податливые) опоры. Понятно, что и эта жесткость\подвижность опор является относительной в зависимости от скорости вращения ротора и величины возникающих центробежных сил. Условной границей является частота собственных колебаний опор\фундамента ротора. Для механических систем форма и частота собственных колебаний определяются массой и упругостью элементов механической системы. То есть частота собственных колебаний является внутренней характеристикой механической системы и не зависит от внешних сил. Будучи отклоненным от состояния равновесия, опоры за счет упругости стремятся вернуться в положение равновесия. Но вследствие инерции массивного ротора этот процесс носит характер затухающих колебаний. Эти колебания и являются собственными колебаниями системы ротор - опоры. Их частота зависит от соотношения массы ротора и упругости опор.

$$f_c = 1/(2\pi \cdot \sqrt{k/m})$$

Когда ротор начинает вращаться и частота его вращения приближается к частоте собственных колебаний, амплитуда вибрации резко возрастает, что может привести даже к разрушению конструкции.

Возникает явление механического резонанса. В области резонанса изменение скорости вращения на 100 об/мин может привести к увеличению вибрации в десятки раз. При этом (в области резонанса) фаза вибрации меняется на 180°.

Если конструкция механизма рассчитана неудачно, и рабочая частота вращения ротора близка к частоте собственных колебаний, то эксплуатация механизма становится невозможной из-за недопустимо высокой вибрации. Балансировка обычным способом тоже невозможна, так как даже при незначительном изменении скорости параметры вибрации резко меняются. Для балансировки в области резонанса применяются специальные методы, не рассматриваемые в данной статье. Определить частоту собственных колебаний механизма можно на выбеге (при выключении вращения ротора) или методом ударного воздействия с последующим спектральным анализом отклика системы на удар. В приборе «Балком 1» предусмотрена возможность определения собственных частот механических конструкций указанными методами.

Для механизмов, рабочая частота вращения которых лежит выше частоты резонанса, то есть работающих в зарезонансном режиме, опоры считаются подвижными и для измерения используются датчики вибрации, в основном виброакселерометры, измеряющие ускорение элементов конструкции. Для механизмов, работающих в дорезонансном режиме, опоры считаются жесткими. В этом случае применяют датчики силы.

Балансировочные приборы и балансировочные станки

Балансировка – это процесс совмещения главной центральной оси инерции с осью вращения ротора.

Указанный процесс может выполняться двумя методами.

Первый метод предусматривает обработку цапф ротора, которая выполняется таким образом, чтобы ось, проходящая через центры сечения цапф с главной центральной осью инерции ротора. Подобная методика редко применяется на практике и не будет подробно рассмотрен в данной статье. Второй (наиболее распространённый) метод предусматривает перемещение, установку или съём на роторе корректирующих масс, которые размещаются таким образом, чтобы ось инерции ротора максимально приблизилась к оси его вращения.

Перемещение, добавление или удаление корректирующих масс при балансировке может производиться с использованием различных технологических операций, в том числе: сверлением, фрезерованием, наплавкой, наваркой, завинчиванием или вывинчиванием винтов, выжиганием лучом лазера или электронным пучком, электролизом, электромагнитным наплавом и т.п.

Процесс балансировки может выполняться двумя способами:

- балансировкой роторов в сборе (в собственных подшипниках) при помощи балансировочных приборов;
- балансировкой роторов на балансировочных станках.

Для балансировки роторов в собственных подшипниках обычно используются специализированные балансировочные приборы (комплекты), позволяющую измерять вибрацию балансируемого ротора на частоте его вращения в векторной форме, т.е. измерять как амплитуду, так и фазу вибрации.

В настоящее время указанные приборы изготавливаются на базе микропроцессорной техники и (помимо измерения и анализа вибрации) обеспечивают автоматизированный расчет параметров корректирующих грузов, которые необходимо установить на роторе для компенсации его дисбаланса.

Эти приборы включают в себя:

- измерительно-вычислительный блок, выполненный на базе компьютера или промышленного контроллера;
- два (или более) датчика вибрации;
- датчик фазового угла;
- оснастку для установки датчиков на объекте;
- специализированное программное обеспечение, предназначенное для выполнения полного цикла измерения параметров вибрации ротора в одной, двух и более плоскостях коррекции.

Для балансировки роторов на балансировочных станках помимо специализированного балансировочного прибора (измерительной системы станка) требуется иметь «раскруточный механизм», предназначенный для установки ротора на опорах и обеспечения его вращения (раскрутки) на фиксированной частоте вращения.

В настоящее наиболее распространены балансировочные станки двух типов:

- станки зарезонансные (с податливыми опорами);
- станки дорезонансные (с жёсткими опорами).

Зарезонансные станки имеют относительно податливые опоры, выполненные, например, на базе плоских пружин.

Частота собственных колебаний этих опор обычно в 2-3 раза ниже частоты вращения балансируемого ротора, который на них устанавливается.

При измерениях вибрации опор зарезонансного станка обычно используются датчики вибрации (акселерометры, датчики виброскорости и т.п.).

В дорезонансных балансировочных станках используются относительно жёсткие опоры, собственные частоты колебаний которых должны быть в 2-3 раза выше частоты вращения балансируемого ротора.

Для измерения вибронегруженности опор дорезонансного станка обычно используются датчики силы.

Достоинством дорезонансных балансировочных станков является то, что балансировку на них можно проводить на относительно невысоких частотах вращения ротора (до 400 - 500 об/мин), что существенно упрощает конструкцию станка и его фундамента, а также повышает производительность и безопасность балансировки.

Методика балансировки жестких роторов

Балансировкой устраняются только вибрация, вызванная несимметричностью распределения массы ротора относительно его оси вращения.

Другие виды вибрации балансировкой не устраняются!

Балансировке подлежат технические исправные механизмы, конструкции которых обеспечивают отсутствие резонансов на рабочей частоте вращения, надежно закрепленные на фундаменте, установленных в исправные подшипники.

Основной задачей балансировки является нахождение массы и места установки компенсирующих грузов, на которые действуют уравновешивающие центробежные силы.

Как было сказано выше для жестких роторов в общем случае необходимо и достаточно установить два компенсирующих груза. При этом будет устранен как статический, так и динамический дисбаланс ротора. Общая схема измерения вибрации при проведении балансировки выглядит следующим образом.

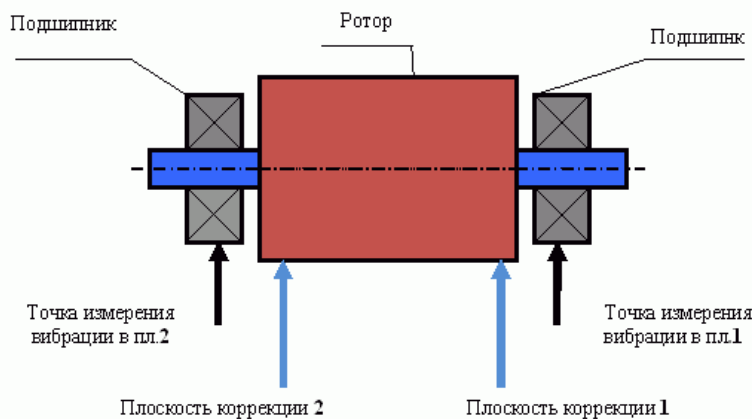


Рис 13.11
Выбор точек измерения
и мест установки грузов
(плоскостей
коррекции)
при
балансировке в
двух плоскостях

На подшипниковые опоры в точках 1 и 2 (рис. 13.12) устанавливаются датчики вибрации. На роторе закрепляется метка оборотов, обычно приклеивается светоотражающая лента. Метка оборотов используется лазерным тахометром для определения скорости вращения ротора и фазы вибросигнала.

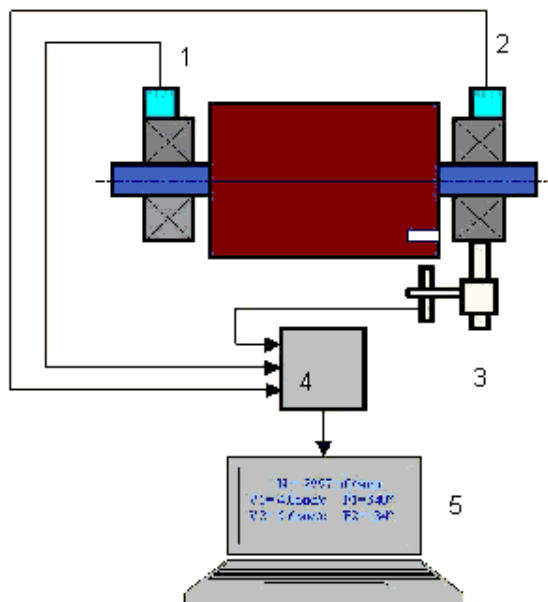


Рис. 13.12.
Установка датчиков при
балансировке в двух
плоскостях.
1,2 - датчики вибрации,
3 - отметчик,
4- измерительный блок,
5- ноутбук

В большинстве случаев динамическая балансировка проводится методом трех пусков. Метод основан на том, что на ротор последовательно в 1 и 2 плоскость устанавливаются пробные грузы известной массы и по результатам изменения параметров вибрации рассчитываются массы и место установки уравнивающих грузов.

Место установки груза называется плоскостью коррекции. Обычно плоскости коррекции выбираются в районе подшипниковых опор, на которые установлен ротор.

При первом пуске измеряется исходная вибрация. Затем на ротор ближе к одной из опор устанавливается пробный груз известной массы. Производится второй пуск и измеряются параметры вибрации, которые должны измениться вследствие установки пробного груза. Затем пробный груз в первой плоскости снимается и устанавливается во второй плоскости. Производится третий пуск и измеряются параметры вибрации. Пробный груз снимается и программа автоматически рассчитывает массы и место (углы) установки уравнивающих грузов. Смысл установки пробных грузов заключается в том, чтобы определить как система реагирует на изменение дисбаланса. Массы и место установки пробных грузов известны, поэтому программа может рассчитать так называемые коэффициенты влияния, показывающие как внесение известного дисбаланса влияет на параметры вибрации. Коэффициенты влияния являются характеристиками самой механической системы и зависят от жесткости опор и массы (инерционности) системы ротор-опоры.

Как можно понять из рис. 13.7 центробежная сила действует в радиальном направлении, т.е. перпендикулярно оси ротора. Поэтому датчики вибрации надо устанавливать так, чтобы их ось чувствительности была направлена также была направлена в радиальном направлении. Обычно жесткость фундамента в горизонтальном направлении меньше, поэтому вибрация в горизонтальном направлении выше. Поэтому для повышения большей чувствительности датчики следует устанавливать так, чтобы их ось чувствительности также была направлена горизонтально. Хотя принципиальной разницы нет. Помимо вибрации в радиальном направлении необходимо контролировать вибрацию в осевом направлении, вдоль оси

вращения ротора. Эта вибрация обычно вызывается не дисбалансом, а другими причинами, в основном связанными с несоосностями и перекосами валов, соединенных через муфту. Эта вибрация балансировкой не устраняется, в этом случае требуется проводить центровку. На практике обычно в таких механизмах присутствует и дисбаланс ротора и несоосность валов, что значительно усложняет задачу устранения вибрации. В таких случаях сначала необходимо провести центровку, а затем уже балансировку механизма.

Критерии оценки качества балансировки механизмов.

Качество балансировки роторов (механизмов) может оцениваться двумя способами. Первый способ предусматривает сравнение величины остаточного дисбаланса, определённого при выполнении балансировки, с допуском на остаточный дисбаланс. Указанные допуски для различных классов роторов установлены в ГОСТ ИСО 1940-1-2007. «Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса». Однако выполнение указанных допусков не может полностью гарантировать эксплуатационную надёжность механизма, связанную с достижением минимального уровня его вибрации. Это объясняется тем, что величина вибрации механизма определяется не только величиной силы, связанной с остаточной неуравновешенностью его ротора, но также зависит ещё от ряда других параметров, в том числе: от жесткости k элементов конструкции механизма, его массы m , коэффициента демпфирования, а также частоты вращения.

Поэтому для оценки динамических качеств механизма (в том числе качества его сбалансированности) в ряде случаев рекомендуется оценивать уровень остаточной вибрации механизма, который регламентируется рядом стандартов.

Сведения о балансировке.

Единицы измерения дисбалансов и основные понятия технологии балансировки определяются в ГОСТ 19534-74 "Балансировка вращающихся тел. Термины".

Дисбалансом называют векторную величину, равную произведению неуравновешенной массы на ее расстояние до оси ротора e (эксцентриситет). Роторы бывают следующих видов

- Межопорный ротор – двухопорный ротор, существенная часть массы которого расположена между опорами (рис. 13.13).
- Консольный ротор – ротор, существенная часть массы которого расположена за одной из крайних опор (рис. 13.14).
- Двухконсольный ротор – ротор, существенная часть массы которого расположена за крайними опорами (рис. 13.15).

Для того, чтобы ротор был уравновешен, необходимо и достаточно, чтобы ось вращения ротора проходила через его центр масс ($e_{CT} = 0$). (статическая уравновешенность) и чтобы ось вращения ротора совпадала с

одной из его главных осей инерции, т. е. чтобы были равны нулю его центробежные моменты инерции (моментная уравновешенность).

Статическая уравновешенность + моментная уравновешенность = динамическая уравновешенность

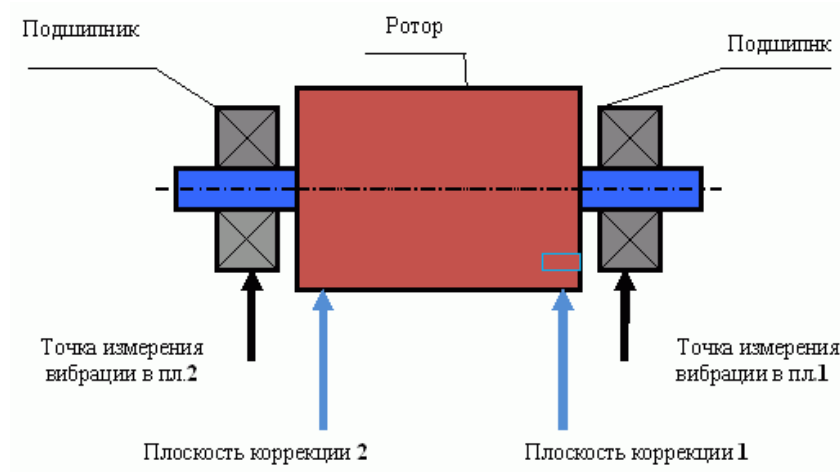


Рис.13.13.
Межопорный ротор

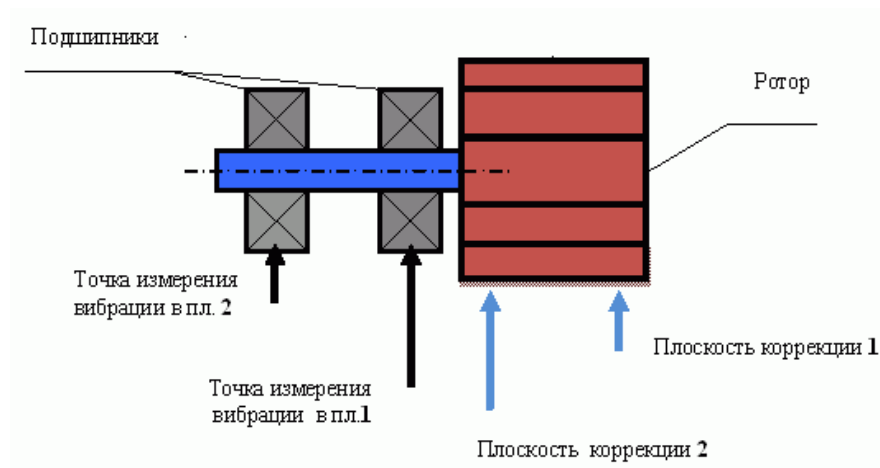


Рис.13.14.
Консольный ротор

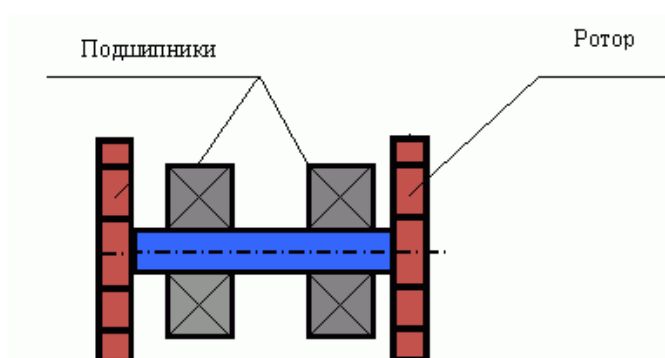


Рис. 13.15.
Двухконсольный ротор

Неуравновешенность—это состояние ротора, характеризующееся таким распределением масс, которое во время вращения вызывает переменные нагрузки на опорах ротора и его изгиб. Мерой неуравновешенности считают *дисбаланс D*.

Для сопоставления роторов различных масс вводят *удельный дисбаланс*, численно равный

$$e_{\text{ст}} = D/m_p .$$

где D - дисбаланс, m_p - масса ротора.

Таким образом дисбаланс D измеряют в $г \cdot мм$ (неуравновешенная масса \cdot радиус), а удельный дисбаланс измеряют в микронах - $г \cdot мм / кг = мм / 1000 = мкм$.

Единицей дисбаланса являются грамм-миллиметр ($г \cdot мм$) и градус (\dots°), служащие для измерения соответственно значения дисбаланса и угла дисбаланса. Отношение модуля главного вектора дисбалансов к массе ротора характеризует удельный дисбаланс [$(г \cdot мм) / кг = мкм$].

Все дисбалансы ротора приводятся к двум векторам - главному вектору $D_{\text{ст}}$ и главному моменту M_d дисбалансов независимо от причин, вызвавших смещение центра масс с оси вращения: погрешностей получения заготовки, погрешностей механосборочного производства или изменения условий эксплуатации.

Главный вектор дисбалансов $D_{\text{ст}}$ проходит через центр масс и равен произведению массы неуравновешенного ротора на ее эксцентриситет e . Главный момент дисбалансов M_d равен геометрической сумме моментов всех дисбалансов ротора относительно его центра масс.

Главный момент дисбалансов перпендикулярен главной центральной оси инерции и оси ротора и вращается вместе с ротором (рис. 13.16).

Главный вектор дисбалансов в плоскостях опор может быть заменен его составляющими (симметричными дисбалансами). Главный момент дисбалансов в тех же плоскостях опор может быть заменен парой сил (кососимметричными дисбалансами).

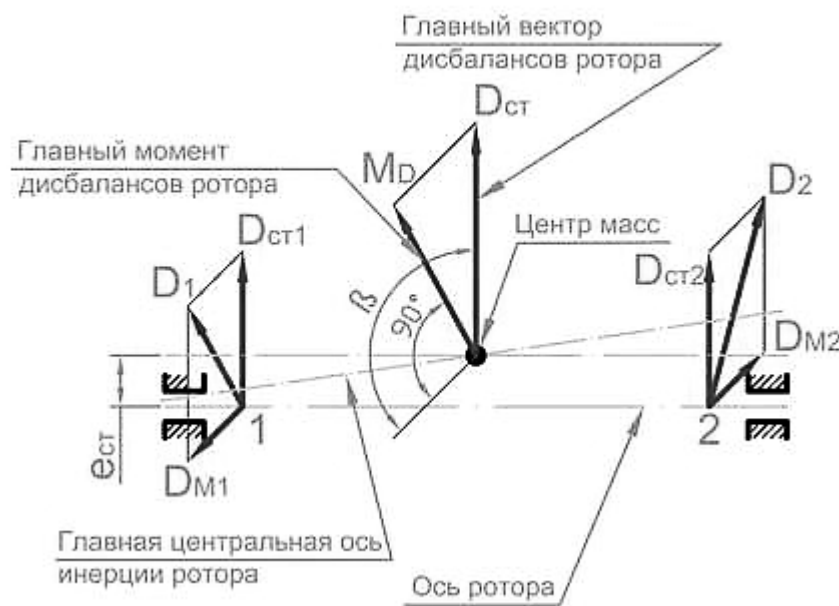


Рис.13.16.. Главный вектор и главный момент дисбаланса ротора.

Дисбаланс является векторной величиной и полностью определяется на роторе в выбранной плоскости углом дисбаланса, а также числовым значением дисбаланса $D_j = m_j \cdot e_j$, т. е. произведением неуравновешенной массы m_j на модуль ее эксцентриситета e_j относительно оси вращения. Эта плоскость может служить для задания дисбаланса (плоскость приведения дисбаланса), корректировки масс ротора (плоскость коррекции), измерения дисбаланса (плоскость измерения дисбаланса). Дисбалансы в различных двух плоскостях вдоль оси данного ротора различны, и их углы и значения могут быть найдены расчетом, а также с помощью балансировочного оборудования.

Балансировка заключается в определении значений и углов дисбалансов ротора и их уменьшения путем корректировки массы ротора.

Действие дисбалансов на ротор можно снижать или устранять путем добавления, уменьшения или перемещения одной или более корректирующей массы, создающей дисбаланс такого же значения, что и у неуравновешенного ротора, но с углом дисбаланса 180° относительно дисбаланса ротора.

Способы устранения дисбалансов ротора.

Для уменьшения дисбалансов ротора используются так называемые корректирующие массы, которые могут удаляться из тела ротора или добавляться к нему. Корректирующую массу в противофазу дисбаланса ротора добавляют приваркой, клепкой, пайкой, привертыванием специальных элементов определенной массы и на определенном радиусе.

Различают дисбалансы начальный – до корректировки масс, остаточный — после корректировки масс, допустимый – приемлемый по условиям эксплуатации машин, удельный – отношение модуля главного вектора к массе ротора.

Различают балансировку статическую (силовую), моментную и динамическую (моментно-силовую).

При статической балансировке определяют и уменьшают главный вектор дисбалансов, т. е. центр масс ротора приводится на ось вращения размещением соответствующей корректирующей массы (масс).

При моментной балансировке определяют и уменьшают главный момент дисбалансов путем образования пары сил размещением корректирующих масс в двух плоскостях коррекции. При этом главная центральная ось инерции ротора в результате поворота совмещается с осью вращения.

При динамической балансировке определяют и уменьшают главный момент и главный вектор. Это достигается размещением корректирующих масс в двух (жесткие роторы) плоскостях коррекции или более (гибкие роторы). При этом главная центральная ось инерции смещается, поворачивается в пространстве и совмещается с осью вращения ротора.

Ротор может быть уравновешен за одну или несколько операций, состоящих из типовых шагов; выявление и определение значения и угла дисбалансов (измерительный), и корректировка (устранение) дисбалансов до заданных значений.

Балансировочные станки.

По характеру режима работы и конструктивному исполнению наиболее широко распространены балансировочные станки *дорезонансного* и *зарезонансного* типа.

У дорезонансного балансировочного станка (рис. 13.17) частота вращения ниже собственной частоты колебаний системы, состоящей из балансируемого ротора и части массы станка, участвующей в колебаниях.



Рис.13.17.
Балансировочный станок дорезонансного типа ТБ-500 позволяет балансировать роторы весом до 500 кг и максимальным расстоянием между шейками до 2000 мм

В зарезонансном балансировочном станке частота вращения ротора при балансировке значительно выше наибольшей собственной частоты колебаний роторной системы..

Структура измерительного устройства и форма информации о неуравновешенности зависят от назначения балансировочного станка. В современных балансировочных станках применяют микропроцессорные измерительно-вычислительные устройства, позволяющие производить измерения одновременно на всех опорах, автоматически вводить данные измерений в вычислитель, который по заданной программе вычисляет места (угол) и массу корректирующих грузов.

Балансировочные станки разделяют на четыре типа: универсальные, определенного назначения, специальные и балансировочные комплекты.

Универсальные балансировочные станки используют в серийном производстве для определения дисбалансов роторов различных конструкций. К этому типу относятся зарезонансные и дорезонансные станки с осевым или ленточным приводом, обладающие высокой точностью и быстрой переналадкой на новый тип роторов. На них можно балансировать роторы, отличающиеся по массе, длине и диаметру в 11...40 раз. Универсальные балансировочные станки характеризуются допустимой массой и диаметром ротора, расстоянием между опорами станка, диапазоном частот вращения ротора, мощностью привода и точностью станка. Минимально допустимая масса ротора — масса балансируемого ротора, при которой обеспечивается заданная точность станка. Максимально допустимая масса ограничена прочностью подвески опор. В нее входит масса ротора, его подшипников и

корпуса, оснастки, т.е. вся масса, устанавливаемая на опоры станка. Допустимый диаметр ротора зависит от расстояния от центров опор до станины (пола) станка. Максимальное расстояние между опорами станка ограничено длиной направляющих станины, а минимальное — толщиной стоек.

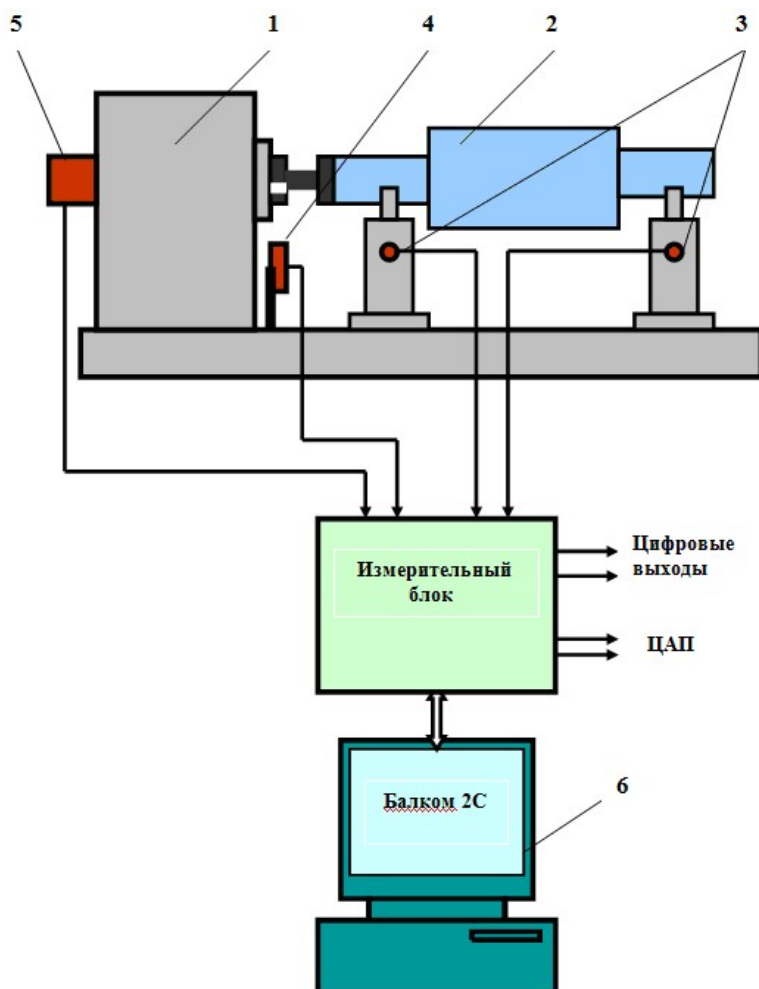


Рис.13.18

- Измерительная система “Балком 2С” в составе балансировочного станка:
1. Балансировочный станок;
 2. Балансируемый ротор;
 3. Датчики вибрации (2 шт.)
 4. Датчик фазового угла;
 5. Датчик угла поворота ротора;
 6. Компьютер

. Для балансировки роторов массой от нескольких граммов до десятков килограммов применяют резонансные станки с ленточным приводным соединением.

Балансировку роторов массой до 1000 кг выполняют на резонансных и дорезонансных станках как с осевым, так и с ленточным приводом с разнообразными измерительными устройствами. Универсальные балансировочные станки для роторов массой более 1000 кг изготавливают с осевым приводом. Опоры станков для тяжелых роторов делают дорезонансными.

[содержание](#)

Литература

1. Г.К Жерве Промышленные испытания электрических машин –Л.: Энергоатомиздат. 1984. –408 с.
2. О.Д. Гольдберг Испытания электрических машин –М.: Высшая школа, 2000. –252 с.
3. О.С Щукин Испытание электрических машин. Учебное пособие. –Омск, 2009. –134 с.
4. В.М. Лагутін, В.Ц. Зелінський, О.Б. Бурикін Випробування електричних машин і трансформаторів в електроенергетичних системах. Навчальних посібник – Вінниця: ВНТУ, 2011.. –116 с.
5. Е.М. Коварский, Ю.И. Янко Испытание электрических машин –М.: Энергоатомиздат. 1990. –320 с.
6. Интернет ресурсы: <http://electricalschool.info>; <http://radio-hobby.org>; <https://forca.com.ua>; <http://energo.ucoz.ua>;

Стандарты на испытание электрических машин

1. Гост 183-74 Машины электрические Общие технические условия
2. Гост 28173-89 Машины электрические. Номинальные данные
3. Гост 11828-86 Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний
4. ДСТУ 2331-93 Машини асинхронні. Вимоги безпеки та методи випробувань
5. Гост 53472-2009 Машины электрические асинхронные. Методы испытаний
6. Гост 25941-83 Машины электрические. Методы определения потерь и КПД
7. Гост 10159-79 Машины электрические коллекторные. Методы испытаний
9. Гост 10169-77 Машины электрические синхронные. Методы испытаний
9. Гост 2933-83 Аппараты электрические низковольтные. Методы испытаний
- 11.. ГОСТ 17187-81 Шумомеры. Общие технические требования и методы испытаний
11. ДСТУ_3346 Якість електричної енергії

[содержание](#)