

**ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. А. Р. Беруни**

УДК 621.314.58

На правах рукописи

МУРТАЗИН ЭМИЛЬ РУСТАМОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ И УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОН-
НЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ МОЩНОСТЬЮ 250 КВТ,
НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В И ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ 750 ОБ/МИН,
УСТАНОВЛЕННЫЙ НА НАСОСНОЙ СТАНЦИИ «УЧ ҚАҲРАМОН»
УРГУТСКОГО РАЙОНА, САМАРКАНДСКОЙ ОБЛАСТИ**

Специальность: 5А521301 - «Электромеханика»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание степени магистра «Электромеханик»

Работа рассмотрена и
допускается к защите.
Зав.кафедрой «ЭМ и КТ»
доц. А.Ш. Ахмедов

Научный руководитель
доц. Мустафакулова Г.Н.

«__» _____ 2013 г.

Ташкент – 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
ГЛАВА 1. ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ	15
1.1. Определение тока и потерь асинхронных двигателей.....	15
1.2. Поверхностные потери.....	19
1.3. Выбор математической модели для исследования асинхронного двигателя в режиме пуска (разгона).....	22
1.4. Выводы.....	27
ГЛАВА 2. Потери и КПД асинхронного электродвигателя.....	8
2.1. Потери энергии и кпд асинхронных двигателей	34
2.2. Способы пуска асинхронных двигателей.....	41
Выводы	50
ГЛАВА 3. ПУСКОВЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ МОЩНОСТЬЮ 250 КВТ, НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В И ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ 750 ОБ/МИН, УСТАНОВЛЕННЫЙ НА НАСОСНОЙ СТАНЦИИ «УЧ ҚАҲРАМОН» УРГУТСКОГО РАЙОНА, САМАРКАНДСКОЙ ОБЛАСТИ	
3.1 Основные положения параметрического регулирования напряжения статора асинхронного двигателя с критерием оптимальности по минимуму потерь в режиме пуска	
3.2. Расчет нагрузочного характеристика асинхронного электродвигателя питательного насоса	61

3.3. Расчет рабочего характеристика асинхронного электродвигателя питательного насоса	65
Выводы	72
Заключение	73
Список использованных литератур	75

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические потери энергии и вид регулирования

Потери энергии в технологическом процессе зависят от расхода сети (технологической нагрузки), определяемого потребителем, и потерь напора на оборудовании насосной станции которые определяются гидравлическим сопротивлением элементов схемы. Для организации технологического процесса с минимальными энергетическими потерями необходимо, в первую очередь, снизить потери напора между трубопроводом насосного агрегата и сетью потребителей.



Кроме того, в процессе функционирования в зависимости от режимов работы системы может меняться давление перед насосом, создаваемое источником водоснабжения. Измерение этого давления также отражается на величине давления в сети потребителей.

Такой характер взаимосвязи параметров требует установки в системе дроссельных регулирующих элементов - регулирующих клапанов (иногда их роль выполняют напорные задвижки агрегатов). Эти элементы создают дополнительное гидравлическое сопротивление и позволяют обеспечить стабильное давление в сетевом трубопроводе. При использовании дроссельных элементов происходит распределение напора на элементах системы.

<http://dizvi.ru/images/stories/055.jpg> На величину потерь при дроссельном регулировании влияет не только регулирующий элемент: чаще всего на этапе проектирования выбирается насосный агрегат с определённым запасом напора, а при замене насосных агрегатов новое оборудование может иметь несколько завышенные характеристики. Кроме того, диапазон изменения входных давлений (перед всасывающим патрубком насосного агрегата) оказывает влияние на величину давления за насосным агрегатом.

Все эти обстоятельства приводят к тому, что потери энергии в ходе технологического процесса становятся достаточно большими, достигающими 45 и более процентов от номинальной мощности агрегата. Для решения задачи минимизации потерь, связанных с регулированием давления в сети, необходимо исключить дополнительные гидравлические сопротивления на участке от насосного агрегата до сетевого трубопровода, то есть необходимо полностью открыть всю запорно - регулируемую арматуру. Это можно сделать, если процесс регулирования давления передать насосному агрегату. Теория работы нагнетателей (насосов и вентиляторов) доказывает, что изменение частоты вращения привода нагнетателя изменяет его напорные характеристики, кроме того, напор создаваемый нагнетателем, пропорционален квадрату частоты вращения агрегата. Изменение напорных характеристик насосного агрегата при изменении частоты вращения иллюстрирует.

Если организовать работу привода насосного агрегата таким образом, чтобы он при изменении параметров технологического процесса (расхода в сети и давления на входе агрегата) изменял частоту вращения, то в итоге можно без существенных потерь энергии стабилизировать давление в сети потребителей.

При таком способе регулирования исключаются потери напора (нет дроссельных элементов), а значит, и потери гидравлической энергии. Способ регулирования давления в сети путём изменения частоты вращения привода насосного агрегата снижает энергопотребление ещё и по другой причине. Собственно насос как устройство преобразования энергии имеет свой коэффициент полезного действия - отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата.

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ АСИНХРОННЫЕ СЕРИИ А4 (200-1000 кВт)

Электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором серии А4 предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосов, вентиляторов, дымососов и др.), а их специальные модификации - в составе регулируемого привода механизмов.

Пуск двигателей прямой, обеспечивается как при номинальном напряжении сети, так и при снижении напряжения сети за время пуска до $0,8 U_{\text{ном}}$.

Двигатели допускают два пуска подряд из холодного состояния или один пуск из горячего состояния. Интервал между последующими пусками не менее трех часов, количество пусков не менее 10000 за период эксплуатации, но не более 500 пусков в год в течение гарантийного периода.

Соединение двигателей с приводным механизмом осуществляется посредством упругой муфты.

Обмотка статора имеет шесть выводных концов, закрепленных на четырех изоляторах в коробке выводов. Соединение фаз обмоток - звезда.

Двигатели допускают правое и левое направление вращения. Изменение направления вращения осуществляется только из состояния покоя.

Характеристики и отличительные особенности двигателей серии А4:

- Могут быть установлены на фундаменты двигателей серии А 12-13 габаритов с применением переходных плит без переделки фундаментов. Плиты поставляются комплектно при необходимости.
- Обладают оптимальным соотношением энергетических показателей и удельной материалоемкости.
- Обладают повышенным значением перегрузочной способности без снижения долговечности.
- Имеют высококачественную систему изоляции обмотки статора типа «Монолит-2» класса нагревостойкости F с температурным использованием

по классу В, что обеспечивает надежную работу двигателей до 20 лет эксплуатации.

- Возможна поставка в исполнении «принудительная вентиляция» вместо самовентиляции.
- Имеют усиленный корпус, снижающий уровни звука и вибрации.
- Аргонодуговая сварка обеспечивает безусловную надежность обмотки ротора.
- Унификация серии А4 позволяет при необходимости на месте эксплуатации переходить от защищенного исполнения (IP23) к закрытому (IP54) со снижением мощности на одну ступень.
- Сейсмостойкость и надежность двигателей допускает их применение на атомных электростанциях.
- Двигатели сертифицированы на соответствие стандарту ISO 9001.



Структура условного обозначения:

А4-НL-ХК (Пример: А4-400ХК-4У3)

А - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

4 - номер серии

Н (400, 450) - высота оси вращения в мм

L (Х, У, Хк, Ук) - условная длина двигателя

Х (4, 6, 8, 10, 12) - число полюсов

К (У3, Т3) - климатическое исполнение и категория размещения

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ АСИНХРОННЫЕ СЕРИИ ДАЗО4

Электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором серии ДАЗО4 предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения (насосов, вентиляторов, дымососов и др.), а их специальные модификации - в составе регулируемого привода механизмов.

Пуск двигателей прямой, обеспечивается как при номинальном напряжении сети, так и при снижении напряжения сети за время пуска до $0,8 U_{\text{ном}}$.

Двигатели допускают два пуска подряд из холодного состояния или один пуск из горячего состояния. Интервал между последующими пусками не менее трех часов, количество пусков не более 10000 за период эксплуатации и не более 500 пусков в год в течение гарантийного срока.

Соединение двигателей с приводным механизмом осуществляется посредством упругой муфты.

Двигатели имеют подшипники качения с пластичной смазкой.

Двигатели допускают правое и левое направление вращения. Изменение направления вращения осуществляется только из состояния покоя.

Характеристики и отличительные особенности двигателей серии ДАЗО4:

- Обладают оптимальным соотношением энергетических показателей и удельной материалоемкости.
- Обладают повышенным значением перегрузочной способности без снижения долговечности.
- Имеют усиленный корпус, снижающий уровни звука и вибрации.
- Аргонодуговая сварка обеспечивает безусловную надежность обмотки ротора.
- Конструкция обеспечивает возможность пополнения (замены) смазки подшипников без остановки или, тем более, разборки двигателей.
- Унификация серии ДАЗО4 позволяет при необходимости на месте эксплуатации переходить от защищенного исполнения (IP23) к закрытому (IP54) и, наоборот, с минимальными затратами.

· Сейсмостойкость и надежность двигателей допускает их применение на атомных электростанциях.

· Двигатели сертифицированы на соответствие стандарту ISO 9001.

Структура условного обозначения:

ДА304-НЛ-ХК (Пример: ДА304-400Х-4У1)

ДА30 - асинхронный обдуваемый двигатель с короткозамкнутым ротором

4 - номер серии

Н (400, 450) - высота оси вращения в мм

L (Х, У, Хк, Ук) - условная длина двигателя

Х (4, 6, 8, 10, 12) - число полюсов

К (У1, Т2, М4) - климатическое исполнение и категория размещения



Приводные двигатели насосов различных типов

Компактность конструкций, простота соединений с насосом, легкая автоматизация управления и относительно низкие эксплуатационные затраты предопределили массовое применение электродвигателей переменного тока в качестве привода для насосов систем водоснабжения и канализации.

К приводным электродвигателям насосных агрегатов помимо их большой мощности предъявляется ряд специфических требований. Одним из определяющих является необходимость пуска двигателей под нагрузкой. Конструкция электродвигателя должна также допускать довольно продолжительное вращение ротора в обратную сторону (с угонной скоростью, определяемой характеристикой насоса), вызываемое сливом воды из напорных трубопроводов после отключения электродвигателя от сети при плановой или аварийной остановке агрегата.

Весьма желательной для улучшения условий работы энергетических систем,

где применяются мощные насосные станции, является возможность частых повторных пусков, что, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к конструкциям обмотки статора и пусковой обмотки электродвигателя, нагревание которых определяет продолжительность требуемой паузы между пусками и допустимое число пусков за рассматриваемый период.

Асинхронные электродвигатели. При работе этих двигателей частота вращения магнитного поля статора постоянна и зависит от частоты питающей сети (стандартная частота 50 Гц) и от числа пар полюсов, а частота вращения ротора отличается на величину скольжения, составляющую 0,012—0,06 скорости магнитного поля статора. Причиной исключительно широкого применения асинхронных электродвигателей является их простота и небольшая стоимость.

В зависимости от типа обмотки ротора различают асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым или с фазным ротором.

		Calorex PPT	
KARCHER	Натрийбензоат , E	22BLY	StiebelEltron
SCP 7000	211 (фас.)	Тепловой	WWK 300 SOL
			
Насосы	Общемедицинские приборы	Очистка и увлажнение воздуха	Водонагреватели

Короткозамкнутые асинхронные электродвигатели являются наиболее подходящим электроприводом для небольших насосов. Они значительно дешевле электродвигателей всех других типов и, что очень существенно, обслуживание их гораздо проще. Пуск этих электродвигателей — прямой асинхронный, при этом не требуется каких-либо дополнительных устройств, что дает возможность значительно упростить схему автоматического

управления агрегатами

Однако при прямом включении короткозамкнутых асинхронных электродвигателей очень высока кратность пускового тока, который для двигателей мощностью 0,6—100 кВт при $n = 750\text{H}-3000\text{ мин}^{-1}$ в 5—7 раз выше номинального тока. Такой кратковременный толчок пускового тока относительно безопасен для двигателя, но вызывает резкое снижение напряжения в сети, что может неблагоприятно сказаться на других потребителях энергии, присоединенных к той же распределительной сети. По этим причинам допустимая номинальная мощность асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, пускаемым прямым включением, зависит от мощности сети и в большинстве случаев ограничивается 100 кВт.

Структура и объем диссертационной работы состоит из введения, трех глав, списка использованных литератур, заключения. Основная часть составляет **76** машинописных страниц.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ МОЩНОСТЬЮ 250 КВТ, НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В И ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ 750 ОБ/МИН, УСТАНОВЛЕННЫЙ НА НАСОСНОЙ СТАНЦИИ «УЧ ҚАҲРАМОН» УРГУТСКОГО РАЙОНА, САМАРКАНДСКОЙ ОБЛАСТИ

1.1. Определение тока и потерь асинхронных двигателей

При проведении опыта короткого замыкания измеряют ток и потери короткого замыкания электродвигателей, проверяют состояние соединений обмоток, а также качество заливки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей. Результаты опыта позволяют определить начальный пусковой ток и начальный вращающий момент электродвигателя, которые являются важными эксплуатационными параметрами. Опыт короткого замыкания производят при заторможенном роторе. В электродвигателях с фазными роторами обмотку ротора замыкают накоротко на кольцах. При заторможенном роторе к статору подводят практически симметричное напряжение номинальной частоты. Вращающий момент для электродвигателей мощностью до 100 кВт измеряют динамометром, весами, тормозом или специальными приборами. Так как этот момент может несколько изменяться в зависимости от положения ротора по отношению к статору, то измерения производят несколько раз, сдвигая ротор на одно зубцовое деление, и в качестве результата принимают наименьший из замеренных моментов. Для двигателей мощностью выше 100 кВт вращающий момент обычно определяют расчетным путем по результатам измерения потерь короткого замыкания. Необходимо учитывать, что при проведении опыта электродвигатель является трансформатором, вторичная обмотка которого (обмотка ротора) замкнута накоротко. Ток, проходящий по обмоткам, может в несколько раз превысить номинальный, а так как двигатель при неподвижном роторе не вентилируется, то его обмотка очень быстро нагревается. Поэтому необходимые отсчеты по приборам и сам опыт надо производить с максимально возможной быстротой. Следует обратить серьезное внимание

на надежность устройств, служащих для затормаживания ротора, так как при проведении опыта они испытывают значительные усилия. Направление вращения ротора определяют заранее и, сообразуясь с ним, устанавливают затормаживающие устройства. При ошибке эти устройства могут сорваться и нанести повреждения персоналу.

Опыт короткого замыкания обычно производят сразу после опыта холостого хода. Характеристика короткого замыкания представляет собой зависимость линейного тока короткого замыкания $I_{\text{к}}$, и потерь короткого замыкания $P_{\text{к}}$ от приложенного к статору напряжения $U_{\text{к}}$.

Для проведения опыта собирается схема, аналогичная схеме при опыте холостого хода (рис. 1). При проведении опыта рекомендуется двигатель включать на напряжение, составляющее 15—20% номинального, затем быстро поднимать его до требуемого значения. При типовом испытании следует произвести пять — семь отсчетов при разных значениях подводимого напряжения. Первый отсчет берут при наибольшем напряжении. Отсчеты по приборам при каждом значении подводимого напряжения производят за время не более 10 с во избежание чрезмерного нагрева обмотки током короткого замыкания. После каждого отсчета двигатель отключают.

При типовом испытании двигателя мощностью до 100 кВт опыт проводят, начиная с напряжения, отличающегося от номинального не более чем на $\pm 10\%$. Типовое испытание короткозамкнутых двигателей мощностью свыше 100 кВт допускается производить при напряжениях, меньших номинального, но при таких, чтобы максимальное значение тока короткого замыкания было не ниже 2,5—4-кратного номинальному. При испытании короткозамкнутых двигателей мощностью свыше 1000 кВт, а также при испытании двигателей с фазным ротором допускается доводить ток только до 2-кратного номинальному. Во всех случаях требуется один из отсчетов произвести при напряжении, указанном ниже.

Номинальное напряжение двигателя, В	127	220	380	500	600	3000	6000
Напряжение короткого замыкания, В	33	58	100	130	173	800	1600

ГОСТ 7217-66 рекомендует при приемо-сдаточных испытаниях ток и потери короткого замыкания определять только при одном напряжении согласно приведенным выше данным с последующим пропорциональным пересчетом тока короткого замыкания на номинальное напряжение двигателя. Потери в этом случае пересчитывают пропорционально квадрату тока. По данным замеров строится характеристика короткого замыкания (рис. 4). Так же как и при опыте холостого хода, измерение подводимой мощности производится по схеме двух ваттметров. Однако корректировка подводимой мощности на потерю в приборах не производится, так как эти потери обычно лежат ниже уровня погрешности измерения. Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания составляет:

$$\cos\varphi_k = P_k / (\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k)$$

Контроль правильности определения производят по кривой, приведенной на рис. 1. Для определения вращающего момента M_k , Нм, при коротком замыкании.

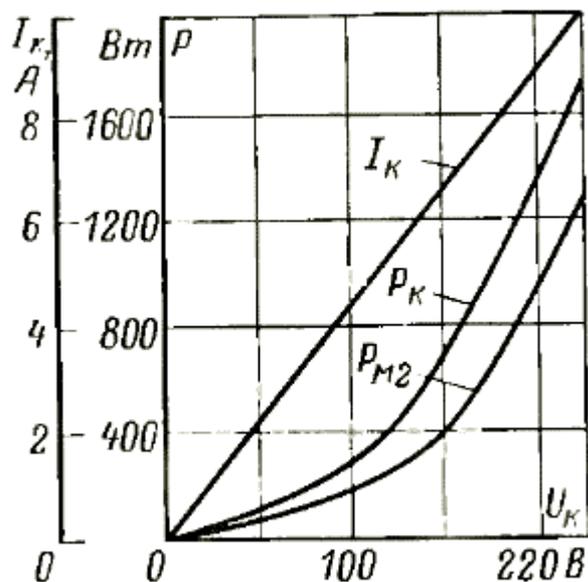


Рис. 1. Пример построения характеристики короткого замыкания.

двигателей мощностью выше 100 кВт следует пользоваться формулой $M_k = 9750 P_{km2} / n_c$,

где P_{km2} — потери в обмотке ротора при опыте короткого замыкания, кВт; n_c — частота вращения (синхронная), об/мин.

Потери в обмотке ротора P_{km2} , кВт, составляют: $P_{km2} = P_k - P_{km1} - P_c$,

где P_{km2} — потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания, кВт, равные: $P_{km1} = 3/U / 1000$ — при соединении фаз в звезду; $P_{km1} = I/R / 1000$ — при соединении фаз в треугольник, где R — сопротивление при постоянном токе одной фазы, Ом; P_c — потери в стали, Значения k_m для некоторых двигателей приведены в табл. 1. Для асинхронных двигателей большей мощности, а также специального исполнения значения k_m указаны в соответствующих стандартах и технических условиях; здесь эти данные не приводятся.

Таблица 1

Мощность, кВт	k_2 при синхронной частоте вращения, об/мин					
	3000	1500	1000	750	600	500
	<i>Для двигателей серий А и АО с короткозамкнутым ротором</i>					
От 0,6 до 28 включительно	7,0	7,0	6,5	5,5	—	—
От 40 до 100 включительно	6,5	6,5	6,5	5,5	—	—
	<i>Для двигателей серий А2 и АО2</i>					
До 7,5 включительно	7,0	7,0	6,5	6,0	—	—
Выше 7,5	7,0	7,0	7,0	7,0	6,5	—
	<i>Для двигателей 110—1000 кВт общего применения</i>					
До 200 включительно	6,5	6,5	6,0	5,5	5,5	5,5
От 200 до 500	7,0	7,0	6,5	6,0	6,0	5,5
Выше 500	7,0	7,0	7,0	6,5	6,0	—

Величина потерь короткого замыкания (приведенная к номинальному напряжению) должна удовлетворять зависимости $P_{кз} > 0,85k_m P_N - kI^2 R_p + P_c$, где k_n — установленная в стандартах или технических условиях минимальная кратность начального пускового вращающего момента; P_N — номинальная мощность электродвигателя, кВт; R_p — расчетное сопротивление фазы обмотки статора, т. е. приведенное к температуре 75°C (если двигатель по нагревостойкости изоляции относится к классам А, Е, В) или 115°C (для классов F и H), Ом; P_c — потери в стали электродвигателя при номинальном напряжении, кВт (определяются при опыте холостого хода); 0,85 — коэффициент, учитывающий допуск 15% в сторону снижения, установленный ГОСТ 183-74 на значение кратности начального пускового вращающего момента; k — коэффициент, равный 0,003 при соединении обмотки статора в звезду или 0,001 при соединении в треугольник.

Таблица 2

Мощность, кВт	Электродвигатели защищенного исполнения				Электродвигатели закрытого обдуваемого исполнения			
	при синхронной частоте вращения, об/мин							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	—	1,7	—	—	—	1,7	—	—
1,0	1,8	1,8	1,3	—	2,0	1,8	1,3	—
1,7	1,8	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
2,8	1,6	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
4,5	1,6	1,4	1,3	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
7	1,5	1,4	1,1	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
10	1,5	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
14	1,2	1,2	1,2	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
20	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
28	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
40	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,4	1,3
55	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
75	1,0	1,0	1,0	—	1,1	1,1	—	—
100	1,0	1,0	—	—	1,1	1,1	—	—

Таблица 3

Мощность, кВт	k_M для двигателей серии А2, А02 при синхронной частоте вращения, об/мин					Мощность, кВт	k_M для двигателей серии А02 при синхронной частоте вращения, об/мин				
	3000	1500	1000	750	600		3000	1500	1000	750	600
0,4	—	—	1,8	—	—	10	1,5	1,4	1,2	1,2	—
0,6	—	1,8	1,8	—	—	13	1,5	1,3	1,2	1,1	—
0,8	1,9	1,8	1,8	—	—	17	1,2	1,3	1,2	1,1	1,1
1,1	1,9	1,8	1,8	—	—	22	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1
1,5	1,8	1,8	1,8	—	—	30	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1
2,2	1,8	1,8	1,8	1,2	—	40	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
3,0	1,7	1,8	1,3	1,2	—	55	1,0	1,1	1,1	1,1	—
4,0	1,7	1,5	1,3	1,2	—	75	1,0	1,1	1,1	—	—
5,5	1,6	1,5	1,3	1,2	—	100	1,0	1,1	—	—	—
7,5	1,6	1,4	1,3	1,2	—	125	1,0	—	—	—	—

Значения k_M для двигателей серий А и А0 определяются по табл. 2, для двигателей серий А2 и А02 — по табл. 3, для двигателей мощностью 110—1000 кВт k_M равен 0,9 для двух- и четырехполюсных и 1,0 для шести-, восьми-, десяти- и двенадцатиполюсных. Для остальных двигателей значения k_M указаны в соответствующих стандартах и технических условиях и здесь не приводятся. Во время проведения опыта короткого замыкания на пониженном напряжении представляется удобная возможность проверить исправность обмотки короткозамкнутого ротора. Это особенно важно для

роторов с литыми алюминиевыми обмотками, в которых часто встречаются пороки литья — пузыри, трещины, обрывы стержней, которые трудно обнаружить при наружном осмотре. Проверка заключается в том, что при включении обмотки статора на трехфазное напряжение, пониженное настолько, что ротор еще не вращается, а ток настолько мал, что не вызывает заметного перегрева обмоток, ротор медленно проворачивают вручную и следят за показанием трех амперметров, включенных в фазы статора. Если обмотка ротора исправна, его проворачивание не вызывает изменения показаний амперметров; при неисправном роторе стрелки амперметров поочередно колеблются, и тем заметнее, чем больше неисправность.

1.2. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОТЕРИ

Поверхностные потери возникают из-за пульсаций индукции в воздушном зазоре. Зависимость КПД от нагрузки. Поверхностные потери возникают в поверхностном слое зубцов или полюсов из-за пульсаций поля в воздушном зазоре. Частота пульсаций индукции определяется числом зубцов и частотой вращения $f_z n_z / 6Q$, где z - число зубцов на статоре, если определяются поверхностные потери в роторе, или число пазов на роторе, если определяются поверхностные потери в статоре. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора. Эти потери имеют место в статорах и роторах асинхронных машин и на поверхности полюсных наконечников синхронных машин и машин постоянного тока. Поверхностные потери возникают из-за пульсаций индукции в воздушном зазоре.

Поверхностные потери, как показал расчет, очень малы. Поверхностные потери в стали ротора наиболее опасны в крупных машинах и надежнее всего снижаются шихтовкой его полюсных

башмаков. Но в последние годы крупные синхронные двигатели чаще изготавливают с массивными полюсами, то есть из сплошного железа. В этих случаях хорошие результаты дает рифление поверхности ротора. Рифленая поверхность резко увеличивает активное сопротивление контуров вихревых токов от высших гармоник, которые, как известно, замыкаются по поверхности ротора. Кроме того, заметно увеличивается площадь охлаждаемой поверхности ротора. Поверхностные потери при расслоенном железе, как правило, незначительны. Поверхностные потери ротора, вызванные полями высших гармонических статора, рассчитываются с учетом частоты, числа полюсов и полюсного деления высших гармонических. Полные поверхностные потери $P_{\text{пов}} \text{ Вт}$, получают умножением $P_{\text{пов}}$ на площадь всей рассматриваемой поверхности статора или ротора - головок зубцов или полюсных наконечников.

Поправочный коэффициент χ . Система координат для расчета поверхностных потерь. Полные поверхностные потери машины пропорциональны площади поверхности расточки статора. Следует учитывать, что индукция B_0 не везде имеет одновременно одинаковые значения. При синусоидальном поле средняя квадратичная величина равна половине квадрата амплитудного значения.

Рассмотрим поверхностные потери в стали ротора при холостом ходе асинхронного двигателя с закрытыми пазами на роторе. Элемент на поверхности ротора при вращении оказывается то под зубцом, то под пазом (шлицем) статора. Пульсации зубцового потока при двух различных положениях ротора относительно статора (а, б. При определенных условиях поверхностные потери переходят в иные виды потерь, в частности в пульсационные потери в зубцах. Это происходит в том случае, когда в одной части машины ширина головок зубцов приблизительно равна или меньше раскрытий пазов другой части, как,

например, в асинхронных машинах. В этом случае поверхностные потери частично отсутствуют и вместо них возникают пульсационные потери.

Поверхностные потери от длины стали в аксиальном направлении не зависят. Зависимость критерия равновесия R_a от критерия контакта K_0 для реакций типа Л твердое. В необогреваемых снаружи реакторах необходимы одинаковые поверхностные потери тепла на единицу производительности в модели и натуре. Поэтому нужен контроль тепловых потерь в модели.

Использование тонких листов стали значительно снижает поверхностные потери в случае, когда поверхность ротора после его шихтовки не обрабатывается. В случае добавочной обработки потери нужно рассчитывать так же, как при массивных роторах. Для расчета поверхностных потерь пригодно равенство (9 - 21 а), причем численную величину коэффициента k_0 можно брать из таблицы, приведенной ниже.

Основными видами добавочных потерь в стали являются пульсационные и поверхностные потери.

Существуют три вида основных потерь: а) поверхностные потери, связанные с переносом тепла через высокий вакуум посредством излучения (до сих пор еще не разработаны тепловые изоляторы очень высокого качества, практически пригодные для использования в области температур от 4 до 77 К); б) потери, обусловленные теплопроводностью опор; в) потери, связанные с теплопроводностью электрических соединений.

Так как пазы на роторе закрыты, то поверхностные потери в статоре равны нулю.

Из табл. 5 - 1 видно, что наибольшие удельные поверхностные потери имеют тяговые двигатели НБ-414, НБ-418 и ЭД-104А.

Во-вторых, эти гармоники поля обуславливают добавочные магнитные потери на поверхности (поверхностные потери) и в теле зубцов (пульсационные потери) статора и ротора. Вращение зубцов ротора относительно зубцов статора вызывает пульсации магнитного потока в зубцах, и поэтому соответствующая часть потерь называется пульсационными потерями. Магнитные потери в сердечнике ротора при нормальных рабочих режимах обычно очень малы и отдельно не учитываются. Как видно из приведенных величин, применение листовой стали вместо массивной существенно снижает поверхностные потери. Значения k_0 для хорошо изолированных друг от друга стальных листов приблизительно пропорциональны их толщине. Расчет k_Q связан с большими математическими трудностями, и поэтому приходится применять приведенные выше значения, установленные экспериментальным путем.

Влияние расположения зубцов на распределение магнитного потока. а - ось зубца ротора совпадает с осью зубца статора. б - ось зубца ротора совпадает с осью паза статора. Основными видами добавочных потерь в стали являются: а) пульсационные и б) поверхностные потери. Таким образом, потери третьего вида можно отнести к механическим потерям в поверхностном молекулярном слое (поверхностные потери), причем они всегда пропорциональны числу разорванных связей, а не скорости роста трещины. В связи с этим методы контролируемого разрушения определяют не свободную поверхностную энергию твердого тела в чистом виде, а величину, включающую механические потери третьего вида.

Сечение Т - образного хвоста полюса (а и паза обода ротора (б. Хвосты полюсов, выполненные из листов стали большей толщины, имеют большую прочность, но при этом увеличиваются поверхностные потери мощности в наконечниках полюсов.

Если ротор сделан цельнокованным, то объемные потери от пульсаций в зубцах ротора не имеют места, а существуют только поверхностные потери.

Если ротор сделан цельнокованным, то объемные потери от пульсаций в зубцах ротора не имеют места, а существуют только поверхностные потери.

Таким образом, наличие зубцов на статоре определяет возникновение поверхностных потерь в роторе, и, наоборот, зубцы ротора вызывают поверхностные потери на статоре. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора. Эти потери имеют место в статорах и роторах асинхронных машин и на поверхности полюсных наконечников синхронных машин и машин постоянного тока. Таким образом, наличие зубцов на статоре определяет возникновение поверхностных потерь в роторе, и, наоборот, зубцы ротора вызывают поверхностные потери на статоре. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора.

Пределы изменения зубцового деления t_z в зависимости от полюсного деления t для синхронных машин. При уменьшении числа пазов возрастают объем тока в пазу и перепад температуры в изоляции, увеличиваются добавочные потери в меди, а также пульсационные и поверхностные потери. Кроме того, с увеличением размеров катушки усложняются ее изготовление и укладка в пазы. При разработке серии в целях унификации обмоточных проводов и числа применяемых штампов стремятся выбирать одинаковые пазы для машин с различным числом полюсов.

Высшие гармонические пазов, проникающие в противоположную часть машины и распространяющиеся дальше вдоль поверхности расточки,

вызывают, поверхностные потери.

V - в ярме, V_n - на гистерезис, V_r - на трение ротора о воздух, V_L - сумма потерь в роторе, V_m - механические, V_o - поверхностные потери в стали, V_p - пульсационные, V_s - в лобовой части обмотки, V_v - в обмотке, отводимые воздухом в вентиляционном канале, V_w - от вихревых токов, V_{w1} - в обмотке, УШ - добавочные в активной стали из-за некачественной изоляции листов, V_{WG} - дополнительные в стали из-за грата, V_z - в зубце.

Деформационными релаксационными потерями (потери первого вида), которые для хрупких тел малы, пренебрегаем. Поверхностные потери не зависят, а динамические потери зависят от скорости роста трещины. Поверхностные потери в полюсных наконечниках вызываются зубчатым строением якоря.

Величина поверхностных потерь ротора зависит от раскрытия пазов статора и, наоборот, величина поверхностных потерь статора зависит от раскрытия пазов ротора; при открытых пазах потери наибольшие, при закрытых отсутствуют. Большие поверхностные потери имеют место в массивных роторах синхронных турбогенераторов и машин с массивными полюсами.

Листы полюсов. Полюсы электрических машин пронизываются потоком, имеющим постоянное направление, и поэтому потери на перемагничивание и на вихревые токи в них отсутствуют. Однако поверхностные потери в полюсных наконечниках не позволяют делать их массивными, и полюсы собирают из штампованных листов. Массивными делают только главные полюсы генераторов и электродвигателей автотракторного электрооборудования. В последнее время получили распространение массивные полюсы в синхронных машинах, где они играют роль пусковой или успокоительной обмотки. Обычно зубцовыми гармониками высшего порядка (при $p1$)

пренебрегают, так как они выражены относительно слабо. Можно принять, что поверхностные потери пропорциональны частоте пульсаций в степени 1,5 и квадрату среднего значения индукции в зазоре.

Обычно зубцовыми гармониками высшего порядка (при p) пренебрегают, так как они выражены относительно слабо. Можно принять, что поверхностные потери пропорциональны частоте пульсаций в степени 1,5 и квадрату среднего значения индукции в зазоре.

Анализ показывает, что поверхностные потери зависят от частоты в степени 1,5 и квадрата среднего значения индукции в зазоре. При нагрузке машины также возникают добавочные потери вследствие искажения распределения магнитного поля под влиянием поперечной реакции якоря. Вследствие неравномерного распределения магнитной индукции в зазоре увеличиваются поверхностные потери. При наличии компенсационной обмотки указанная часть магнитных потерь практически отсутствует. Другая часть добавочных потерь связана с образованием вихревых токов в стержнях обмотки якоря вследствие изменения потока рассеяния. Ток короткого замыкания переключаемых секций также вызывает потери в проводниках. Одним из средств уменьшения этой части потерь является применение стержней обмотки, собранных из проводников малого сечения. Продолжать обобщение включив в него кобальт, ниобий, молибден и вольфрам, опасно из-за сложности межэлементных взаимодействий. Это очень хорошая противоокислительная стойкость, при которой поверхностные потери (с одной стороны образца) не превышают 0,025 мм.

Крепление сердечника полюса заклепками (а) и стержнем (б). Полюса для уменьшения потерь набирают из листов толщиной 1 - 2 мм. При

больших толщинах затрудняется штамповка листов и увеличиваются поверхностные потери, при меньших толщинах увеличиваются затраты труда вследствие увеличения количества листов, а также уменьшается коэффициент заполнения сердечника сталью. При нагрузке машины также возникают добавочные потери вследствие искажения распределения магнитного поля под влиянием поперечной реакции якоря. Вследствие неравномерного распределения магнитной индукции в зазоре увеличиваются поверхностные потери. При наличии компенсационной обмотки указанная часть магнитных потерь практически отсутствует. Другая часть добавочных потерь связана с образованием вихревых токов в стержнях обмотки якоря вследствие изменения потока рассеяния. Ток короткого замыкания переключаемых секций также вызывает потери в проводниках. Одним из средств уменьшения этой части потерь является применение стержней обмотки, собранных из проводников малого сечения.

1.3. КПД АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Преобразование энергии в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии. Эти потери делятся на механические, магнитные и электрические.

Из сети в обмотку статора поступает мощность P_1 . Часть этой мощности расходуется на покрытие магнитных потерь в сердечнике статора Δp_{c1} , а также в обмотке статора на покрытие электрических потерь, обусловленных нагревом обмотки,

$$\Delta p_{\partial 1} = m_1 I_{12}^2 r_1. \quad (2.1) \text{http://dizvi.ru/images/stories/141.jpg}$$

Оставшаяся часть мощности при помощи магнитного потока передается на ротор и поэтому называется электромагнитной мощностью

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (\Delta p_{c1} + \Delta p_{\partial 1}). \quad (2.2)$$

Часть электромагнитной мощности затрачивается на покрытие

электрических потерь в обмотке ротора
 $p_{э2} = m_2 I_{22}^2 r_2 = m_1 I_{22}^2 r_2.$ (2.3)

Остальная часть электромагнитной мощности преобразуется в механическую мощность двигателя, называемую полной механической мощностью
 $P_2 = P_{эм} - p_{э2}.$ (2.4)

Таким образом, полная механическая мощность
 $P_2 = m_1 I_{22}^2 r_2 [(1-s)/s] = p_{э2} [(1-s)/s].$ (2.5)

Выполнив несложные преобразования, получим
 $p_{э2} [(1-s)/s] = P_{эм} - p_{э2}$ и $p_{э2} = s P_{эм},$ (2.6)

т.е. мощность электрических потерь в роторе пропорциональна скольжению. Поэтому работа асинхронного двигателя более экономична при малых скольжениях.

Следует отметить, что в роторе двигателя возникают также и магнитные потери, но ввиду небольшой частоты тока ротора ($f_2 = f_1 s$) эти потери настолько малы, что ими обычно пренебрегают. Механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше полной механической мощности P'_2 на величину механических $p_{мех}$ и добавочных p_d потерь
 $P_2 = P'_2 - (p_{мех} + p_d).$ (2.7)

Механические потери в асинхронном двигателе обусловлены трением в подшипниках и трением вращающихся частей о воздух. Добавочные потери вызваны наличием в двигателе полей рассеяния и пульсацией поля в зубцах ротора и статора.

Таким образом, полезная мощность асинхронного двигателя
 $P_2 = P_1 - \sum p,$ (2.8)

где $\sum p$ – сумма потерь в асинхронном двигателе,
 $\sum p = p_{с1} + p_{э1} + p_{э2} + p_{мех} + p_d.$

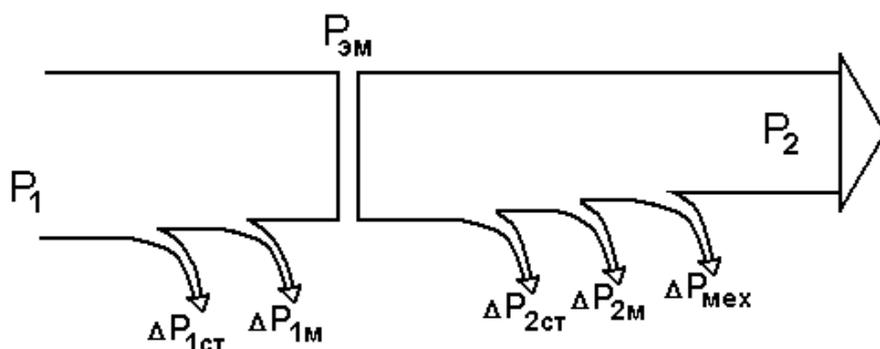
Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя
 $\eta = P_2 / P_1 = 1 - \sum p / P_1.$ (2.9)

Благодаря отсутствию коллектора КПД асинхронных двигателей выше, чем у

двигателей постоянного тока. В зависимости от величины мощности асинхронных двигателей их КПД при номинальной нагрузке может быть в пределах от 83 до 95% (верхний предел соответствует двигателям большой мощности).

Потери в установившихся режимах

- Потери в электрических машинах детально изучаются в соответствующих курсах. Основные составляющие потерь в машине:
- потери в обмотках (потери в меди),
- потери в магнитопроводе (потери в стали),
- потери в трущихся частях (потери механические).
- Для *нерегулируемого электропривода* первую составляющую, пропорциональную I^2 , относят к переменным потерям, поскольку $I \in M$, а последний определяется моментом сопротивления, т.е. зависит от технологического процесса. Две другие составляющие относят условно к постоянным потерям, так как потери в магнитопроводе определяются практически неизменными амплитудой и частотой магнитной индукции, а механические потери – практически неизменной скоростью. Таким образом, для нерегулируемого электропривода в первом приближении можно считать
- $D P = K + I^2 R$, (10)
- где K – постоянные потери,
- I и R – ток и сопротивление силовой цепи.
- Более детальное качественное представление о потерях дает рис. 2
- – диаграмма потерь при передаче энергии от электрического источника $P_1 = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi$ (или $P_1 = UI$ для электропривода постоянного тока) к вращающейся нагрузке $P_2 = M\omega$. На диаграмме указана также электромагнитная мощность $P_{эм} = M\omega_0$ – мощность в воздушном зазоре машины.



- Рис. 2. Энергетическая диаграмма электрической машины
- В принятых нами моделях электропривода для удобства предполагалось, что момент на валу равен моменту электромагнитному, а момент, связанный с потерями $D M$, отнесен к моменту сопротивления M_c . Это допущение, существенно упрощающее все этапы анализа и синтеза электропривода, не вносит ощутимых погрешностей в результаты в подавляющем большинстве случаев, поскольку сами потери сравнительно невелики. Разумеется, в редких специальных случаях, когда либо потери значительны, либо их аккуратный учет представляет почему-либо самостоятельную задачу, нужно пользоваться более полными и точными моделями.
- Общее представление об энергетической эффективности нерегулируемого электропривода дает зависимость КПД двигателя с редуктором от относительной нагрузки. На рис. 3 для ориентировки приведена такая
- зависимость для двигателей средней мощности (15-150 кВт) с хорошим редуктором (КПД больше 0,95).

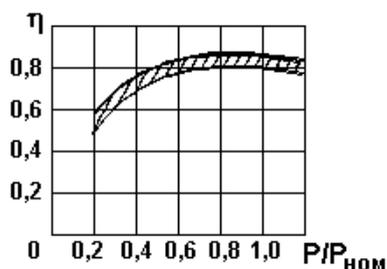


Рис. 3. Типичная зависимость КПД от нагрузки

- Необходимо подчеркнуть, что работа с недогрузкой приводит к заметному снижению КПД, поэтому неоправданное завышение мощности двигателя “на

всякий случай” – вредно. Так же вредны в соответствии с (5) неудачно организованные циклы, когда холостой ход занимает в цикле большое место.

- В регулируемом по скорости электроприводе энергетическая эффективность определяется главным образом выбранным способом регулирования, в связи с чем все способы можно разделить на две большие группы в зависимости от того, изменяется или нет ω_0 в процессе регулирования.
- К первой группе $\omega_0 = const$ относятся все виды реостатного регулирования, а также регулирование асинхронного двигателя с к.з. ротором изменением напряжения при неизменной частоте. Если принять для простоты, что $P_{эм} = P_1$ и $D P_2 = D P_{2м}$, то для этой группы получим:

$$\Delta P_2 = M\omega_0 - M\omega = M(\omega_0 - \omega) = P_1 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = P_1 s, \quad (11)$$

- т.е. потери в роторной (якорной) цепи при любой нагрузке пропорциональны

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

разности скоростей $D \omega$ ($\omega_0 - \omega$) или скольжению

- При реостатном регулировании лишь часть этих потерь, пропорциональная

$$\frac{R_{2p}}{R_{2p} + R_{2доб}},$$

рассеивается внутри машины и греет ее. Другая часть,

пропорциональная $\frac{R_{2доб}}{R_{2p} + R_{2доб}}$, рассеивается вне машины, ухудшая, разумеется, энергетические показатели электропривода. Именно эта часть в каскадных схемах используется полезно.

- Сложнее и неприятнее соотношение (11) проявляется в асинхронном электроприводе с к.з. ротором при регулировании изменением напряжения или каким-либо еще “хитрым” способом, но при постоянной частоте. Здесь вся мощность $D P_2 = P_1 s$ рассеивается в двигателе, нагревая его и делая способ практически непригодным для продолжительного режима работы.

- Интересно, что соотношение (9) нельзя “обмануть”, хотя такие попытки делались и еще делаются.
- К второй группе $w_0 = var$ относятся все “безреостатные” способы регулирования в электроприводах постоянного тока – изменением напряжения и магнитного потока и частотное регулирование в электроприводах переменного тока.
- Принципиально способы второй группы энергетически предпочтительны, поскольку в (11) разность скоростей $D w \approx const$, однако следует учитывать, что в устройствах, обеспечивающих $w_0 = var$, тоже есть потери и при малых мощностях, небольших диапазонах регулирования и немалой стоимости устройств необходимы детальные сопоставления.

- **Тепловые потери электрического оборудования**

Для более точного расчета систем вентиляции электрических машин и электромашинных помещений необходимо более полно учитывать все тепловые потери от электрического оборудования. Тепловые потери от различных видов электрооборудования определяют следующим образом.

Известно, что расчетные запасы мощностей в электрических машинах при увеличении производительности технологического оборудования быстро используются. Поэтому недогрузки машин, наблюдающиеся в первое время эксплуатации, учитывать не следует. Для нескольких машин обычно учитывают одновременность их работы.

Определение потерь по к. п. д. не всегда является правильным, потому, что он часто вычисляется по расчетной рабочей температуре нагрева обмоток 75 °С (ГОСТ 183-74). Фактически эта температура, ограничиваемая классом изоляции обмоток, может быть выше, что увеличивает потери. Поэтому лучше дополнительно к к. п. д. запрашивать у заводов — изготовителей машин истинные греющие потери.

Суммарные тепловые потери в машине делятся на две части, из которых

большая (92%) уносится охлаждающей водой (в замкнутых и полужамкнутых системах вентиляции) или воздухом (в проточных системах вентиляции), а меньшая (8%) отводится конвекцией и лучеиспусканием через корпус машины непосредственно в электромашинное помещение или цех в зависимости от того, где установлена машина, и в передаче тепла через воздухоохладитель не участвует. Выделение тепла с поверхности корпусов крупных машин обычно составляет около 0,5 кВт на 1 м² поверхности. У машин с открытым коллектором часть нагретого воздуха выходит через кольцевой зазор у коллектора. В этих случаях количество потерь, выделяемых в электромашинное помещение, следует увеличивать. Долю этих потерь определяет завод — изготовитель машины. Тепловые потери, отдаваемые в помещение, где установлены выпрямители, при воздушном охлаждении, составляют 100%, а при водяном — 10% полученной мощности потерь. Потери в кремниевых выпрямителях (тиристорах, диодах) определяют так же, как и в ртутных выпрямителях, но падение напряжения в каждом вентиле принимают около 2 В при номинальном токе. При последовательном соединении вентилях в выпрямителе общую потерю напряжения подсчитывают умножением потери напряжения в одном вентиле на количество вентилях. В мостовой схеме при одном вентиле в плече всегда работают последовательно два вентиля, и поэтому потери в этом случае удваиваются. При отсутствии данных о количестве вентилях в выпрямителе потери в нем подсчитывают по к. п. д. Для тиристорных преобразовательных агрегатов, состоящих из ряда шкафов, целесообразно запрашивать у заводов-изготовителей общие потери, включающие потери от всей аппаратуры, установленной во всех шкафах преобразователя.

Потери в шкафах УБСР (унифицированная блочная система регуляторов)

принимают 0,5 кВт на один шкаф. Потери в жидкостных регуляторах скольжения, кВт. Подавляющая часть этих потерь уносится водой и только 7—8% выделяется в электромашинное помещение. Таким образом, 0,5% мощности асинхронного привода двигателя агрегата отводится боковой поверхностью регулятора скольжения. Потери в приводных двигателях вентиляторов определяют как полную мощность, потребляемую двигателем из сети, кВт. Полезная мощность, развиваемая двигателем вентилятора, почти полностью расходуется на создание напора воздуха, который при преодолении сопротивлений в вентиляционном оборудовании и трении о стенки воздуховодов, теряется. Воздух при этом нагревается (на 1 °С при потерях давления в сети 1000 Па). При нескольких вентиляторах суммарную потребляемую мощность их двигателей определяют с учетом коэффициента спроса (обычно 0,7—0,8). Для замкнутых и проточных систем вентиляции 10% этих потерь выделяется в электромашинное помещение а 90% уносится соответственно водой воздухоохладителей или воздухом и учитывается в своих системах вентиляции. Для отвода потерь двигателя вентилятора обычно требуется 10—15% воздуха, циркулирующего в системе. Для полузамкнутых систем вентиляции и установок добавочного воздуха 100% этих потерь выделяется в электромашинное помещение. Это становится понятным, если учесть, что в таких системах вентиляции вся работа вентиляторов сохраняется в пределах рассматриваемой системы. При этом механическая энергия, затрачиваемая на перемещение воздуха в системах вентиляции, переходит в тепловую в результате трения воздуха о стенки воздуховодов.

Потери в двигателях насосов теплообменников определяют как 10% мощности, потребляемой этими двигателями из сети. Потери в катушках контакторов и реле, установленных на станциях управления, принимают в среднем по 0,2 кВт на каждую панель или как

мощность источника питания цепей управления. Потери в ящиках пусковых резисторов принимают в среднем по 1 кВт на каждый установленный ящик или равными 8% установленной мощности двигателей, в силовых цепях которых имеются пусковые резисторы. Потери в силовых трансформаторах, установленных в комплектных трансформаторных подстанциях (КТП), принимают равными приблизительно 2% мощности трансформаторов. В аварийных режимах, когда силовые трансформаторы допускается нагружать в течение 6 ч до 130% номинальной мощности, их потери на этот период удвоятся. Это следует учитывать только для установленных в отдельных помещениях одиночных трансформаторов, для которых такой режим работы вероятен. Потери в ячейках высшего напряжения типа КРУ или КСО (600—1000 А) принимают 0,5—1 кВт на каждую ячейку, если они полностью нагружены по току. Потери в конденсаторных батареях напряжением 380 В принимают примерно 4 Вт на 1 КВар установленной мощности батарей. Потери в ошиновках постоянного и переменного тока, проложенных в пределах электромашинного помещения, приближенно можно принять равными 0,25% передаваемой мощности. Потери в силовых кабелях и проводах, питающих производственные механизмы, Вт/м. Эти потери обычно принимают равными около 0,5% мощности двигателей механизмов. Потери от силовых кабелей в кабельных туннелях обычных размеров (2х Х2 м) при отсутствии данных по количеству, сечению и загрузке кабелей принимают ориентировочно 0,5 кВт на 1 м туннеля. Потери от кабелей управления не учитывают. Потери в светильниках определяют, исходя из того, что вся мощность, потребляемая лампами, переходит в тепло. При применении светильников с люминесцентными лампами и лампами ДРЛ учитывают также потери в

пускорегулирующих аппаратах (ПРА), которые в среднем составляют 20% мощности люминесцентных ламп, включенных по стартерным схемам; 30% мощности таких ламп, включенных по бесстартерным схемам и 10% мощности ламп ДРЛ.

Общие величины потерь зависят от способа выполнения освещения. Если светильники размещают в освещаемом помещении, то все тепловыделения от ламп и ПРА поступают в это помещение. Если светильники устанавливают за подвесным потолком или встраиваются в него, то в освещаемое помещение поступает только часть тепла, а часть выделяется в пространство между подвесным потолком и перекрытием. При отсутствии теплообмена между освещаемым помещением и пространством за подвесным потолком при применении люминесцентных ламп в освещаемое помещение поступает 35—40% всего выделяющегося тепла.

Ориентировочно потери от светильников (при отсутствии дневного освещения) составляют около 15 Вт на 1 м² площади помещения. Однако эти потери в общем балансе обычно учитывают по первому этажу электромашинного помещения в объеме 50%, так как они выделяются в верхней зоне помещения, где допускаются большие перегревы воздуха. Потери от освещения в подвале электромашинного помещения учитывают полностью.

2.2. Потери энергии асинхронных двигателей



В электрическом двигателе при преобразовании одного вида энергии в другой часть энергии теряется в виде теплоты, рассеиваемой в различных частях двигателя. В электрических двигателях имеются потери энергии трех

видов: **потери в обмотках, потери в стали и механические потери.**

Кроме того, имеются незначительные **добавочные потери**.

Потери энергии в асинхронном двигателе рассмотрим при помощи его энергетической диаграммы (рис. 1). На диаграмме P_1 - мощность, подводимая к статору двигателя из сети. Основная часть $P_{эм}$ этой мощности, за вычетом потерь в статоре, передается электромагнитным путем на ротор через зазор. $P_{эм}$ называется **электромагнитной мощностью**.

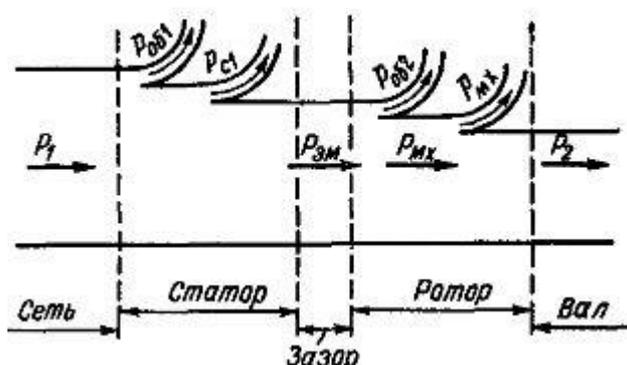


Рис. 1. Энергетическая диаграмма двигателя

Потери мощности в статоре складываются из потерь мощности в его обмотке $P_{об1} = m_1 \times r_1 \times I_1^2$ и потерь в стали $P_{с1}$. Мощность $P_{с1}$ является потерями на вихревые токи и на перемагничивание сердечника статора.

Потери в стали имеются и в сердечнике ротора асинхронного двигателя, но они невелики и могут не приниматься во внимание. Это объясняется тем, что скорость вращения магнитного потока относительно статора n_0 во много раз больше скорости вращения магнитного потока относительно ротора $n_0 - n$, если скорость вращения ротора асинхронного двигателя n соответствует устойчивой части естественной механической характеристики.

Механическая мощность асинхронного двигателя $P_{мх}$, развиваемая на валу ротора, меньше электромагнитной мощности $P_{эм}$ на значение мощности $P_{об2}$ потерь в обмотке ротора:

$$P_{мх} = P_{эм} - \Delta P_{об2}$$

Мощность на валу двигателя:

$$P_2 = P_{\text{мх}} - \Delta P_{\text{мх}},$$

где $\Delta P_{\text{мх}}$ - мощность механических потерь, равная сумме потерь на трение в подшипниках, на трение вращающихся частей о воздух (вентиляционные потери) и на трение щеток о кольца (для двигателей с фазным ротором).

Электромагнитная и механическая мощности равны:

$$P_{\text{эм}} = \omega_0 M, P_{\text{мх}} = \omega M,$$

где ω_0 и ω - синхронная скорость и скорость вращения ротора двигателя; M - момент, развиваемый двигателем, т. е. момент, с которым вращающееся магнитное поле действует на ротор.

Из этих выражений следует, что мощность потерь в обмотке ротора:

$$\text{или } \Delta P_{\text{об2}} = s \times \Delta P_{\text{эм}}$$

В случаях, когда известно активное сопротивление r_2 фазы обмотки ротора, потери в этой обмотке могут быть найдены также из выражения $\Delta P_{\text{об2}} = m_2 \times r_2 \times I_2^2$.

В асинхронных электродвигателях имеются также добавочные потери, обусловленные зубчатостью ротора и статора, вихревыми токами в различных конструктивных узлах двигателя и другими причинами. При полной нагрузке двигателя потери $\Delta P_{\text{д}}$ принимаются равными 0,5% его номинальной мощности.

Коэффициент полезного действия (КПД) асинхронного двигателя:

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - (\Delta P_{\text{об}} - \Delta P_{\text{с}} - \Delta P_{\text{мх}} - \Delta P_{\text{д}})) / P_1,$$

где $\Delta P_{\text{об}} = \Delta P_{\text{об1}} + \Delta P_{\text{об2}}$ - суммарная мощность потерь в обмотках статора и ротора асинхронного двигателя.

Поскольку общие потери зависят от нагрузки, то и КПД асинхронного двигателя является функцией нагрузки.

На рис. 2, а дана кривая $\eta = f(P/P_{\text{ном}})$, где $P/P_{\text{ном}}$ - относительная мощность.

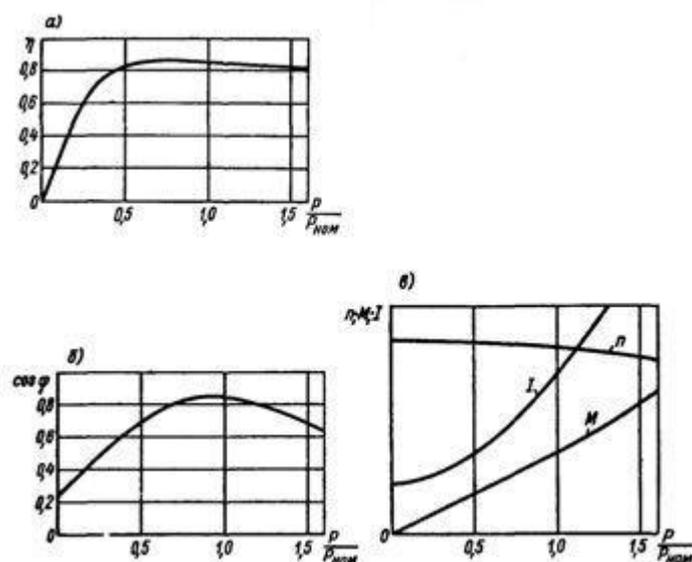


Рис. 2. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Асинхронный электродвигатель конструируется так, чтобы максимум его коэффициента полезного действия η_{max} имел место при нагрузке, несколько меньшей номинальной. КПД двигателя достаточно высок и в широком диапазоне нагрузок (рис. 2, а). Для большинства современных асинхронных двигателей КПД имеет значение 80 - 90%, а для мощных двигателей 90-96%.

Мощность и коэффициент полезного действия электрических машин

Потери мощности в электрических машинах. Преобразование механической энергии в электрическую в генераторе и электрической энергии в механическую в двигателе сопровождается некоторыми потерями энергии, которые выделяются в виде тепла, нагревая электрическую машину. Энергетические диаграммы генератора и двигателя (рис. 145) наглядно показывают баланс мощности в этих машинах. Как видно из них, при работе электрической машины возникают потери мощности: электрические, магнитные, механические и добавочные.

Электрические потери $\Delta P_{\text{эл}}$ появляются в результате того, что каждая обмотка (в машине постоянного тока обмотки якоря, возбуждения,

добавочных полюсов и компенсационная) обладает определенным сопротивлением, препятствующим прохождению по ней электрического тока. Они пропорциональны сопротивлению данной обмотки и квадрату протекающего по ней тока, т. е. сильно возрастают с увеличением нагрузки машины. Электрические потери вызывают нагрев проводов обмоток. К электрическим потерям относятся также потери, возникающие при протекании тока через щетки и через переходное сопротивление между щетками и коллектором; они вызывают нагрев коллектора и щеток.

Магнитные потери ΔP_M (потери в стали) возникают в сердечниках якоря и полюсов (главным образом, в полюсных наконечниках) в результате перемагничивания стали этих сердечников и образования в них вихревых токов. Перемагничивание стали сердечника якоря происходит потому, что при вращении якоря каждая его точка попеременно проходит то под северным, то под южным полюсам. Перемагничивание стали полюсных наконечников вызывается в результате изменения магнитной индукции в воздушном зазоре машины в пределах $\pm B$ при вращении зубчатого якоря (рис. 146). При этом в прилегающих к зазору ферромаг-

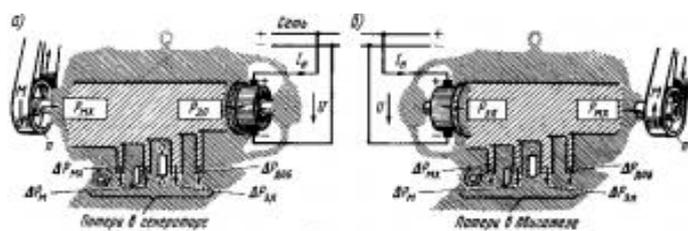


Рис. 145. Энергетические

диаграммы машины постоянного тока при работе ее в режиме генератора (а) и электродвигателя (б)

нитных элементах магнитной системы (полюсных наконечниках и зубцах якоря) индуцируются вихревые токи, изменяющиеся с высокой частотой (1000 Гц и более) и сосредоточенные, главным образом, на их поверхности. Поэтому потери мощности, созданные этими токами, называют *поверхностными*.

В машинах, имеющих зубцы на статоре и роторе (машины постоянного тока с компенсационной обмоткой, асинхронные и синхронные), при вращении ротора создаются заметные пульсации индукции в зубцах, что также приводит к образованию вихревых токов и соответствующим потерям мощности. Эти потери называют *пульсационными*. Магнитные потери возникают также и в стальных бандажах, укрепляющих обмотку якоря, которые при вращении якоря пересекают силовые линии магнитного поля машины. Магнитные потери вызывают нагрев сердечника якоря и полюсов, они почти не зависят от нагрузки машины, но резко возрастают с увеличением частоты перемагничивания, т. е. частоты вращения якоря.

Механические потери $\Delta P_{\text{мх}}$ возникают в результате трения: в подшипниках, щеток по коллектору, деталей машины о воздух в процессе вентиляции. Эти потери вызывают нагрев подшипников, коллектора и щеток, с увеличением нагрузки они возрастают незначительно. При повышении частоты вращения якоря электрической машины механические потери резко возрастают.

Добавочные потери $\Delta P_{\text{доб}}$ обуславливаются различными вторичными явлениями, имеющими место при работе электрических машин под нагрузкой: возникновением вихревых токов в проводниках обмотки якоря, неравномерным распределением тока по сечению проводников и индукции в воздушном зазоре машины, воздействием коммутационных токов (в машинах постоянного тока) и переменных потоков рассеяния (в машинах переменного тока), которые индуцируют вихревые токи в крепежных деталях, и др.

При работе электрической машины под нагрузкой ее проводники, лежащие в пазах ротора и статора, пронизываются продольным и поперечным пазовыми потоками (рис. 147). При вра-

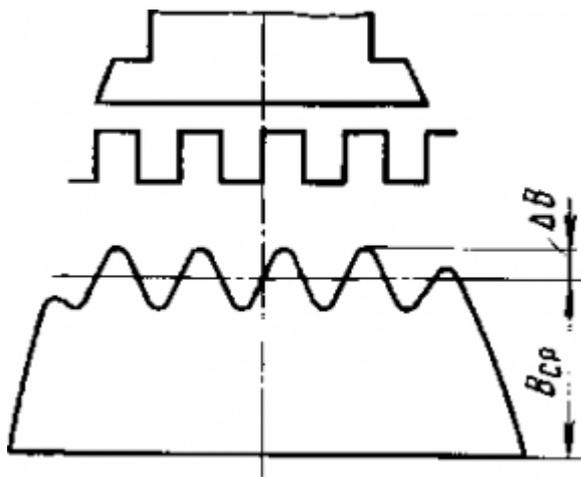


Рис. 146. Распределение индукции в воздушном зазоре машины с зубчатым якорем

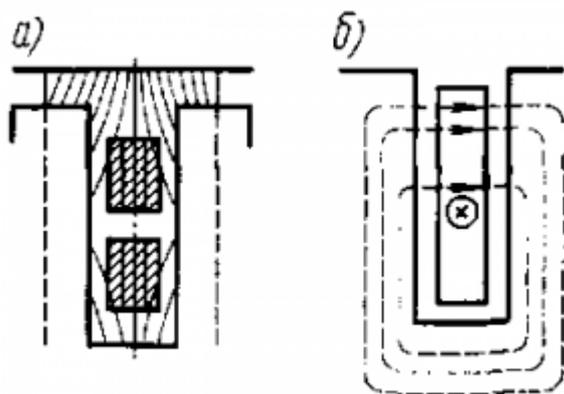


Рис. 147. Схема возникновения продольных (а) и поперечных (б) потоков

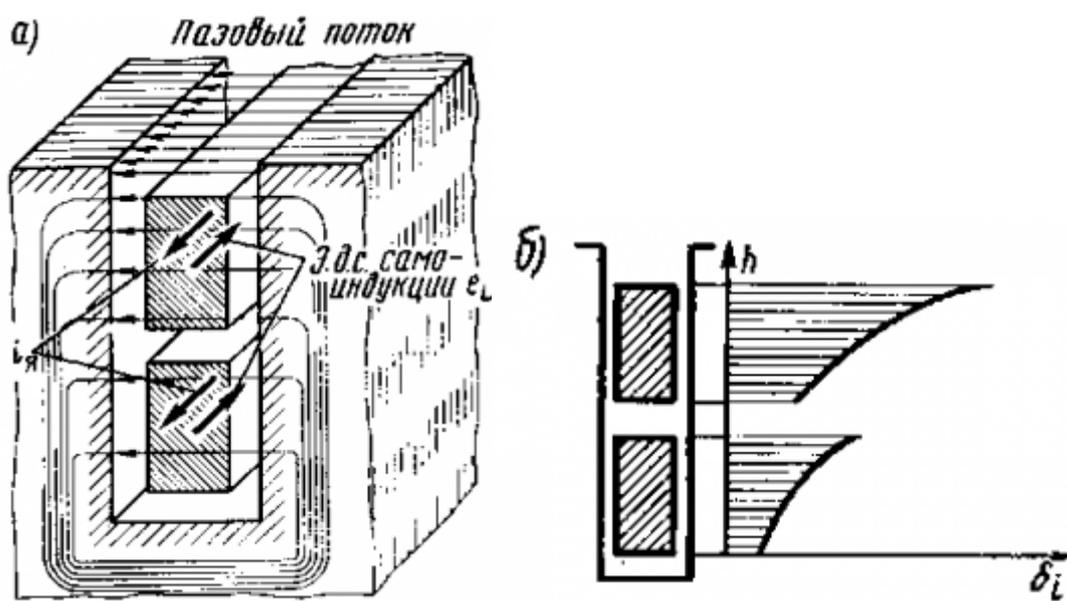


Рис. 148. Вытеснение тока в верхнюю часть проводников обмотки якоря (а) и распределение плотности тока δ_i по их высоте h (б)

щении якоря эти потоки индуцируют в проводниках вихревые токи, так как якорь, непрерывно перемещаясь, проходит под различными полюсами, вследствие чего все время изменяются и пронизывающие его продольный и поперечный пазовые потоки. То же происходит и при изменении тока в проводниках, т. е. нагрузки машины.

Вихревые токи не только увеличивают электрические потери в проводниках обмоток, но и приводят к неравномерному распределению тока по сечению проводников, вызывая вытеснение тока в более удаленные от дна паза слои. Это явление возникает из-за действия индуцируемых поперечными пазовыми потоками э. д. с. самоиндукции e_L (рис. 148, а), которые стремятся противодействовать прохождению по проводникам тока нагрузки i_a . В нижних слоях каждого проводника индуцируются большие э. д. с. e_L , чем в верхних, так как их охватывает большое количество силовых магнитных линий (от нижней части паза до рассматриваемого слоя). Поэтому ток, проходящий по проводникам, несколько вытесняется в верхнюю часть и плотность тока δ_i этой части увеличивается (рис. 148, б). В этом отношении условия прохождения постоянного тока по проводникам обмотки якоря аналогичны условиям прохождения переменного тока, который, как это будет подробно рассмотрено ниже, всегда стремится проходить по наружным слоям проводника. Неравномерное распределение тока по поперечному сечению проводника создает добавочные потери мощности, так как при этом как бы уменьшается площадь поперечного сечения и увеличивается электрическое сопротивление проводников.

Для уменьшения добавочных потерь, связанных с этим явлением, в тяговых двигателях стремятся уменьшить высоту проводников обмотки якоря. Для этого проводники разделяют по высоте паза на две-три параллельно соединенные части (рис. 149, а) или располагают их в пазах плашмя (рис. 149, б). При разделении проводников на несколько частей

каждую из них изолируют отдельно, для того чтобы вихревые токи замыкались только в пределах одной части.

Коэффициент полезного действия. Соотношение между потребляемой и отдаваемой машиной мощностями характеризуется коэффициентом полезного действия: для генератора

$$\mu = P_{эл}/P_{мх} = P_{эл}/(P_{эл}+\Delta P)$$

для двигателя

$$\mu = P_{мх}/P_{эл} = P_{мх}/(P_{мх}+\Delta P)$$

где ΔP — суммарные потери мощности.

К. п. д. стационарных машин постоянного тока колеблется в зависимости от мощности машины в пределах от 0,75 до 0,95 (машины большой мощности имеют более высокий к. п. д.). К. п. д. тяговых двигателей составляет 0,86—0,92, к. п. д. тепловозных генераторов — 0,92—0,94.

При изменении нагрузки отдельные виды потерь изменяются по-разному. Электрические потери $\Delta P_{эл}$ в обмотках, по которым проходит ток нагрузки $I_{я}$ (обмотках якоря, добавочных полюсов и компенсационной), изменяются пропорционально $I_{я}$, электрические потери в щеточном контакте $\Delta P_{щ.эл}$ — пропорционально $I_{я}$, а магнитные $\Delta P_{м}$ и механические $\Delta P_{мх}$ остаются практически постоянными — такими же, как и при холостом ходе, если напряжение машины U и частота ее вращения n не изменяются. По этому принципу все виды потерь можно разделить на две группы: постоянные потери $\Delta P_{пост} = \Delta P_{м} + \Delta P_{мх}$ и переменные $\Delta P_{пер} = \Delta P_{эл} + \Delta P_{щ.эл}$, которые можно считать пропорциональными квадрату тока нагрузки $I_{я}^2$ (обычно значение потерь $\Delta P_{щ.эл}$ мало по сравнению с $\Delta P_{эл}$).

Формула для определения к. п. д. принимает вид

$$\mu = P_2/P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P_{пер} + \Delta P_{пост})$$

где P_2 — полезная мощность, отдаваемая машиной ($P_{эл}$ в генераторах и $P_{мх}$ — электродвигателях); P_1 — потребляемая машиной мощность.

При холостом ходе полезная мощность $P_2 = 0$, поэтому к. п. д. тоже равен нулю (рис. 150). При малых нагрузках магнитные и механические потери, оставаясь постоянными, имеют относительно большое значение по сравнению с полезной мощностью и к. п. д. незначителен. В дальнейшем с увеличением нагрузки полезная мощность P_2 и к. п. д. увеличиваются и при некотором значении $P_{2кр}$ к. п. д. достигает максимального значения. Этот режим соответствует равенству $\Delta P_{пост} = \Delta P_{пер}$ (точка А на рис. 150). Обычно максимум к. п. д. имеет место при 75—85 % номинальной мощности. При дальнейшем возрастании нагрузки к. п. д. начинает падать, так как рост электрических потерь, пропорциональный квадрату

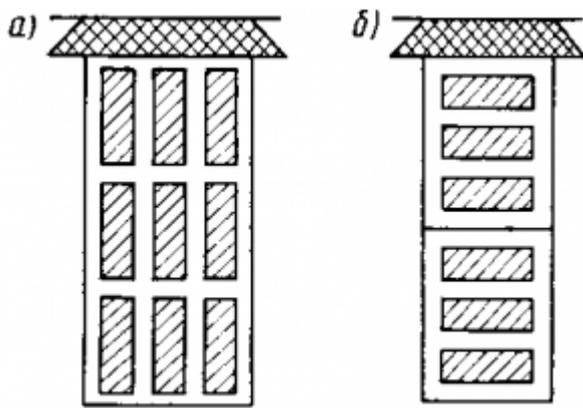


Рис. 149. Вертикальное (а) и

горизонтальное (б) размещение проводников обмотки якоря в пазах

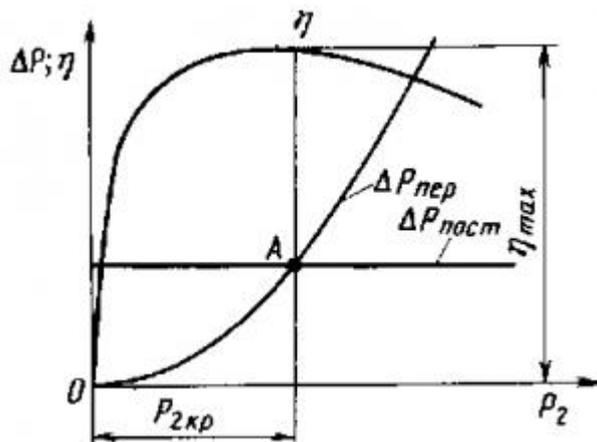


Рис. 150. Зависимости к.п.д. и потерь

мощности от полезной мощности

тока нагрузки $I_{я}^2$, начинает превышать прирост полезной мощности, пропорциональный только первой степени от этого тока.

В зависимости от назначения локомотива целесообразно, чтобы максимальное к. п. д. электродвигателей было при различных нагрузках. Это обеспечивают при проектировании благодаря перераспределению отдельных видов потерь мощности. Например, для тяговых двигателей электропоездов, работающих в условиях частых пусков с большими токами, выгоднее, чтобы максимальный к. п. д. располагался в зоне больших нагрузок, что достигается путем снижения электрических потерь. Для двигателей электровозов и тепловозов, работающих преимущественно при токах, меньших номинального, стремятся, чтобы максимальный к. п. д. находился в зоне средних токов. Добиться этого можно уменьшением магнитных и механических потерь.

Нагревание электрических машин. Нагрузочная способность электрических машин в большинстве случаев определяется условиями нагревания, так как повышение температуры является главной причиной, ограничивающей мощность машины при длительных нагрузках. С увеличением нагрузки возрастают потери энергии в машине, увеличивается количество выделяющегося тепла и при чрезмерной нагрузке температура отдельных ее частей может превысить допустимые пределы.

Процессы нагревания и охлаждения в электрических машинах всех типов подчиняются общим законам, так как любую электрическую машину можно в первом приближении рассматривать как некоторое однородное тело. Тепло, выделяющееся в электрической машине, частично затрачивается на повышение температуры машины, а частично отдается в окружающую среду. Чем больше превышение температуры машины θ над температурой окружающей среды, тем энергичнее идет теплоотдача, поэтому при некотором определенном превышении температуры устанавливается тепловое равновесие; в машине выделяется столько тепла, сколько она отдает в окружающую среду.

Превышение температуры, при котором наступает тепловое равновесие, называется *установившимся превышением температуры t* . После достижения теплового равновесия машина может работать при данной нагрузке сколь угодно долгое время без дальнейшего повышения температуры.

При увеличении нагрузки машины возрастают потери мощности ΔP и количество выделяемого тепла, а также повышается значение t . Следовательно, *чем больше мощность, отдаваемая машиной, тем выше ее температура*. При снятии нагрузки температура машины постепенно снижается.

Для более наглядного представления о характере изменения превышения температуры t во времени по опытным данным строят кривые нагревания и охлаждения электрических машин.

В процессе нагревания и охлаждения превышение температуры машины t над температурой окружающей среды изменяется. При нагревании (например, при увеличении нагрузки) величина P возрастает (кривая 1 на рис. 151, а) от некоторого начального значения P_0 , постепенно приближаясь к установившемуся значению $\theta_{\infty 1}$. При охлаждении (например, при уменьшении нагрузки) величина P уменьшается (кривая 2) до другого установившегося значения $\theta_{\infty 2}$.

Температура, при которой может нормально работать электрическая машина, строго ограничена теплостойкостью ее деталей. Особенно чувствительны к повышению температуры изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, в частности, изоляция проводов их обмоток. Поэтому тепловое равновесие в машине должно устанавливаться при такой температуре, которая не вызывает разрушение изоляции, однако постепенный износ изоляции (ее старение) неизбежен. Чем выше допустимая предельная температура отдельных частей, тем меньше срок службы электрической машины вследствие старения ее изоляции и тем менее

надежна она в эксплуатации. С другой стороны, чем выше эта температура, тем больше можно нагрузить данную машину. Государственными стандартами на электрические машины установлены предельные значения температуры отдельных их деталей. Эти температуры выбраны на основании опытов. Их соблюдение позволяет обеспечить длительную (примерно 15—20 лет) и надежную работу машины при хорошем использовании материалов.

Нормируются превышения температуры различных частей электрической машины по отношению к температуре окружающей среды. Предельные превышения температуры определяются теплостойкостью изоляции, применяемой в электрической машине (классом изоляции).

Мощности продолжительного и часового режимов. В паспорте стационарных электрических машин обычно указывают их номинальную мощность продолжительного режима P_N , т. е. такую мощность, которую машина может отдавать неограниченно долго, не перегреваясь ни в одной своей части свыше значений θ_{\max} , допускаемых нормами. При работе машины в режиме номинальной мощности $P_1 = P_{\max}$ (рис. 151,б) тепловое равновесие практически достигается через 3—6 ч.

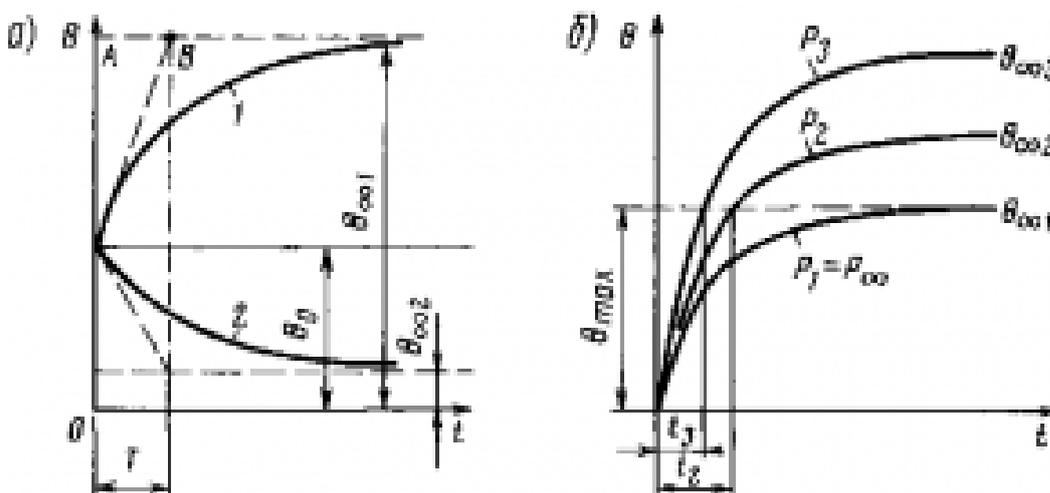


Рис. 151. Кривые нагрева и охлаждения электрической машины

Номинальная мощность P_N зависит от теплостойкости применяемой изоляции и интенсивности охлаждения. Чем выше интенсивность охлаждения, тем большую мощность можно получить от данной машины без

недопустимого превышения ее температуры. Поэтому в большей части электрических машин применяют принудительное охлаждение внутренних деталей воздухом, прогоняемым посторонним вентилятором (при независимой вентиляции) или вентилятором, насаженным на вал самой машины (при самовентиляции).

Таким образом, основными мероприятиями, обеспечивающими увеличение мощности, которую можно получить от электрических машин, является применение более теплостойкой изоляции и усиление интенсивности их охлаждения. Эти меры широко применяют в электромашиностроении, благодаря их использованию удалось в течение последних 50 лет уменьшить примерно в 2—4 раза массу и размеры электрических машин одинаковой мощности.

При работе машины с мощностями P_2 и P_3 , большими, чем P_N (с перегрузкой), величины P_2 и P_3 будут больше максимально допустимого значения θ_{\max} (см. рис. 151,б). Следовательно, длительная работа машины при таких мощностях недопустима и время ее работы должно быть ограничено соответственно значениями t_2 и t_3 . При этом перегрузка должна быть снята прежде, чем температура машины достигнет предельного значения. Чем больше перегрузка, тем быстрее возрастает температура и тем скорее она достигает предельного значения. Поэтому небольшие перегрузки электрические машины могут выдерживать сравнительно длительное время, большие же перегрузки должны быть кратковременными.

При работе тяговых двигателей режим их нагрузки резко меняется в зависимости от профиля пути и массы поезда; эти условия работы тяговых двигателей не позволяют характеризовать их работоспособность одним значением номинальной мощности P_N . Поэтому наряду с номинальной длительной мощностью для характеристики тяговых двигателей используют также понятия часовой и максимальной мощностей. *Часовой мощностью* $P_{\text{ч}}$ (*мощностью часового режима*) называется мощность, при которой машина

может работать в течение 1 ч с нормально действующей вентиляцией от холодного состояния, не перегреваясь свыше предельной температуры. Эта мощность, так же как и θ_{\max} , ограничивается условиями нагревания машины, она позволяет судить о временной перегрузочной способности двигателя. Токи, соответствующие номинальным мощностям P_m и $P_{\text{ч}}$, называются продолжительным и часовым токами тягового двигателя. В паспортах тяговых двигателей указывают обычно их часовую мощность.

Наибольшей мощностью тягового двигателя называется мощность, которую он может кратковременно отдавать (в течение 1 мин) без недопустимого искрения под щетками и возникновения кругового огня; следовательно, она ограничивается условиями коммутации машины. Отношение максимальной мощности к часовой называют *коэффициентом перегрузки*, или перегрузочной способностью машины. По стандарту на тяговые двигатели коэффициент перегрузки их должен быть не менее двух. Отношение P_m/P_1 характеризует интенсивность вентиляции двигателя и называется *коэффициентом вентиляции*. У современных тяговых машин с независимой вентиляцией этот коэффициент составляет 0,8—0,9.

В эксплуатации работа тяговых двигателей с часовой мощностью может иметь место при движении поезда на подъемах. На руководящих подъемах, движение по которым продолжается менее получаса, реализуется мощность несколько большая, чем часовая. При движении на наибольших незатяжных подъемах мощность двигателей может превышать часовую на 10—15 %. При пуске электровозов и тепловозов токи тяговых двигателей могут превышать часовой ток на 60—80 %.

ВЫВОДЫ

1. Наличие зубцов на статоре определяет возникновение поверхностных потерь в роторе, и, наоборот, зубцы ротора вызывают поверхностные потери на статоре. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора.

Список использованных литератур.

1. И.А.Каримов. Наша главная задача – дальнейшее развитие страны и повышение благосостояния народа /И.А.Каримов.- Т.: «Узбекистан», 2010.
- 2.Сандлер А.С; Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М. «Энергия»1974.
- 3.Роддатис К.Ф. Котельные установки. Учеб. пособие для студентов вузов. М. «Энергия».1977.
- 4.С.В.Усов; В.В.Кантан; Е.Н.Кизеветтер; Б.Н.Михалев; А.К.Черновец. Электрическая часть электростанции. Под редакции С.В. Усова. Учебник для вузов. Л. «Энергия» 1977.

- 5.И.П.Копылов; Б.К. Клокова. Справочник по электрическим машинам. Том 1- М. «Энергоатомиздат»1988.
6. Башарин А.В; Новиков В.А; Соколовский Г.Г; Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. Л. «Энергоиздат» 1982.
7. А.Н.Барсуков; С.С.Бодрухина; Ф.К.Бойко; И.А. Будзко; О.А. Бушуева; С.И. Вершинина; М.В.Кудрук; Н.Д. Рыкова; В.Г.Сальников. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Под общ.ред.. А.А. Федорова.- М. «Энергоатомиздат». 1987.
8. А.М. Бакластов; Б.Г. Борисов; В.М. Бродянский; Э.П.Волков; Д.Б.Вольфберг; В.В.Галактионов; В.А. Горбенко; А.К.Городов; В.А. Григорьев. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник. Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М. «Энергоатомиздат». 1991.
- 9.Безпалов В.Я. Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 2006.
- 10.ВольдекА.И; Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Учебник для вузов. 2008
- 11.Ф.М.Фролев.Эксплуатация водяных систем теплоснабжения. 1990.
- 12.В.И; Брускин Д.Э; Зорохович А.Е; Электрические машины: Асинхронные машины. Учеб. для электромех. спец. вузов. Под ред. И.П. Копылова – М. Высшая школа 1988.
16. Интернет сайты:www.ekra.ru.(устройство плавного пуска)
17. **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки. управление)**
- 18.www.vacon.com. (частотное преобразователи)

