

**АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ НОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(АНО ВО «РОСНОУ»)**

Институт информационных систем и инженерно-компьютерных технологий

Кафедра электроэнергетики и электротехники

**Методические указания
к курсовой работе по учебной дисциплине
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

направление: 13.03.02 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**профиль: Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений**

ЭУММ УД рассмотрены и утверждены
на заседании кафедры «26» августа 2020, протокол №1.

И.о. заведующего кафедрой
кандидат технических наук

Бовтрикова Е.В. _____

Автор:

д.т.н., проф,

Логинова Е.Ю.

УДК 629.423.31.001.2

В настоящих указаниях рассмотрены основные этапы выбора параметров асинхронного электродвигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора и приведена методика расчета его рабочей характеристики

Требования к выполнению курсовой работы.

Целью выполнения курсовой работы является :

1. Расчет параметров асинхронного двигателя в соответствии с исходными данными, приведенными в задании;
2. Расчет и построение рабочих характеристик асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики строятся при постоянных значениях фазного напряжения ***U_{ном}***, его частоты ***f_{ном}*** в диапазоне изменения скольжения $0,5s_{ном} \leq s \leq 1,2 s_{ном}$ с шагом $0,1 s_{ном}$.

Для расчета рабочих характеристик рекомендуется использование пакетов Matchcad или Excel.

Пример рабочих характеристик асинхронного двигателя приведен на рис. 7.3, 7.4.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ. Общие сведения.	3
I. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	
1.1. Расчет параметров режима работы двигателя	9
1.2. Расчет параметров ярма статора	13
1.3. Расчет параметров обмотки статора	19
1.4. Расчет параметров ярма ротора и его обмотки	29
1.5. Расчет магнитной цепи	35
1.6. Расчет индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора	44
II РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ И ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК	

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список литературы

ВВЕДЕНИЕ.**Общие сведения**

Асинхронные двигатели являются самым распространенным типом бесколлекторных электрических машин переменного тока. Промышленный выпуск высоковольтной полупроводниковой техники и статических преобразователей напряжения позволяют внедрять электропривод с асинхронными двигателями во всех областях техники: от систем автоматического управления, где используются двигатели мощностью менее 1Вт, до тягового привода мощных транспортных средств, где используются двигатели мощностью более 1000 кВт.

Асинхронной называют машину переменного тока, у которой угловая скорость вращения ротора ω_r отличается от угловой скорости вращения электромагнитного поля ω_1 и изменяется в зависимости от нагрузочного момента.

Асинхронные двигатели классифицируются:

- 1) трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором;
- 2) трехфазные двигатели с фазным ротором;
- 3) двухфазные исполнительные двигатели с короткозамкнутым ротором;
- 4) однофазные двигатели с конденсаторным пуском.

Асинхронные машины общего назначения применяют главным образом в двух исполнениях: с короткозамкнутым (беличья клетка) и с фазным (с контактными кольцами) ротором.

Наибольшее применение имеют трехфазные двигатели, рассчитанные на работу от сети промышленной частоты (50 Гц). Асинхронные двигатели специального назначения для приборов и систем автоматики изготавливаются на повышенные частоты переменного тока (200, 400 Гц и более).

В настоящих методических указаниях рассмотрена методика выбора параметров трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора.

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из статора и ротора (рис.1). Для защиты от внешних воздействий рабочие узлы двигателя располагаются в корпусе. Ротор двигателя с двух сторон устанавливается в подшипниковые узлы. Подшипниковые узлы двигателя также закрепляются в корпусе.

На статоре двигателя располагается трехфазная обмотка, выполненная по схеме “звезда” или “треугольник”. Фазы обмотки сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 120° эл. Обмотка статора подключается к источнику трехфазного переменного напряжения. Если обмотка ротора выполняется по типу “беличья клетка”, то она представляет собой токопроводящие стержневые элементы, закрепленные в токопроводящем короткозамкнутом кольце.

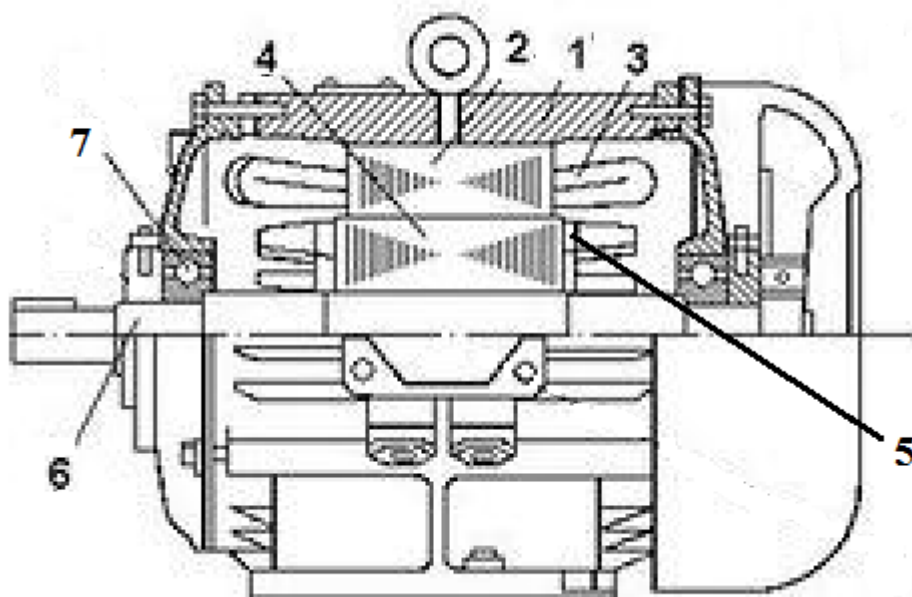


Рис. 1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора
1 – корпус, 2 - ярмо статора, 3 – обмотка статора, 4 – ярмо ротора, 5 – короткозамыкающее кольцо обмотки ротора, 6 – вал, 7 – подшипниковый узел

Двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора конструктивно проще, чем двигатель с фазной обмоткой ротора, надежнее в работе, дешевле, но пусковые характеристики у него хуже.

При включении обмоток статора в сеть трехфазного тока, в машине возникает вращающееся магнитное поле, угловая скорость вращения которого определяется выражением

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (1)$$

где f_1 - частота напряжения питающей сети,
 p – число пар полюсов.

Поле, сцепляясь с обмоткой якоря, наводит в ней ЭДС. При этом в стержнях обмотки ротора появится ток. В результате взаимодействия тока с вращающимся магнитным полем на роторе возникают электромагнитные силы. Совокупность этих сил создает электромагнитный вращающий момент, под действием которого ротор приходит во вращение в сторону вращения поля статора с угловой скоростью $\omega_2 < \omega_1$.

Если $\omega_2 = \omega_1$ и направления вращения поля и ротора совпадают, то электромагнитного взаимодействия между обмоткой статора и обмоткой ротора нет, так как проводники ротора не будут пересекаться магнитными силовыми линиями вращающегося поля статора, а, следовательно, ЭДС в роторе будет равна нулю.

Непременным условием взаимодействия статора и ротора асинхронной машины является наличие разности скоростей вращения $\omega_1 - \omega_2$.

Величина, которая характеризует эту разность, называется скольжением. Относительное скольжение ротора относительно электромагнитного поля определяется как

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \quad (2)$$

В зависимости от соотношения ω_2 и ω_1 различают три режима работы асинхронной машины (рис. 2):

- 1) двигательный режим, когда $\omega_2 < \omega_1$, а векторы угловых скоростей направлены в одну сторону, при этом величина скольжения может принимать значения в пределах $0 < s \leq 1$;
- 2) генераторный режим $\omega_2 > \omega_1$, а векторы угловых скоростей направлены в одну сторону; при этом величина скольжения может принимать значения в пределах $-\infty < s < 0$;
- 3) режим электромагнитного торможения, когда $\omega_2 < \omega_1$, а векторы угловых скоростей направлены в разные стороны; при этом величина скольжения может принимать значения в пределах $1 < s < +\infty$

Регулирование скорости вращения ротора двигателя в широком диапазоне осуществляется изменением частоты питающего напряжения, изменением числа пар полюсов p или изменением значения скольжения.

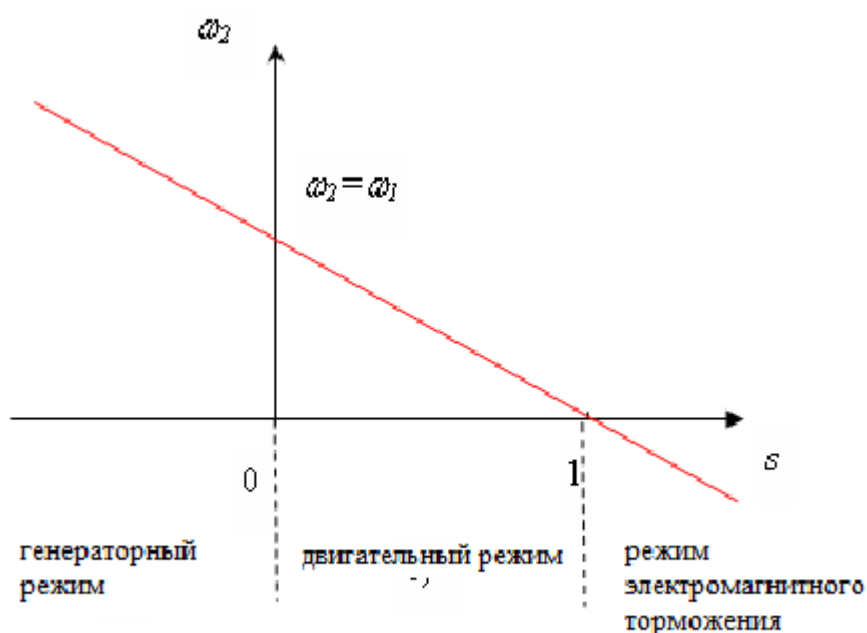


Рис. 2. Режимы работы асинхронного двигателя

Характеристики асинхронных двигателей

Механические характеристики асинхронных двигателей представляют собой зависимости угловой скорости ротора от электромагнитного момента $\omega_2 = f(M)$ или момента от угловой скорости ротора $M = f(\omega_2)$. Часто в качестве механической характеристики удобнее использовать зависимости момента от скольжения ротора $M = f(s)$. Вид механических характеристик асинхронного двигателя представлен на рис. 3.

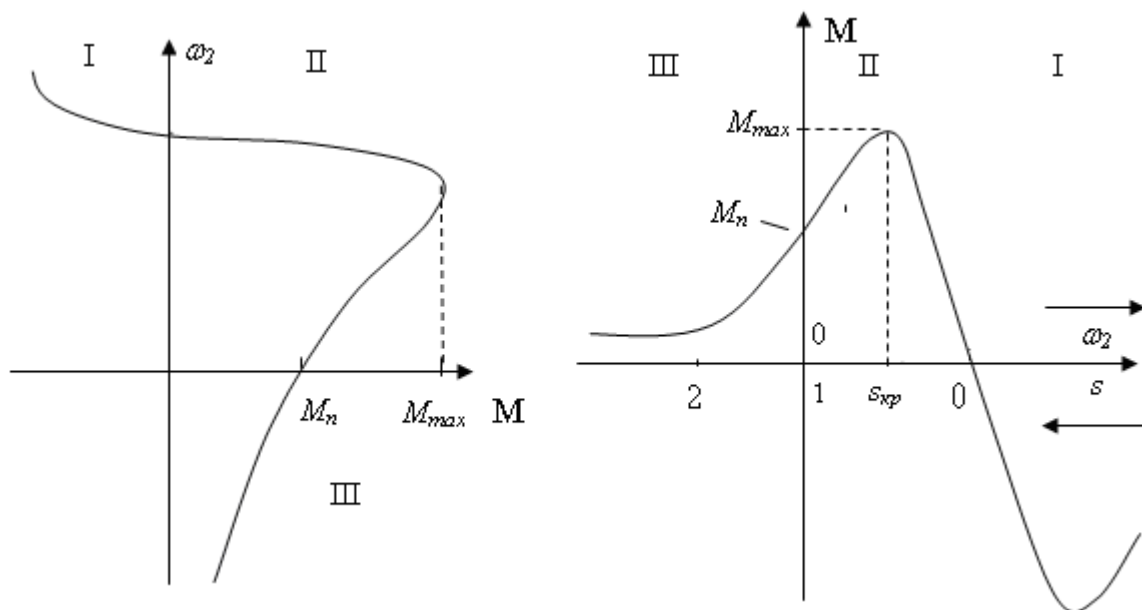


Рис. 3. Механические характеристики асинхронного двигателя: I- генераторный режим; II- двигательный режим; III- режим электромагнитного торможения

В соответствии с механической характеристикой пусковой момент двигателя соответствует $\omega_2 = 0$ (ротор не вращается), его значение составляет $M_n = (0,3 \div 0,7) M_{max}$.

Максимум электромагнитного момента достигается при скорости вращения ротора двигателя $\omega_2 = (0,8 \div 0,9) \omega_1$. При $\omega_2 = \omega_1$ электромагнитный момент равен нулю.

Максимальное значение электромагнитного момента двигателя M_{max} соответствует пределу устойчивости асинхронного двигателя и значению критического скольжения $s_{кр}$. В диапазоне значений скольжения $0 < s < s_{кр}$ увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает увеличение электромагнитного момента; при достижении электромагнитным моментом максимального значения наступает предел устойчивости работы асинхронного двигателя; дальнейшее увеличение значения $s > s_{кр}$ вызовет уменьшение момента двигателя независимо от значения момента нагрузки. Таким образом, работа асинхронного двигателя становится неустойчивой при скольжениях $s > s_{кр}$. При максимальном электромагнитном моменте M_{max} и $s = s_{кр}$ любое незначительное увеличение нагрузочного момента приводит к увеличению скольжения и уменьшению

электромагнитного момента и этот процесс будет продолжаться до полной остановки ротора двигателя. Следовательно, для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы сумма нагрузочных моментов, действующих на ротор, была меньше максимального момента M_{max} . Характеристикой надежности работы двигателя в условиях случайных кратковременных перегрузок, является перегрузочная способность λ . Она определяется отношением максимального момента к номинальному $\lambda = M_{max}/M_{ном}$; для большинства асинхронных двигателей $\lambda = 1,7 \div 2,5$.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости скорости вращения ротора ω_2 , кпд η , механического момента на валу двигателя M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и тока статора I_1 от мощности на валу двигателя P_2 при $U_1 = const$ и $\omega_1 = const$. Их определяют экспериментально или расчетным путем по схемам замещения. Рабочие характеристики строят только для зоны устойчивой работы двигателя, т.е. до скольжения $(1,1 \div 1,2)s_{ном}$. Примерный вид рабочих характеристик асинхронного двигателя приведен на рис. 4.

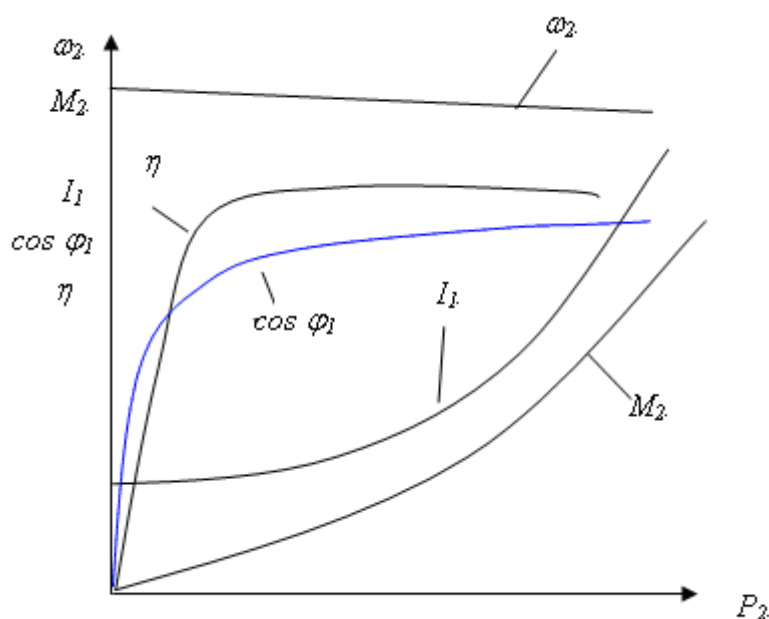


Рис. 4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя определяются как зависимости кпд η , механического момента на валу двигателя M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, тока статора I_1 и приведенного значения тока ротора I_2' от скольжения ротора s при $U_1 = const$ и $\omega_1 = const$

I. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Допустимые нагрузки асинхронного двигателя

В соответствии с ГОСТ 7217-87 “Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные” расчет параметров двигателя выполняется для номинального режима.

Этому режиму должны соответствовать допустимые нагрузки двигателя.

1.1. Допустимое значение частоты вращения ротора. Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного двигателя имеет жесткую конструкцию без лобовых частей. Поэтому при вращении ротора не возникает опасности ее механического разрушения.

Лимитирующим узлом в отношении механических нагрузок у асинхронного двигателя являются подшипники, в которых закрепляется вал ротора. Если в двигателе не используются подшипники специального назначения, то максимально допустимая частота вращения ротора $n_{2\max} = 2200 \text{ об/мин}$.

1.2. Допустимое значение электромагнитной нагрузки. Момент, создаваемый асинхронным двигателем, возникает в результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, с током, протекающим в обмотке ротора. Поэтому магнитная цепь машины имеет определяющее значение в работе двигателя. При увеличении магнитного потока происходит насыщение ярма статора и ротора. Для электротехнических сталей, которые используются при изготовлении ярма машины предельное значение магнитной индукции составляет 2,3...2,4 Тл.

1.3. Допустимое значение тепловой нагрузки. Лимитирующим узлом по тепловым нагрузкам у асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора является изоляция обмотки статора. Одним из основных показателей изоляции является ее класс нагревостойкости, который характеризуется значением теплового фактора

$$Aj = A \cdot j, \quad (1.1)$$

где A - линейная нагрузка обмотки статора, j - плотность тока в проводниках обмотки статора.

В настоящее время для двигателей используется изоляция из стекловолокна классов нагревостойкости F и H . Допустимое значение теплового фактора для изоляции класса нагревостойкости F $(Aj)_F = 3600 \text{ A}^2 / \text{см} \cdot \text{мм}^2$, а для класса нагревостойкости H - $(Aj)_H = 4200 \text{ A}^2 / \text{см} \cdot \text{мм}^2$.

1.4. Допустимое значение частоты питающего напряжения. При частотном управлении скоростью вращения ротора двигателя обмотка статора подключается к источнику напряжения через статический преобразователь – инвертор. Принцип работы инвертора состоит в преобразовании постоянного напряжения в переменное напряжение заданной частоты с помощью коммутации электронных ключей (тириستоров или транзисторов). Поскольку

электронные ключи имеют конечное время коммутации, то для инверторов общего назначения принимается, что максимальное значение частоты питающего напряжения не должно превышать $f_{max}=150$ Гц.

1.1. Расчет параметров режима работы двигателя

На практике расчет параметров асинхронного двигателя выполняется для номинального режима в предположении, что двигатель работает от синусоидального источника напряжения. В настоящее время для питания асинхронных двигателей специального назначения используются статические преобразователи - инверторы напряжения или тока. На выходе инвертора форма напряжения значительно отличается от синусоидальной. Так как инвертор работает на противо-ЭДС статорной обмотки двигателя, имеющую синусоидальную форму, то ток в фазе определяется разницей между приложенным ступенчатым напряжением и синусоидальной противо-ЭДС. Однако расчет двигателя ведется на основную гармоническую составляющую фазного напряжения. В дальнейшем – если это важно - при расчете характеристик двигателя учитывается, что напряжение на его входе имеет сложный гармонический состав, который определяется типом инвертора и характеристиками самого асинхронного двигателя.

Исходными данными для расчета асинхронного двигателя являются механическая мощность (мощность на валу двигателя) $P_{2\text{ном}}$, значение линейного (или фазного) напряжения на входе $U_{\Delta 1\text{ном}}$, номинальная $n_{\text{ном}}$ и максимальная $n_{\text{ном}}$ частоты вращения ротора.

Расчет электрических параметров режимов работы асинхронного двигателя сводится к определению ориентировочных значений электрических и механических нагрузок двигателя, по которым выбираются его конструктивные параметры.

Габариты электрической машины и размеры ее основных узлов определяются ее полной электрической мощностью Q_1 , которая подводится к двигателю в виде электрической мощности (рис. 1.1).

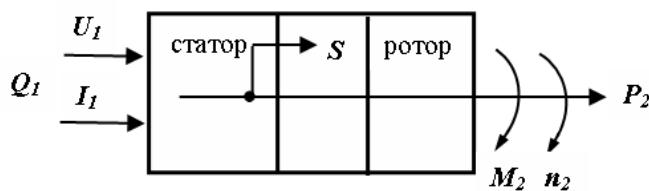


Рис. 1.1. Передача энергии в асинхронном двигателе

Значение полной мощности трехфазного двигателя

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1, \quad (1.2)$$

где $m_1 = 3$ - число фаз обмотки статора, U_1 - действующее значение напряжения фазы обмотки статора, I_1 - действующее значение тока фазы обмотки статора.

В двигателе полная мощность раскладывается на две составляющие – реактивную мощность S_1 и активную мощность P_1 . Реактивная составляющая мощности S_1 расходуется

на создание магнитного поля в двигателе, а активная составляющая мощности P_1 передается по энергетической цепи двигателя, преобразуясь в механическую мощность на валу двигателя P_2 .

Полная мощность двигателя с ее активной и реактивной составляющими связана соотношением

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 + P_1^2} \quad (1.3)$$

Активная составляющая электрической мощности

$$P_1 = Q_1 \cdot \cos \varphi = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cos \varphi, \quad (1.4)$$

а реактивная составляющая электрической мощности

$$S_1 = Q_1 \cdot \sin \varphi = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \sin \varphi, \quad (1.5)$$

где $\cos \varphi$ - коэффициент мощности двигателя.

Механическая мощность на валу двигателя P_2 будет определяться значением активной мощности на входе двигателя P_1 , за вычетом полных потерь в двигателе $\sum \Delta P$

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P \quad (1.6)$$

или моментом на валу двигателя

$$P_2 = M_2 \cdot \omega_2 = M_2 \cdot 2\pi \cdot n_2, \quad (1.7)$$

где M_2 – механический момент на валу двигателя [Нм], ω_2 - угловая скорость ротора двигателя [рад/с], а n_2 – частота вращения ротора [1/с].

Как известно, активная составляющая входной мощности и выходная мощность связаны также значением коэффициента полезного действия

$$\eta = \frac{P_1 - \sum \Delta P}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.8)$$

Соответственно мощности, ток I_1 , протекающий в обмотке статора может быть представлен суммой активного тока

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi, \quad (1.9)$$

и реактивного тока

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi. \quad (1.10)$$

Согласно (1.3)

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}. \quad (1.11)$$

Следует также напомнить, что для синусоидального трехфазного напряжения его линейное значение $U_{1\Lambda}$ связано с фазным значением U_1 соотношением

$$U_{1\Lambda} = \sqrt{3} U_1 \quad (1.12)$$

Для расчета основных параметров номинального режима работы двигателя необходимо по значению механической мощности $P_{2\text{ ном}}$ определить значение его полной мощности $Q_{I\text{ ном}}$. Для этого первоначально определяется активная мощность на входе в двигатель $P_{I\text{ ном}}$, задавшись ориентировочным значением номинального коэффициента полезного действия $\eta_{\text{ ном}} \approx 0,94$ по характеристикам двигателя-прототипа. Тогда в соответствии с (6)

$$P_{I\text{ ном}} = \frac{P_{2\text{ ном}}}{\eta_{\text{ ном}}}$$

На втором этапе, по значению активной мощности $P_{1\text{ ном}}$ рассчитывается полная мощность на входе двигателя (5)

$$Q_{1\text{ ном}} = \frac{P_1}{(\cos \varphi)_{\text{ном}}},$$

или

$$Q_{1\text{ ном}} = \frac{P_1}{(\cos \varphi)_{\text{ном}}} = \frac{P_{2\text{ ном}}}{\eta' (\cos \varphi)_{\text{ном}}},$$

где $(\cos \varphi)_{\text{ном}} \approx 0,84$ - ориентировочное значение номинального коэффициента мощности двигателя-прототипа.

Поскольку полная мощность двигателя определяется электрическими параметрами режима работы двигателя, то по (1.2) можно определить предварительное значение номинального тока его статорной обмотки

$$I_{1\text{ ном}} = \frac{Q_{1\text{ ном}}}{m_1 U_{1\text{ ном}}}.$$

Вследствие того, что габарит и масса электродвигателя определяются отношением $\frac{P_{2\text{ ном}}}{n_2}$, желательно возможный скоростной диапазон двигателя использовать полностью,

т.е. обеспечить работу двигателя с возможно большей частотой вращения ротора. Для этого конструктивной скорости тепловоза $V_{\text{констр}}$ должна соответствовать допустимая частота вращения ротора двигателя, которая по механической прочности подшипников не должна превышать $n_{2\text{ max}}$. Одновременно при частоте вращения ротора $n_{2\text{ max}}$ не должна быть превышена максимально допустимая частота питающего напряжения, при которой обеспечивается устойчивая коммутация электронных ключей инвертора, т.е. 150Гц.

Частота вращения электромагнитного поля двигателя при номинальном режиме работы

$$n_{1\text{ ном}} = \frac{n_{2\text{ ном}}}{1 - s_{\text{ном}}}, \quad (1.13)$$

где $s_{\text{ном}}$ - номинальное скольжение ротора.

Опыт проектирования показывает, что для асинхронных двигателей оптимальные значения скольжения (при которых удастся получить наибольшее значение механического момента) составляют

$$s_{\text{ном}} = (3 \div 4)\%.$$

Из теории асинхронной машины известно, частота питающего напряжения связана с частотой вращения поля n_1 соотношением:

$$f_1 = p \cdot n_1, \quad (1.14)$$

где p - число пар полюсов.

В то же время, частота вращения ротора асинхронного двигателя зависит от частоты вращения электромагнитного поля в воздушном зазоре и определяется как

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s_{\text{ном}}) \quad (1.15)$$

Решив совместно (4) и (5) можно определить, какое число пар полюсов должен содержать электродвигатель:

$$p \approx \frac{f_{1\max}}{n_{2\max}}(1 - s_{\text{ном}}) \quad (1.16)$$

Как правило, для электродвигателей $p = 3$ или $p = 4$. Значение p принимается из условия, чтобы при максимальной частоте вращения ротора $n_{2\max}$ частота питающего напряжения не превышала допустимого значения $f_{1\text{ном}}$.

Расчет параметров режимов работы асинхронного двигателя

При заданной частоте питающего напряжения f_1 [Гц], частота вращения электромагнитного поля в воздушном зазоре

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad [1/c] \quad (1.17)$$

Относительное скольжение асинхронного двигателя определяется как

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.18)$$

где n_2 – частота вращения ротора, [1/с].

С учетом [1.18] частота вращения ротора двигателя

$$n_2 = n_1(1 - s), \quad [1/c] \quad (1.19)$$

1.2. Расчет параметров ярма статора

Параметры статора определяются возможностью размещения активной части машины в заданных габаритах и размещением требуемого числа витков обмотки статора в его пазах.

Ярмо статора изготавливается шихтованным из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

Параметры статора определяются возможностью размещения активной части машины в заданных габаритах.

Толщина остова h_j рассчитывается из условия крепления подшипников ротора; ориентировочно для двигателей $P_l > 100$ кВт можно принять $h_j = 17 - 20$ мм (рис. 2.1).

Внешний диаметр активной части статора D_a принимают меньше, чем полученное значение D_j на 2 мм:

$$D_a = D_j - 2 \text{ мм}. \quad (2.1)$$

Если заданы предельные габариты машины, то наружный (внешний) диаметр статора D_a необходимо принимать в соответствии с заданием и рядом нормальных

габаритов (рис. 2.1). Ярмо статора изготавливают из дорогостоящей электротехнической стали и отходы материала при штамповке его листов должны быть минимальными. В соответствии с этим требованием разработан нормальный ряд диаметров статора, рекомендуемый при изготовлении листов ярма статора (табл. 2.1).

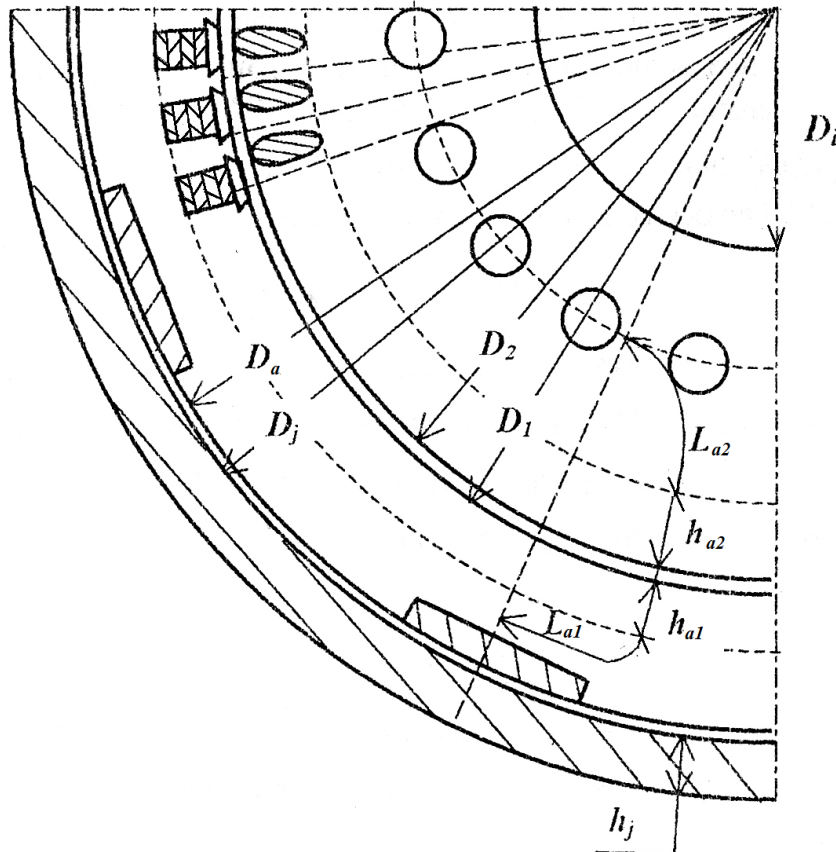


Рис. 2.1. К расчету параметров асинхронного двигателя

Таблица 2.1

Внешние диаметры пакетов статора асинхронной машины

Габарит №	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Диаметр D_a , мм	208	248	291	343	393	458	590	740	850	990	1180	1430

Диаметры D_a габаритов 1-9 применяются для пакетов статоров двигателей мощностью 0,6-100 кВт.

Для двигателей мощностью 300 кВт и менее целесообразно принимать габарит №11.

Для двигателей большей мощности - габарит №12.

Внутренний диаметр ярма статора D_1 определяется рекомендуемыми значениями индукции в ярме статора и высотой паза статора. Первоначально значение D_1 принимается исходя из того, что

$$D_1 = (0,7...0,8)D_a \quad (2.2)$$

Окончательное значение D_i определяется рекомендуемыми значениями индукции в ярме статора $B_j \leq 1,4 \text{ Тл}$.

Для уменьшения тока намагничивания двигателя и повышения коэффициента мощности воздушный зазор двигателя делают $\delta = 1,5 \div 2 \text{ мм}$ (рис. 2.1).

В пазах сердечника статора размещается трехфазная обмотка, которая подсоединяется к сети переменного тока. Фазы обмотки соединяются по схеме “звезда” или многоугольник. Между собой обмотки фаз смещены на угол $360/m_1$ град; для трехфазной обмотки этот угол равен 120° . Начала проводников обмоток обозначаются буквами A, B и C (или a, b и c), а концы проводников обмоток X, Y и Z (или x, y и z) (рис. 2.2,а)

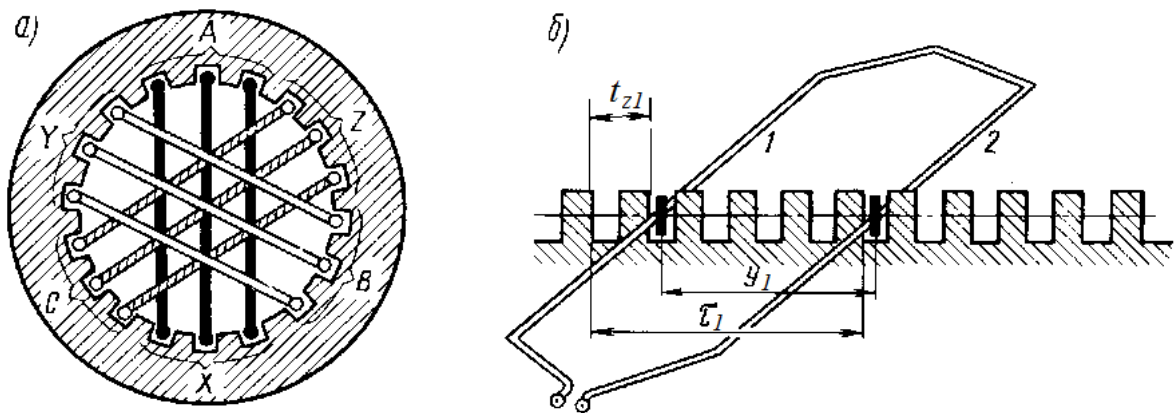


Рис. 2.2. Расположение трехфазной обмотки на статоре (а); расположение витка обмотки в пазах статора (б)

Обмотки фаз выполняются из отдельных катушек, соединенных последовательно. В данном случае под катушкой подразумеваются несколько последовательно соединенных витков обмотки статора, размещенных в одних и тех же пазах и имеющих общую изоляцию относительно стенок паза. В свою очередь витком считаются два активных (т. е. расположенных в самом сердечнике статора) проводника 1 и 2 (рис. 2.2.б), уложенных в двух пазах под соседними разноименными полюсами и соединенных друг с другом последовательно. Проводники, расположенные вне сердечника статора и соединяющие активные проводники между собой, называются лобовыми частями обмотки. Прямолинейные части катушек обмоток, уложенные в пазы, называются сторонами катушек или пазовыми частями.

Пазы статора, в которые укладываются обмотки, образуют на внутренней стороне статора зубцы. Расстояние между соседними зубцами сердечника статора, измеренное по его поверхности, обращенной к воздушному зазору, называется зубцовым делением (зубцовым шагом) или пазовым делением t_{z1}

$$t_{z1} = b_{\Pi 1} + b_{z1}, \quad (2.3)$$

где $b_{\Pi 1}$ и b_{z1} – ширина паза статора и ширина зубца статора.

Под полюсным делением статора (см. рис. 2.2.б) понимается длина окружности расточки сердечника статора, приходящаяся на один полюс. Величина полюсного деления может быть найдена по формуле

$$\tau_1 = \frac{\pi D_1}{2p} \quad (2.4)$$

где D_1 — диаметр расточки статора, м; $2p$ — число полюсов обмотки статора.

Полюсное деление может быть также выражено числом пазовых делений, заключенных между осями соседних полюсов.

Катушки обмоток статора характеризуются определенным числом витков w_1 и шагов y_1 . Шаг катушки определяется числом зубцовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые укладываются проводники катушек. Шаг катушки считается полным — диаметральный, если он равен полюсному делению, измеренному в числе зубцов, приходящихся на один полюс, т. е.

$$y_1 = \tau_1 = \frac{Z_1}{2p}, \quad (2.5)$$

где Z_1 — число зубцов обмотки статора.

Если шаг меньше полюсного деления, то он носит название укороченного.

Центральный угол, соответствующий полюсному делению, составляет в двухполюсном электродвигателе 180°, в четырехполюсном 90°, в шестиполюсном 60° и т. д. Принято считать угол, соответствующий полюсному делению, равен 180 *электрических градусов* [эл. град]. Тогда число электрических градусов в окружности расточки для двигателя, имеющего $2p$ полюсов, составит $180 \cdot 2p$.

Катушка с укороченным шагом может характеризоваться некоторым коэффициентом укорочения a , который выражается отношением шага катушки y_1 к величине полюсного деления τ_1 , т. е.

$$a = \frac{y_1}{\tau_1}$$

Укорочение шага приводит к снижению ЭДС, индуцируемой в катушке, так как при этом обе стороны витка не находятся одновременно под центрами соседних разноименных полюсов. Однако такое исполнения катушек имеют и ряд положительных сторон: экономия меди за счет лобовых частей, облегчение укладки катушек в пазы статора. Кроме того, при этом улучшаются электрические показатели двигателя за счет снижения так называемых высших гармонических, которые увеличивают потери и ухудшают форму электромагнитного поля.

Катушки одной фазы обмотки статора, расположенные в соседних пазах и соединенные друг с другом последовательно, объединяются в так называемую катушечную группу. В свою очередь катушечные группы могут соединяться внутри каждой фазы последовательно или объединяться в параллельные ветви. Параллельные

ветви присоединяются к внешним зажимам фазы. Число параллельных ветвей фазы обмотки статора a_1 является одним из ее показателей.

В пазы статора асинхронного двигателя закладывается двухслойная обмотка. Отличие двухслойной обмотки от однослойной заключается в том, что в пазы статора закладываются стороны двух катушек. Одна сторона катушки размещается на дне паза, а другая - в части паза, прилегающей к расточке статора (рис. 2.2,б, 2.3,а,б). При двухслойном выполнении обмоток статора все катушки изготавливаются одинаковыми, что упрощает и удешевляет производство и делает их более технологичными.

Одним из главных преимуществ двухслойных обмоток по сравнению с однослойными является возможность существенного влияния на форму поля обмотки с помощью укорочения шага. Указанные выше преимущества двухслойных катушек обеспечили их практическое применение в подавляющем большинстве машин переменного тока средней и большой мощности.

Однослойные обмотки (рис. 2.3,в) имеют ряд преимуществ по сравнению с двухслойными при использовании их для сравнительно малых асинхронных двигателей. В этих обмотках отсутствует изоляционная прокладка в середине паза, что существенно улучшает использование объема паза и увеличивает коэффициент его заполнения. Кроме того, при изготовлении мелких машин мощностью до 4—5 кВт с мягкими всыпными однослойными катушками (рис. 2.3.а), которые закладываются в пазы статора одновременно обеими сторонами, появляется возможность использования автоматических или полуавтоматических станков для укладки обмоток.

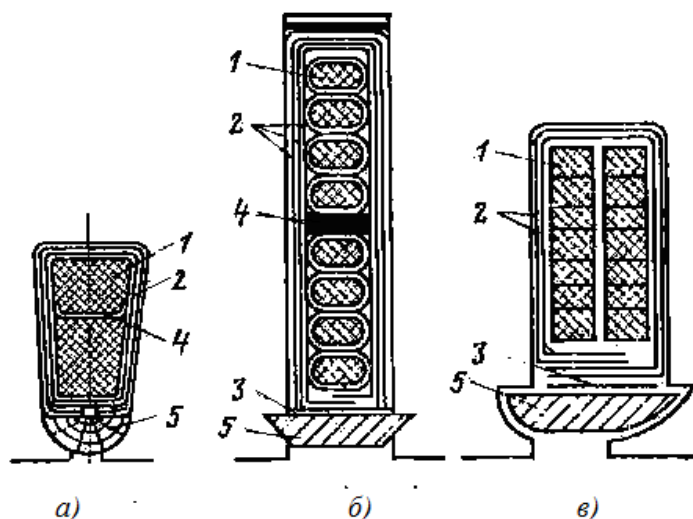


Рис. 2.3. Пазы и обмотки статора

а) — полужакрытый паз, обмотка двухслойная; б) — открытый паз, обмотка двухслойная; в) — полуоткрытый паз, обмотка однослойная; 1 — обмоточный провод; 2 — пазовая коробка; 3 — прокладка под клином; 4 — прокладка между слоями; 5 — пазовый клин

На рис. 2.4. приведена схема простой однослойной обмотки статора.

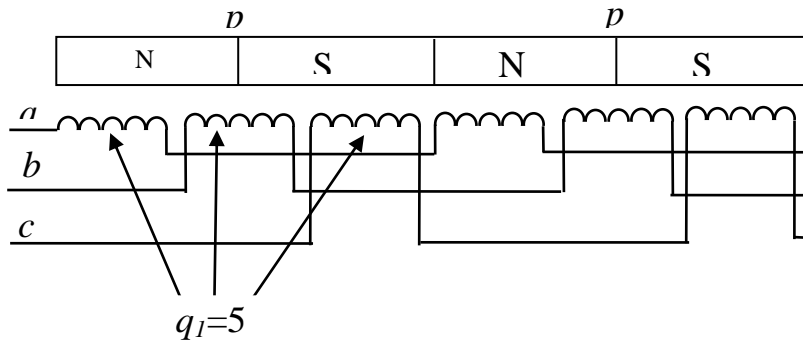


Рис. 2.4. Схема простой однослойной обмотки статора с $q_1=5$ и $p=2$

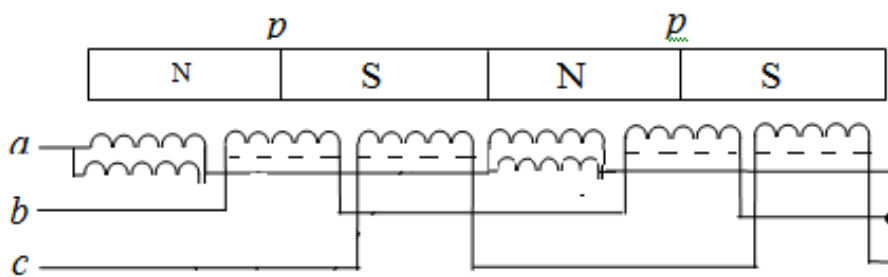


Рис. 2.4. а Схема двухслойной обмотки статора с $q_1=5$ и $p=2$

Ориентировочно, число витков одной фазы обмотки статора w_1 может быть определено из значения трансформаторной ЭДС фазы

$$E_{1ном} = 4,44 \cdot (w_1 \cdot k_{об1}) \cdot f_{1ном} \cdot \Phi_{ном}, \quad (2.6)$$

где $\Phi_{ном}$ - номинальное значение магнитного потока машины, $k_{об1}$ - обмоточный коэффициент фазы обмотки статора.

Поскольку все электрические машины имеют очень маленькие значения сопротивлений обмотки, для номинального режима работы можно считать

$$E_{1ном} \approx 0,96 U_1. \quad (2.7)$$

Значения $k_{об1}$ изменяются в диапазоне $k_{об1} = 0,96-1,0$ (в зависимости от типа обмотки); если обмотка распределенная – как обмотка статора асинхронного двигателя (рис. 2.2, 2.4) - $k_{об1} < 1,0$, если сосредоточенная – как короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного двигателя или обмотка главных полюсов двигателя постоянного тока $k_{об1} = 1,0$.

Значение номинального магнитного потока $\Phi_{ном}$ определяется, в основном, площадью сечения магнитопровода; ориентировочно его значение для электродвигателей мощностью 100...600 кВт можно принять $\Phi_{ном} \approx 0,08 \text{ Вб}$. Тогда на основании (2.5) и (2.6)

можно ориентировочно определить необходимое число витков одной фазы обмотки статора

$$w_1' = \frac{0,96 \cdot U_1}{4,44 \cdot (k_{об1}') \cdot f_{1ном} \cdot \Phi_{ном}'} \quad (2.8)$$

где $\Phi_{ном}'$, $k_{об1}'$ - ориентировочные значения номинального магнитного потока машины и обмоточного коэффициента фазы обмотки статора.

Как правило, для тепловозных асинхронных двигателей значение w_1' достаточно велико, что не позволяет разместить на статоре двухслойную обмотку. В этом случае применяют комбинированную обмотку, каждая катушка которой состоит из двух витков эффективного проводника. В этом случае обмотка статора получается четырехслойной.

После того, как определено необходимое ориентировочное число витков обмотки статора, необходимо рассмотреть возможность ее компоновки на статоре.

При расчете параметров статора используют вспомогательную величину - число пазов на полюс и фазу q_1 , т.е. число пазов одной фазы, например, фазы a , приходящихся на одну полюсную систему N-S.

Для выполнения симметричной обмотки величина q_1 должна принимать любое целое значение $q_1 = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$. Из рисунка 2.4 следует, что данная электрическая машина имеет две пары полюсов, т.е. $2p=4$, а число витков в одной фазе $w_1=10$. Таким образом, число пазов на полюс и фазу для данной однослойной обмотки

$$q_1 = \frac{2w_1}{2p} = 5, \quad (2.9)$$

или число витков в одной фазе $w_1 = p \cdot q_1$.

Отсюда следует, что величина w_1' , рассчитанная по (2.7) не может иметь произвольное значение; при выборе параметров обмотки статора надо принять такое целое значение q_1 , чтобы число витков в фазе обмотки статора $w_1 \rightarrow w_1'$.

Общее число витков обмотки статора при симметричной однослойной обмотке

$$W_1 = m_1 \cdot w_1 = m_1 \cdot p \cdot q_1. \quad (2.10)$$

Каждый виток обмотки имеет две стороны (рис. 2.2), следовательно, при однослойной обмотке число пазов на статоре должно быть равно $Z_1 = 2 \cdot W_1$.

Статоры тепловозных асинхронных двигателей имеют как правило простую петлевую обмотку или комбинированную обмотку. При использовании двухслойной петлевой обмотки

$$Z_1 = \frac{2 \cdot W_1}{2} = W_1. \quad (2.11)$$

При двухслойной комбинированной обмотке статора

$$Z_1 = \frac{2 \cdot W_1}{4} = \frac{W_1}{2}. \quad (2.12)$$

Опыт проектирования асинхронных двигателей показывает, что его весогабаритные показатели будут наилучшими, если ширина паза $b_{пз}$ и ширина зубца $b_{зл}$ имеют примерно одинаковые значения, т.е. $b_{пз} \approx b_{зл}$. Тогда в соответствии с (2.3) можно считать, что ориентировочное значение зубцового шага $t_{зл} \approx 2b_{зл}$.

Поскольку электротехническая сталь – хрупкий материал, сечение зубца статора b_{z1} не может быть менее 8мм.

Тогда максимально возможное число пазов на статоре

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{z1\min}} = \frac{\pi \cdot D_1}{0,016} . \quad (2.12)$$

Сопоставляя значения W_1 и $Z_{1\max}$ можно определить, сколько слоев должна иметь обмотка статора, а соответственно и тип обмотки. При этом должно выполняться условие

$$Z_1 \leq Z_{1\max} .$$

Принятое по (2.11) или (2.12) число зубцов статора позволяет рассчитать зубцовый шаг обмотки

$$t_{z1} = \frac{\pi D_1}{Z_1} . \quad (2.13)$$

1.3. Расчет параметров обмотки статора

Типы обмотки статора и обмоточный коэффициент.

Для статоров асинхронных двигателей могут применяться обмотки различных типов:

- петлевая;
- волновая;
- комбинированная (лягушачья).

В петлевой обмотке (рис. 3.1) при обходе каждой фазы совершается движение петлеобразной формы, а в волновой обмотке (рис. 3.2) — движение волнообразной формы. Комбинированная обмотка применяется, когда фаза должна иметь большое число витков, а диаметр статора не позволяет разместить петлевую или волновую обмотку.

При выборе типа обмотки необходимо ориентироваться на значение тока фазы статора. По условию нормального охлаждения двигателя ток параллельной ветви обмотки $i_l \leq 200-220 \text{ A}$.

Как известно из теории электрических машин для петлевой обмотки число параллельных ветвей $2a=2$; для волновой обмотки $2a=2p$.

В технической литературе схемы обмоток обычно представляются условно в виде развертки окружности на плоскости чертежа. При этом стороны катушек, уложенных в пазы, изображаются прямыми линиями. Однослойные обмотки изображаются одной линией, а двухслойные двумя линиями; сторона катушки, уложенная в верхней части паза — сплошной линией, а сторона катушки на дне паза — пунктирной линией.

С точки зрения самой технологии изготовления катушки петлевых обмоток выполняются мягкими или жесткими

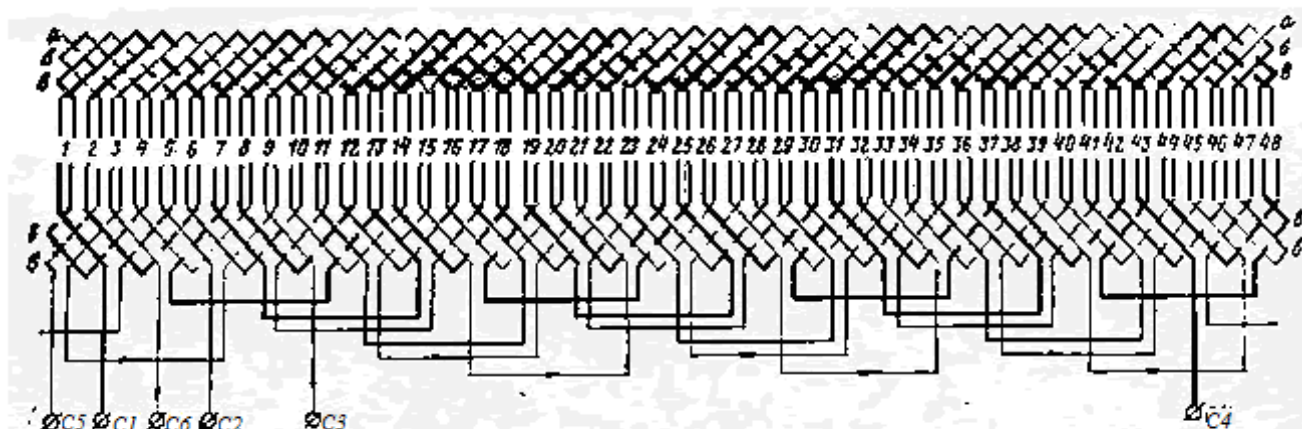


Рис. 3.1. Развернутая схема двухслойной петлевой обмотки

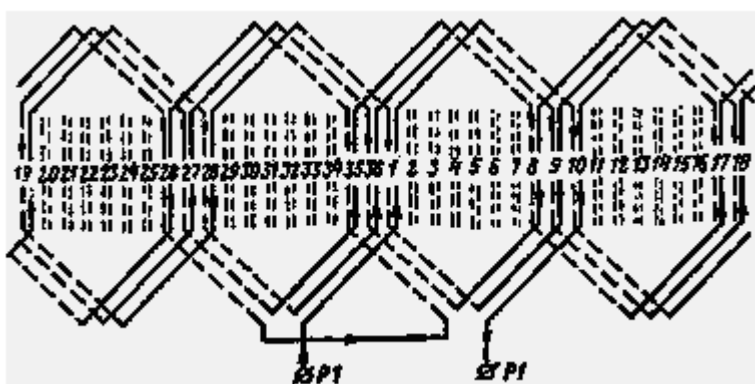


Рис. 3.2. Развернутая схема двухслойной волновой обмотки $Z_2 = 36$; $2p = 4$

Для мягких (всыпных) обмоток используются провода круглого сечения, которые «всыпаются» в полузакрытые пазы (см. рис. 2.3,а), поочередно по одному проводнику. Такой способ изготовления обмоток применяется в асинхронных двигателях малой и средней мощности порядка до 100 кВт.

В машинах средней и чаще большой мощности жесткие обмотки из шаблонных катушек и провода прямоугольного сечения. Эти провода предварительно формуются и изолируются, а затем укладываются в пазы статора.

Кратко необходимо остановиться на вопросе симметричности обмоток и способе соединения фаз обмоток.

Симметричные обмотки характеризуются тем, что наведенные во всех фазах обмотки статора э. д. с. равны по величине. При этом наведенные в каждой паре соседних фаз э. д. с. смещены во времени относительно друг друга на один и тот же угол. Как указывалось ранее, для трехфазной обмотки этот угол равен 120° .

Несимметричные обмотки статора встречаются редко. Несимметрия обмоток может привести к повышенной вибрации машины и увеличению токов, а соответственно к дополнительному нагреву и росту электрических потерь.

Все процессы и зависимости, приведенные здесь, относятся к асинхронным двигателям с симметричным обмоткам.

В асинхронных двигателях используются два способа соединения фаз обмоток между собой: в звезду и треугольник. Эти соединения могут выполняться как внутри машины — глухое подсоединение, так и вне двигателя — с помощью сменных перемычек на специальной щитке, установленном на корпусе машины.

Асинхронные двигатели широкого применения обычно выпускаются для работы на одном из двух напряжений находящихся в соотношении $1 : \sqrt{3}$, например, 127 и 220 В, 220 и 380 В и реже 380 и 660 В. При меньшем из каждых двух напряжений фазы двигателя соединяются в треугольник Δ , а при большем — в звезду Y . При внешнем соединении фаз двигателя сравнительно просто можно подключить его к одному из указанных на щитке напряжений.

Электродвигатели широкого применения мощностью 100...600 кВт выпускаются на напряжение свыше 500 В. Фазы их обмотки статора соединены по схеме “звезда”. Это позволяет передавать энергию по силовой цепи тепловоза с высоким напряжением, а значит меньшим током, чем при соединении по схеме “треугольник”.

Обозначения выводов обмоток асинхронных двигателей в соответствии с ГОСТ 183-66 приведены в табл. 3.1. В асинхронных двигателях с секционированными обмотками, с помощью которых возможно изменение числа пар полюсов, впереди прописных букв обозначений обмоток ставятся цифры, начиная с единицы. Эти дополнительные цифры показывают число полюсов данной секции. Маркировка выводов наносится на щитке рядом с выводами или чаще непосредственно на концах обмоток. Сравнительно редко, например в малых машинах, обмотки различаются с помощью разноцветных проводов. В двигателях старых выпусков могут встретиться следующие обозначения начал и концов обмоток: H1, H2, H3 и K1, K2, K3 или X, Y, Z и U, V, W.

Как следует из рис. 3.1 и 3.2 статор асинхронного двигателя имеет распределенную обмотку, эффективность которой для создания магнитного потока меньше, чем у сосредоточенной. Снижение эффективности распределенной обмотки в процессе создания магнитного потока машины учитывается обмоточным коэффициентом $k_{об1}$. В общем случае обмоточный коэффициент распределенной обмотки статора определяется как

$$k_{об1} = k_{y1} \cdot k_{p1}, \quad (3.1)$$

где k_{y1} - коэффициент укорочения обмотки, k_{p1} - коэффициент распределения обмотки. Коэффициент укорочения обмотки зависит от распределения ее полного и частичного шагов. Коэффициент распределения обмотки зависит от числа пазов на полюс и фазу q_1 , т.е. числа магнитных центров фазы в одной полюсной системе.

В случае применения на статоре укороченной обмотки шаги по пазам стремятся выбирать таким образом, чтобы ее относительный шаг $\beta = \frac{y_1}{y_{z1}} = 0,833$, где $y_{z1} = \frac{Z_1}{2p}$, y_1 - первый частичный шаг (см. рис. 3.3). При таком значении β в кривой э.д.с. отсутствуют кратные 3-ей пространственные гармонические и содержится наименьшее число гармонических 5 и 7-го порядков. Коэффициент укорочения шага обмотки определяется как

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) \leq 1. \quad (3.2)$$

Коэффициент распределения основной гармонической э.д.с. обмотки статора

$$k_{p1} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m_1}}{q_1 \sin \frac{\pi}{2m_1 q_1}}. \quad (3.3)$$

Изоляционные материалы и провода для обмоток определяются условиями ее эксплуатации (температура, влажность и др.), напряжением, на которое рассчитана обмотка, конструктивным исполнением обмотки (однослойная или двухслойная, катушечная или стержневая, мягкая или жесткая), а также формой паза. Изоляция необходима как между витками — витковая, так и между проводом и заземленным корпусом двигателя — корпусная.

Изоляционные материалы различаются по своей нагревостойкости — способности выдерживать заданную рабочую температуру и выполнять свои функции в течение времени нормальной эксплуатации электрооборудования, в котором используется данный электроизоляционный материал.

Согласно ГОСТ 8865-70 различают семь классов нагревостойкости; для изоляции обмоток электрических машин применяются материалы классов А, Е, В, F и Н, для которых в табл. 2 приведены допустимые температуры.

Таблица 3.2

Допустимая температура для изоляции различных классов нагревостойкости

Объект измерения	Допустимая температура, °С, для изоляции класса нагревостойкости				
	А	Е	В	F	Н
Предельно допустимая для материала изоляции	105	120	130	155	180
Средняя допустимая для обмотки	90	100	110	125	140
Допустимое превышение над температурой окружающей среды	50	60	70	85	100

В электродвигателях старых выпусков обмотки статора выполнялись из провода марки ПБД, изолированного двумя слоями хлопчатобумажной пряжи, имеющего недостаточно теплостойкую изоляцию значительной толщины, существенно снижающую коэффициент заполнения паза и тем самым ухудшающую использование двигателя.

Затем были освоены обмоточные провода с более тонкой и более теплостойкой изоляцией — эмалевой и комбинированной (эмалево-волокнуистой) марок ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛБО и др.

Последние годы для обмоток двигателей применяются провода с изоляцией классов *F* и *H* марок ПЭТВ, ПСД, ПСДК и ПЭТ-155.

Для повышения электрической и механической прочности, влагостойкости и улучшения теплоотдачи обмотки пропитываются в электроизоляционных лаках: маслянобитумных, глифталемасляных, кремнийорганических и др. Для защиты обмоток от механических повреждений и воздействия некоторых химических реагентов, а также для создания гладкой поверхности, затрудняющей оседание и накопление грязи и пыли, обмотки снаружи покрывают эмалью или специальным покровным лаком.

Рассмотрим пример использования для статора комбинированной обмотки (рис. 3.3) двигателя средней мощности. На электродвигателях средней мощности применяются только шаблонные двухслойные обмотки, что позволяет лучше использовать объем паза и повысить эффективность теплоотвода от проводников. Катушка комбинированной обмотки состоит из двух витков: витка петлевой обмотки и витка волновой обмотки. Поскольку одна катушка комбинированной обмотки содержит два витка, то в пазах статора двигателя можно расположить вдвое больше витков, чем при петлевой или волновой обмотки (при условии, что слоев обмоток одинаковое).

Если для комбинированной обмотки число пазов статора на полюс и фазу q_1 принять целым, то полное число пазов статора определится как $Z_1 = 2p m_1 q_1$.

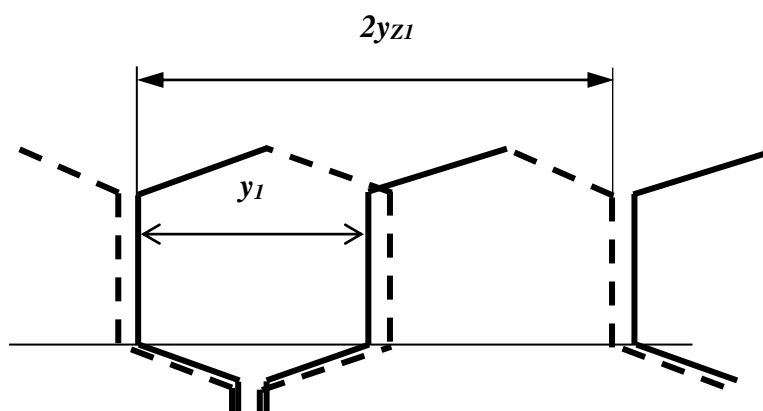


Рис. 3.3. Комбинированная симметричная двухслойная обмотка

— верхний проводник в пазу, - - - нижний проводник в пазу

Сечения эффективного проводника обмотки статора

Выше указывалось, для того, чтобы катушки обмотки статора были одинаковыми - обмотка должна быть двухслойной. В этом случае в пазу статора будут расположены четыре эффективных проводника (рис. 3.4). *Эффективным* называется проводник, по которому протекает полное значение фазного тока двигателя I_1 .

Сечение эффективного проводника обмотки статора q_{al} определяют по значению тока фазы I_1 и допустимой плотности тока в проводнике j_1 .

Допустимая плотность тока зависит от класса нагревостойкости изоляции и используемой системы охлаждения. Как было указано выше, при использовании для проводника обмотки статора изоляции класса нагревостойкости F значение теплового фактора $Aj_F = 3600 \text{ A}^2/\text{см мм}^2$, при использовании изоляции класса нагревостойкости H $Aj_H = 4200 \text{ A}^2/\text{см мм}^2$.

Класс нагревостойкости изоляции определяет значение теплового фактора проводника Aj , который является произведением двух величин: линейной нагрузки A и плотности тока j

$$AJ = A \cdot j. \quad (3.1)$$

По значению тока фазы статора можно определить значение линейной нагрузки статора:

$$A = \frac{2m_1 I_1 w_1}{\pi D_1}, \quad (3.2)$$

где $m_1 = 3$ - число фаз обмотки статора; w_1 - число витков в фазе обмотки статора; D_1 - внутренний диаметр статора (см. рис. 2.1).

Приняв класс нагревостойкости изоляции для обмотки статора можно рассчитать допустимую плотность тока в проводнике

$$j_{1 \max} = \frac{Aj}{A}. \quad (3.3)$$

Все тепловозные электродвигатели имеют принудительную систему охлаждения, т.е. вентилятор установлен вне машины и воздух в нее нагнетается по воздуховоду (рукаву) независимо от вращения ротора. Для таких электрических машин допустимое значение плотности тока в проводниках $(j_1)_{\text{доп}} = 8 \text{ A}/\text{мм}^2$. Если электрическая машина оборудована системой самовентиляции, т.е. на валу ротора установлен вентилятор (крыльчатка), который охлаждает двигатель при вращении ротора, то допустимое значение плотности тока в проводниках $(j_1)_{\text{доп}} = 4 \text{ A}/\text{мм}^2$.

При расчете ориентировочного сечения активного проводника обмотки статора рекомендуется принять плотность тока $j_1 < j_{1 \max}$

$$q_{al}' = \frac{I_1}{j_1} \quad (3.4)$$

Значение q_{al}' позволяет выполнить эскиз паза (рис. 3.4).

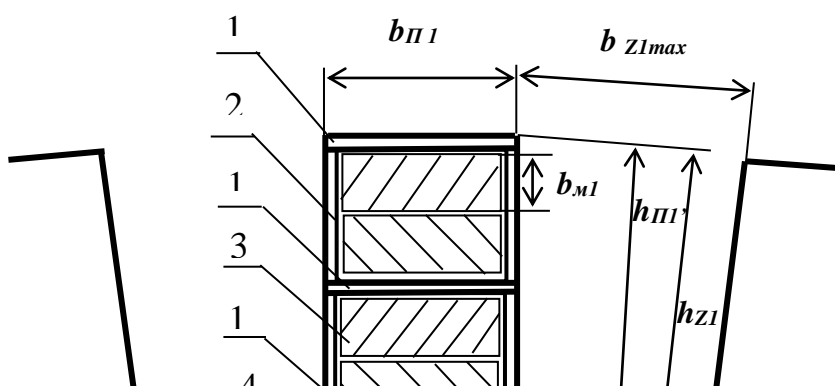


Рис. 3.4. Геометрические параметры паза статора с комбинированной обмоткой: 1 – прокладка; 2 – покровная изоляция; 3 – эффективный проводник; 4 – клин

Геометрия паза статора.

Опыт проектирования электрических машин показывает, что наилучшие показатели имеет асинхронный двигатель, у которого ширина паза статора $b_{\text{пл}}$ и высота паза статора $h_{\text{пл}}$ связаны соотношением

$$\frac{b_{\text{пл}}}{h_{\text{пл}}} \approx \frac{1}{4} . \quad (3.5)$$

При протекании переменного тока по проводнику наблюдается скин-эффект, который заключается в том, что ток вытесняется к поверхности проводника. В результате, ток по проводнику распределяется неравномерно, сечение проводника для протекания тока снижается, и сопротивление обмотки возрастает. Это приводит к увеличению потерь в машине, снижению ее КПД и повышенному нагреву обмотки.

Чтобы снизить влияние скин-эффекта на работу машины эффективный проводник обмотки набирают из нескольких элементарных проводников (рис. 3.5). Для машин средней мощности высота элементарного проводника не должна превышать 2,8...3,2 мм.

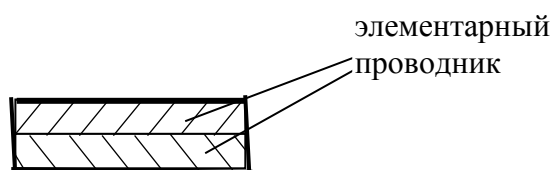


Рис. 3.5. Эффективный проводник обмотки статора, состоящий из двух элементарных проводников

Сечение проводника q_{a1} выбирают таким, чтобы плотность тока в обмотке не превышала допустимого значения

$$j_1 = \frac{I_1}{q_{a1}} \leq j_{\text{max}} . \quad (3.6)$$

Геометрия паза формируется исходя из условий, что ширина зубца $b_{z \text{ min}} \geq 8 \text{ мм}$ (рис. 3.4), индукция в зубце с учетом насыщения магнитной цепи не должна

превышать допустимого значения $B_{z1} \leq B_{\max}$, а высота элементарного проводника катушки $b_{m1} \approx 2,8 \div 3,2$ мм (рис. 3.4); при большей высоте проводника добавочные потери от высших гармонических составляющих тока достигают больших значений, уменьшая КПД двигателя.

Катушку обмотки статора наматывают на широкое ребро и укладывают в паз, геометрические параметры которого уточняются с учетом витковой и покровной изоляции (рис. 3.4).

Сечение и геометрические размеры проводника для шаблонной (жесткой катушки) выбираются из таблицы 3.3.

Таблица 3.3

Размеры прямоугольной меди

Размеры прямоугольной меди, мм*					
0,90	2,83	7,40	1,56	4,70	11,6
1,01	3,05	8,0	1,68	5,10	12,5
1,08	3,28	8,6	1,81	5,50	13,5
1,16	3,53	9,3	1,95	5,90	14,5
1,25	3,80	10,0	2,10	6,40	15,6
1,35	4,10	10,8	2,26	6,50	16,0
1,45	4,40	11,0	2,44	6,90	16,8
			2,63	7,0	18,0

* Размер провода можно получить комбинацией любых табличных размеров

Толщина изоляции обмотки статора определяется значением фазного напряжения. В зависимости от фазного напряжения меняется число слоев корпусной изоляции (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Толщина изоляции обмотки статора

U_l , В	500-800	800-1200	1200-2000	2000-3000
$\Delta_{из}$, мм**	2,0	2,5	3,0	4,0

** толщина изоляции по ширине паза (на две стороны)

Изоляционный слой складывается из:

- витковой изоляции – один слой встык стеклянной ленты толщиной 0,11 мм;
- корпусной изоляции – пять слоев вполуперекрышу встык стеклянной ленты толщиной 0,11 мм;
- покровная изоляция - один слой встык стеклянной ленты толщиной 0,11 мм.

При расчете толщины изоляции обмотки необходимо учесть, что готовую катушку пропитывают лаком, при этом происходит распушение изоляции по ширине и высоте катушки на величину $\Delta_{расп}=0,3$ мм.

В связи с этим ширина паза (рис. 3.4)

$$b_{П1} = b_{m1} + \Delta_{из} + \Delta_{расп} \leq t_{z1} - b_{z1 \min} \quad (3.7)$$

Высота паза статора при двухслойной обмотке складывается из высоты двух катушек с изоляцией $h_{кам1}$, трех миканитовых прокладок $\Delta_{мик}=0,5$ мм, которые укладываются на дно паза, между катушками и под клин, собственно клина толщиной $h_{клин}=3$ мм и зазора между клином и расточкой статора $h_l' \approx 1,5$ мм (рис. 3.4)

$$h_{\Pi I} = 2h_{\text{кам1}} + 3\Delta_{\text{мик}} + 2\Delta_{\text{расп}} + h_{\text{клин}} + h_1'' \quad (3.8)$$

Высота катушки определяется типом применяемой обмотки; если обмотка простая петлевая или волновая

$$h_{\text{кам1}} = u_1 \cdot b_{\text{м1}} + \Delta_{\text{уз}}, \quad (3.9)$$

Если обмотка комбинированная (см. рис. 3.3)

$$h_{\text{кам1}} = 2 \cdot u_1 \cdot b_{\text{м1}} + \Delta_{\text{уз}}, \quad (3.10)$$

где u_1 - число элементарных проводников в одном активном проводнике обмотки статора

Сопротивление фазы обмотки статора.

Длина проводника витка катушки статора (рис. 3.6)

$$l_{\text{wl}} = 2l_a + 4l_l + 4a + 4l_{\text{нов}}, \quad (3.11)$$

где l_a - активная длина витка (часть витка, расположенная в ярме статора, где наводится ЭДС фазы E_I);

l_l - лобовая часть витка катушки; предназначена для соединения активных проводников обмотки с целью образовать замкнутый виток;

a - прямолинейный участок катушки при выходе из паза (с учетом радиуса изгиба), принимается в зависимости от напряжения относительно корпуса, для электродвигателей средней мощности ориентировочно можно принять $a=28 \text{ мм}$

$l_{\text{нов}}$ - головка катушки; при двухслойной обмотке статора активные проводники катушки располагаются в разных плоскостях, чтобы все катушки были одного размера; для электродвигателей средней мощности ориентировочно можно принять $l_{\text{нов}}=30-33 \text{ мм}$;

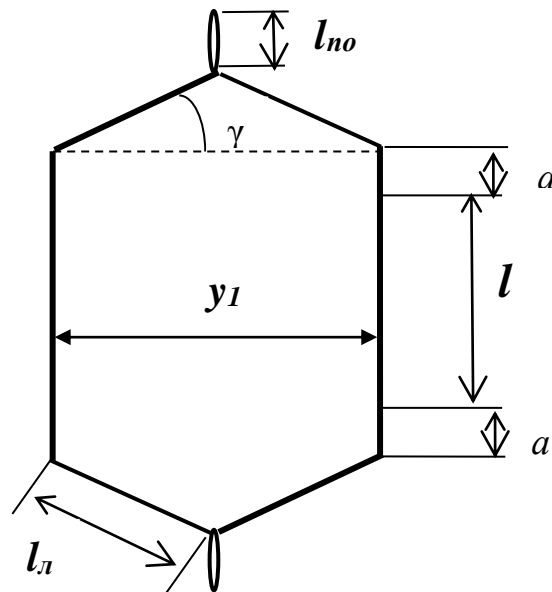


Рис. 3.6. К расчету длины витка.

Лобовая часть катушки не участвует в создании ЭДС и является источником дополнительных потерь в машине и потока рассеяния (потерь магнитного потока при создании ЭДС). В связи с этим лобовые части обмотки стремятся выполнить максимально короткими.

В общем случае длина лобовых частей катушки определяется шагом обмотки. Для получения максимального значения ЭДС активные проводники катушки должны располагаться под разными полюсами, т.е. на расстоянии полюсного деления.

Опыт проектирования электрических машин показывает, что минимальный угол расположения лобовых частей катушки γ , который позволяет расположить на статоре все витки обмотки составляет $28-30^\circ$ (рис. 3. 6). Поэтому длина лобовой части катушки может быть определена как

$$l_{\text{л}} = \frac{y_1}{2} \frac{1}{\cos \gamma} \quad (3.12)$$

Шаг обмотки

$$y_1 = m_1 \cdot q_1 \cdot t_1, \quad (3.13)$$

где q_1 – число пазов на полюс фазу, t_1 – зубцовый шаг.

Длина активной части статора окончательно определяется при расчете магнитной цепи машины исходя из условия, чтобы индукция в его зубцах не превысила допустимого значения:

$$l_a \geq \frac{\Phi_{\text{ном}}}{b_{Z1 \min} \cdot \frac{Z_1}{2p} \cdot \alpha_\delta \cdot k_{CT} \cdot B_{\max}}, \quad (3.14)$$

где $\Phi_{\text{ном}}$ – значение магнитного потока; α_δ – коэффициент полюсного перекрытия.

Однако первоначально для электродвигателей длину активной части принимают по двигателю прототипу, а затем пересчитывают при выполнении расчета магнитной цепи. Для двигателя средней мощности можно принять $l_a=0,5$ м.

Расчет сопротивления обмотки статора основывается на геометрических параметрах ее катушки и выполняется после конструктивной проработки. При этом необходимо учитывать, что при эксплуатации двигателя его обмотка нагревается, а при нагревании меди ее удельное сопротивление увеличивается. В соответствии с ГОСТ рабочая температура обмотки электрической машины в эксплуатации $T_p=115^\circ\text{C}$. В справочной литературе удельное сопротивление электротехнической меди приводится для температуры 20°C . Поэтому при расчете сопротивления обмотки изменение ее сопротивления при нагреве учитывается коэффициентом $[1 + \alpha(T_p - 20)]$, где $\alpha=0,0039 [1/^\circ\text{C}]$ – удельный коэффициент сопротивления меди.

В результате омическое сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \frac{\rho_m w_1 l_{w1}}{q_{a1}} [1 + \alpha(T_p - 20)], \quad (3.15)$$

где $\rho_m = \frac{1}{57} \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right]$ – удельное сопротивление электротехнической меди при температуре 20°C , q_{a1} – сечение активного проводника обмотки статора, $[\text{мм}^2]$, l_{w1} – длина витка обмотки, $[\text{м}]$.

1.4. Расчет параметров ярма ротора и его обмотки

Асинхронные двигатели выпускаются как с фазной обмоткой ротора, так и с короткозамкнутой обмоткой ротора.

Короткозамкнутая обмотка состоит из стержней, замкнутых накоротко, а фазная обмотка соединяется с внешними пусковыми сопротивлениями (рис. 4.1, 4.2).

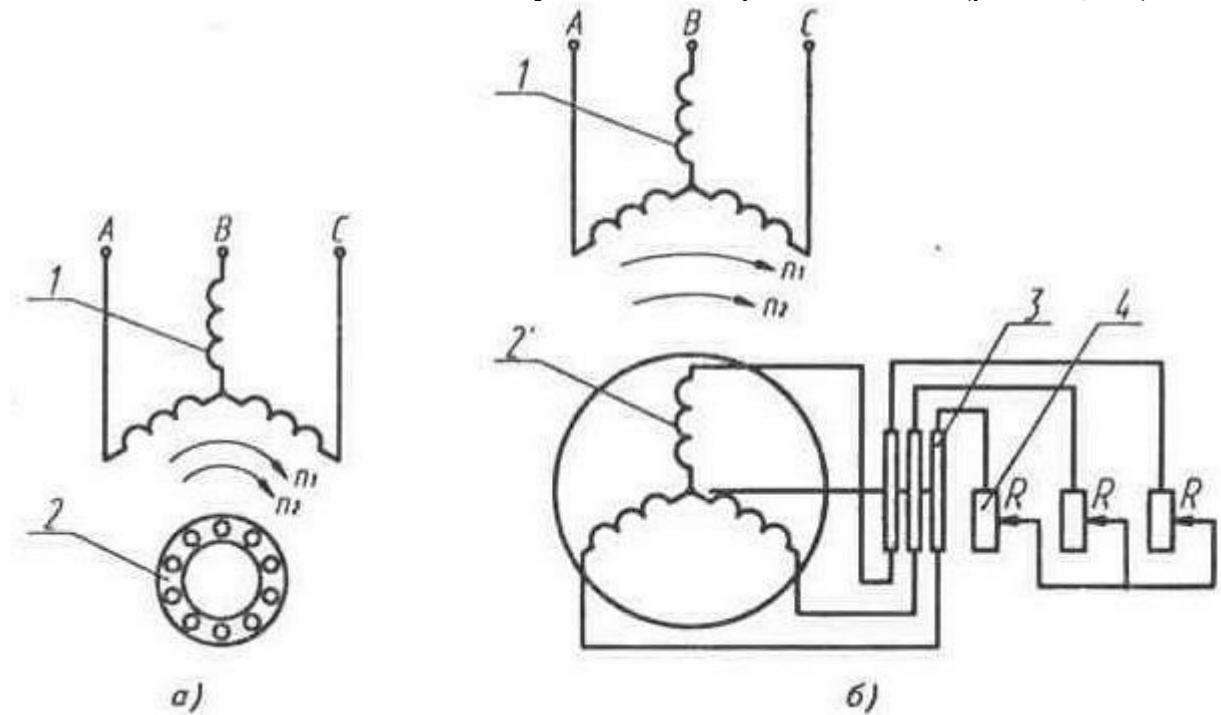


Рис. 4.1. Принципиальная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора (а) и с фазной обмоткой ротора (б)

1- обмотка статора, 2 – короткозамкнутая обмотка ротора, 2'- фазная обмотка ротора, 3 – щетки, 4 – пусковые резисторы

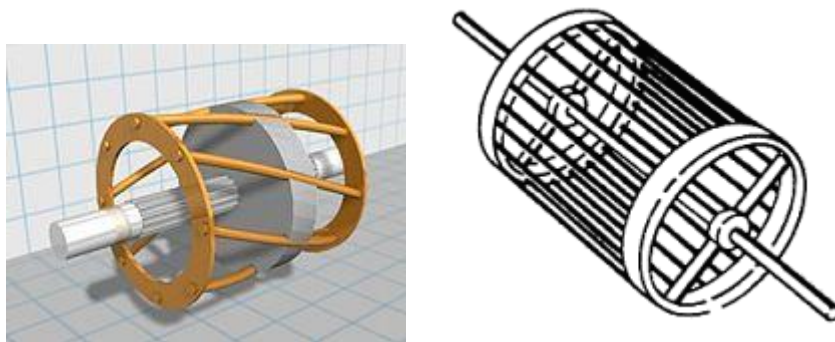


Рис. 4.2. Ротор асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой

У фазного ротора обмотка выполняется трёхфазной, аналогично обмотке статора, с тем же числом пар полюсов. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме “звезда”. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закреплёнными на валу ротора, и через щётки выводятся во внешнюю цепь. Контактные кольца изготавливают из латуни или стали, они должны быть изолированы друг от друга и от вала. В качестве щёток

используют металлографитовые щётки, которые прижимаются к контактному кольцу с помощью пружин щёткодержателей, закреплённых неподвижно в корпусе машины.

Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется из стержней различной формы, закреплённых методом сварки в двух кольцах (беличья клетка). Таким образом, образуются замкнутые витки. Каждый виток состоит из двух стержней и двух участков короткозамыкающих колец (рис. 4.3). У двигателей с самовентиляцией на валу ротора расположены вентиляционные лопатки

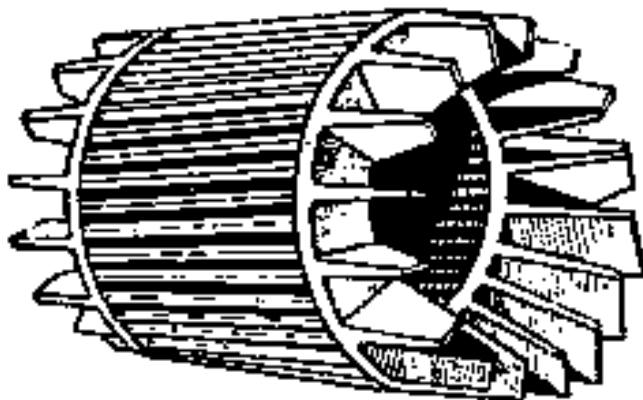


Рис. 4.3. Литая алюминиевая беличья клетка ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя (с короткозамыкающим кольцом и вентиляционными лопатками)

Стержни ротора могут иметь разную форму. Например, на рис. 4.4,а изображен ротор, обмотка которого выполнена в виде медных прямоугольных стержней. Но чаще стержни делают литыми из алюминия, путем заливки в пазы ротора. На рис. 4.3,б приведены формы пазов ротора с алюминиевой короткозамкнутой обмоткой.

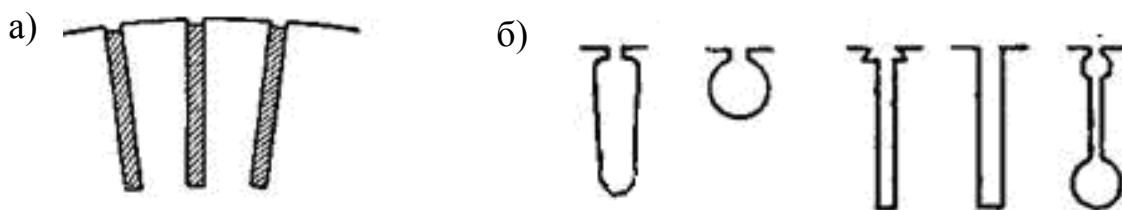


Рис. 4.4. Форма стержней (а) и пазов (б) ротора с короткозамкнутой обмоткой

Для повышения пускового момента асинхронного двигателя применяют двойную беличью клетку, которая фактически состоит из двух беличьих клеток, стержни которых соединены перемычкой (рис. 4.5)

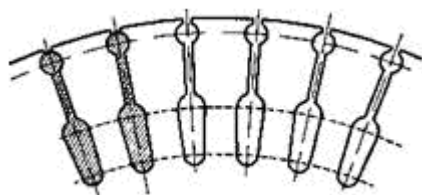


Рис. 4.5. Ротор асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой

Рассмотрим обмотку ротора в виде беличьей клетки.

Число фаз короткозамкнутой обмотки ротора равно числу ее стержней (пазов), т.е.

$$m_2 = Z_2. \quad (4.1)$$

Поскольку каждый стержень беличьей клетки представляет собой фазу – обмотка ротора сосредоточенная с значением обмоточного коэффициента

$$k_{o\delta 2} = 1. \quad (4.2)$$

Один виток катушки образован двумя стержнями (см. рис. 4.2), а каждый стержень – фаза обмотки. Значит одна фаза короткозамкнутой обмотки ротора содержит 0,5 витка, т.е.

$$w_2 = 0,5 \quad (4.3)$$

Сердечник ротора АД выполняется шихтованным с прямыми пазами различной формы и аксиальными вентиляционными каналами. Наружный диаметр сердечника ротора

$$D_2 = D_1 - 2\delta. \quad (4.4)$$

Для электродвигателей работающих в тяжелых условиях пуска число пазов ротора Z_2 должно удовлетворять неравенству $0,82Z_2 \leq Z_2 \leq Z_1$. На практике значение Z_2 выбирают исходя из условий минимизации добавочных потерь, паразитных моментов, радиальных вибрационных сил и шума. Исследования, выполненные на заводе «Электросила», позволили определить рекомендуемые значения Z_2 в зависимости от значений p и Z_1 (табл. 4.1).

Таблица 4.1
Рекомендуемое число пазов ротора АД

p	Z_1	Z_2
3	54	44; 64; 66; 68
	72	56; 58; 62; 82; 84; 86; 88
	90	74; 76; 78; 80; 100; 102; 104
4	84	66; 70; 98; 100; 102; 104
	96	78; 82; 110; 112; 114

Стержни ротора асинхронных двигателей отливаются из алюминия или изготавливаются из электротехнической меди. Для получения высоких значений к.п.д. стержни обмотки ротора могут изготавливаться из сплава электротехнической меди и серебра.

Для асинхронных двигателей тепловозов обмотка ротора преимущественно отливается из алюминия, а пазы ярма ротора имеют грушевидную форму со шлицом (рис. 4.6). Значения диаметров большего $d_{2\max}$ и меньшего $d_{2\min}$ овалов паза (а соответственно и стержня) принимаются такими, чтобы обеспечить приблизительно постоянную ширину зубца ротора $b_{Z2\min} \approx b_{Z2cp} \approx b_{Z2\max}$. Опыт проектирования электрических машин показывает, что ее весогабаритные показатели будут наилучшими, если ширина паза ротора $b_{\Pi 2}$ и средняя ширина зубца b_{Z2} имеют примерно одинаковые значения, т.е. $b_{\Pi 2} \approx b_{Z2}$. Тогда можно считать, что ориентировочное значение зубцового шага $t_2 \approx 2b_{Z2}$.

Поскольку электротехническая сталь – хрупкий материал, сечение зубца статора b_{Z1} не может быть менее 8мм.

Геометрические параметры стержня ротора определяются его электрической нагрузкой. Рекомендуется выдерживать соотношение

$$4 = \frac{\text{высота стержня}}{\text{наибольшее поперечное сечение стержня}}$$

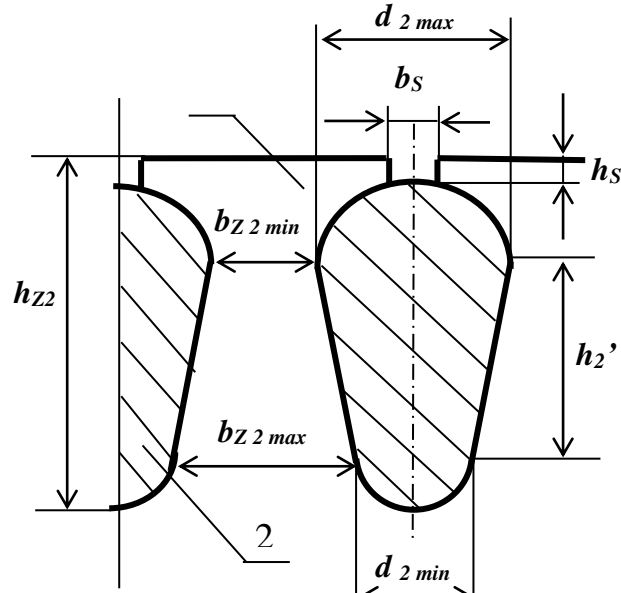


Рис. 4.6. Геометрические параметры паза и зуба ротора

Рассматривая беличью клетку ротора как короткозамкнутую многофазную сосредоточенную обмотку с числом фаз $m_2 = Z_2$, обмоточным коэффициентом $k_{об2} = 1$ и числом витков в фазе $w_2 = 0,5$ действующее значение фазной эдс обмотки ротора находится как

$$E_{2\text{ ном}} = E_{1\text{ ном}} \frac{w_2 k_{об2}}{w_1 k_{об1}} \approx 0,96 U_{1\text{ ном}} \frac{w_2 k_{об2}}{w_1 k_{об1}}. \quad (4.5)$$

По значению $E_{2\text{ ном}}$ определяются фазные значения тока в стержне

$$I_{2\text{ ном}} = \frac{P_{2\text{ ном}}}{Z_2 E_{2\text{ ном}} (1 - s_{\text{ном}}) \eta'} \quad (4.6)$$

и короткозамыкающем кольце

$$I_{\text{КЛ ном}} = \frac{I_{2\text{ ном}}}{2 \sin \frac{p\pi}{Z_2}}.$$

По значению $j_{\text{мах}}$ рассчитывается минимально возможное сечение стержня

$$q_{a2} = \frac{I_{2\text{ ном}}}{j}. \quad (4.7)$$

Если компоновка ротора позволяет, значение плотности тока в стержнях обмотки ротора целесообразно принять как и в проводниках обмотки статора. В том случае, когда

необходимо использовать в роторе стержни меньшего сечения, значение плотности тока можно увеличить, но не более, чем до 8 А/мм^2 .

Пакет сердечника ротора в спрессованном состоянии удерживается двумя нажимными шайбами, толщина которых составляет приблизительно $0,1l_a$, где l_a – активная длина электродвигателя. Для электродвигателей с активной длиной пакета ротора $l_a=400-500 \text{ мм}$ толщина каждой нажимной шайбы $40 \div 50 \text{ мм}$; поэтому короткозамыкающие кольца отстают от сердечника якоря на расстояние $l_{s2} \approx 0,05 \text{ м}$, а длина стержня между кольцами $l_{CT}' = l_a + 2 \cdot l_{s2}$ (для электродвигателей мощностью порядка 300 кВт ориентировочное значение активной длины составляет $l_a \approx 0,5 \text{ м}$).

Параметры короткозамыкающего кольца определяются параметрами стержня (рис. 4.7).

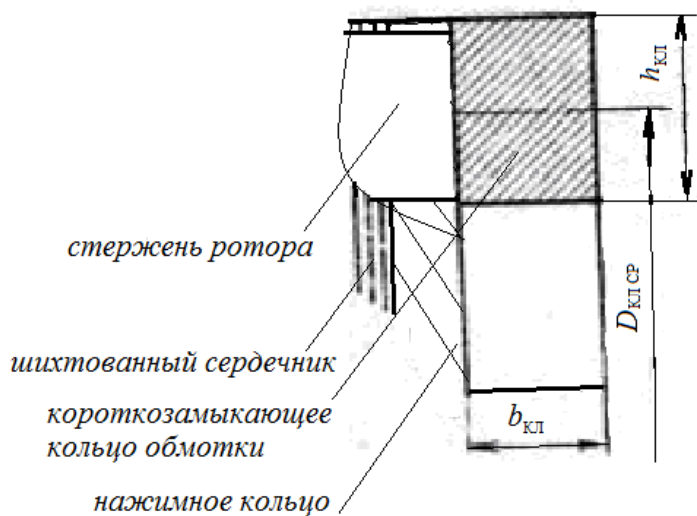


Рис. 4.7. К расчету геометрии короткозамыкающего кольца обмотки ротора

Высота кольца в радиальном направлении принимается

$$h_{KL} = (1,4 \div 1,6) h_{CT}, \quad (4.8)$$

где h_{CT} – высота стержня ротора (рис. 4.7).

Ширина кольца в осевом направлении определяется допустимой плотностью тока в кольце

$$b_{KL} \geq \frac{I_{KL}}{j_{\max} \cdot h_{KL}}. \quad (4.9)$$

Для электродвигателей мощностью порядка 300 кВт по технологии производства ширина не может быть меньше 40 мм .

Средний диаметр кольца

$$D_{KL} = D_2 - h_{KL}. \quad (4.10)$$

Средняя длина кольца, приходящаяся на одно пазовое деление (рис. 4.8)

$$l_{KL} = \frac{\pi D_{KL}}{Z_2}.$$

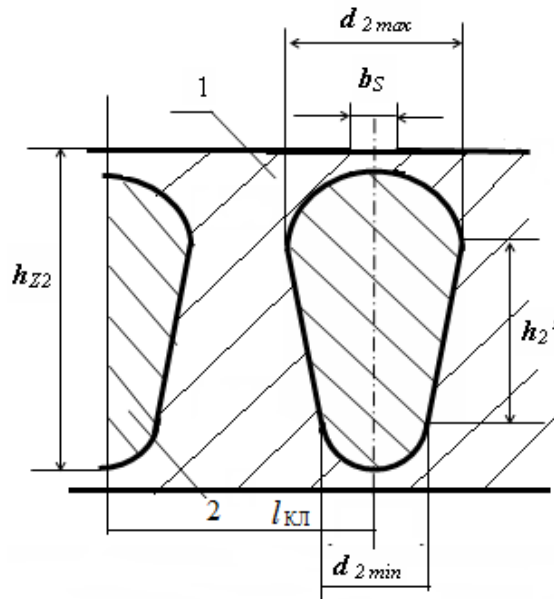


Рис. 4.8. К определению длины кольца короткозамыкающей обмотки ротора, приходящейся на одну фазу

Сопротивление кольца, приходящегося на одно пазовое деление при нормальных условиях

$$r_{\text{кл}} = \rho \frac{l_{\text{кл}}}{q_{\text{кл}}}, \quad (4.11)$$

где $\rho \left[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right]$ - удельное сопротивление материала обмотки ротора, $q_{\text{кл}} = b_{\text{кл}} h_{\text{кл}}$ - сечение кольца, $\rho_{\text{Al}} = 0,029 \div 0,033 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ - удельное сопротивление алюминия при 20°C ; $\rho_{\text{м}} = \frac{1}{57} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ - удельное сопротивление электротехнической меди при температуре 20°C .

Расчетная длина стержня учитывает ширину колец

$$l_{\text{СТ}} = l_{\text{СТ}}' + b_{\text{кл}}. \quad (4.12)$$

Сопротивление стержня при нормальных условиях

$$r_{\text{СТ}} = \rho_{\text{Al}} \frac{l_{\text{СТ}}}{q_{a2}}. \quad (4.13)$$

Роторы АД мощностью до 400 кВт не являются глубокопазными, а частота тока в стержнях мала $f_2 = s \cdot f_1$, поэтому эффект вытеснения тока в стержнях не оказывает значительного влияния на изменение их сопротивления. Опыт проектирования показывает, что при высоте стержня $\leq 40 \text{ мм}$ во всем рабочем диапазоне изменения частоты питающего напряжения учет вытеснения тока позволяет повысить точность расчета активного и реактивного сопротивлений ротора не более, чем на 1%. Таким образом, активное сопротивление фазы обмотки ротора допустимо определять без учета эффекта вытеснения тока

$$r_2 = \left(r_{CT} + \frac{2r_{\kappa\Lambda}}{\Delta^2} \right) [1 + \alpha(T_p - 20)], \quad (4.13)$$

где $\Delta = 2 \sin \left(\frac{p\pi}{Z_2} \right)$ учитывает разные потенциальные условия в стержнях ротора.

$$E_{\Phi 2} = E_{\Phi 1} \frac{w_2 k_{об2}}{w_1 k_{об1}}$$

1.5. Расчет магнитной цепи

В основе расчета магнитной цепи двигателя лежит закон полного тока

$$\oint_i H_i \cdot l_i = F_0,$$

где $H_i l_i$ - падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи, F_0 - результирующая намагничивающая сила, H_i - напряженность магнитного поля на участке магнитной цепи, l_i - длина участка магнитной цепи, в пределах которого значение напряженности не меняется, т.е. $H_i = \text{const}$ /

Расчет магнитной цепи электродвигателя выполняется с целями:

- определить активную длину асинхронного двигателя l_a ; активная длина электрической машины должна быть такой, чтобы при известных радиальных размерах (диаметре ярма статора и диаметре ярма ротора) пропустить заданное (номинальное $\Phi_{ном}$) значение магнитного потока;

- рассчитать ток намагничивания холостого хода I_μ ; ток намагничивания (ток обмотки статора на холостом ходу машины за вычетом тока потерь холостого хода), который наводит в машине заданное (номинальное $\Phi_{ном}$) значение магнитного потока.

Методика расчета магнитной цепи базируется на значении номинального магнитного потока.

Из теории электрических машин известно, что напряжение, подведенное к фазе обмотки статора электродвигателя (рис. 5.1)

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot Z_1$$

где E_1 - значение ЭДС, наводимая магнитным полем в фазе обмотки статора, I_1 - значение тока в фазе обмотки статора, Z_1 - значение полного сопротивления фазы обмотки статора.

Значение полного сопротивления фазы обмотки статора для электрических машин мало. Для номинального режима работы электродвигателя можно считать, что

$$E_{1\text{ ном}} \approx 0,96 U_{1\text{ ном}}. \quad (5.1)$$

ЭДС фазы обмотки статора определяется ее трансформаторным значением

$$E_{1\text{ ном}} = 4,4 \cdot f_{1\text{ ном}} \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot \Phi_{ном}, \quad (5.2)$$

где $f_{1\text{ ном}}$ - номинальное значение частоты питающего напряжения, Гц; w_1 - число витков в фазе обмотки статора; $k_{об1}$ - обмоточный коэффициент обмотки статора, $\Phi_{ном}$ - номинальное значение магнитного потока, Вб.

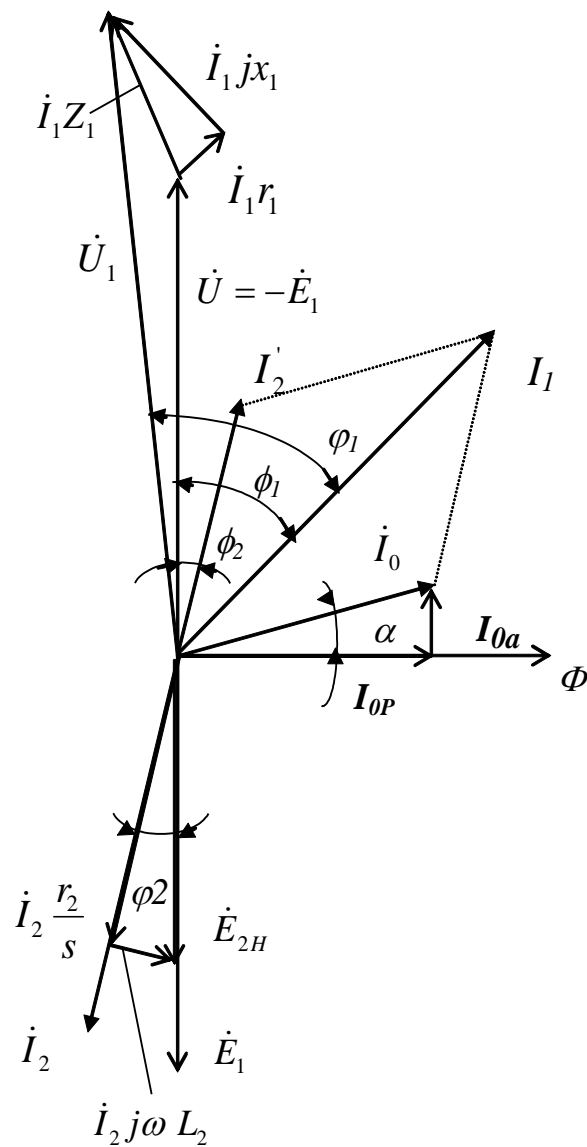


Рис. 5.1. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Тогда требуемое значение номинального магнитного потока двигателя можно рассчитать из зависимости $E_{\Phi 1 \text{ ном}}$:

$$\Phi_{\text{ном}} = \frac{E_{1\Phi \text{ ном}}}{4k_B f_{1\text{ ном}} w_1 k_{o\delta 1}} \approx \frac{0.96 U_{1\Phi \text{ ном}}}{4k_B f_{1\text{ ном}} w_1 k_{o\delta 1}}, \quad (5.3)$$

где k_B – коэффициент формы тока; для синусоидального тока $k_B = 1,11$.

В то же время из курса физики известно, что магнитный поток определяется значением индукции B и площадью S , через который проходит магнитный поток,

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot l \cdot b,$$

где S , b , l – площадь прохождения магнитного потока, ее ширина и длина.

Таким образом, значение $\Phi_{ном}$ определяет минимальную активную длину якоря

$$l_{a \min} = \frac{\Phi_{ном}}{b_{Z1/3} \cdot \frac{Z_1}{2p} \cdot \alpha_\delta \cdot k_{CT} \cdot B_{Z1 \max}}, \quad (5.4)$$

где $b_{Z1/3}$ - ширина зубца статора на высоте 1/3 от дна паза (это сечение соответствует среднему значению индукции по высоте зубца) ; $b_{Z1/3} \cdot \frac{Z_1}{2p}$ - ширина зубцов якоря,

приходящаяся на один полюс; α_δ учитывает форму магнитного поля в воздушном зазоре (при ненасыщенном состоянии магнитной цепи $\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} \approx 0,63$;

$k_{CT} \approx 0,92...0,94$ - коэффициент шихтовки стали сердечника статора;

$B_{Z1 \max} = 1,6 \div 1,8$ Тл - номинальное значение индукции в зубцах статора. Поскольку в зависимости от индукции в различных сечениях машины магнитная цепь может насыщаться, принимать в качестве расчетного значения индукции допустимое - для электротехнической стали $B_{Z \max} = 2,2 \div 2,4$ Тл - не рекомендуется.

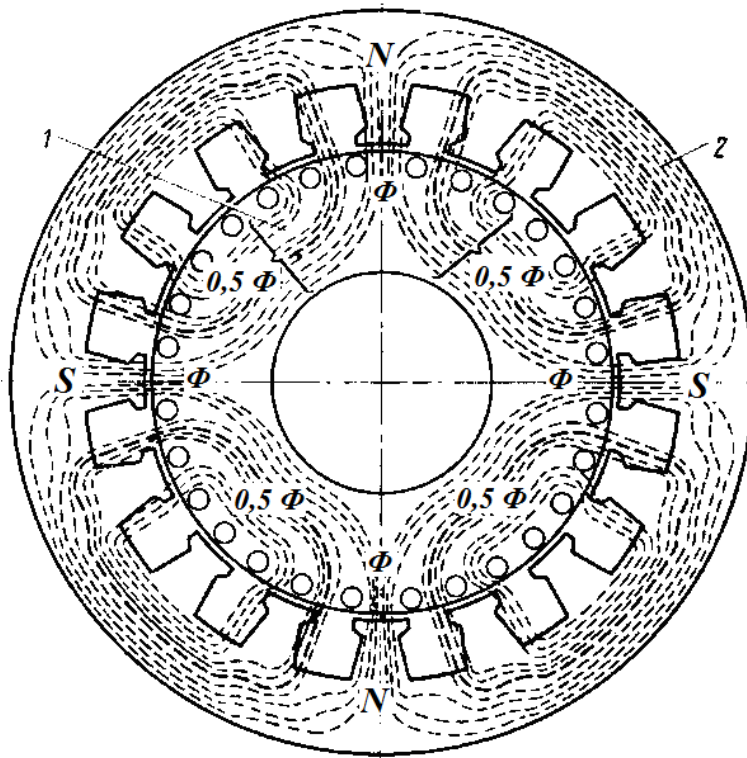
После того, как определена активная длина машины, рассчитываются все сечения магнитопровода (сечения ярма статора и ротора, по которым проходит магнитный поток) (рис. 5.2).

Из практики электромагнитного расчета асинхронных двигателей известно, что по длине магнитной линии можно выделить пять характерных участков, в пределах которых напряженность магнитного поля H_i остается приблизительно постоянной:

1. ярмо статора;
2. зубцы статора;
3. воздушный зазор;
4. зубцы ротора;
5. ярмо ротора.

Расчет магнитной системы ведется на один полюс и учетом того, что магнитная цепь симметрична. Из схемы распределения магнитного потока видно, что по зубцовому слою статора, воздушному зазору и зубцовому слою ротора протекает полный магнитный поток, создаваемый одной парой полюсов Φ , а в ярме статора и

ротора поток распределяется на два, в результате по ярму статора и ротора протекает поток $\Phi/2$.



5.2. К расчету магнитной цепи асинхронного двигателя

1- магнитное поле в статоре, 2- магнитное поле в роторе

Сечение для потока $\Phi_{ном}$ в ярме статора определяется с учетом того, что он шихтованный как

$$S_{a1} = h_{a1} l_a \cdot k_{CT}, \quad (5.5)$$

где h_{a1} – высота ярма статора (рис. 5.3).

Сечение для потока в зубцовом слое статора на один полюс (рис. 5.3)

$$S_{Z1/3} = \frac{Z_1}{2p} b_{Z1/3} l_a k_{CT} \alpha, \quad (5.6)$$

где $b_{Z1/3}$ - ширина зубца на 1/3 высоты от дна паза, т.к. в этом сечении зубца индукция принимает среднее значение.

Сечение для потока в воздушном зазоре на один полюс (рис. 5.3)

$$S_{\delta} = \frac{\pi(D_2 + \delta)l_a}{2p}, \quad (5.7)$$

где D_2 – внешний диаметр ротора, δ – воздушный зазор.

Сечение для потока в зубцовом слое ротора на один полюс (рис. 5.3)

$$S_{Z2/3} = \frac{Z_2}{2p} b_{Z2/3} l_a k_{CT} \alpha, \quad (5.6)$$

где $b_{Z2/3}$ - ширина зубца на 1/3 высоты от дна паза.

Сечение для потока в ярме ротора (рис. 5.3)

$$S_{a2} = h_{a1} l_a \cdot k_{CT} \cdot \alpha, \quad (5.5)$$

где h_{a2} – высота ярма статора (рис. 5.3).

Высота ярма ротора рассчитывается с учетом того, что через ярмо проходит вал двигателя и имеются вентиляционные каналы (рис. 5.3)

$$h_{a2} = \frac{D_2 - D_i - 2h_{Z2} - 1,33n_k d_k}{2}, \quad (5.6)$$

где n_k , d_k – число рядов и диаметр вентиляционных каналов в роторе.

По значениям потока и площадей сечений магнитной цепи рассчитываются значения индукции в соответствующих сечениях.

Значения индукции в зубцовом слое ротора на номинальном режиме

$$B_{Z2\text{ ном}} = \frac{\Phi_{\text{ном}}}{S_{Z2/3}}; \quad (5.7)$$

значение индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta\text{ ном}} = \frac{\Phi_{\text{ном}}}{S_{\delta}}. \quad (5.8)$$

С учетом того, что в ярме статора и ротора магнитный поток разделяется на две части индукция в ярме статора и ротора

$$B_{a1\text{ ном}} = \frac{\Phi_{\text{ном}}}{2 \cdot S_{a1}}, \quad (5.9)$$

$$B_{a2\text{ ном}} = \frac{\Phi_{\text{ном}}}{2 \cdot S_{a2}}. \quad (5.10)$$

Значение индукции в ярме статора и ротора рекомендуется (аналогично с двигателями постоянного тока)

$$B_a \leq 1,4 \text{ Тл} \quad (5.11)$$

Вызвано это тем, что длины участков магнитных силовых линий в спинках ярма статора и ротора достаточно велики, и при больших значениях B_{a1} и B_{a2} падение магнитного напряжения на этих участках магниторода будут столь значительны, что необходимый ток намагничивания двигателя на режиме холостого хода может превысить номинальное значение тока обмотки статора. Это недопустимо. Поэтому, если значения $B_{a1\text{ ном}}$ и $B_{a2\text{ ном}}$ не удовлетворяют условию (5.11), необходимо увеличить соответственно значения h_{a1} или h_{a2} .

Значения напряженностей магнитного поля в каждом сечении магнитопровода определяются по магнитной характеристике электротехнической стали (см. приложение).

С учетом того, что воздух, как и вакуум, имеет постоянное значение магнитной проницаемости, значение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре определяется по зависимости

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} k_{\delta}, \quad (5.11)$$

где k_{δ} --результатирующий коэффициент Картера, учитывающий дополнительное сопротивление магнитной цепи в воздушном зазоре, вносимое наличием пазов статора и ротора;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - абсолютная магнитная проницаемость воздуха.

Значение коэффициента Картера определяется через величины, рассчитанные отдельно для пазов статора и ротора:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2},$$

где $k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{\pi 1}'^2}{t_1(5\delta + b_{\pi 1}') - b_{\pi 1}'^2}$ - коэффициент Картера, учитывающий влияние пазов статора на магнитное сопротивление в воздушном зазоре;

$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_s^2}{t_2(5\delta + b_s) - b_s^2}$ - коэффициент Картера, учитывающий влияние пазов ротора на магнитное сопротивление в воздушном зазоре;

$b_{\pi 1}' = b_{\pi 1} + 0,2$ мм - ширина паза статора в штампе, мм;

$b_{\pi 1}$ - ширина паза статора, мм (рис. 3.4);

b_s - ширина шлица паза ротора (рис. 4.6);

δ – высота воздушного зазора, мм.

На распределение магнитной индукции в зубцах статора, ротора и воздушном зазоре асинхронного двигателя сильно сказывается насыщение зубцов статора и ротора (т.к. воздушный зазор очень мал), приводя к «уплощению» синусоидальной кривой поля в области ее максимума. В результате величина α_{δ} увеличивается ($\alpha_{\delta} > \frac{2}{\pi}$), что необходимо учитывать при определении намагничивающей силы.

В практических расчетах значение величины α_{δ} определяют по графической зависимости $\alpha_{\delta} = f(k_H)$ (рис. 5.4), где

$$k_H = \frac{F_{Z1} + F_\delta + F_{Z2}}{F_\delta} \quad (5.12)$$

- коэффициент насыщения, F_{Z1} , F_δ , F_{Z2} - напряженности магнитного поля в зубцовом слое статора, воздушном зазоре и зубцовом слое ротора.

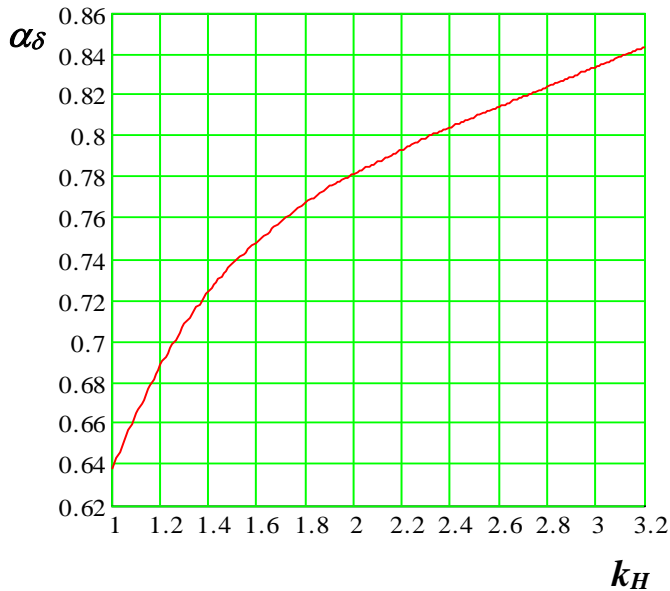


Рис. 5.4. Зависимость коэффициента полюсного перекрытия от коэффициента насыщения магнитной цепи

Для того, чтобы определить значения магнитных напряжений на всех участках цепи необходимо определить длины магнитных потоков на каждом участке (рис. 5.3). Поскольку магнитная цепь симметрична расчет ведется на $\frac{1}{2}$ длины магнитной силовой линии.

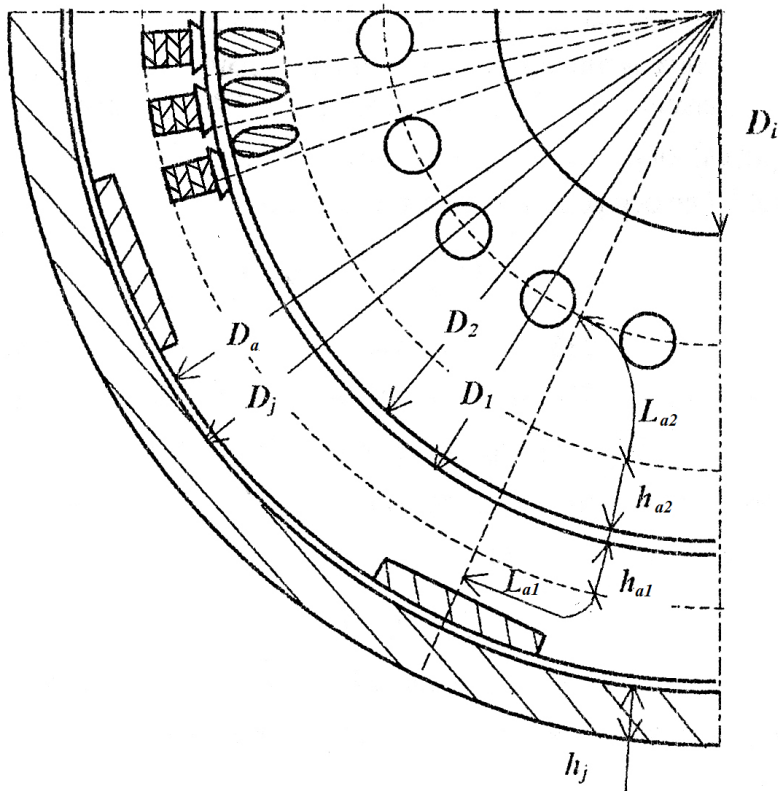


Рис. 5.3. К определению длины магнитной силовой линии

Половина длины магнитной силовой линии в ярме статора определяется по среднему сечению ярма (табл. 5.1), (рис. 5.3), м

$$L_{a1} = \frac{\pi(D_a - h_{a1})}{2 \cdot 2p}, \quad (5.13)$$

где h_{a1} – высота ярма статора.

Длина магнитной силовой линии в зубцовом слое статора - h_{z1} , м (рис. 5.3).

Длина магнитной силовой линии в воздушном зазоре – δ , м (рис. 5.3).

Длина магнитной силовой линии в зубцовом слое ротора - h_{z2} (рис. 5.3).

Половина длины магнитной силовой линии в ярме ротора (рис. 5.3), м

$$L_{a2} = \frac{\pi(D_2 - 2h_z - h_a)}{2 \cdot 2p}, \quad (5.14)$$

где h_{a2} – высота ярма статора.

Произведение длины каждого участка магнитной цепи на соответствующее значение напряженности магнитного поля $l_i H_i$, позволяет определить падение магнитного напряжения на каждом участке (намагничивающую силу каждого участка) $F_i = l_i H_i$ (табл. 5.1)

Требуемое значение магнитодвижущей силы обмотки статора на один полюс для создания магнитного потока значением $\Phi_{ном}$ при холостом ходе асинхронного двигателя принимается на 3% выше расчетной (коэффициент запаса)

$$F_0 = 1,03(F_{a1} + F_{z1} + F_{\delta} + F_{z2} + F_{a2}), \quad (5.15)$$

а действующее значение тока намагничивания на холостом ходу

$$I_{\mu} = \frac{\pi}{m_1 \sqrt{2}} \frac{p F_0}{k_{o\delta 1} w_1}. \quad (5.16)$$

После расчета требуемого значения I_{μ} следует определить его относительное значение $I_{\mu}' = \frac{I_{\mu}}{I_1}$, которое на номинальном режиме для асинхронных двигателей может достигать $I_{\mu}' \approx 0,7 \div 0,75$. Если $I_{\mu}' > 0,75$ следует уменьшить индукцию в наиболее напряженном сечении магнитопровода за счет увеличения его площади. Если все участки магнитопровода имеют большое магнитное напряжение, то целесообразно увеличить значение w_1 .

Таблица 5.1

К расчету магнитной цепи асинхронного двигателя

Наименование участка	Магнитный поток, Вб	Расчетное сечение, м ²	Длина участка, м	Индукция на участке, Тл	Напряженность магнитного поля на участке, А/м	Падение магнитного напряжения на участке, А
Ярмо статора	$0,5 \cdot \Phi_{ном}$	$S_{a1} = h_{a1} l_a \cdot k_{CT}$	$L_{a1} = \frac{\pi(D_a - h_{a1})}{2 \cdot 2p}$	B_{a1}	$H_{a1}(B_{a1})^*$	$F_{a1} = H_{a1} \cdot L_{a1}$
Зубцы статора	$\Phi_{ном}$	$S_{Z1/3} = \frac{Z_1}{2p} b_{Z1/3} l_a k_{CT} \alpha$	h_{Z1}	$B_{Z1/3}$	$H_{Z1/3}(B_{Z1/3})^*$	$F_{Z1/3} = B_{Z1/3} \cdot h_{Z1}$
Воздушный зазор	$\Phi_{ном}$	$S_{\delta} = \frac{\pi(D_2 - 2h_z - h_a)}{2 \cdot 2p}$	δ	B_{δ}	$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0}^{**}$	$F_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta$
Зубцы ротора	$\Phi_{ном}$	$S_{Z2/3} = \frac{Z_2}{2p} b_{Z2/3} l_a k_{CT} \alpha$	h_{Z2}	$B_{Z2/3}$	$H_{Z2/3}(B_{Z2/3})^*$	$F_{Z2/3} = B_{Z2/3} \cdot h_{Z2}$
Ярмо ротора	$0,5 \cdot \Phi_{ном}$	$S_{a2} = h_{a1} l_a \cdot k_{CT} \cdot \alpha$	$L_{a2} = \frac{\pi(D_2 - 2h_z - h_a)}{2 \cdot 2p}$	B_{a2}	$H_{a2}(B_{a2})^*$	$F_{a2} = H_{a2} \cdot L_{a2}$

- Напряженность магнитного поля в зависимости от значения индукции определяется по кривой намагничивания для соответствующей марки стали.

** $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$ - абсолютная магнитная проницаемость воздуха.

По значению I_{μ} можно оценить значение тока холостого хода обмотки статора I_0 . При работе без нагрузки активная составляющая этого тока $I_{0a} \approx (0,02 \div 0,03)I_0$. Поэтому можно считать, что ток холостого хода двигателя приблизительно равен своей реактивной составляющей, т.е. току намагничивания $I_0 \approx I_{\mu}$.

1.6. Расчет индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора

Индуктивные сопротивления асинхронного двигателя рассчитываются на основании зависимости ЭДС рассеяния катушки. Основная реактивность фазы обмотки определяется как

$$x_s = 2\pi f L_s p q, \quad (6.1)$$

где L_s - индуктивность рассеяния одной катушки.

На практике расчет реактивных сопротивлений выполняется для характерных сечений катушки: пазовой и лобовой, а также по коронкам зубцов ярма (дифференциальное рассеяние). С учетом такой дифференциации, и того, что число витков в одной фазе статора $w_1 = s_{\Pi} p q_1$, где s_{Π} - число эффективных проводников в пазу, реактивное сопротивление обмотки статора на номинальном режиме представляется как, Ом

$$x_1 = 4\pi \cdot \mu_0 f_{\text{ном}} w_1^2 \frac{l_a}{pq_1} (\lambda_{\text{П1}} + \lambda_{\Delta 1} + \lambda_{\Lambda 1}), \quad (6.2)$$

где $\lambda_{\text{П1}}, \lambda_{\Lambda 1}, \lambda_{\Delta 1}$ - проводимости рассеяния соответственно пазовой, лобовой частей обмотки и по коронкам зубцов. Значения проводимостей рассеяния определяются геометрией паза и катушки обмотки статора. Поскольку величины $\lambda_{\text{П1}}, \lambda_{\Lambda 1}, \lambda_{\Delta 1}$ являются безразмерными коэффициентами важно следить, чтобы при расчете зависимостей (6.4), (6.8) все используемые величины имели любую, но одинаковую, размерность.

Проводимость пазового рассеяния обмотки статора при прямых пазах (рис. 6.1)

$$\lambda_{\text{П1}} = \frac{h_{\text{П1-1}} - h_{\text{П1-2}}}{3b_{\text{П1}}} + \frac{h_{\text{П1-3}}}{b_{\text{П1}}} + \frac{h_{\text{П1-2}}}{4b_{\text{П1}}}, \quad (6.4)$$

где значения $h_{\text{П1-1}}, h_{\text{П1-2}}, h_{\text{П1-3}}$ принимаются по поверхности меди проводников обмотки.

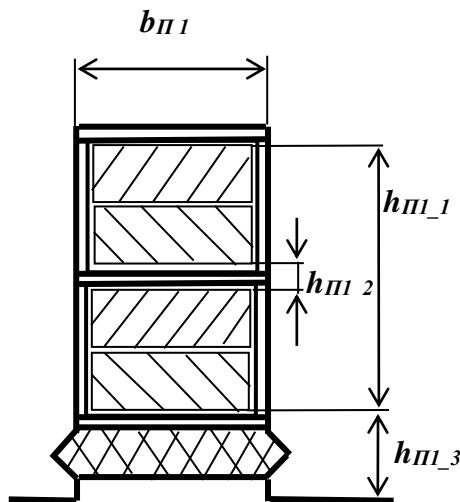


Рис. 6.1. К определению проводимости пазового рассеяния обмотки статора

Опыт проектирования асинхронных двигателей показывает, что с некоторым приближением проводимость дифференциального рассеяния и лобового рассеяния обмотки статора можно определять как

$$\lambda_{\Delta 1} \approx 0,3\lambda_{\text{П1}}, \quad (6.5)$$

$$\lambda_{\Lambda 1} \approx 0,3\lambda_{\text{П1}} \quad (6.6)$$

Реактивное сопротивление обмотки ротора на номинальном режиме для синхронной частоты f_1 и учетом того, что $w_2 = 0,5$ представляется как, Ом

$$x_2 = 2\pi \cdot \mu_0 f_{\text{ном}} l_a (\lambda_{\text{П2}} + \lambda_{\Delta 2} + \lambda_{\Lambda 2}), \quad (6.7)$$

где $\lambda_{\text{П2}}, \lambda_{\Lambda 2}, \lambda_{\Delta 2}$ - проводимости рассеяния соответственно пазовой и лобовой частей обмотки и по коронкам зубцов.

Проводимость пазового рассеяния обмотки ротора при грушевидных пазах (рис. 4.6)

$$\lambda_{\Pi 2} = \left[\frac{h_2}{3d_{2\max}} \left(1 - \frac{\pi d_{2\max}^2}{8q_{a2}} \right)^2 + 0,66 - \frac{h_s}{2d_{2\max}} \right] + \frac{h_s}{b_s}, \quad (6.8)$$

где q_{a2} – сечение стержня ротора.

Для пазов ротора иной формы зависимости для расчета рассеяния обмотки можно найти в любой справочной литературе по проектированию электродвигателей.

Аналогично проводимости обмотки статора, для обмотки ротора

$$\lambda_{\Delta 2} \approx 0,3\lambda_{\Pi 2}, \quad (6.9)$$

$$\lambda_{\Lambda 2} \approx 0,3\lambda_{\Pi 2} \quad (6.10)$$

II. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ

7. Расчет нагрузки асинхронного двигателя в соответствии со схемой замещения.

Расчет характеристики холостого хода и рабочих характеристик асинхронного двигателя после конструктивной проработки выполняется с использованием Т-образной схемы замещения (рис. 7.1).

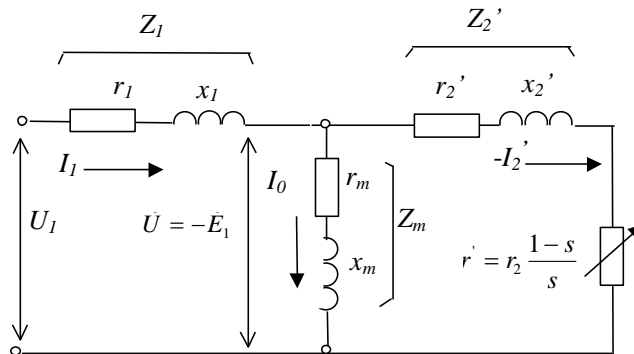


Рис. 7.1. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя: U_1 - фазное напряжение статора, E_1 - эдс фазы статора, I_1 - ток статора, I_0 - ток цепи намагничивания, I_2' - приведенный ток ротора, r_1 - активное сопротивление фазы обмотки статора, r_2' - приведенное активное сопротивление ротора, r_m - активное сопротивление цепи намагничивания, r' - приведенное сопротивление, представляющее механическую нагрузку, x_1 - реактивное сопротивление фазы обмотки статора, x_2' - приведенное реактивное сопротивление ротора, x_m - реактивное сопротивление цепи намагничивания, Z_1 - полное сопротивление фазы обмотки статора, Z_2' - полное приведенное сопротивление ротора, Z_m - полное сопротивление цепи намагничивания

При этом ротор рассматривается как неподвижный, а параметры его обмотки приводятся к параметрам статорной обмотки

$r_2' = r_2 K_{\text{пр}}$ - активное сопротивление ротора, приведенное к параметрам статорной обмотки;

$x_2' = x_2 K_{\text{пр}}$ - реактивное сопротивление ротора, приведенное к параметрам статорной обмотки,

$$K_{\text{пр}} = \frac{m_1 (k_{o\delta 1} w_1)^2}{Z_2 (k_{o\delta 2} w_2)^2} - \text{коэффициент приведения.}$$

Кроме того, механическая нагрузка двигателя заменяется переменным активным сопротивлением

$$r' = r_2 \frac{1-s}{s}, \quad (7.1)$$

позволяющим учитывать все потери в двигателе (рис. 7.1).

Энергетический баланс в двигателе при такой схеме замещения может быть представлен векторной диаграммой (рис. 5.1) и системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_0 Z_m; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'; \\ \dot{E}_1 = -\dot{I}_2' (Z_2' + r'), \end{cases} \quad (7.2)$$

где \dot{U}_1 - фазное напряжение статорной обмотки; \dot{E}_1, \dot{E}_{2H} - соответственно ЭДС фазы статора и неподвижного ротора; $\dot{I}_1; \dot{I}_0; \dot{I}_2'$ - соответственно ток статора, ток намагничивания; приведенный ток ротора; Z_1, Z_m, Z_2' - соответственно полное сопротивление фазы обмотки статора, полное сопротивление магнитной цепи двигателя; полное приведенное сопротивление цепи обмотки статора; r' - приведенное сопротивление, эквивалентное механической нагрузке двигателя.

В результате электрические и механические нагрузки электродвигателя при заданных значениях f_1, U_1 и S могут быть рассчитаны по уравнениям:

$$\begin{cases} I_2' = \frac{U_{\Phi 1}}{z}; \\ I_{1a} = I_{0a} + I_2' \cos \varphi_2'; \\ I_{1p} = I_{0p} + I_2' \sin \varphi_2'; \\ I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}; \\ \cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_a}; \\ P_1 = m U_1 I_{1a}; \\ \Sigma P = P_{1M} + P_{2M} + P_c + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}; \\ P_2 = P_1 - \Sigma P; \\ M_2 = \frac{P_2}{\omega_2}; \\ \eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}, \end{cases} \quad (7.3)$$

где I_1 - ток обмотки статора; I_2' - приведенный ток обмотки ротора; I_{1a}, I_{1p} - активная и реактивная составляющие тока статора; $\cos \varphi_1$ - коэффициент мощности двигателя; P_1 - электрическая мощность, подведенная к статорной обмотке; $\Sigma \Delta P$ - суммарные потери в двигателе; $\Delta P_{\text{доб}}$ - добавочные потери от основной и от высших гармонических составляющих тока; M_2 - момент на валу двигателя; ω_2 - частота вращения ротора; η - КПД двигателя;

полное сопротивление обмоток двигателя по схеме замещения:

$$z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (7.4)$$

активное сопротивление обмоток двигателя по схеме замещения:

$$R = r_1 + \frac{r_2'}{s}; \quad (7.5)$$

реактивное сопротивление обмоток двигателя по схеме замещения :

$$X = x_1 + x_2'; \quad (7.6)$$

тригонометрические функции угла между векторами приведенного тока обмотки ротора и напряжения статора:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi_2 = \frac{X}{Z}; \quad (7.7)$$

электрические потери в обмотке статора:

$$\Delta P_{1M} = m I_1^2 r_1; \quad (7.8)$$

электрические потери в обмотке ротора:

$$\Delta P_{2M} = m (I_2')^2 r_2'; \quad (7.9)$$

основные потери в стали :

$$\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2}; \quad (7.10)$$

механические потери

$$\Delta P_{мех} \approx 0,002 P_1; \quad (7.11)$$

Основные потери в стали статора складываются из потерь в ярме (ΔP_{a1}) и в зубцовом слое (ΔP_{z1}) :

$$\Delta P_{c1} = C_{\Pi} \cdot (\Delta P_{a1} + \Delta P_{z1}), \quad (7.12)$$

где $C_{\Pi}=(2,7...3,0)$ - коэффициент пульсаций, учитывающий добавочные потери от зубцовых гармонических индукции, т.е. добавочные потери холостого хода.

Потери в стали ярма статора и зубцовом слое статора определяются соответственно как

$$\Delta P_{a1} = p_{a1} G_{a1}; \quad \Delta P_{z1} = p_{z1} G_{z1}, \quad (7.13)$$

где удельные потери в ярме и зубцовом слое статора:

$$p_{a1} = p_{10/50} B_{a1}^2 \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,5}; \quad (7.14)$$

$$p_{z1} = p_{10/50} B_{z1}^2 \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,5}; \quad (7.15)$$

$p_{10/50} = 2,2 \text{ Вт/кг}$ - удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц;

B_{a1} - индукция в ярме статора, [Вб] ;

B_{z1} - индукция в зубцовом слое статора, [Вб]; G_{a1}, G_{z1} - вес ярма и зубцов статора, [кг].

Основными потерями в стали ротора можно пренебречь, т.к. частота перемагничивания ярма ротора очень мала

$$f_2 = f_1 \cdot s, \quad (7.16)$$

а величина $\left(\frac{f_2}{50}\right)^{1,5} < 1$; соответственно удельные потери в ярме и зубцовом слое ротора $P_{a2} = P_{10/50} B_{a2}^2 \left(\frac{f_2}{50}\right)^{1,5}$ и $P_{z2} = P_{10/50} B_{z2}^2 \left(\frac{f_2}{50}\right)^{1,5}$ также будут очень малы.

Характеристикой холостого хода асинхронного двигателя является зависимость тока холостого хода двигателя от линейного напряжения при постоянном значении его частоты: $I_0 = f(U_{\Lambda 1})$ при $f_1 = const$.

Фактическое значение I_0 рассчитывается по его активной I_{0a} и реактивной I_{0p} составляющим:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (7.17)$$

Определение величин I_{0a} и I_{0p} выполняется после расчета магнитной цепи двигателя, т.к. реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{0p} = I_{\mu}. \quad (7.18)$$

Активная составляющая тока холостого хода определяется потерями машины на холостом ходу

$$I_{0a} = \frac{\Delta P_{m01} + \Delta P_{c1} + P_{\text{мех}}}{m_1 U_{\Phi 1}}, \quad (7.19)$$

где электрические потери в обмотке статора на холостом ходу:

$$P_{m01} \approx m_1 I_{\mu}^2 r_1. \quad (7.20)$$

В том случае, если асинхронный двигатель работает от источника синусоидального напряжения, добавочные потери при нагрузке рассчитываются в соответствии с ГОСТ 7217-87 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные» как

$$\Delta P_{cd} = 0,05 P_1 \quad (7.21)$$

Если асинхронный двигатель работает от инвертора, поэтому добавочные потери при нагрузке рассчитываются с учетом сложного гармонического состава напряжения в соответствии с ГОСТ 7217-87 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные» как

$$\Delta P_{cd} = \Delta P_{свг} + \Delta P_{мдоб} + 0,05 P_1 \quad (7.22)$$

где $\Delta P_{свг}$ - потери в стали статора и ротора от высших гармонических напряжения; $\Delta P_{мдоб}$ - потери в обмотках статора и ротора от высших гармонических тока.

Сложный гармонический состав $U_{\Phi 1}$ на выходе инвертора учитывается при расчете добавочных потерь двигателя, т.к. именно эти потери учитывают наличие «паразитных» токов и моментов.

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называются зависимости $I_1 = f(s)$ и $\cos \varphi = f(s)$ при постоянных параметрах напряжения на входе $U_{\Lambda 1} = \text{const}$; $f_1 = \text{const}$. Для электродвигателей особый интерес представляют также зависимости $P_2 = f(s)$, механический момент на валу $M_2 = f(s)$ и $\eta = f(s)$, т.к. позволяют определить свойства машины. Эти характеристики рассчитывают после определения всех потерь в двигателе.

При расчете рабочих характеристик диапазон скольжения следует принимать $0,5s_{\text{ном}} \leq s \leq 1,5s_{\text{ном}}$ с шагом $0,1s_{\text{ном}}$.

На рис. 7.3 и 7.4 приведены характеристика холостого хода и рабочие характеристики и характеристики холостого хода электродвигателя ДАТ-305, производства НПО «ПРИВОД» (г. Лысьва); конструктивные параметры и параметры номинального режима этого электродвигателя указаны в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Основные технические параметры электродвигателя ДАТ305

Параметр	Значение параметра
Номинальная мощность на валу, кВт	305
Напряжение линейное, В	675/1000
Ток фазный, А	320/195
Частота вращения синхронная, об/мин	313/2230
Частота питающего напряжения, Гц	15,55/111,5
Коэффициент полезного действия	0,88
Пусковой момент, Нм	9770
Максимальный вращающий момент, Нм	9316
Мощность в тормозном режиме, кВт	350
Соединение фаз обмотки статора	«звезда»
Число пар полюсов	3
Тип обмотки статора	комбинированная
Класс изоляции обмотки статора	Н
Внутренний диаметр статора, мм	490
Длина сердечника статора, мм	500
Число пазов статора	90
Число пазов ротора	80
Сталь сердечника статора, ротора	2212
Охлаждение	принудительное
Цикл вентиляции	разомкнутый
Расход охлаждающего воздуха, м ³ /с	0,8

.	Полное давление воздуха, Па	1500
.	Климатическое исполнение	УХЛ1
.	Степень защиты	JP X5
.	Тип подвески	Опорно-осевая
.	Масса (с осевым подшипником), кг	2500

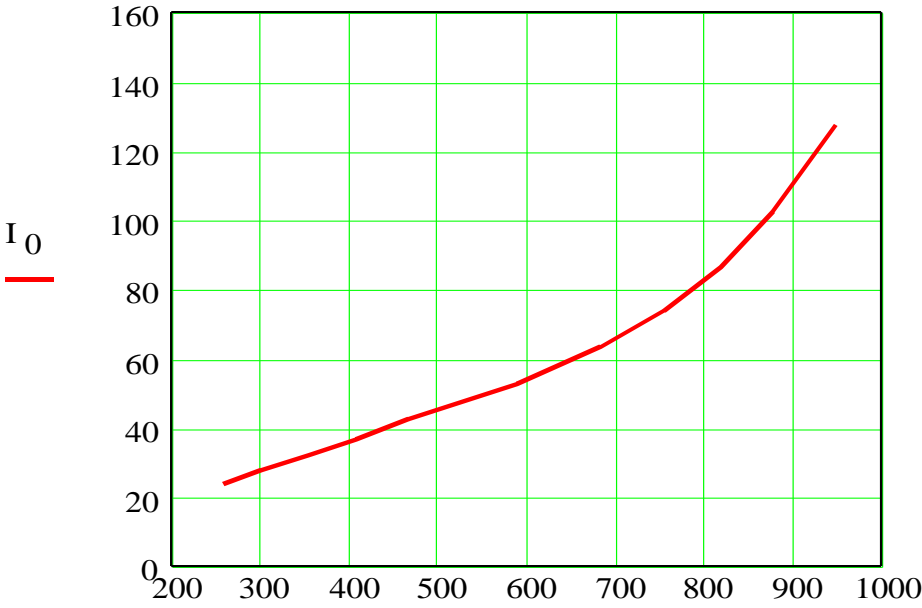


Рис. 7.3. Характеристика холостого хода электродвигателя ДАТ-305

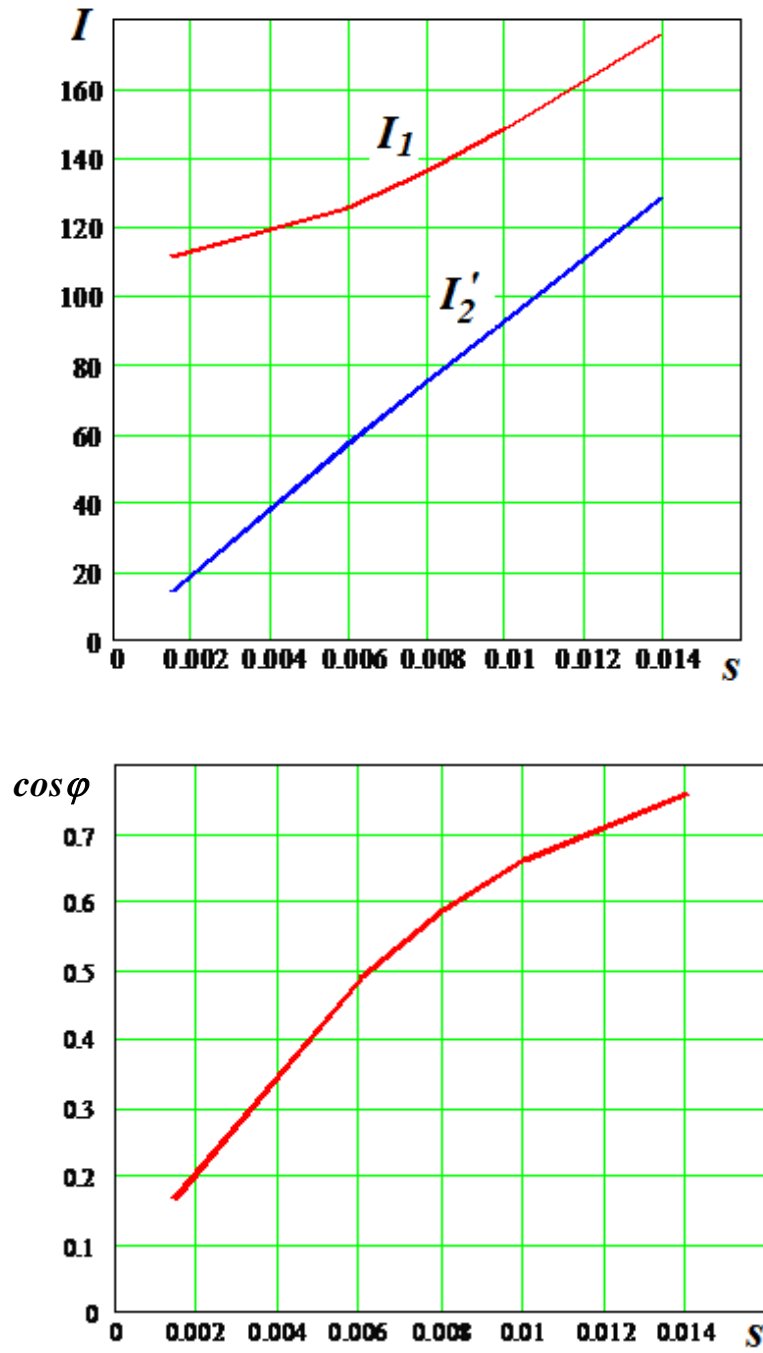


Рис. 7.4. Рабочие характеристики ДАТ-305 при $U_{\text{ЛЛ}}=912\text{В}$ $f_I=25$ Гц и характеристика холостого хода при $f_I=25$ Гц.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ХАРАКТЕРИСТИКА НАМАГНИЧИВАНИЯ В(Н) СТАЛЕЙ

Таблица 1. Значения напряженности, Н, А/см, для электротехнической стали 1312

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,6	3	3	3	3	3	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3
0,7	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9
0,8	4	4	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
0,9	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
1,0	5,7	5,8	5,9	6,0	6,2	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1
1,1	7,2	7,4	7,5	7,6	7,7	8,0	8,2	8,5	8,7	8,9
1,2	9,3	9,6	9,9	10,1	10,5	11	11,3	11,6	11,9	12,3
1,3	12,8	13,3	13,8	14,2	14,6	15	15,7	16,3	17	17,6
1,4	18,2	19	19,8	20,6	21,2	22	23,5	25	26,5	28
1,5	29	30	31	32,5	33,5	35	37	39	41	43
1,6	47	50	53	56	60	63	67	71	75	79
1,7	83	88	93	98	104	110	116	122	128	135
1,8	142	149	156	163	171	179	187	196	205	214
1,9	224	235	246	257	269	281	294	308	322	336
2,0	350	364	378	393	408	423	439	457	476	495
2,1	515	535	556	577	598	620	643	666	689	712
2,2	735	759	783	807	831	855	880	905	930	955
2,3	980	1006	1032	1058	1085	1110	1135	1165	1195	1230
2,4	1270	1305	1340	1375	1415	1455	1495	1535	1570	1610
2,5	1650	1696	1730	1775	1820	1870	1920	1975	2030	2090

Таблица 2. Значения напряженности Н, А/см, для электротехнических сталей 2212, 2213 и 2214

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,6	3,9	3,9	4,0	4,0	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,4
0,7	4,5	4,6	4,6	4,7	4,8	4,8	4,9	4,9	5	5,1
0,8	5,1	5,2	5,3	5,3	5,4	5,5	5,5	5,6	5,6	5,7
0,9	5,8	5,8	5,9	6,0	6,0	6,1	6,2	6,2	6,3	6,4
1,0	6,4	6,5	6,5	6,6	6,7	6,7	6,8	6,9	6,9	7,0
1,1	7,1	7,1	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4	7,5	7,6	7,6
1,2	7,7	7,8	7,8	7,9	8,0	8,0	8,1	8,2	8,2	8,3
1,3	8,3	8,4	8,5	8,5	8,6	8,7	8,7	8,8	8,9	8,9
1,4	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5
1,5	14	14,8	15,6	16,4	17,2	18	19,4	20,8	22,2	23,6
1,6	25	27,2	29,4	31,6	33,8	36	41	46	51	55,5
1,7	58	63	68,3	74,5	80,7	87,1	93,5	100	106	113
1,8	120	128	136	144	152	160	168	176	184	192
1,9	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
2,0	300	314	328	343	358	373	389	407	427	445
2,1	464	483	503	524	543	564	586	608	630	652
2,2	674	697	720	743	766	789	813	837	861	885
2,3	909	934	950	984	1010	1034	1058	1087	1116	1150
2,4	1189	1223	1257	1291	1330	1369	1408	1447	1481	1520
2,5	1560	1609	1640	1685	1730	1780	1830	1885	1940	2000

Литература

1. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин [Электронный ресурс]. 3-е изд., испр. и доп. -М.: Высш. шк. , 2002. -757с.: ил.- Режим доступа:
https://www.studmed.ru/kopylov-ip-i-dr-proektirovanie-elektricheskikh-mashin_d175087895d.html
2. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин [Электронный ресурс]. Изд. 3-е, переработ. и доп. М.:Энергия, 1970.- 632с.-Режим доступа :
<https://www.razym.ru/tehnicheskaya/elektrotehnika/328928-sergeev-ps-i-dr-proektirovanie-elektricheskikh-mashin.html>
3. 1. Игнатович, В. М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. М. Игнатович, Ш. С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск : Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа:
<http://www.iprbookshop.ru/34738.html>