

Государственное бюджетное профессиональное
образовательное учреждение города Москвы
Московский государственный колледж
Электромеханики и информационных технологий

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

по профессиональному модулю **ПМ.01 Организация и проведение работ
по изготовлению электрических машин, аппаратов и установок**

по междисциплинарному курсу **МДК 01.02 Основы проектирования
электротехнических изделий**

специальность **13.02.10 «Электрические машины и аппараты»**

Рассмотрено на заседании
предметной (цикловой) комиссии
Технической эксплуатации
электрического и
электромеханического
оборудования

Разработано на основе
Федерального государственного
образовательного стандарта
профессионального образования
По специальности 13.02.10
«Электрические машины и
аппараты»

Протокол № _____
от «___» _____ 2018г.

Председатель ПЦК

_____ Маркелов С.Н.
(подпись)

Составитель: Ежов Ю.И., преподаватель МГКЭИТ

Содержание

Введение	4
1 Исходные данные для проектирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	5
2 Определение главных размеров асинхронного двигателя	5
3 Расчет обмотки статора	10
4 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора	14
5 Расчет ротора	16
6 Расчет магнитной цепи	20
7 Параметры рабочего режима двигателя	23
8 Расчет потерь	29
9 Расчет рабочих характеристик аналитическим методом	32
10 Расчет пусковых характеристик	34
11 Тепловой расчет	41
12 Список источников информации	47
13 Приложение А Справочные таблицы	48
15 Приложение Б Варианты задания на курсовое проектирование	68

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

ВВЕДЕНИЕ

Цель курсового проекта – ознакомить студента с современной практикой проектирования электрических машин и её основными проблемами, научить его применять полученные значения при решении реальной задачи, воспитать и развить навыки самостоятельной работы и самостоятельного принятия решений.

Основные разделы курсового проекта

Содержание курсового проекта направлено, прежде всего, на расширение и углубление знаний, развитие навыков в расчетах с широким использованием справочной литературы, каталогов, учебных пособий и др.

Курсовой проект содержит следующие материалы:

Расчетно-пояснительную записку.

Графическую часть.

Расчетно-пояснительная записка должна содержать:

- 1 Титульный лист.
- 2 Задание на курсовой проект.
- 3 Оглавление.
- 4 Введение
- 5 Расчетно-конструкторскую часть, в которую входит:
 - Выбор главных размеров электродвигателя
 - Определение числа зубцов и витков обмотки статора
 - Расчёт зубцовой зоны статора и воздушного зазора
 - Расчет ротора
 - Расчет намагничивающего тока
 - Определение параметров рабочего режима
 - Расчет потерь и параметров холостого хода
 - Расчет рабочих и пусковых характеристик
 - Тепловой расчет и расчет вентиляции
 - Заключение (анализ расчетных данных)
- 6 Список использованных источников информации.

Общие указания по выполнению курсового проекта

Пояснительная записка (в т. ч. титульный лист и задание) со ссылками на литературу и промежуточными вычислениями оформляется в редакторе WORD в соответствии с правилами оформления, для проектов и сдается в бумажной и электронной форме.

Графическая часть проекта должна содержать:

1 Чертёж общего вида электродвигателя с его продольным и поперечным разрезами (для полного представления о принципиальных конструктивных решениях).

2 Эскизы пазов статора и ротора.

3 Рабочие и пусковые характеристики.

4 Спецификацию основных деталей машины.

Конструктивный чертёж (формат А1), выполненный в соответствии с требованиями ЕСКД. Масштаб для общего вида выбирается таким, чтобы на одном листе разместить две проекции (1:1; 1:2; 1:2,5; 1:4; 1:5; 1:10).

1. Исходные данные для проектирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

P_{2H} - номинальная мощность асинхронного двигателя (АД), кВт;

U_{1H} - фазное напряжение обмотки статора, В;

n_1 - синхронная частота вращения, мин⁻¹;

f_1 - частота питающей сети, Гц;

S1, S2, S3 ...- режим работы АД (продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный и т.д.);

IP23, IP44 ...- исполнение АД по степени защиты (каплезащищенное исполнение, брызгозащищенное исполнение и т.д.).

2. Определение главных размеров асинхронного двигателя

Расчёт асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчётной длины воздушного зазора l_δ . С этой целью предварительно принятой высоте оси вращения h выбирают наружный диаметр статора D_a , а по нему определяют внутренний диаметр D . Затем, задаваясь предварительно (на основе имеющихся рекомендаций) значениями электромагнитной нагрузки A и индукции в воздушном зазоре B_δ , коэффициентами α_δ , k_B , k_{obl} , определяют l_δ и λ . Алгоритм решения при этом имеет вид:

$$h \rightarrow D_a \rightarrow D \begin{matrix} \rightarrow \tau \\ \rightarrow P_{\text{расч}} \end{matrix} \rightarrow l_\delta \rightarrow \lambda$$

В процессе проектирования наружный диаметр статора, выбранный в зависимости от h , может быть изменен обычно в большую сторону (в меньшую нецелесообразно, так как при этом возрастают электромагнитные нагрузки).

При определении $P_{\text{расч}} = P'$ предварительные значения η и $\cos\phi$, если они не указаны в задании, выбираются по ГОСТ 19523 или по кривым рисунки 3 или 4. При выборе A и B_δ вообще допускается сравнительно широкий их диапазон. Однако принятие их крайних пределов допускаемой области одинаково малоудовлетворительно: при верхних - увеличивается нагрев обмотки и ухудшаются энергетические показатели (при одновременном уменьшении габаритов и массы машины); при нижних - наоборот, увеличиваются размеры и объем активной части машины, но снижаются технико-экономические показатели.

Следует помнить, что если от произведения $A \cdot B_\delta$ зависят главные размеры двигателя, то их соотношение существенно влияет на его характеристики. До расчета магнитной цепи удобнее магнитное поле рассматривать синусоидальным (влияние его уплощения учитывается только при расчете магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи), поэтому коэффициент полюсного перекрытия α_δ и коэффициент формы поля k_B предварительно принимаются:

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,64; \quad k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

2.1 Число пар полюсов

$$p = \frac{60 f_1}{n_1}$$

2.2 Предварительная высота оси вращения h определяется по рисунку 1. Затем по таблице 1 (Приложение А) принимается ближайшее меньшее стандартное значение h и соответствующий наружный диаметр статора D_a .

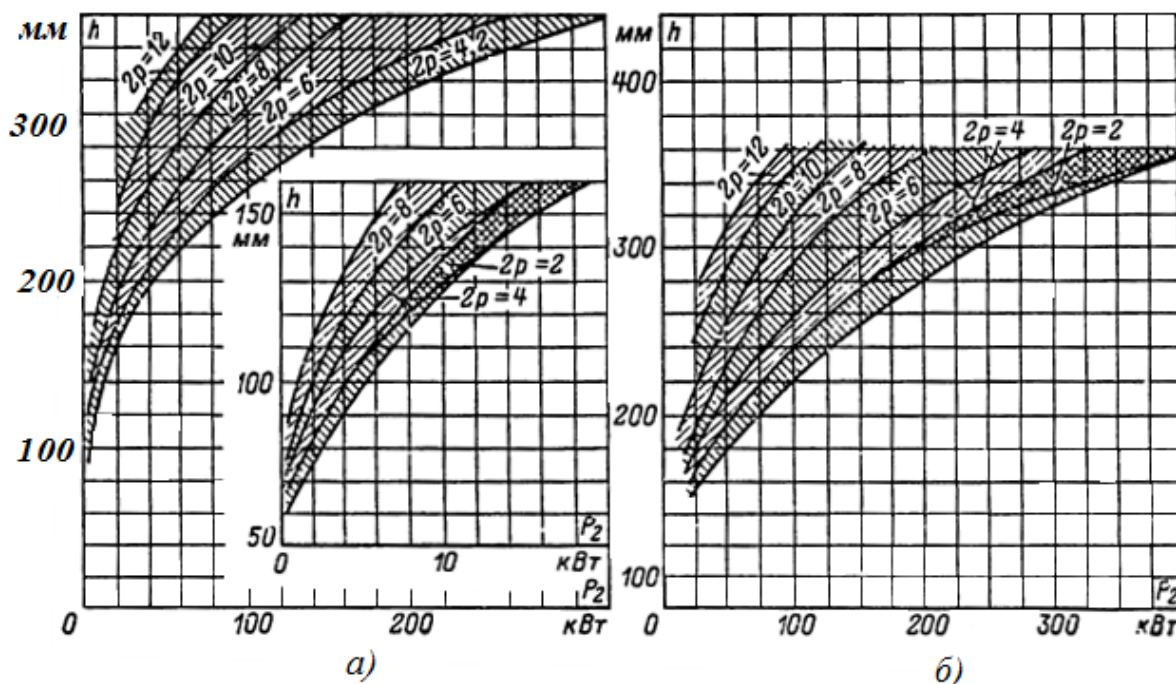


Рисунок 1 - Высота оси вращения h двигателей серии 4А различной мощности и частоты вращения

а) – со степенью защиты IP44; б) – с IP23

2.3 Внутренний диаметр статора

$$D = K_D \cdot Da, \text{ м,}$$

где K_D определяется по таблице 2.

2.4 Полусное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \text{ м,}$$

где $2p$ – число полюсов асинхронного двигателя.

2.5 Расчетная мощность асинхронного двигателя

$$P' = P_{2H} \frac{K_E}{\eta \cdot \cos \varphi}, \text{ кВт,}$$

где K_E - определяется по рисунку 2;

η - номинальный расчетный КПД (по рисунку 3 или 4);

$\cos \varphi$ - номинальный расчетный коэффициент мощности (по рисунку 3 или 4).

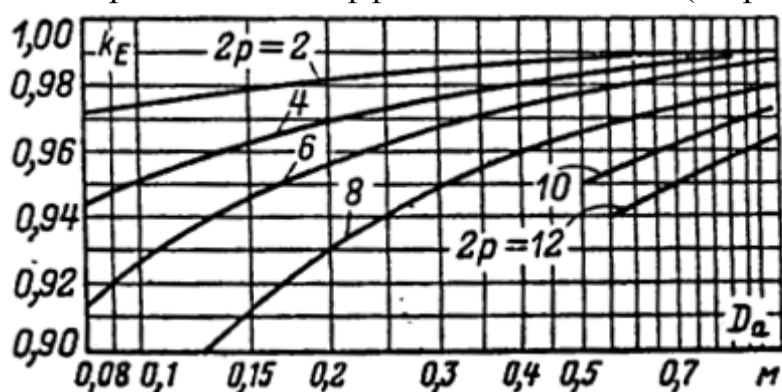


Рисунок 2 - Значение коэффициента k_E

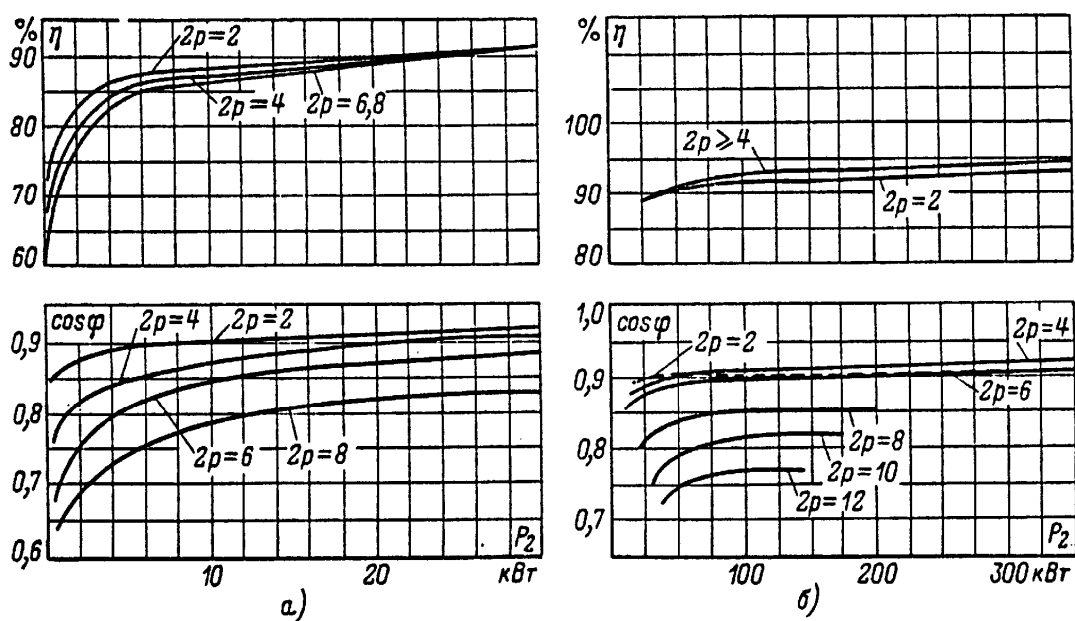


Рисунок 3- Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44.

а) – двигатель мощностью до 30 кВт; б) – двигатель мощностью до 400 кВт

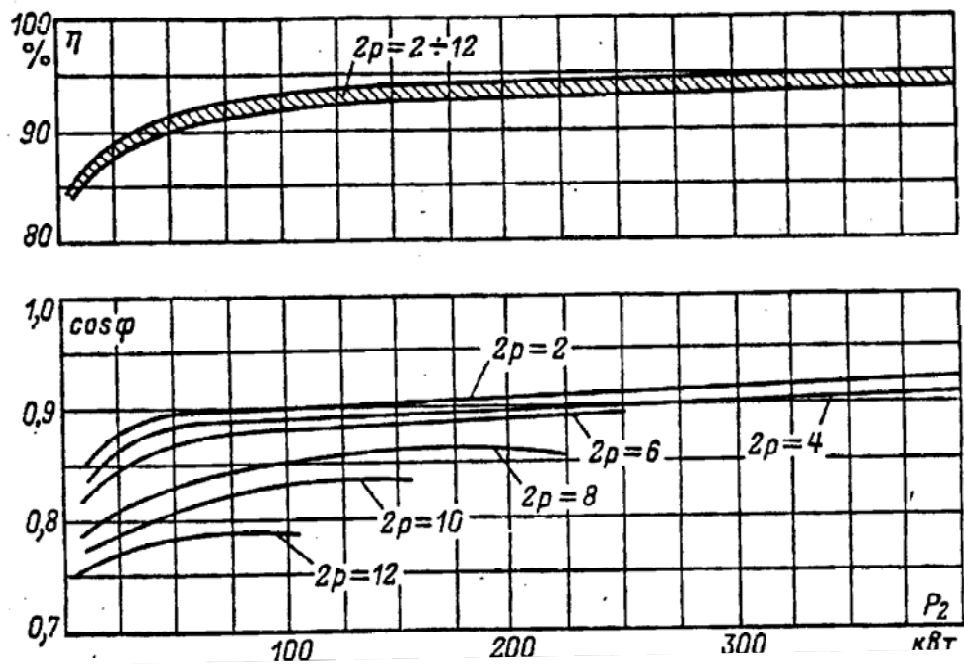


Рисунок 4 - Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP23

2.6 Электромагнитные нагрузки предварительно определяются по рисунка 5 и 6 A , A/m ; B_δ , Тл.

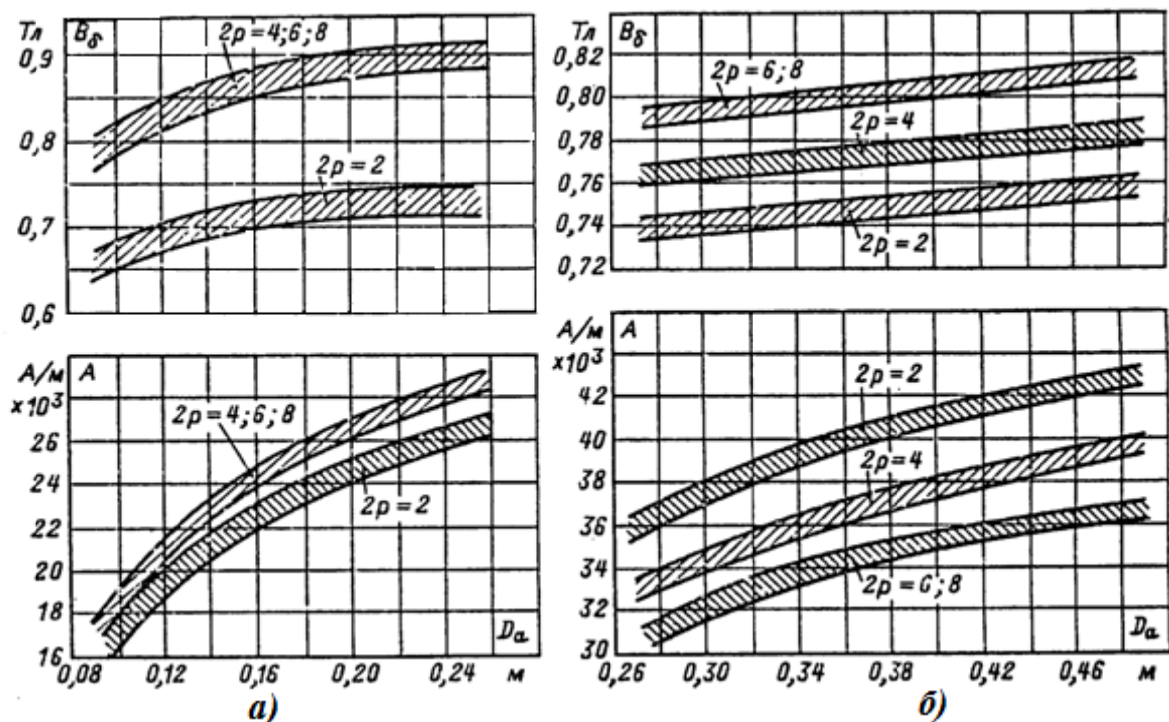


Рисунок 5 - Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

а)– при высоте оси вращения $h \leq 132$ мм;

б) –при $h=160 \div 250$ мм

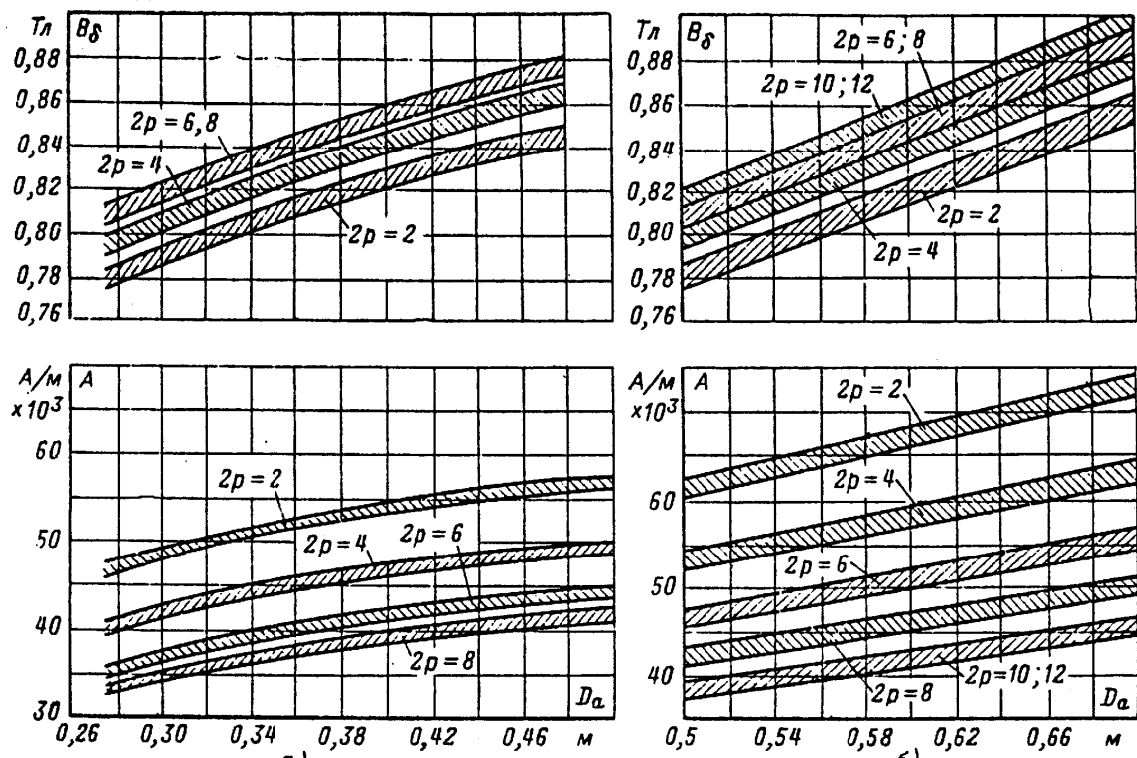


Рисунок 6 - Элект^{а)} магнитные нагрузки асинхронных дви^{б)} елей серии 4А со степенью защиты IP23

а) – при высоте оси вращения $h=160 \div 250$ мм; б) – при $h \geq 280$ мм

2.7 Обмоточный коэффициент $K_{об1}$ зависит от типа обмотки статора.

Предварительно задаются:

для однослойных обмоток $K_{об1} = 0,95 \div 0,96$;

для двухслойных обмоток при $2p=2$ $K_{об1} = 0,9 \div 0,91$;

для двухслойных обмоток при $2p > 2$ $K_{об1} = 0,91 \div 0,92$.

2.8 Расчетная длина воздушного зазора

$$l_{\delta} = \frac{P' \cdot 10^3}{K_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{об1} \cdot A \cdot B_{\delta}}, \text{ м},$$

где K_B - коэффициент формы поля в воздушном зазоре, $K_B = 1,09 \div 1,11$;

Ω - синхронная угловая скорость АД,

$$\Omega = 2\pi \frac{n_1}{60} \text{ или } \Omega = 2\pi \frac{f_1}{p}, \text{ рад/с.}$$

2.9 Отношение $\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau}$.

Это отношение в значительной степени влияет на технические характеристики и экономические данные машины.

Величина λ является критерием правильности выбора главных размеров D и l_δ , которая должна находиться в пределах, указанных на рисунке 7.

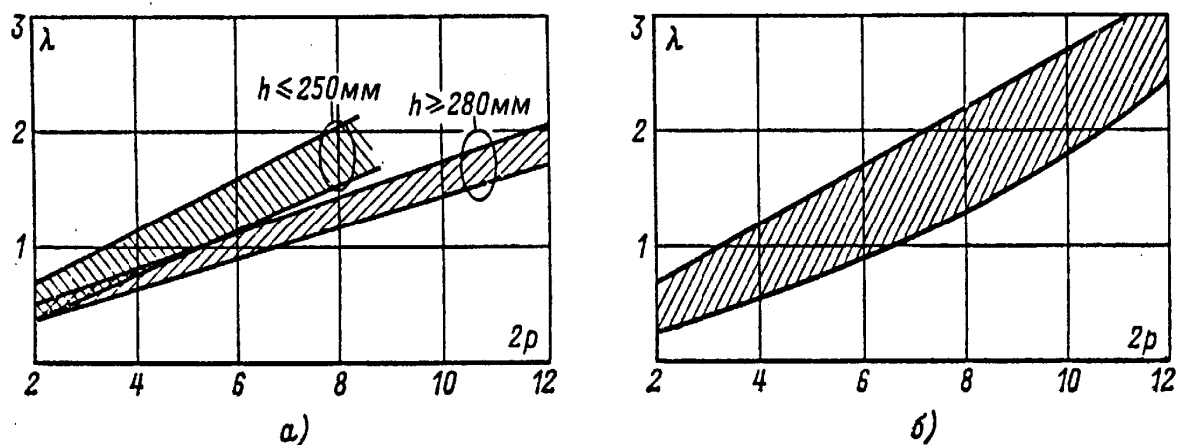


Рисунок 7 - Отношение $\lambda = l_\delta/\tau$ у двигателей серии 4А
а) – со степенью защиты IP44; б) – с IP23

Если λ больше указанных пределов, то следует повторить расчет (по пунктам 2.2-2.9) для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения h . Если λ меньше указанных пределов, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h .

На этом выбор главных размеров заканчивается.

3. Расчет обмотки статора

3.1 Предельные значения зубцового деления t_1 определяется по рисунку 8:

$t_{1\text{макс}}$, $t_{1\text{мин}}$, мм.

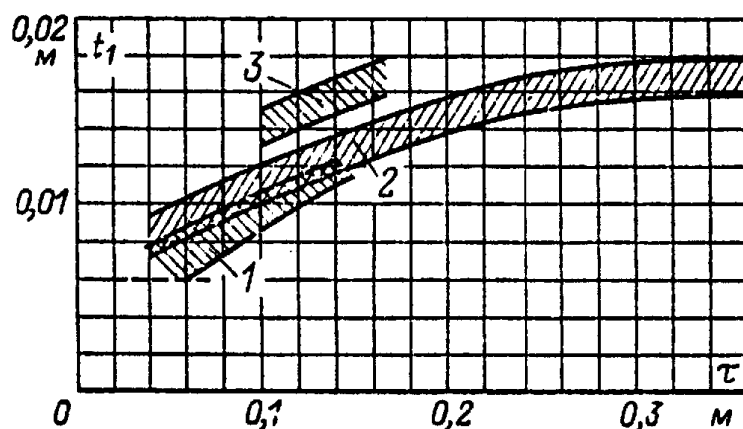


Рисунок 8 - Зубцовое деление статора асинхронных двигателей со всыпной обмоткой

1 – при $h \leq 90$ мм; 2 – при $90 < h \leq 250$ мм; 3 – при $h > 250$ мм.

3.2 Число пазов статора

$$z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} ; z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} .$$

3.3 Окончательное значение числа пазов принимается из полученного в п.3.2 предела с учетом того, что z_1 должно быть кратным числу фаз m , а число пазов на полюс и фазу должно быть целым числом.

3.4 Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = \frac{z_1}{2 p \cdot m} .$$

3.5 Окончательное значение зубцового деления статора

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2 p \cdot m \cdot q_1} , \text{ м.}$$

Окончательное значение t_1 не должно выходить за указанные выше пределы более чем на 10%. В любом случае для двигателей с $h \geq 56$ мм зубцовое деление t_1 должно быть не менее 6-7 мм (0,006-0,007м).

3.6 Предварительное число эффективных проводников в пазу (при условии, что число параллельных ветвей в обмотке $a=1$)

$$u_{\Pi}' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1H} \cdot z_1} ,$$

где A - принятое ранее (п.2.6) значение линейной нагрузки;

I_{1H} - номинальный ток обмотки статора,

$$I_{1H} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} , \text{ А.}$$

Здесь $\cos \varphi$ и η определены в п.2.5.

Полученное число эффективных проводников в пазу u_{Π}' округляется до целого числа, а при двухслойной обмотке – до целого чётного числа. Чтобы это округление не было слишком грубым, сначала значение u_{Π}' не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмотки, при котором число эффективных проводников в пазу потребует незначительного изменения для получения целого или целого чётного числа.

При изменении числа параллельных ветвей число эффективных проводников в пазу определяется:

$$u_{\Pi} = a \cdot u_{\Pi}' ,$$

где a - число параллельных ветвей обмотки, которое зависит от числа полюсов. При выборе значения a можно пользоваться следующими данными:

Число полюсов $2p$	2	4	6	8	10
Допустимое число a	1	1;2	1;2;3	1;2;4	1;2;5

3.7 Окончательное число витков фазы обмотки статора

$$w_1 = \frac{u_{II} \cdot Z_1}{2a \cdot m}.$$

3.8 Окончательное значение линейной нагрузки.

$$A = \frac{2I_{1H} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D}, \quad \frac{A}{m}$$

Значение линейной нагрузки должно лишь незначительно отличаться от принятого ранее. Полученное значение A нужно сопоставить с рекомендуемым на рисунках 5 и 6.

3.9 Выбор типа обмотки

Машины мощностью до 15кВт в большинстве случаев имеют всыпную однослойную обмотку. У более мощных машин всыпные обмотки выполняют двухслойными. Обмотки из прямоугольного провода делают только двухслойными.

3.10 Обмоточный коэффициент

$$K_{об1} = K_p \cdot K_y,$$

где K_p - коэффициент распределения, учитывающий уменьшение ЭДС распределенной по пазам обмотки по сравнению с сосредоточенной. K_p находят из таблицы 3 для первой гармоники при соответствующем значении q , равном числу пазов на полюс и фазу

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \cdot m},$$

K_y - коэффициент укорочения, учитывающий уменьшение ЭДС. витка, вызванное укорочением шага обмотки.

$K_y = \sin(\frac{\pi}{2} \beta)$ - для двухслойной обмотки.

Здесь $\beta = 0,8$ - укорочение шага обмотки.

Для однослойной обмотки K_y всегда равен единице.

3.11 Окончательное значение магнитного потока

$$\Phi = \frac{K_E \cdot U_{1H}}{4,44 w_1 \cdot K_{об1} \cdot f_1}, \text{ Вб},$$

где K_E - коэффициент определяется по рисунку 2.

3.12 Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta}, \text{ Тл}.$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области (рисунки 5 и 6) более чем на 5%, следует принять другое значение u_n и повторить расчет.

3.13 Плотность тока в обмотке статора (предварительно)

$$J_1 = \frac{(A \cdot J_1)}{A}, \frac{A}{\text{м}^2}$$

Значение $(A \cdot J_1)$ определяется из рисунка 9.

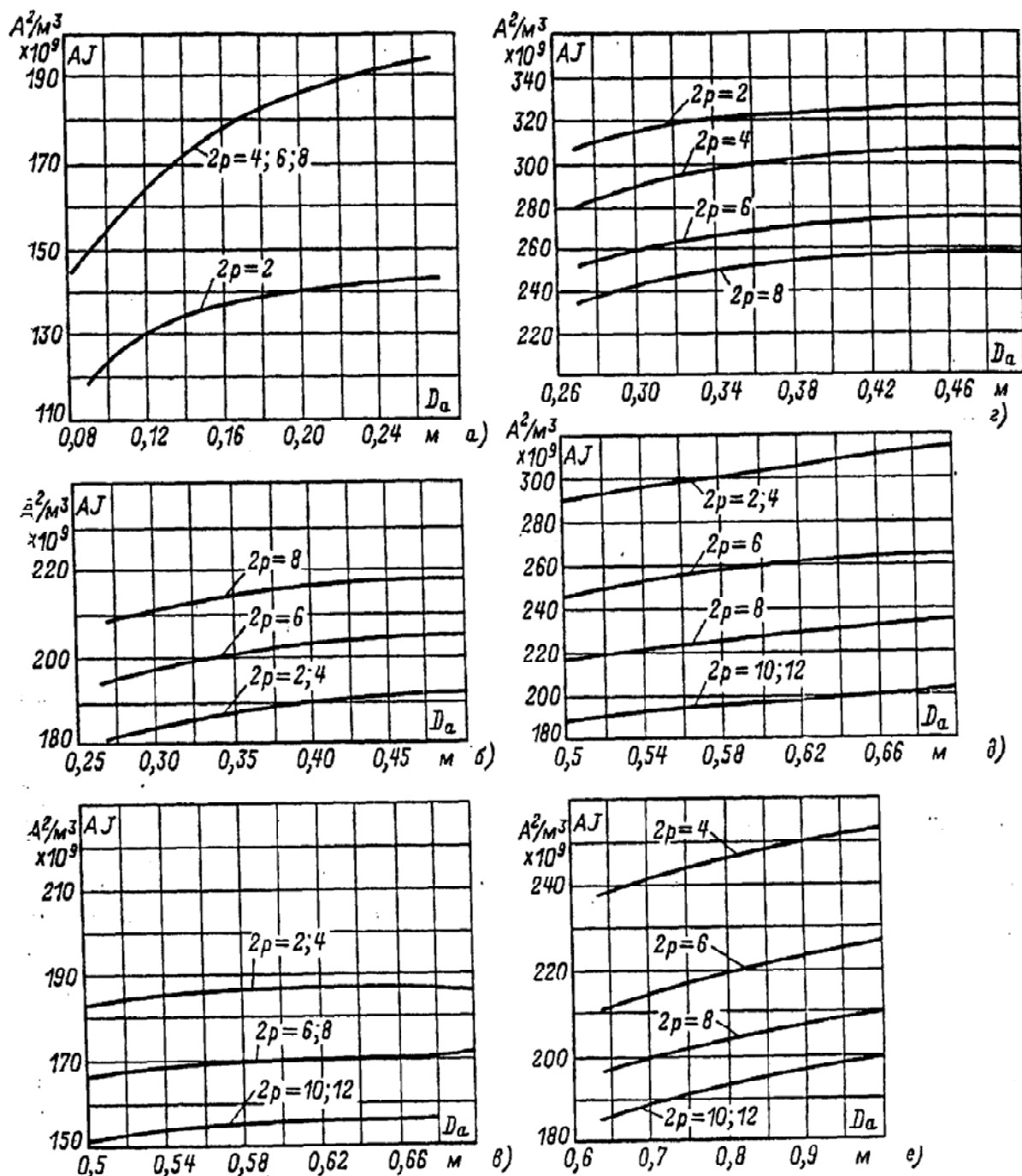


Рисунок 9 - Средние значения произведения (AJ) АД
а) – со степенью защиты IP44, $h \leq 132$ мм; б) – то же при $h=160 \div 250$ мм;
в) – то же при $h=280 \div 355$ мм (при продувном роторе);
г) – со степенью защиты IP23, при $h=160 \div 250$ мм;
д) – то же при $h=280 \div 355$ мм; е) – то же при $U=6000$ В.

3.14 Сечение эффективного проводника (предварительно)

$$q_{\text{эф1}} = \frac{I_{1H}}{a \cdot J_1}, \text{ мм}^2.$$

Для насыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1,8 мм.

Если расчетное $q_{\text{эф1}} > 1,8$ мм, то проводник разделяется на несколько элементарных. Для этого по таблице 4 подбирается $q_{\text{эл}}$ и число элементарных проводников $n_{\text{эл}}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника

$$q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}} = q_{\text{эф1}}.$$

У насыпных обмоток $n_{\text{эл}} \leq 6$.

3.15 Плотность тока в обмотке статора (окончательно).

$$J_1 = \frac{I_{1H}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}}, \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

4. Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

4.1 Для насыпной обмотки рекомендуется выбирать паз статора, показанный на рисунке 10а.

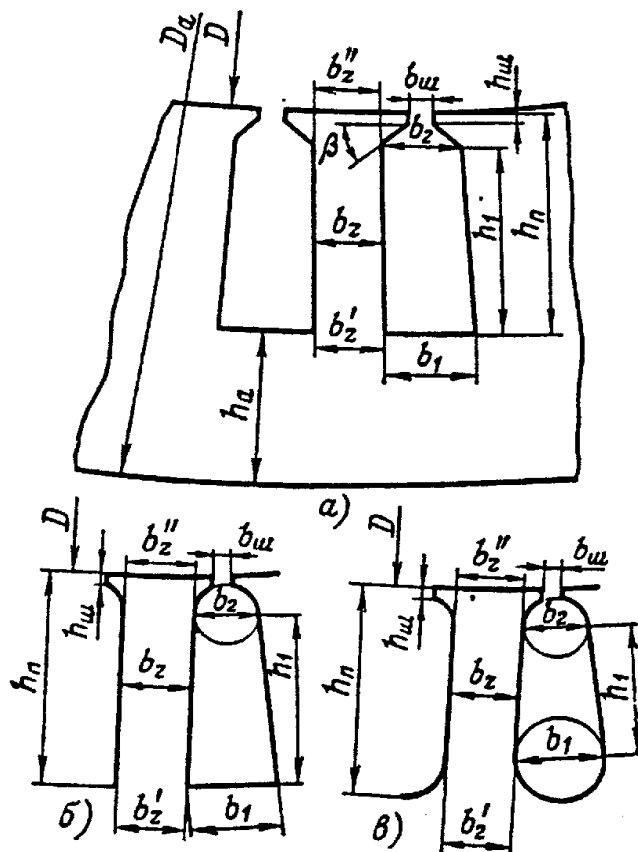


Рисунок 10 - К расчёту размеров зубцовой зоны насыпной обмотки статора

4.2 Принимаются предварительно по таблице 5:

B_a – значение допустимой индукции в ярме статора, Тл ;

B_{z1} – значение допустимой индукции в зубцах статора, Тл.

4.3 Предварительный расчет размеров паза.

Ширина зубца

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot K_c}, \text{ мм},$$

где $l_{cm1} = l_{\delta}$; - длина стали сердечника статора;

K_c - определяется по таблице 6.

Высота ярма статора

$$h_a = \frac{\Phi}{2 B_a \cdot l_{cm1} \cdot K_c}, \text{ мм}.$$

4.4 Размеры паза в штампе принимаются:

$h_u = (0,5 - 1,0) \text{ мм}$ - высота шлица паза;

$b_u = (1,8 - 4,0) \text{ мм}$ - ширина шлица паза.

4.5 Размеры паза в штампе рассчитываются:

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a, \text{ мм};$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_n)}{Z_1} - b_{z1}, \text{ мм};$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_u - b_u) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi}, \text{ мм};$$

$$h_1 = h_n - \left(h_u + \frac{b_2 - b_u}{2} \right), \text{ мм}.$$

Величина b_2 справедлива для трапецеидальных пазов (рисунок 10а) с углом наклона граней клиновой части $\beta = 45^\circ$ у двигателей с $h \leq 250$ мм. Полученные в п. 4.5 размеры округляют до десятых долей миллиметра.

4.6 Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку:

$$b_1' = b_1 - \Delta b_{\Pi}, \text{ мм},$$

$$\epsilon_2' = \epsilon_2 - \Delta \epsilon_{\Pi}, \text{ мм},$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_{\Pi}, \text{ мм},$$

где $\Delta \epsilon_{\Pi}$; Δh_{Π} - припуски по ширине и высоте паза.

Принимается $\Delta \epsilon_{\Pi} = 0,2$ мм., $\Delta h_{\Pi} = 0,2$ мм.

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников

$$S_{\Pi}' = \frac{\epsilon_1' + \epsilon_2'}{2} \cdot h_1' - S_{из} - S_{np}, \text{ мм}^2,$$

где $S_{из}$ - площадь поперечного сечения корпусной изоляции

$$S_{из} = \epsilon_{из} (2h_{\Pi} + \epsilon_1 + \epsilon_2), \text{ мм}^2,$$

здесь $\epsilon_{из}$ - односторонняя толщина изоляции в пазу (по таблице 7);

S_{np} - площадь поперечного сечения прокладок в пазу

$$S_{np} = 0,4 \epsilon_1 + 0,9 \epsilon_2$$

4.7 Коэффициент заполнения паза (характеризует плотность укладки проводников в пазы)

$$K_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot u_{\Pi} \cdot n_{эл.}}{S_n'}.$$

При ручной укладке обмоток коэффициент заполнения паза должен быть $K_3 = 0,7 - 0,75$, а при механизированной укладке $K_3 = 0,7 - 0,72$.

Если значение K_3 отличается от рекомендованных, то необходимо изменить размеры паза. Для этого надо принять другие значения B_a и B_{z1} и повторить расчет пп. 4.2-4.7.

4.8 После выполненных расчетов необходимо показать размеры паза в штампе на рисунке паза.

5. Расчет ротора

5.1 Воздушный зазор δ определяется по рисунку 11.

5.2 Число пазов ротора Z_2 определяется по таблице 8.

5.3 Внешний диаметр ротора

$$D_2 = D - 2\delta, \text{ м.}$$

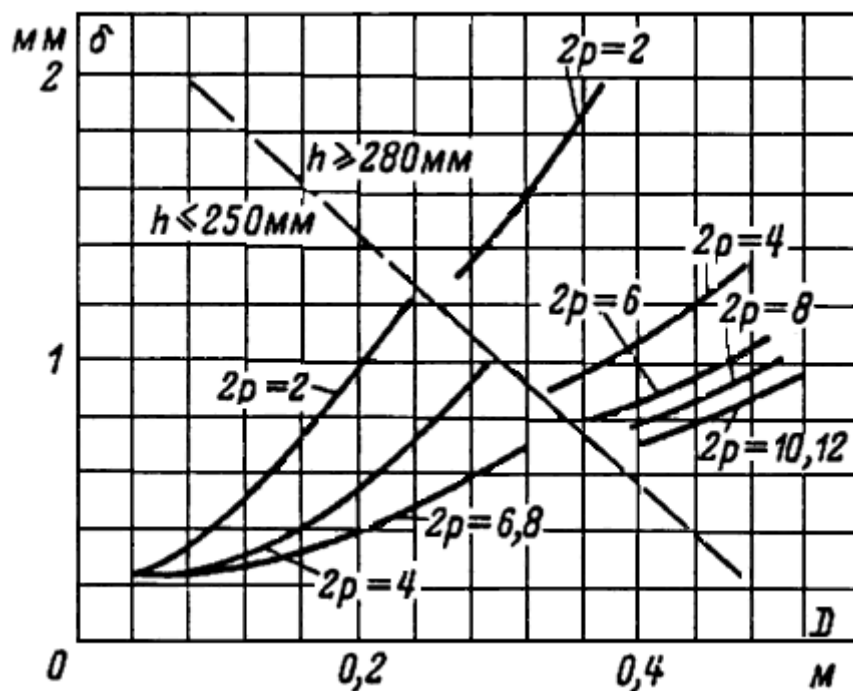


Рисунок 11- К выбору воздушного зазора в асинхронных двигателях

5.4 Длина ротора принимается равной длине статора

$$l_1 = l_2, \text{ м.}$$

5.5 Зубцовое деление

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2}, \text{ м.}$$

5.6 Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал

$$D_j = D_\epsilon = Da \cdot K_\epsilon, \text{ м,}$$

где K_ϵ определяется по таблице 9.

5.7 Ток в стержне ротора

$$I_2 = K_i \cdot I_1 \cdot \nu_i, \text{ А,}$$

где K_i - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания

и сопротивления обмоток на отношение $\frac{I_1}{I_2}$. Определяется по рисунку 12;

ν_i - коэффициент приведения токов для двигателя с короткозамкнутым ротором

$$v_i = \frac{2m_1 \cdot w_1 \cdot K_{o61}}{Z_2}.$$

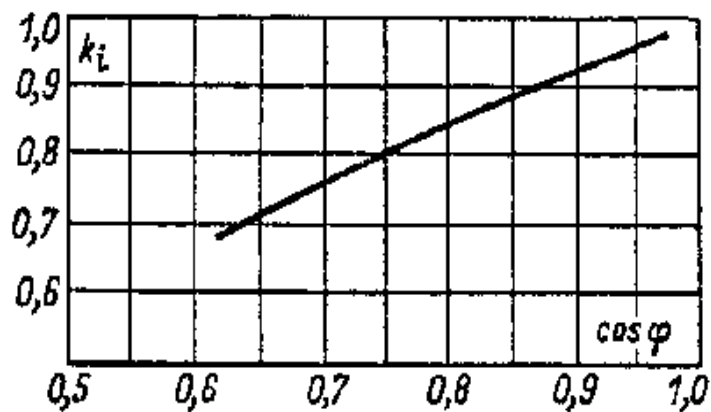


Рисунок 12 - Коэффициент k_i в зависимости от $\cos \varphi$

5.8 Площадь поперечного сечения стержня

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}, \text{ м}^2,$$

где J_2 - плотность тока в стержне литой клетки ротора принимается в

$$\text{пределах } J_2 = (2,5 - 3,5) \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

5.9 Паз ротора АД с короткозамкнутым ротором с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм выполняется грушевидным с литой обмоткой.

В двигателях с $h < 160$ мм применяют полузакрытые пазы (рисунок 13а) с размерами:

$$v_{\text{ш}} = 1,0 \text{ мм}; h_{\text{ш}} = 0,5 \text{ мм} - \text{при } h < 100 \text{ мм};$$

$$v_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}; h_{\text{ш}} = 0,75 \text{ мм} - \text{при } h < 112 - 132 \text{ мм}.$$

В двигателях с $h = 160 - 250$ мм применяют закрытые пазы (рисунок 13б) с размерами: $v_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}; h_{\text{ш}} = 0,7 \text{ мм}$. При этом высота перемычки над пазом в

двигателях с $2p \geq 4$ выполняется равной $h'_{\text{ш}} = 0,3 \text{ мм}$, а при $2p = 2$ - $h'_{\text{ш}} = 1,0 - 1,5 \text{ мм}$.

5.10 Допустимая ширина зубца

$$b_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{Z2} \cdot l_{CT2} \cdot K_C}, \text{ мм},$$

где B_{δ} - допустимая индукция (по таблице 5);

$$l_{CT2} = l_{\delta}.$$

5.11 Размеры паза (рисунок 13):

$$e_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu}) - Z_2 \cdot e_{z2}}{\pi + Z_2}, \text{ мм};$$

$$e_2 = \sqrt{\frac{e_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}}, \text{ мм};$$

$$h_1 = (e_1 - e_2) \frac{Z_2}{2\pi}, \text{ мм}.$$

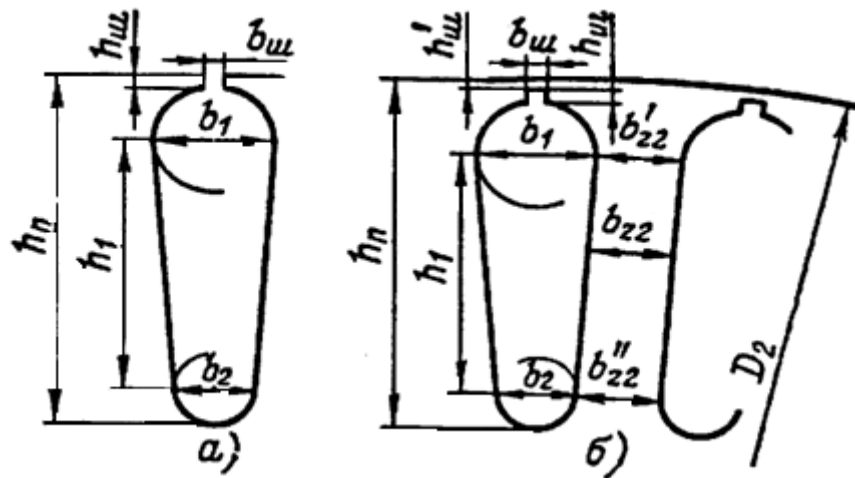


Рисунок 13 - Грушевидные пазы короткозамкнутого ротора
а) – полузакрытые; б) – закрытые

5.12 Полная высота паза

$$h_{\Pi 2} = h'_{uu} + h_{uu} + \frac{e_1}{2} + h_1 + \frac{e_2}{2}, \text{ мм}.$$

5.13 Уточненная площадь сечения стержня

$$q_c = \frac{\pi}{8}(e_1^2 + e_2^2) + \frac{1}{2}(e_1 + e_2) \cdot h_1, \text{ мм}^2.$$

5.14 Плотность тока в стержне

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c}, \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

5.15 Площадь поперечного сечения короткозамыкающих колец (рисунок 14)

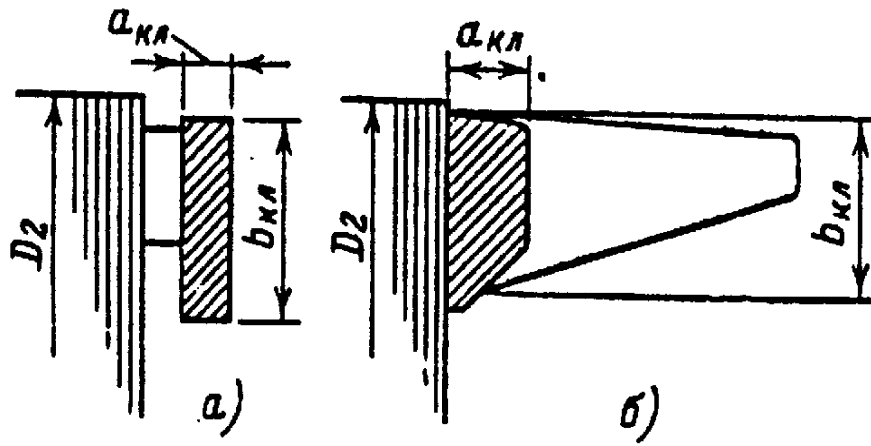


Рисунок 14 - Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора
а) – со сварной обмоткой; б) – с литой обмоткой

$$q_{\text{кЛ}} = \frac{I_{\text{кЛ}}}{J_{\text{кЛ}}}, \text{ м}^2,$$

где $I_{\text{кЛ}}$ - ток в кольце

$$I_{\text{кЛ}} = \frac{I_2}{\Delta}, \text{ А},$$

здесь I_2 - ток в стержнях ротора;

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2};$$

$J_{\text{кЛ}}$ - плотность тока в короткозамыкающих кольцах.

$$\text{Принимается } J_{\text{кЛ}} = 0,85 J_2, \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

5.16 Размеры короткозамыкающих колец

$$e_{\text{кЛ}} = 1,25 h_{\text{П2}}, \text{ мм};$$

$$a_{\text{кЛ}} = \frac{q_{\text{кЛ}}}{e_{\text{кЛ}}}, \text{ мм}.$$

Средний диаметр короткозамыкающего кольца

$$D_{\text{к.ср}} = D_2 - e_{\text{кЛ}}, \text{ мм}.$$

6. Расчет магнитной цепи

6.1 Значения магнитных индукций в зубцах статора и ротора

$$B_{\text{З1}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{e_{\text{З1}} \cdot l_{\text{СТ1}} \cdot K_{\text{С}}}, \text{ Тл};$$

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{e_{z2} \cdot l_{CT2} \cdot K_C}, \text{ Тл.}$$

6.2 Индукция в ярме статора

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a \cdot l_{CT1} \cdot K_C}, \text{ Тл,}$$

где h_a - расчетная высота ярма статора

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{П1}, \text{ м.}$$

6.3 Индукция в ярме ротора

$$B_j = \frac{\Phi}{2h_j \cdot l_{CT2} \cdot K_C}, \text{ Тл,}$$

где h_j - расчетная высота ярма ротора

$$h_j = \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{П2} \right), \text{ м.}$$

6.4 Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot K_{\delta}, \text{ А,}$$

где K_{δ} - коэффициент воздушного зазора;

δ - воздушный зазор, м;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м;}$$

$$K_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta},$$

$$\text{здесь } \gamma_1 = \frac{(e_w / \delta)^2}{5 + e_{w1} / \delta}.$$

6.5 Магнитное напряжение зубцовой зоны статора

$$F_{z1} = 2h_{z1} \cdot H_{z1}, \text{ А}$$

где h_{z1} - расчетная высота зубца статора, м.

Для рисунка 10а $h_{z1} = h_{П}$;

H_{z1} - напряженность поля в зубцах статора, А/м,
определяется по таблице 12 при B_{z1} .

6.6 Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора

$$F_{z2} = 2h_{z2} \cdot H_{z2}, \text{ А},$$

где h_{z2} - расчетная высота зубца ротора, м.

Для рисунка 13 $h_{z2} = h_{п2} - 0,1\delta_2$;

H_{z2} - напряженность поля в зубцах ротора, А/м,
определяется по таблице 12 при B_{z2} .

6.7 Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$K_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}$$

Коэффициент K_z характеризует правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных машины и должен находиться в пределах $1,6 > K_z > 1,2$. Если это условие не выполняется, необходимо в расчет внести коррективы.

6.8 Магнитное напряжение ярма статора

$$F_a = L_a \cdot H_a, \text{ А},$$

где L_a - длина средней магнитной линии ярма статора

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p}, \text{ м};$$

H_a - напряженность поля при индукции B_a по таблице 11.

6.9 Магнитное напряжение ярма ротора

$$F_j = L_j \cdot H_j, \text{ А},$$

где L_j - длина средней магнитной линии ярма ротора.

Для всех двигателей кроме двухполюсных

$$L_j = \frac{\pi(D_\delta - h_j)}{2p}, \text{ м},$$

здесь D_δ - диаметр вала двигателя;

h_j - высота спинки ротора

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2}.$$

Для двигателей с $2p=2$

$$L_j = 2h_j, \text{ м};$$

H_j - напряженность поля при индукции B_j по таблице 11.

6.10 Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи машины на пару полюсов

$$F_y = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j, \text{ А.}$$

6.11 Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$K_\mu = \frac{F_y}{F_\delta}.$$

6.12 Намагничивающий ток

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_y}{0,9m_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1}}, \text{ А.}$$

6.13 Относительное значение намагничивающего тока

$$I_\mu^* = \frac{I_\mu}{I_{1H}}$$

Значение I_μ^* служит критерием правильности расчетов размеров и обмотки двигателя. Величина I_μ^* должна быть в пределах $0,35 > I_\mu^* > 0,18$.

7. Параметры рабочего режима двигателя

7.1 Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \rho \cdot \frac{L_1}{q_{\varnothing\phi} \cdot a}, \text{ Ом,}$$

где L_1 - общая длина эффективных проводников фазы обмотки

$$L_1 = l_{CP1} \cdot w_1, \text{ м,}$$

здесь l_{CP1} - средняя длина витка обмотки

$$l_{CP1} = 2(l_{п1} + l_{л}), \text{ м.}$$

В этом выражении:

$l_{П1}$ - длина пазовой части витка

$l_{П1} = l_1$ (l_1 - конструктивная длина сердечника статора);

$l_{Л}$ - длина лобовой части витка

$$l_{Л} = K_{Л} \cdot \epsilon_{ТК} + 2B, \text{ м.}$$

Здесь $\epsilon_{ТК}$ - средняя ширина витка

$$\epsilon_{ТК} = \frac{\pi(D + h_{П1})}{2p} \cdot \beta_1, \text{ м,}$$

где β_1 - относительное укорочение шага обмотки статора (см. п. 3.10).

$K_{Л}$ - коэффициент выбирается по таблице 13;

B - длина вылета прямолинейной части секции из паза до начала отгиба лобовой части. Принимается $B=0,01\text{м}$.

$q_{ЭФ}$ - сечение эффективного проводника (см. п.3.14)

ρ - удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, Ом·м (по таблице 20).

Для изоляции обмоток с классом нагревостойкости А, Е и В расчетная температура принимается равной 75°C ,

а для изоляции обмоток класса F и H - 115°C .

7.2 Относительное значение сопротивления r_1

$$r_1^* = r_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}}.$$

7.3 Активное сопротивление фазы обмотки ротора

$$r_2 = r_c + 2 \frac{r_{кл}}{\Delta^2}, \text{ Ом,}$$

$$\text{где } r_c = \rho_c \cdot \frac{l_2}{q_c}, \text{ Ом;}$$

$$r_{кл} = \rho_{кл} \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}}, \text{ Ом.}$$

В этих выражениях:

l_2 - длина стержня, м (см. п.5.4);

$D_{кл.ср}$ - средний диаметр замыкающих колец

$$D_{кл.ср} = D_2 - \epsilon_{кл}, \text{ м;}$$

q_c - площадь поперечного сечения стержня (см. п.5.13);

$q_{кл}$ - площадь поперечного сечения замыкающего кольца (см. п.5.15);

ρ_c и $\rho_{кл}$ - соответственно удельные сопротивления материала стержня и замыкающих колец при расчетной температуре (по таблице 20);

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2}.$$

7.4 Приведение r_2 к числу витков обмотки статора

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4m_1 \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2}, \text{ Ом.}$$

7.5 Относительное значение r_2'

$$r_2^* = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}}.$$

7.6 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta'}{p \cdot q} (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}), \text{ Ом,}$$

где $\lambda_{п1}$ - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния определяется по таблице 14 в зависимости от вида паза (рисунок 15).

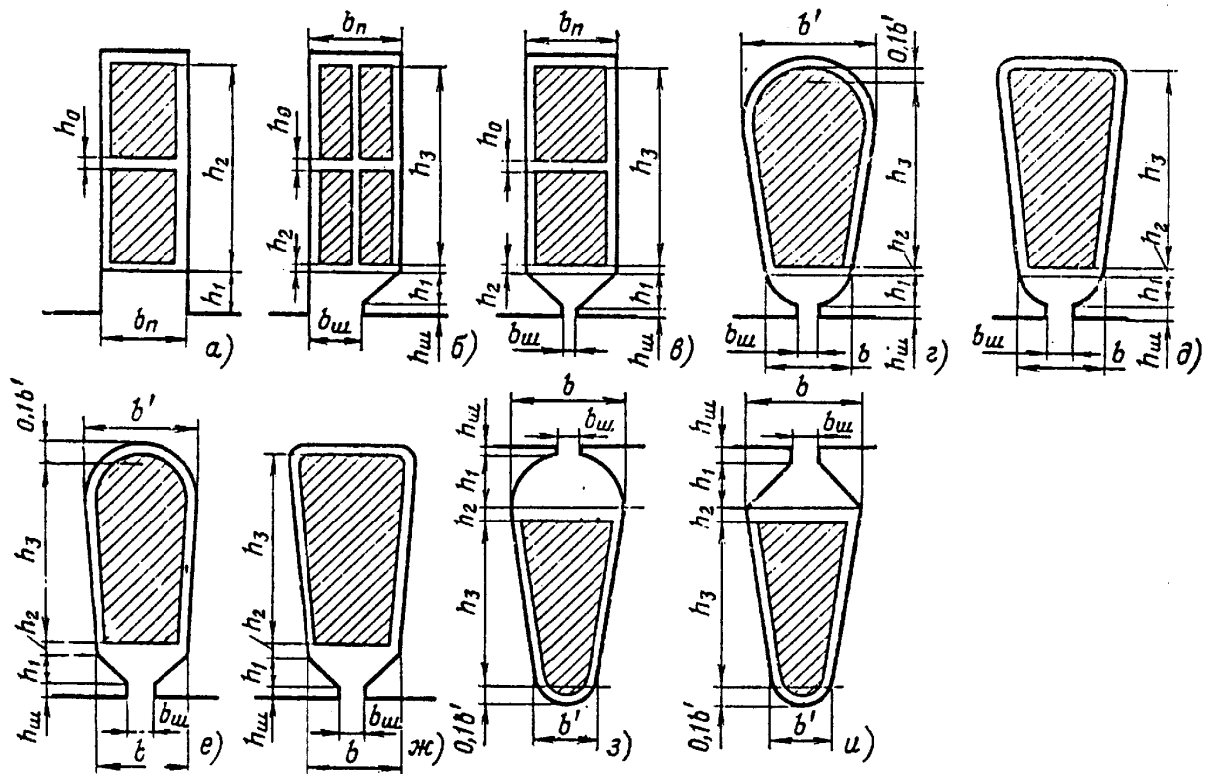


Рисунок 15 - К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазов статора

В расчетных формулах коэффициенты K_β и K_β' определяют:

для однослойных обмоток и при полном шаге двухслойных обмоток

$$K_{\beta} = K'_{\beta} = 1;$$

при двухслойной обмотке с укороченным шагом

$$\frac{2}{3} \leq \beta < 1$$

$$K'_{\beta} = 0,25(1+3\beta);$$

при двухслойной обмотке с укороченным шагом

$$\frac{1}{3} \leq \beta < \frac{2}{3}$$

$$K'_{\beta} = 0,25(6\beta-1);$$

коэффициент

$$K_{\beta} = 0,25(1+3K'_{\beta}).$$

$\lambda_{Л1}$ - коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{Л1} = 0,34 \frac{q}{l'_{\delta}} (l_{Л1} - 0,64 \beta \tau)$$

$\lambda_{Д1}$ - коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_1}{12 \delta \cdot K_{\delta}} \xi,$$

значение ξ определяется следующим образом:

при открытых пазах статора и отсутствии скоса пазов

$$\xi = (2 \frac{t_2}{t_1} - \frac{t_1}{t_2} \Delta_z) K_{\beta} - K_{о\delta 1}^2 (\frac{t_2}{t_1})^2;$$

при полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2 K'_{ck} \cdot K_{\beta} - K_{о\delta 1}^2 (\frac{t_2}{t_1})^2 (1 + \beta_{ck}^2)$$

В этих формулах:

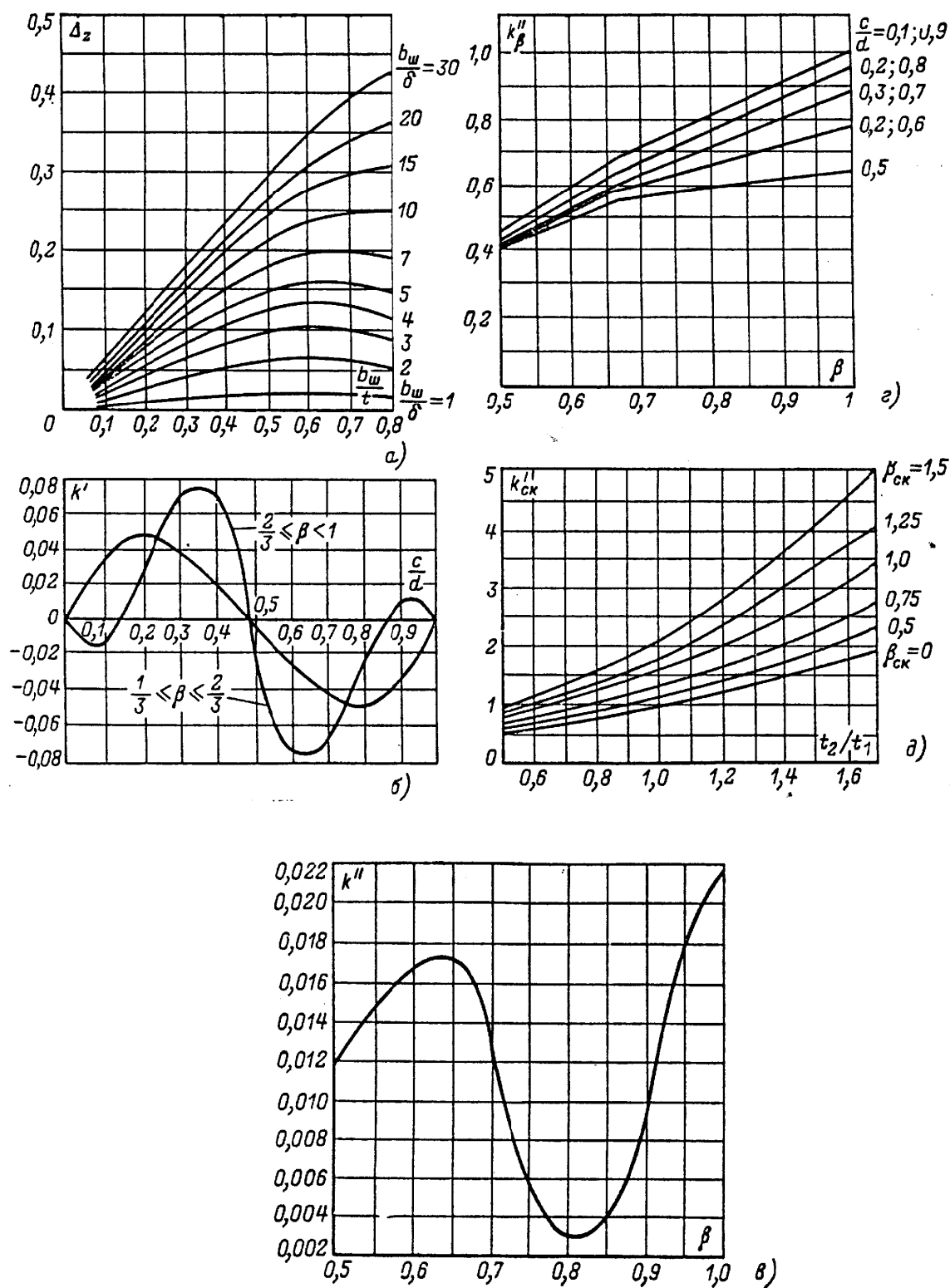
t_1 и t_2 - зубцовые деления статора и ротора;

Δ_z определяется по рисунку 16а;

$$\beta_{ck} = \frac{e_{ck}}{t_2} - \text{коэффициент скоса.}$$

При отсутствии скоса пазов $e_{ck} = 0$;

K'_{ck} - определяется по рисунку 16 б.



- а – коэффициент Δ_z в зависимости от размерных соотношений $b_{ш}/t$ и $b_{ш}/\delta$;
б – коэффициент k' в зависимости от дробной части числа q ;
в – коэффициент k'' в зависимости от укорочения шага обмотки β ;
г – коэффициент k_{ck}' в зависимости от укорочения шага обмотки β_{ck} и дробной части числа q ;
д – коэффициент k_{ck}'' в зависимости от соотношения t_2/t_1 и относительного скоса пазов β_{ck} .

Рисунок 16 - Коэффициенты к расчёту проводимости дифференциального рассеяния

7.7 Относительное значение x_1

$$x_1^* = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}}.$$

7.8 Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 f_1 \cdot l'_\delta \cdot 10^{-6} (\lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}), \text{ Ом},$$

где $l'_\delta = l_\delta$;

$\lambda_{П2}$ - определяется по формулам в таблице 15 в зависимости от вида паза (рисунок 17);

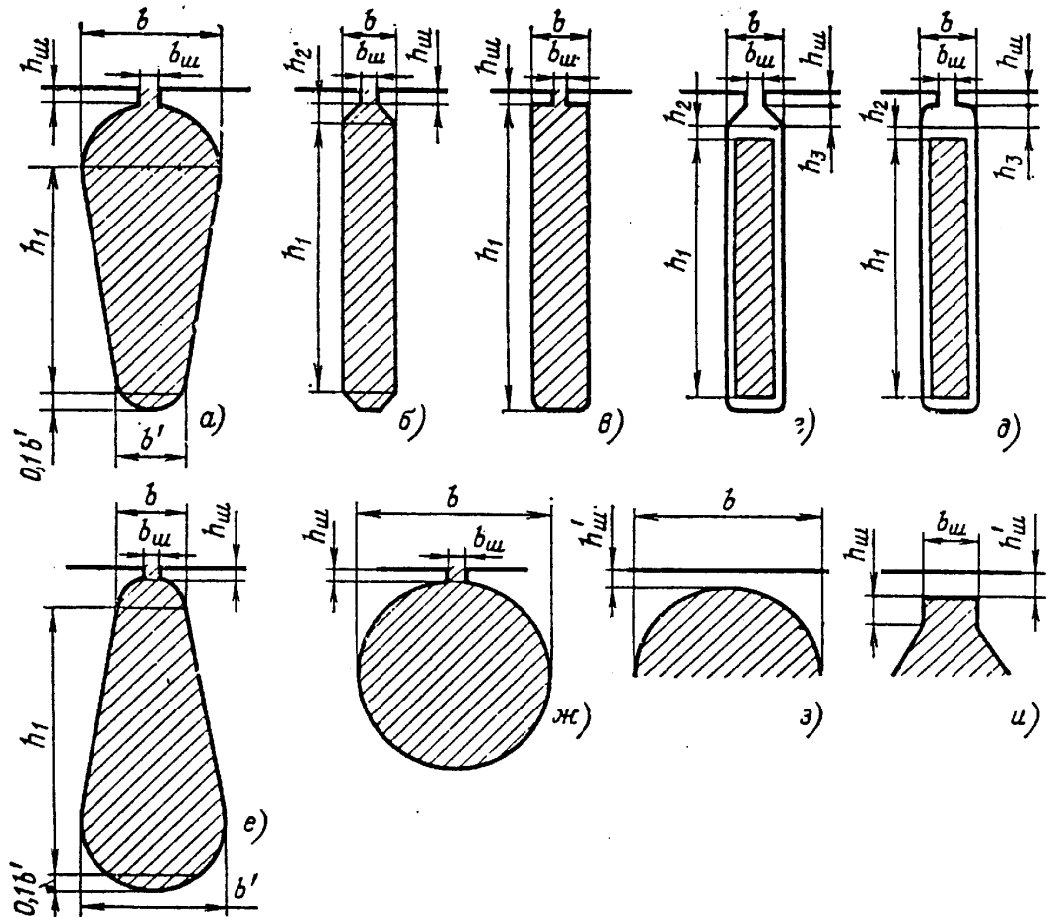


Рисунок 17 - К расчёту магнитной проводимости пазов ротора

$\lambda_{Д2}$ - определяется по формуле

$$\lambda_{Д2} = \frac{t_2}{12\delta \cdot K_\delta} \xi,$$

здесь

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_Z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2}.$$

В этом выражении Δ_Z определяется по рисунку 16а.

$\lambda_{Л2}$ - для ротора с литыми обмотками определяется по формуле

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3 D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \lg \frac{4,7 D_{кл.ср}}{2a_{кл} + \epsilon_{кл}},$$

где $D_{кл.ср}$, $a_{кл}$, $\epsilon_{кл}$,

Δ - параметры замыкающих колец определены выше.

7.9 Приведение x_2 к числу витков статора

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4m \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2}, \text{ Ом.}$$

7.10 Относительное значение

$$x_2^* = x_2 \frac{I_{1H}}{U_{1H}}.$$

8. Расчет потерь

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические потери, вентиляционные, механические и добавочные потери при нагрузке.

8.1 Потери в стали основные

$$p_{ст.осн.} = p_{1,0/5,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (K_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + K_{\partial z} \cdot B_{Z1}^2 \cdot m_{Z1}), \text{ Вт}$$

где $p_{1,0/5,0}$ - удельные потери, Вт/кг (по таблице 16);

β - показатель степени (по таблице 16);

$K_{\partial a}$, $K_{\partial z}$ - коэффициенты для машин мощностью меньше 250 кВт принимаются

$$K_{\partial a} = 1,6 ; K_{\partial z} = 1,8 ;$$

B_a, B_{z1} - индукция в ярме и в зубцах статора (определены в разделе 6);

m_a, m_{z1} - масса стали ярма и зубцов статора,

$$m_a = \pi (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{CT1} \cdot K_C \cdot \gamma_C , \text{ кг};$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot \epsilon_{z1cp} \cdot Z_1 \cdot l_{CT1} \cdot K_C \cdot \gamma_C , \text{ кг},$$

здесь h_a - высота ярма статора (определена в разделе 6);

h_{z1} - расчетная высота зубца статора.

$h_{z1} = h_{\Pi}$ (определена в разделе 6);

ϵ_{z1cp} - средняя ширина зубца статора

$$\epsilon_{z1cp} = \frac{\epsilon_{z1max} + \epsilon_{z1min}}{2} , \text{ м};$$

$$\gamma_C = 7,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Кг}}{\text{м}^3} - \text{удельная масса стали};$$

$K_C = 0,97$ - коэффициент, учитывающий неоднородность стали.

8.2 Поверхностные потери в роторе

$$P_{нов 2} = p_{нов 2} (t_2 - \epsilon_{ш 2}) Z_2 \cdot l_{CT 2} , \text{ Вт},$$

где $p_{нов 2}$ - удельные поверхностные потери ротора

$$p_{нов 2} = 0,5 K_{o2} \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{o2} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} ,$$

здесь $K_{o2} = 1,4 \div 1,8 ;$

n - частота вращения ротора, мин^{-1} ;

$$B_{o2} = \beta_{o2} \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta} ,$$

где $\beta_{o2} = 0,15 - 0,4$.

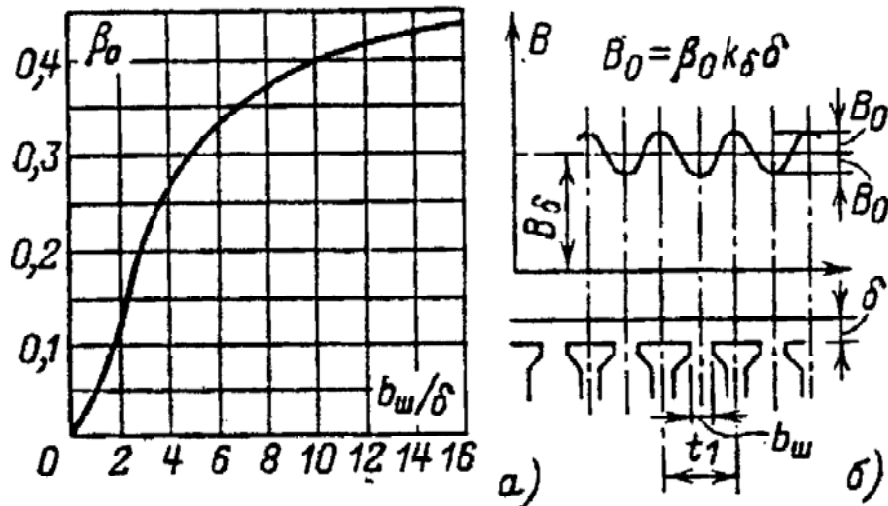


Рисунок 18 - К расчёту поверхностных потерь в асинхронной машине
 а) – зависимость $\beta_0 = f(b_{ш}/\delta)$; б) – пульсации индукции в воздушном зазоре

8.3 Пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{\text{пуль 2}} = 0,11 \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пуль 2}} \right)^2 \cdot m_{Z2}, \text{ Вт},$$

где $B_{\text{пуль 2}}$ - амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов

$$B_{\text{пуль 2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2t_2} \cdot B_{Z2cp}, \text{ Тл}.$$

Здесь γ_1 - определена выше (п. 6.4);

$B_{Z2cp} = B_{Z2}$ определена выше (п. 6.1);

m_{Z2} - масса стали зубцов ротора

$$m_{Z2} = h_{Z2} \cdot \epsilon_{Z2cp} \cdot Z_2 \cdot l_{CT2} \cdot K_C \cdot \gamma_C, \text{ кг},$$

здесь h_{Z2} - расчетная высота зубца ротора (п. 6.6);

$$\epsilon_{Z2cp} = \frac{\epsilon_{Z2\text{ макс}} + \epsilon_{Z2\text{ мин}}}{2}, \text{ м} - \text{средняя ширина зубца ротора}.$$

8.4 Сумма добавочных потерь в стали

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов2}} + P_{\text{пуль 2}}, \text{ Вт}.$$

8.5 Полные потери в стали

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}}, \text{ Вт}.$$

8.6 Механические потери

Потери на трение и вентиляционные потери для двигателей со степенью защиты IP23 определяются по формуле:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10D)^3, \text{ Вт},$$

где для двигателей с $D_a \leq 0.25$ м:

$$K_T = 5 \text{ при } 2p=2; K_T = 6 \text{ при } 2p \geq 4;$$

для двигателей с $D_a \geq 0.25$ м:

$$K_T = 6 \text{ при } 2p=2; K_T = 7 \text{ при } 2p \geq 4.$$

Механические потери для обдуваемых двигателей (степень защиты IP44) определяются

$$P_{\text{мех}} = K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4, \text{ Вт},$$

где $K_T = 1.0$ для двигателей с $2p=2$;

$K_T = 1.3(1 - D_a)$ для двигателей с $2p \geq 4$.

8.7 Добавочные потери при номинальном режиме

$$P_{доб.н} = 0.005 \cdot P_{1H} = 0.005 \cdot \frac{P_{2H}}{\eta}, \text{ Вт},$$

где η - КПД определен выше по рисунку 3 или 4.

8.8 Ток холостого хода двигателя

$$I_{xx} = \sqrt{I_{xxa}^2 + I_{\mu}^2}, \text{ А},$$

$$\text{где } I_{xxa} = \frac{P_{CT} + P_{MEX} + P_{\Sigma 1XX}}{m \cdot U_{1H}}, \text{ А},$$

Здесь $P_{\Sigma 1XX}$ - электрические потери в статоре при холостом ходе

$$P_{\Sigma 1XX} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1, \text{ Вт}.$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{\mu} = I_{XXP},$$

где I_{μ} - намагничивающий ток определен в п. 6.12.

8.9 Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{xx} = \frac{I_{xxa}}{I_{xx}}.$$

9. Расчет рабочих характеристик аналитическим методом

9.1 Параметры из схемы замещения фазы обмотки машины

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн.}}{m \cdot I_{\mu}^2}, \text{ Ом};$$

$$x_{12} = \frac{U_{1H}}{I_{\mu}}, \text{ Ом};$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}}.$$

9.2 Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{oa} = \frac{P_{ст.осн.} + 3I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3U_{1H}}, \text{ А}.$$

9.3 Расчетные величины для расчета (таблице 17)

$$a' = c_1^2; \quad a = c_1 \cdot r_1, \text{ Ом.};$$

$$e' = 0; \quad e = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2'), \text{ Ом.}$$

9.4 Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в таблице 17.

Расчет выполняют, задаваясь значениями скольжений:

$$S = 0,003; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03; S_n.$$

В таблице 17 перед расчетными формулами представлены параметры, которые не зависят от скольжения. Численные значения этих параметров надо указать. Последовательность расчета понятна из таблицы. После завершения расчета строятся рабочие характеристики $P_1, I_1, \cos \varphi, \eta, S = f(P_2)$.

По характеристике $S = f(P_2)$ определяется номинальное скольжение S_n , соответствующее номинальной мощности P_{2n} . После этого выполняется расчет для скольжения S_n и заполняется последняя графа таблицы. Примерный вид рабочих характеристик представлен на рисунке 19.

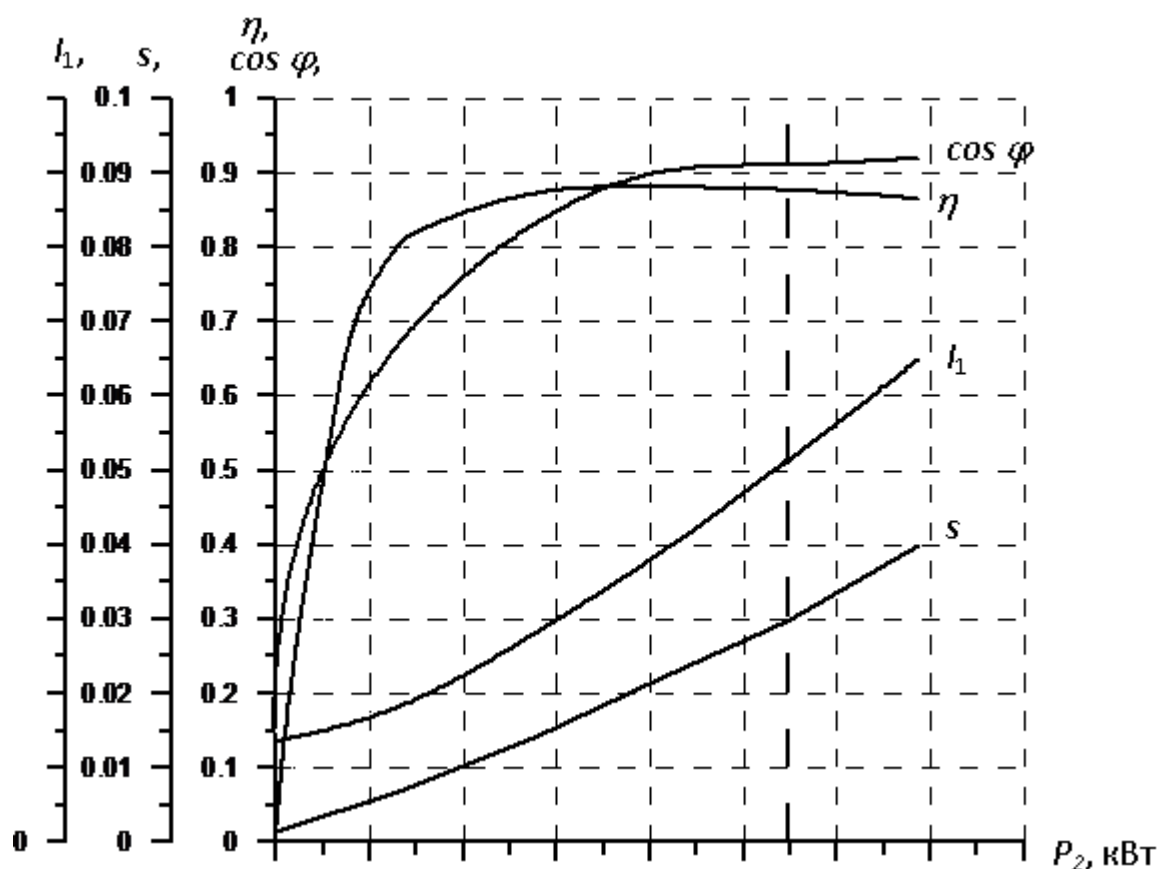


Рисунок 19 - Примерный вид рабочих характеристик

10. Расчет пусковых характеристик

С увеличением частоты тока в стержнях обмотки ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается. При этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины, поэтому при расчетах этих характеристик следует учитывать эффект вытеснения тока.

10.1 Расчетные точки характеристик определяются при скольжениях: $S=1,0$; $0,8$; $0,5$; $0,2$; $0,15$; $0,1$; S_{kp} и заносятся в таблицу 18).

Критическое скольжение приближенно равно

$$S_{kp} = \frac{r_2'}{\frac{x_1}{c_1} + x_2'}.$$

Необходимые пояснения для расчета (таблица 18) приводятся ниже.

Расчет параметров надо начинать для скольжения $S=1,0$ и представить его в качестве примера в пояснительной записке. Для других скольжений результаты заносятся непосредственно в таблицу 18.

10.2 Параметры с учетом вытеснения тока.

ξ - приведенная высота стержня обмотки ротора.

Для литой алюминиевой обмотки ротора:

при расчетной температуре 75°C (класс нагревостойкости изоляции А, Е, В)

$$\xi = 65.15 h_c \cdot \sqrt{S} ;$$

при расчетной температуре 115°C (класс нагревостойкости изоляции F, H)

$$\xi = 63.61 h_c \cdot \sqrt{S} ,$$

где S - скольжение;

h_c - высота стержня в пазу (см. п.5.12).

$$h_c = h_{п2} - h_{ш}' - h_{ш} , \text{ м.}$$

10.3 Для значения ξ - по рисунку 20 определяется величина φ , а по

рисунку 21- величина $\varphi' = K_g$,

K_g - коэффициент демпфирования.

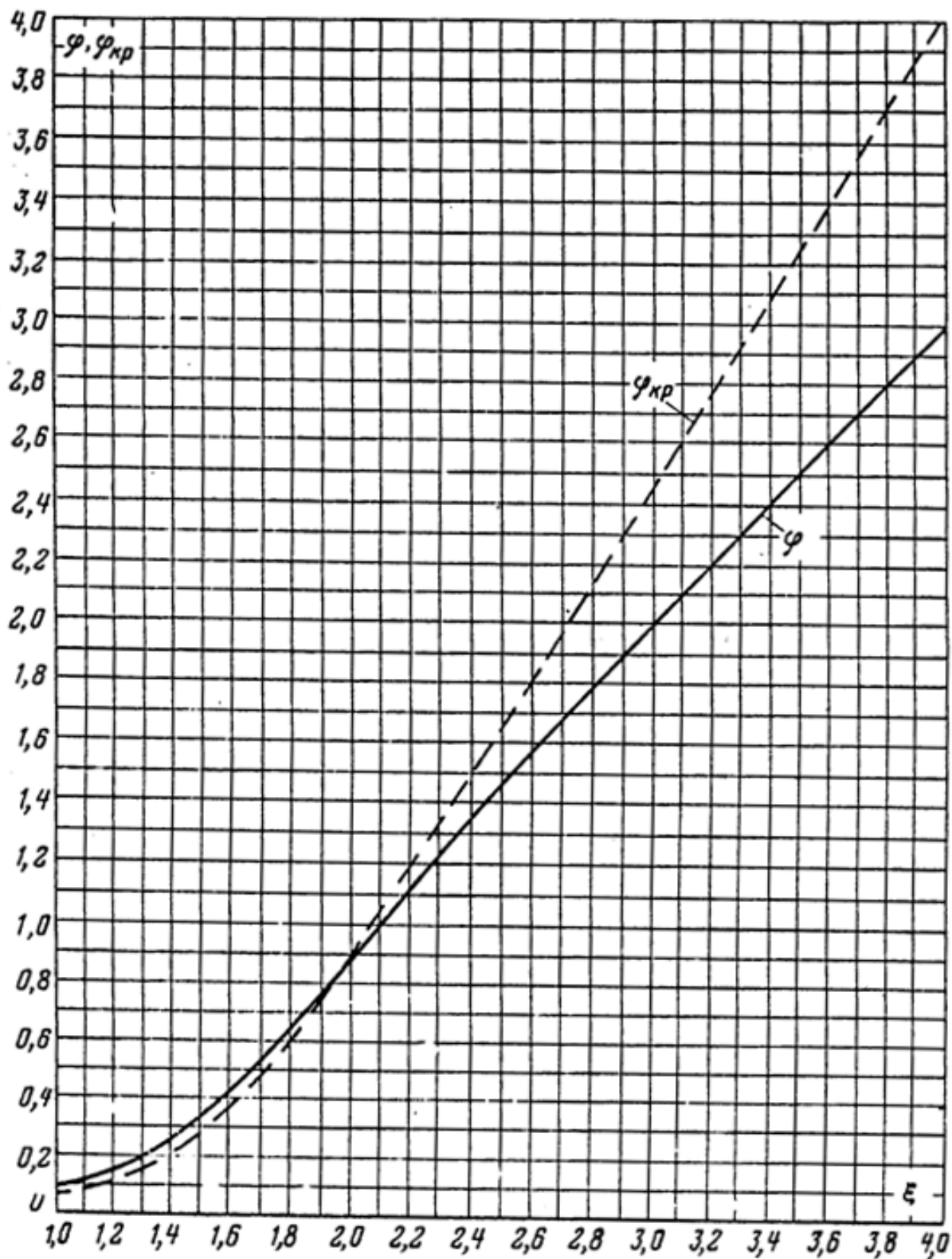


Рисунок 20 - Кривые φ и $\varphi_{кр}$ в функции приведённой высоты ξ
 $(\varphi \approx \xi - 1 \text{ при } \xi > 4 \text{ и } \varphi \approx 4\xi^{4/15} \text{ при } \xi < 1)$

10.4 Глубина проникновения тока в стержень

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}, \text{ м.}$$

10.5 Площадь сечения стержня, ограниченная величиной h_r :

при $h_r \geq \frac{\epsilon_2}{2}$

$$q_r = \frac{\pi \cdot \epsilon_2^2}{8} + \frac{\epsilon_2 + \epsilon_r}{2} \cdot (h_r - \frac{\epsilon_2}{2}), \text{ м}^2;$$

при $h_r < \frac{\epsilon_2}{2}$

$$q_r = \frac{\pi \cdot \epsilon_2^2}{4(\varphi_{kp} + 1)}, \text{ м}^2.$$

В этих выражениях

$$\epsilon_r = \epsilon_2 - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{h_1} \cdot (h_r - \frac{\epsilon_2}{2}), \text{ м};$$

$$\epsilon_1; \epsilon_2; h_1 - (\text{см. п.5.11});$$

φ_{kp} - определяется по рисунку 20.

10.6 Коэффициент K_r , определяющий отношение площади всего сечения стержня (q_c) к площади сечения стержня, ограниченного высотой h_r

$$K_r = \frac{q_c}{q_r},$$

$$\text{где } q_c = \frac{\pi \cdot (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)}{8} + \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \cdot h_1, \text{ м}^2.$$

10.7 Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (K_r - 1),$$

где r_c и r_2 - (см. п.7.3).

10.8 Приведенное активное сопротивление ротора с учетом эффекта вытеснения тока

$$r_{2\xi}' = K_R \cdot r_2', \text{ Ом},$$

где r_2' - (см. п.7.4).

10.9 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока $\lambda_{n2\xi}$ определяется по формуле (таблица 15) в зависимости от принятого вида паза ротора (рисунок 17) и с учетом коэффициента K_g (рисунок 21).

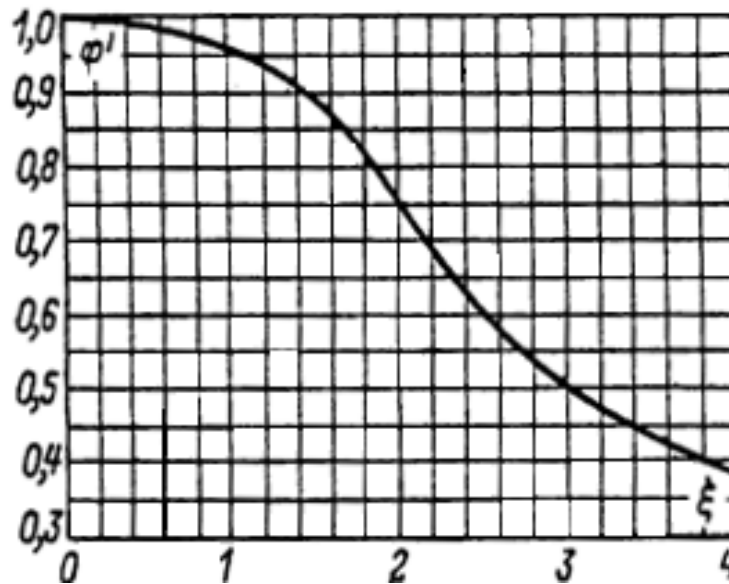


Рисунок 21- Зависимость коэффициента φ'' от приведённой высоты ξ
 $(\varphi' = 3/2\xi \text{ при } \xi > 1)$

10.10 Коэффициент, учитывающий изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от эффекта вытеснения тока

$$K_x = \frac{\lambda_{П2\xi} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}} = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2},$$

где $\lambda_{П2}$, $\lambda_{Л2}$, $\lambda_{Д2}$ - (см. п.7.8).

10.11 Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом эффекта вытеснения тока

$$x_{2\xi}' = x_2' \cdot K_x, \text{ Ом},$$

где x_2' - (см. п.7.9).

10.12 Ток ротора без учета влияния насыщения магнитопровода полями рассеяния

$$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\frac{(r_1 + r_{2\xi}')^2}{S} + (x_1 + x_{2\xi}')^2}}, \text{ А},$$

где r_1 и x_1 - (см. пп. 7.1 и 7.6).

10.13 Далее при расчете параметров машины будет учитываться влияние насыщения магнитопровода полями рассеяния.

Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора

$$F_{n.c.p.} = 0.7 \frac{K_{нас} \cdot I_1 \cdot u_{n1}}{a} \cdot (K_{\beta}' + K_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}), \text{ А ,}$$

где I_1 - ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения. Принимается $I_1 \approx I_2'$; расчет выполняется для тока равного $K_{нас} \cdot I_1$;

a - число параллельных ветвей обмотки статора;

u_{n1} - число эффективных проводников в пазу статора;

K_{y1} - коэффициент укорочения шага (см п.3.10);

$K_{об1}$ - обмоточный коэффициент (см п.3.10);

K_{β}' - коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза при укороченном шаге (см п.7.6);

$K_{нас} = (1.25 - 1.4)$ - коэффициент, учитывающий увеличение кратности тока при насыщении.

10.14 Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.c.p.}}{1.6\delta \cdot C_N} \cdot 10^{-6}, \text{ Тл ,}$$

где C_N - коэффициент

$$C_N = 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}},$$

здесь t_1 и t_2 - зубцовые деления статора и ротора (см пп.3.5 и 5.5).

10.15 По рисунку 22 определяется коэффициент x_{δ} , характеризующий отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины.

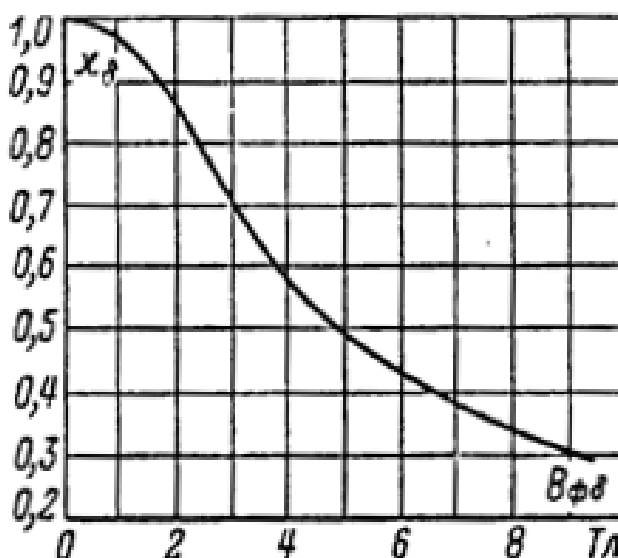


Рисунок 22 - Функция x_δ в зависимости от фиктивной индукции $B_{\phi\delta}$.

10.16 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения

$$\lambda_{П1.нас} = \lambda_{П1} - \Delta\lambda_{П1.нас},$$

$$\text{где } \Delta\lambda_{П1.нас} = \frac{h_{ш1} + 0.58 \cdot h'}{e_{ш1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + 1.5 \cdot e_{ш1}},$$

$$\text{здесь } c_1 = (t_1 - e_{ш1}) \cdot (1 - x_\delta);$$

$$h' = h_n - h_1 - h_{ш1}.$$

Параметры $h_n, h_1, h_{ш1}, e_{ш1}$ определены ранее.

10.17 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом насыщения

$$\lambda_{Д1.нас} = \lambda_{Д1} \cdot x_\delta.$$

10.18 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом насыщения

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{П1.нас} + \lambda_{Д1.нас} + \lambda_{Л1}}{\lambda_{П1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{Л1}}, \text{ Ом.}$$

10.19 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора с учетом насыщения и вытеснения тока

$$\lambda_{П2.\xi.нас} = \lambda_{П2\xi} - \Delta\lambda_{П2.нас},$$

$$\text{где } \Delta\lambda_{П2.нас} = \frac{h_{ш2}}{e_{ш2}} \cdot \frac{C_2}{e_{ш2} + C_2},$$

$$\text{здесь } C_2 = (t_2 - e_{ш2}) \cdot (1 - x_\delta), \text{ мм.}$$

10.20 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом насыщения

$$\lambda_{Д2.нас} = \lambda_{Д2} \cdot x_\delta.$$

10.21 Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния вытеснения тока и насыщения

$$x'_{2\xi.нас} = x'_2 \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xi.нас}}{\sum \lambda_2} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{П2\xi.нас} + \lambda_{П2.нас} + \lambda_{Л2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{Д2} + \lambda_{Л2}}, \text{ Ом.}$$

10.22 Сопротивление взаимной индукции обмоток в пусковом режиме

$$x_{12n} = x_{12} \cdot \frac{F_u}{F_\delta}, \text{ Ом},$$

где x_{12} - см. расчет рабочих характеристик.

10.23 Ток в обмотке ротора и статора

$$I_2' = \frac{U_{1n}}{\sqrt{a_n^2 + e_n^2}}, \text{ А};$$

$$I_1 = I_2' \cdot \frac{\sqrt{a_n^2 + (e_n + x_{12n})^2}}{C_{1n.nac} \cdot x_{12n}}, \text{ А}.$$

В этих формулах:

$$C_{1n.nac} = 1 + \frac{x_{1nac}}{x_{12n}};$$

$$a_n = r_1' + C_{1n.nac} \cdot \frac{r_{2\xi}'}{S};$$

$$e_n = x_{1nac} + C_{1n.nac} \cdot x_{2\xi.nac}'.$$

Если полученное значение тока статора I_1 не отличается от принятого в п. 10.13. значения тока $K_{nac} \cdot I_1$ более чем на (10-15)%, то расчет для $S = 1$ считается законченным. Если расхождение больше, расчет повторяют (п.п. 10.13.-10.23.) скорректировав коэффициент K_{nac} .

10.24 Относительное значение тока (кратность пускового тока при $S = 1$)

$$I^* = \frac{I_1}{I_{1n}}.$$

При $S = 1$ формула примет вид:

$$I_n^* = \frac{I_{1n}}{I_{1n}}.$$

10.25 Относительное значение момента

$$M^* = \frac{M}{M_n} = \left(\frac{I_2'}{I_{2n}'} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_n}{S}$$

где S_n - номинальное скольжение, которое определяется по графику $S = f(P_2)$ рабочих характеристик. Значение S_n соответствует мощности P_{2n} .
при $S = 1$ формула примет вид

$$M_n^* = \frac{M_n}{M_H} = \left(\frac{I_{2n}'}{I_{2H}'} \right)^2 \cdot K_R \cdot S_H.$$

В этом случае M_n^* будет определять кратность пускового момента. Кратность пускового тока и пускового момента должна находиться в пределах:

$$I_n^* = (4.0 - 7.5) \cdot I_{1H};$$

$$M_n^* = (1.2 - 2.2) \cdot M_H.$$

10.26 Действительное критическое скольжение определяется после расчета всех точек пусковых характеристик (таблица 18) по средним значениям сопротивлений $X_{1нас}$ и $X_{2\xi.нас}'$, соответствующим скольжениям $S=0.2; 0.15$ и 0.1

$$S_{кр} = \frac{r_2'}{\frac{X_{1нас}}{C_{1n.нас}} + X_{2\xi.нас}'}$$

11. Тепловой расчет

11.1 Превышение температуры внутренней поверхности статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta \vartheta_{пов1} = K \cdot \frac{P_{\xi.л1}' + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1}, ^\circ C,$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи с поверхности (рисунок 23 или 24);

K – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора передается через станину в окружающую среду (таблица 19).

$P_{\xi.л1}'$ - электрические потери в пазовой части обмотки статора

$$P_{\xi.л1}' = K_\rho \cdot P_{\xi1} \cdot \frac{2l_1}{l_{CP1}}, \text{ Вт}$$

здесь $K_\rho = 1,15$ для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В,

$K_\rho = 1,07$ для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости F,

$K_\rho = 1,45$ для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости H;

$P_{\xi1}$ - электрические потери в обмотках статора.

$$P_{\xi1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \text{ Вт};$$

l_1, l_{CPI} - см. расчет активного сопротивления обмотки статора.

$P_{ст.оч}$ - см. расчет потерь.

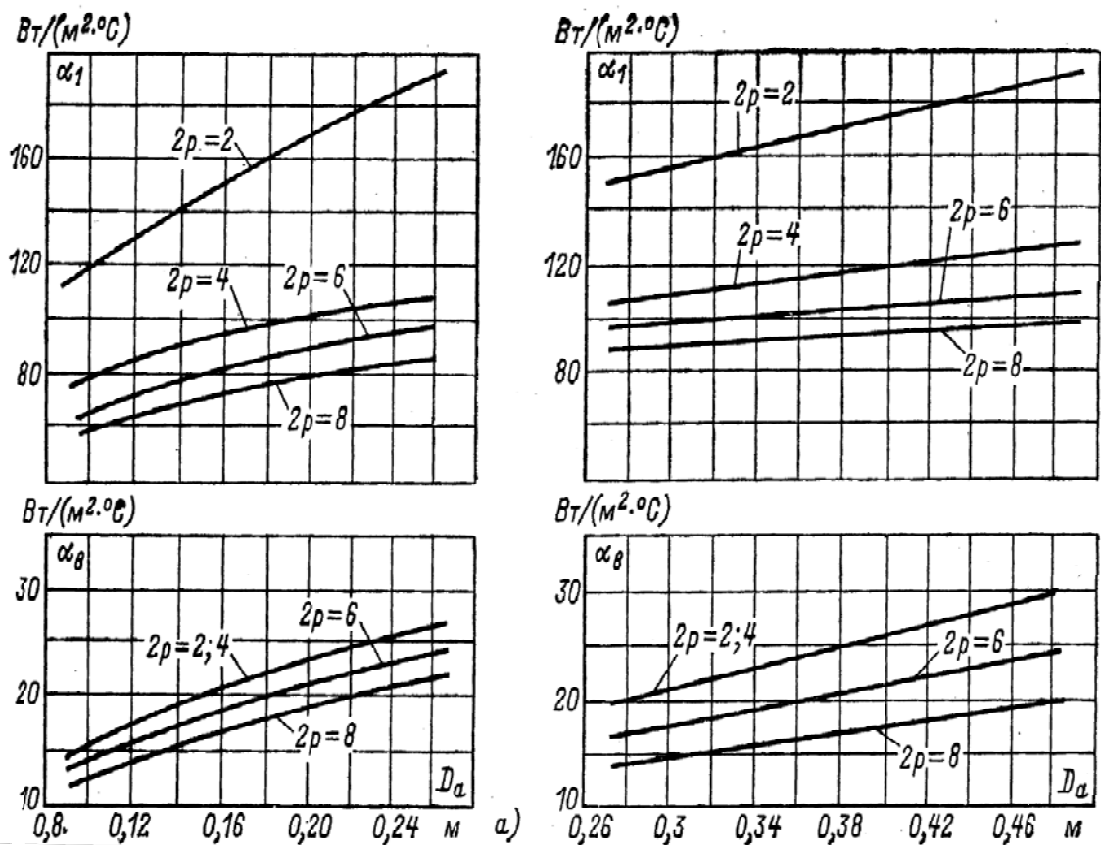
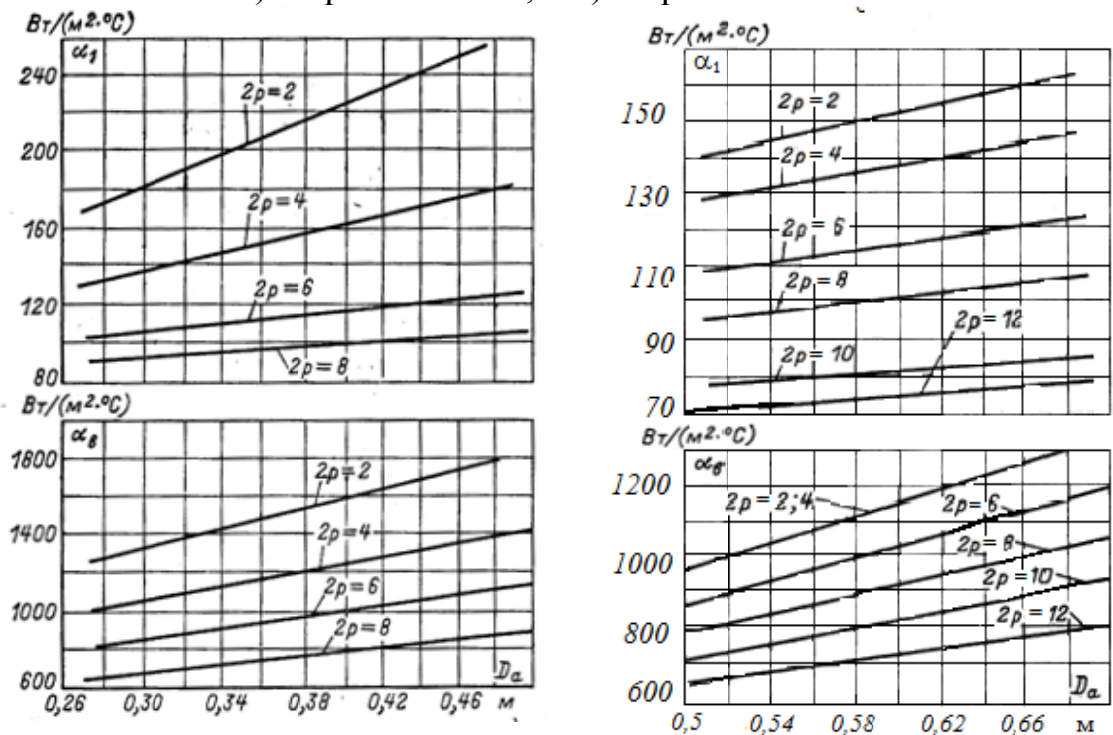


Рисунок 23 - Среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха α_8 для асинхронных двигателей исполнения IP44.

а) – при $h < 160$ мм; б) – при $h = 160-250$ мм.



а)

б)

Рисунок 24- Среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха α_β для асинхронных двигателей исполнения IP23.

a – при $h=160\div 250$ мм; b – при $h>250$ мм

11.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки ротора

$$\Delta \vartheta_{из.п1} = \frac{P'_{\vartheta.п1}}{Z_1 \cdot l_1 \cdot \Pi_{п1}} \left(\frac{\vartheta_{из.п1}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right), ^\circ\text{C},$$

где $\Pi_{п1}$ - расчетный периметр поперечного сечения статора

$$\Pi_{п1} = 2h_{п1} + \vartheta_1 + \vartheta_2, \text{ м},$$

здесь $h_{п1}, \vartheta_1, \vartheta_2$ - размеры паза статора в штампе;

$\vartheta_{из.п1}$ - односторонняя толщина изоляции в пазу (определена выше по таблице 7);

$\lambda_{\text{эКВ}}$ - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции.

Для классов нагревостойкости В, F, Н - $\lambda_{\text{эКВ}} = 0,16 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$,

для классов нагревостойкости А, Е - $\lambda_{\text{эКВ}} = 0,1 \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$;

$\lambda'_{\text{эКВ}}$ - определяется по рисунку 25 для значения $\frac{d}{d_{из}}$.

Здесь d - диаметр неизолированного провода обмотки статора (таблица 4).

$d_{из}$ - диаметр изолированного провода обмотки статора (таблица 4).

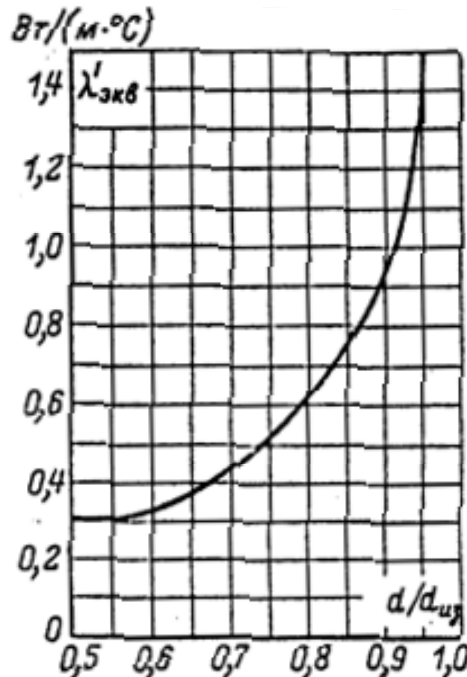


Рисунок 25 - Средние значения коэффициентов теплопроводности $\lambda'_{\text{эКВ}}$ внутренней изоляции катушек выпойной обмотки из эмалированного провода

11.3 Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей обмотки ротора

$$\Delta \vartheta_{из..л1} = \frac{P'_{э..л1}}{2Z_1 \cdot l_1 \cdot \Pi_{л1}} \left(\frac{\vartheta_{из..л1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{h_{л1}}{12 \lambda'_{эКВ}} \right), ^\circ C,$$

где $\Pi_{л1} = \Pi_{л1}$;

Принимаем, что изоляция в лобовых частях обмотки отсутствует.

Тогда $\vartheta_{из..л1} = 0$;

$P'_{э..л1}$ - электрические потери в лобовых частях обмотки

$$P'_{э..л1} = k_{\rho} \cdot P_{э1} \cdot \frac{2l_{л1}}{l_{ср1}}, \text{ Вт},$$

здесь $l_{л1}, l_{ср1}$ - см. расчет активного сопротивления обмотки статора.

11.4 Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta \vartheta_{пов..л1} = \frac{K \cdot P'_{э..л1}}{2\pi \cdot D \cdot l_{выл1} \cdot \alpha_1}, ^\circ C,$$

где $l_{выл1}$ - длина вылета лобовых частей обмотки статора.

$$l_{выл1} = K_{выл} \cdot \vartheta_{кт} + B, \text{ м}.$$

В этом выражении:

$K_{выл}$ определяется по таблице 13;

$\vartheta_{кт}$ - см. расчет активного сопротивления обмотки статора;

B - длина вылета прямолинейной части секции из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части. Принимается $B = 0,01$ м.

11.5 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta \vartheta'_1 = \frac{(\Delta U_{пов1} + \Delta U_{из..л1}) \cdot 2l_1}{l_{ср1}} + \frac{(\Delta U_{из..л1} + \Delta U_{пов..л1}) \cdot 2l_{л1}}{l_{ср1}}, ^\circ C.$$

11.6 Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды

$$\Delta \vartheta_{\vartheta} = \frac{\sum P'_{\vartheta}}{S_{кор} \cdot \alpha_{\vartheta}}, ^\circ C,$$

где $\sum P'_{\vartheta}$ - сумма потерь, отводимых в воздух внутри машины.

Для двигателей со степенью защиты IP23

$$\sum P'_{\vartheta} = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{э..л1} + P_{ст.осн}), \text{ Вт}.$$

Для двигателей со степенью защиты IP44

$$\sum P'_{\vartheta} = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{э..л1} + P_{ст.осн}) - 0,9 P_{мех}, \text{ Вт}.$$

В этих формулах

$$\Sigma P' = \Sigma P + (K_{\rho} - 1) \cdot (P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}), \text{ Вт.}$$

Здесь ΣP , $P_{\text{э2}}$ $P_{\text{э1}}$ - потери в двигателе при нормальном режиме (из таблицы 17 при номинальном скольжении S_n);

$\alpha_{\text{в}}$ - коэффициент подогрева воздуха (по рисунку 23);

$S_{\text{кор}}$ - эквивалентная поверхность охлаждения корпуса двигателя.

Для двигателей со степенью защиты IP23

$$S_{\text{кор}} = \pi \cdot D_a \cdot (l_1 + 2l_{\text{выл1}}), \text{ м}^2$$

Для двигателей со степенью защиты IP44

$$S_{\text{кор}} = (\pi \cdot D_a + 8Pr) \cdot (l_1 + 2l_{\text{выл1}}), \text{ м}^2.$$

Здесь Pr - условный периметр поперечного сечения ребер станины (по рисунку 25).

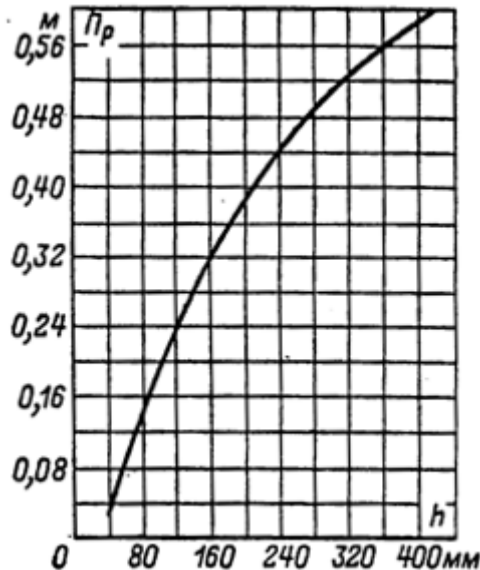


Рисунок 25 - Средние значения периметра поперечного сечения ребер асинхронных двигателей серии 4А

11.7 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta_1' + \Delta \vartheta_{\text{в}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

11.8 Вентиляционный расчет заключается в сопоставлении расхода воздуха необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

Необходимый расход воздуха:

для двигателей со степенью защиты IP23

$$Q_{\text{в}} = \frac{\Sigma P_{\text{в}}'}{1100 \Delta \vartheta_{\text{в}}}, \text{ } \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

для двигателей со степенью защиты IP44

$$Q_{\text{в}} = \frac{K_L \cdot \Sigma P_{\text{в}}'}{1100 \Delta \vartheta_{\text{в}}}, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

где K_L - коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором

$$K_L = L \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_a}.$$

Здесь n - частота вращения двигателя, мин^{-1} ;

$L = 2,6$ для двигателей с $2p = 2$ при $h \leq 132 \text{ мм}$;

$L = 3,3$ при $2 \cdot p = 2$ и $h \geq 160 \text{ мм}$;

$L = 1,8$ при $2 \cdot p \geq 4$ и $h \leq 132 \text{ мм}$;

$L = 2,5$ при $2 \cdot p \geq 4$ и $h \geq 160 \text{ мм}$.

11.9 Фактический расход воздуха, получаемый с помощью вентилятора:
для двигателя со степенью защиты IP23

$$Q_{\text{в}}' = m' (n_{\text{к}} \cdot \vartheta_{\text{к}} + 0,1) \cdot \frac{n}{100} \cdot D_a^2, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

для двигателей со степенью защиты IP44

$$Q_{\text{в}}' = 0,6 D_a^3 \cdot \frac{n}{100}, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

В этих формулах:

n - частота вращения двигателя, мин^{-1} ;

m' - коэффициент

$m' = 2,6$ для двигателей с $2p = 2$;

$m' = 3,15$ для двигателей с $2p \geq 4$.

$n_{\text{к}}, \vartheta_{\text{к}}$ - число и ширина радиальных вентиляционных каналов.

Если длина стали сердечника статора (см. п.4.3) $l_{\text{СТ}} > 0,15 \text{ м}$, то

$$n_{\text{к}} = \frac{l_{\text{СТ},1}}{l_{\text{г}}},$$

Здесь $l_{\text{г}}$ - расстояние между вентиляционными каналами. Принимается

$$l_{\text{г}} = (0,04 - 0,08) \text{ м}.$$

Ширина вентиляционных каналов принимается $\vartheta_{\text{к}} = 0,01 \text{ м}$.

Если $l_{\text{СТ}} \leq 0,15 \text{ м}$, то принимается $n_{\text{к}} = \vartheta_{\text{к}} = 0$.

11.10 Сопоставление требуемого и получаемого расхода воздуха.

Получаемый расход воздуха $Q_{\text{в}}'$ должен быть больше требуемого для охлаждения двигателя $Q_{\text{в}}$

$$Q_{\text{в}}' > Q_{\text{в}}$$

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Гольдберг О.Д., Макаров Л.Н., Хелемская С.П. Инженерное проектирование электрических машин. Учебник для вузов. – М.: «ИД «БАСТЕТ», 2016г. – 528 стр., ил. ISBN 978-5-903178-42-1
2. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин в 2 ч. Часть 1: учебник для академического бакалавриата / И. П. Копылов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 490 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-08701-7.

Приложение А

Справочные таблицы

Таблица 1- Высоты оси вращения электрических машин (по ГОСТ 13267) и соответствующие им наружные диаметры статоров асинхронных двигателей серии 4А

h , мм	56	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315	355
D_a , м	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

Таблица 2 - Отношение $K_D = D/D_a$ в двигателях серии 4А при различных числах полюсов

$2p$	2	4	6	8–12
K_D	0,52–0,57	0,64–0,68	0,70–0,72	0,74–0,77

Таблица 3 - Коэффициенты распределения k_p трёхфазных обмоток с фазной зоной

$\nu \backslash q$	2	3	4	5	6	∞
1	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,955
3	0,707	0,667	0,654	0,646	0,644	0,636
5	0,259	0,217	0,205	0,200	0,197	0,191
7	-0,259	-0,177	-0,158	-0,149	-0,145	-0,136
9	-0,707	-0,333	-0,270	-0,247	-0,236	-0,212
11	-0,966	-0,177	-0,126	-0,110	-0,102	-0,087

Таблица 4 - Диаметр и площадь поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного проводника, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²
0,08	0,10	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,10	0,122	0,00785
0,112	0,134	0,00985
0,125	0,147	0,01227
(0,132)	0,154	0,01368
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,20	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,284
0,20	0,23	0,0314
(0,212)	0,242	0,0353
0,224	0,259	0,0394
(0,236)	0,271	0,0437
0,25	0,285	0,0491
(0,265)	0,300	0,0552

0,28	0,315	0,0616
(0,30)	0,335	0,0707
0,315	0,350	0,0779
0,335	0,370	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,40	0,44	0,1257
0,425	0,465	0,1419
0,45	0,49	0,1590
(0,475)	0,515	0,1772
0,50	0,545	0,1963
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246
0,60	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503

0,85	0,915	0,567
------	-------	-------

0,90	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1,00	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,20	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011
1,70	1,785	2,27
1,80	1,895	2,54
1,90	1,995	2,83

2,00	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,50	2,60	4,91

Примечания:

1. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учётом расчётной средней двухсторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщин.

Таблица 5 - Допустимые значения индукции на различных участках магнитной цепи, Тл.

Участки магнитной цепи		Обозначение	IP44					IP23					
		2р	-	4	6	8	10 и 12	2	4	6	8	10	12
Ярмо статора		B _а	1,4–1,6			1,15–1,35	1,1–1,2	1,45–1,6			1,2–1,4		1,1–1,3
Зубцы статора при постоянном сечении (всыпная обмотка)		B _{z1}	1,7–1,9				1,6–1,8	1,9–2,1	1,8–2,0			1,7–1,9	
Зубцы статора в наиболее узком сечении:	при полуоткрытых пазах	B _{z1 max}	1,75–1,95					1,9–2,1	1,8–2,0				
	при открытых пазах	B _{z1 max}	1,6–1,8					1,7–1,9					
Ярмо ротора:	короткозамкнутого	B _j	≤1,45	≤1,25	≤1,15	≤0,85		≤1,55	≤1,35	≤1,25	≤0,95		
	фазного	B _j	—	≤1,25	≤1,05	≤0,75		—	≤1,35	≤1,15	≤0,85		
	в двигателях с U=6000 В	B _j	—	≤1,55	≤1,30	≤0,10		—	≤1,45	≤1,20	≤1,0		
Зубцы ротора при постоянном сечении (грушевидные пазы)		B _{z2}	1,75–1,85					1,8–1,95					
Зубцы ротора в наиболее узком сечении	короткозамкнутого	B _{z2 max}	—	1,5–1,7	1,45–1,60			—	1,6–1,8	1,55–1,70			
	фазного	B _{z2 max}	—	1,85–2,05	1,75–1,9			—	2,0–2,2	1,9–2,05			

Таблица 6 - Рекомендуемые марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали, способы изолировки листов и коэффициент заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора асинхронных двигателей

h, мм	U, В	Марка стали	Статор		Короткозамкнутый ротор		Фазный ротор	
			Способ изолировки листов	k_C	Способ изолировки листов	k_C	Способ изолировки листов	k_C
50–250	≤ 660	2013	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97	—	—
280–355	≤ 660	2312	Лакировка	0,95	Оксидная плёнка	0,97	Лакировка	0,95
400–560	6000	2411	Лакировка	0,95	Лакировка	0,95	Лакировка	0,95

Таблица 7 - Изоляция однослойных и двухслойных всыпных обмоток статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм. Напряжение до 660 В. Классы изоляции В, F, H

Рисунок	Тип обмотки	Высота оси вращения, мм	Позиция	Материал			Толщина, мм	Число слоёв	Односторонняя толщина, мм
				Наименование, марка					
				Класс В	Класс F	Класс H			
	Однослойная	50–80		Плёнкостеклопласт					
			1	изофлекс	имидофлекс		0,2	1	0,2
			2	изофлекс	имидофлекс		0,3	1	0,3
		90–132		Плёнкостеклопласт					
			1	изофлекс	имидофлекс		0,25	1	0,25
			2	изофлекс	имидофлекс		0,35	1	0,35
		160		Плёнкостеклопласт					
			1	изофлекс	имидофлекс		0,4	1	0,4
			2	изофлекс	имидофлекс		0,5	1	0,5

	Двухслойная	180–250		Плёнкостеклопласт				
			1	изофлекс	имидофлекс	0,4	1	0,4
			2	изофлекс	имидофлекс	0,4	1	0,4
			3	изофлекс	имидофлекс	0,5	1	0,5

Примечание: Междофазные прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала, указанного для позиции 1 рисунков.

Таблица 8 - Рекомендуемые числа пазов короткозамкнутых асинхронных двигателей

2р	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		Пазы без скоса	Пазы со скосом
2	12	9 [*] , 15 [*]	—
	18	11 [*] , 12 [*] , 15 [*] , 21 [*] , 22 [*]	14 [*] , (18), 19 [*] , 22 [*] , 26, 28 [*]
	24	15 [*] , (16 [*]), 17 [*] , 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59

4	12	9 [*]	15 [*]
	18	10 [*] , 14 [*] , ,	18 [*] , 22 [*]
	24	15 [*] , 16 [*] , 17, (32)	16, 18, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83

6	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163

14	84	74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103
	126	106, 108, 116, 136, 144, 146, 148, 150, 152, 154, 158	107, 117, 119, 121, 131, 133, 135, 145
16	96	84, 86, 106, 108, 116, 118	90, 102
	144	120, 122, 124, 132, 134, 154, 156, 164, 166, 168, 170, 172	138, 150

Примечание:

1. В скобках взяты числа пазов, при которых возможно повышение вибрации двигателей.

2. Звёздочкой отмечены числа пазов, применяемые в основном в машинах малой мощности.

Таблица 9 - Коэффициенты k_B для расчёта диаметра вала асинхронных двигателей

h, мм	50–63	71–250	280–355		400–500		
2p	2–6	2–8	2	4–12	4	6	8–12
k_B	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,25

Таблица 10 - Основная кривая намагничивания **СТАЛЬ 2013**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11200	11800	12400
1,9	13000	13600	14200	14800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2,0	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	109000	116000	123000
2,2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Таблица 11 - Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей **СТАЛЬ 2013**

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица 12 - Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей *СТАЛЬ 22013*

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Таблица 13 - К расчёту размеров лобовых частей катушек насыпной обмотки

Число полюсов $2p$	Катушки статора			
	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	K_L	$K_{ВЫЛ}$	K_L	$K_{ВЫЛ}$
2	1,20	0,26	1,45	0,44
4	1,30	0,40	1,55	0,50
6	1,40	0,50	1,75	0,62
≥ 8	1,50	0,50	1,90	0,72

Таблица 14 - Определение коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток λ_{Π}

Рисунок	Тип обмотки	Расчётные формулы
15 а	Двухслойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_{\Pi}} k_{\beta} + \frac{h_1}{b_{\Pi}} k'_{\beta} + \frac{h_0}{4b_{\Pi}}$
	Однослойная	$\frac{h_2}{3b_{\Pi}} + \frac{h_1}{b_{\Pi}}$
15 б	Двухслойная	$\frac{h_3 - h_0}{3b_{\Pi}} k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b_{\Pi}} + \frac{3h_1}{b_{\Pi} + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_{\beta}$
15 в	Двухслойная	$\frac{h_3 - h_0}{3b_{\Pi}} k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b_{\Pi}} + \frac{3h_1}{b_{\Pi} + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_{\beta}$
	Однослойная	$\frac{h_3}{3b_{\Pi}} + \frac{h_2}{b_{\Pi}} + \frac{3h_1}{b_{\Pi} + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}}$
15 г, д, з	Двухслойная и однослойная	$\frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_{III}}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_{\beta}$
15 е, ж, и	Двухслойная и однослойная	$\frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b + 2b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k'_{\beta}$

Таблица 15 - Формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов

Рисунок	Расчётные формулы
17 а	$\left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b} \right] k_{д} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
17 б	$\left(\frac{h_1}{3b} + \frac{3h_2}{b + 2b_{ш}} \right) k_{д} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
17 в	$\frac{h_1}{3b} k_{д} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
17 г	$\frac{h_1}{3b} k_{д} + \frac{h_2}{b} + \frac{2h_2}{b + 2b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
17 д	$\frac{h_1}{3b} k_{д} + \frac{h_2}{b} + 0,785 - \frac{h_{ш}}{2b} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
17 е	$\left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b} \right] k_{д} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$
17 ж	$\left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2b} \right) k_{д} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}$

Примечания:

1. Для номинального режима $k_{д} = 1$.
2. Для закрытых пазов по рисунку (17, з, и) во всех расчётных формулах вместо слагаемого $h_{ш} / b_{ш}$ подставлять для пазов по рисунку (17 з) $0,3 + 1,12 \frac{h_{ш}}{I_2} 10^6$ и по рисунку (17 и) $\frac{h_{ш}}{b_{ш}} + 1,12 \frac{h_{ш}}{I_2} 10^6$ где $h_{ш}$ — толщина перемычки над пазом, м; I_2 — тока ротора, А

Таблица 16 - Удельные потери в стали асинхронных двигателей и значение β при толщине листов 0,5 мм

Марка стали	$p_{1,0/50}$, Вт/кг	β
2013, 2011, 2211	2,5–2,6	1,5
2312	1,75	1,4
2411	1,6	1,3

19

Таблица 17 - Расчёт рабочих характеристик асинхронного двигателя

P_{2H} , кВт	U_{1H} , В	I_{1H} , А	2р	$P_{CT} + P_{MEX}$, кВт	I_{0A} , А	$I_{0P} \approx I_{\mu}$, А	

r_1 , Ом	r_2 , Ом	c_1	a	a , Ом	b	b , Ом

№ п/п	Расчётная формула	Единица изм.	Скольжение				
			0,003	0,01	0,015	s_H
1	$a' r_2' / s$	Ом					
2	$b' r_2' / s$	Ом					
3	$R = a + a' r_2' / s$	Ом					

4	$X = b + b' r_2' / s$	ОМ					
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	ОМ					
6	$I_2'' = U_{1H} / Z$	А					
7	$\cos \varphi_2' = R / Z$	—					
8	$\sin \varphi_2' = X / Z$	—					
9	$I_{1A} = I_{0A} + I_2'' \cos \varphi_2'$	А					
10	$I_{1P} = I_{0P} + I_2'' \sin \varphi_2'$	А					
11	$I_1 = \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1P}^2}$	А					
12	$I_2' = c_1 I_2''$	А					
13	$P_1 = 3U_{1H} I_{1A} \cdot 10^{-3}$	кВт					
14	$P_{\vartheta 1} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт					
15	$P_{\vartheta 2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт					
16	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 \cdot 10^{-3}$	кВт					
17	$\sum P = P_{CT} + P_{\text{МЭХ}} + P_{\vartheta 1} + P_{\vartheta 2} + P_{\text{доб}}$	кВт					
18	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт					
19	$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	—					
20	$\cos \varphi = I_{1A} / I_1$	—					

Таблица 18 - Данные расчёта пусковых характеристик двигателя

P_{2H} , кВт	U_{1H} , В	$2p$	$x_{12П}$, Ом	x_1 , Ом	x_2 , Ом	r_1 , Ом	r_2 , Ом	I_{1H} , А	I_{2H} , А	s_H

№ п/п	Расчётная формула	Единица изм.	Скольжение					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,15
1	ξ	—						
2	φ	—						
3	$k_r = q_c / q_r$	—						
4	$k_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1)$	—						
5	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом						
6	k_{Δ}	—						
7	$K_X = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2}$	—						
8	$x'_{2\xi} = K_X x'_2$	Ом						
9	$x'_{2\xi HAC} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi HAC}}{\sum \lambda_2}$	Ом						

10	$x_{1HAC} = \frac{\sum \lambda_{1HAC}}{\sum \lambda_1} X_1$	Ом						
11	$c_{1П.HAC} = 1 + \frac{x_{1HAC}}{x_{12П}}$	—						
12	$a_{П} = r_1 + c_{1П.HAC} \frac{r_{2\xi}}{s}$	Ом						
13	$b_{П} = x_{1HAC} + c_{1П.HAC} \cdot x_{2\xi HAC}'$	Ом						
14	$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{a_{П}^2 + b_{П}^2}}$	А						
15	$I_1 = I_2' \frac{\sqrt{a_{П}^2 + (b_{П} + x_{12П})^2}}{c_{1П} x_{12П}}$	А						
16	$I_{1*} = I_1 / I_{1H}$	—						
17	$M_* = \left(\frac{I_2'}{I_{2H}} \right)^2 K_R \frac{s_H}{s'}$	—						

Таблица 19 - Средние значения коэффициента К для асинхронных двигателей 4А

Исполнение двигателя по способу защиты	Число полюсов двигателя 2р					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

Таблица 20 - Удельное электрическое сопротивление материала проводников обмотки

Тип обмотки	Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре °С		
		20	75	115
Обмотка из медных проводов или неизолированной меди	Медь	$\frac{1}{57} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{47} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{41} \cdot 10^{-6}$
Короткозамкнутые роторы асинхронных машин	Алюминиевые шины	$\frac{1}{35} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{28} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{26} \cdot 10^{-6}$
	Алюминий литой	$\frac{1}{30} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{14} \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{22} \cdot 10^{-6}$

Примечание:

Удельное сопротивление алюминия после заливки в пазы машины несколько повышается в связи с образованием некоторого количества раковин (воздушные включения) и изменением структуры при охлаждении в узких пазах. Поэтому в расчетах примем удельное сопротивление литой алюминиевой обмотки роторов асинхронных машин равной $\frac{10^{-6}}{21,5}$ Ом·м при температуре 75° С и $\frac{10^{-6}}{20,3}$ Ом·м при температуре 115° С.

Приложение Б

Варианты задания на курсовое проектирование

Параметры	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	3; 4; 5									
	Последняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная мощность P_{2H} , кВт	3,0	1,5	5,5	2,2	15	7,5	30	132	90	55
Синхронная частота вращения n_1 , мин ⁻¹	3000	1000	1500	750	3000	1500	3000	750	1500	750
Фазное напряжение обмотки статора U_{1H} , В	220	127	380	220	220	220	220	380	380	220

Параметры	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	6; 7									
	Последняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная мощность P_{2H} , кВт	15	11	30	22	45	18,5	37	45	110	90
Синхронная частота вращения n_1 , мин ⁻¹	1500	750	3000	1000	1500	750	1500	1000	1000	500
Фазное напряжение обмотки статора U_{1H} , В	220	220	220	380	220	220	220	220	380	220

Параметры	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	8; 9									
	Последняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная мощность P_{2H} , кВт	55	45	132	55	220	90	75	90	250	55
Синхронная частота вращения n_1 , мин ⁻¹	3000	1000	1500	750	1500	500	1500	750	1500	500
Фазное напряжение обмотки статора U_{1H} , В	220	220	380	220	380	220	220	380	380	220

Последняя цифра учебного шифра										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Степень защиты от внешних воздействий	Закрытое обдуваемое IP44						Защищенное IP23			
Режим работы	Продолжительный S1				Кратковременный S2			Повторно-кратковременный S3		