

Содержание

1. Исходные данные для проектирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....
2. Определение главных размеров асинхронного двигателя.....
3. Расчет обмотки статора.....
4. Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора.....
5. Расчет ротора.....
6. Расчет магнитной цепи.....
7. Параметры рабочего режима двигателя.....
8. Расчет потерь.....
9. Расчет рабочих характеристик аналитическим методом.....
10. Расчет пусковых характеристик.....
11. Тепловой расчет.....

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ						
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата				Лист.	Лист	Листов	
Разраб.	Баранов А.А.										
Пров.	Егоров И.Н.									2	
Н.контр.											
Утв.											

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.).

вариант 4

Номинальная мощность P_{2H} , кВт 10000

Синхронная частота вращения n_1 , мин^{-1} 3000

Фазное напряжение обмотки статора U_{1H} , В 220

Степень защиты от внешних воздействий IP44

Режим работы Кратковременный S2

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		3

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 a_δ , k_B , $k_{об1}$, определяют l_δ и λ . Алгоритм решения при этом имеет вид:

$$h \rightarrow D_A \rightarrow D \xrightarrow[\rightarrow P_{расч}]{\rightarrow \tau} l_\delta \rightarrow \lambda$$

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). 6 При определении $P_{расч} = P'$ предварительные значения η и $\cos \varphi$, 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 уплотнения учитывается только при расчете магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи), поэтому коэффициент полюсного перекрытия a_δ и коэффициент формы поля k_B предварительно принимаются:

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

2.1. Число пар полюсов

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		4

$$p = \frac{60 f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1; 2p = 2$$

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 .

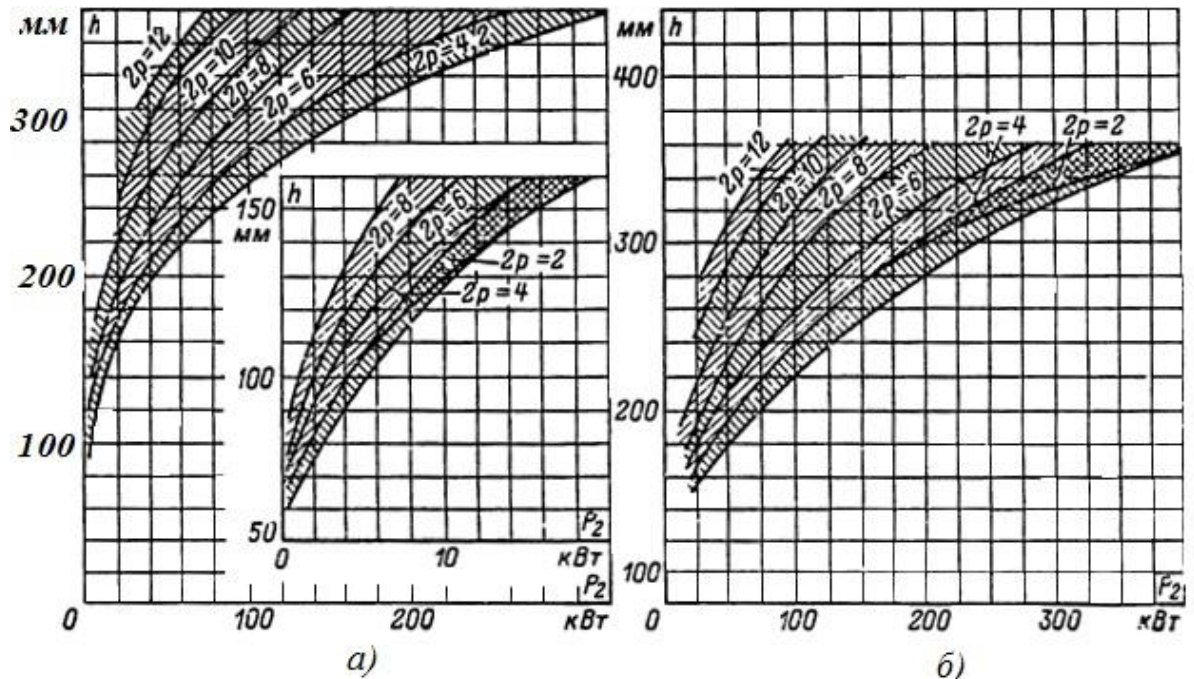


Рисунок 1 – Высота оси вращения h двигателей серии 4А различной мощности и частоты вращения а) – со степенью защиты IP44; б) – с IP23

2.3. Внутренний диаметр статора

$$D = K_D \cdot D_A = 0,54 \cdot 0,225 = 0,14688 \text{ м}$$

$$h = 160 \text{ мм}; D_A = 0,272 \text{ м}; K_D = (0,52 - 0,57)$$

2.4. Полусное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,14688}{2} = \frac{0,38151}{2} = 0,2306016 \text{ м}$$

где $2p$ – число полюсов асинхронного двигателя

2.5. Расчетная мощность асинхронного двигателя

$$P' = P_{2H} \frac{K_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 10 \cdot 10^3 \frac{0,982}{0,89 \cdot 0,88} = 10^3 \cdot \frac{0,982}{0,7832} = 12538,304 \text{ Вт}$$

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)

$$\eta = 0,89; \cos \varphi = 0,88; K_E = 0,982$$

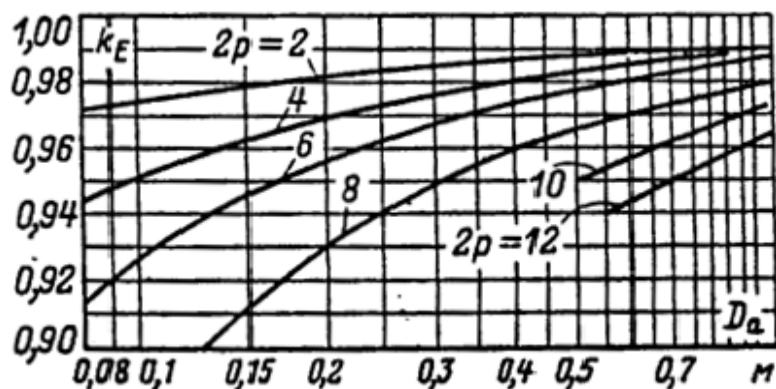


Рисунок 2 – Значение коэффициента K_E

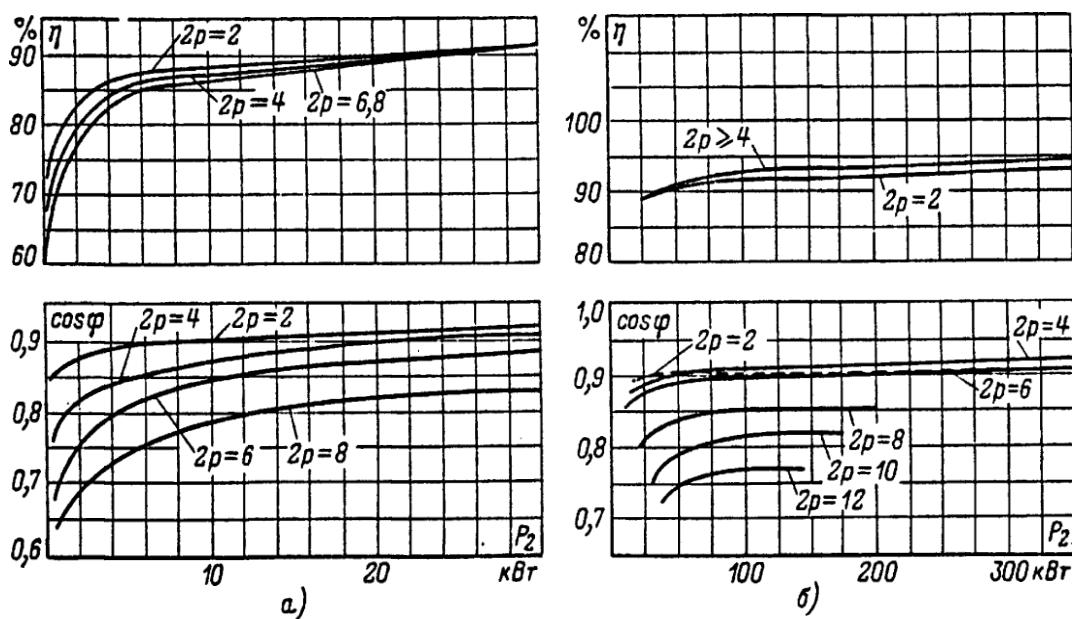
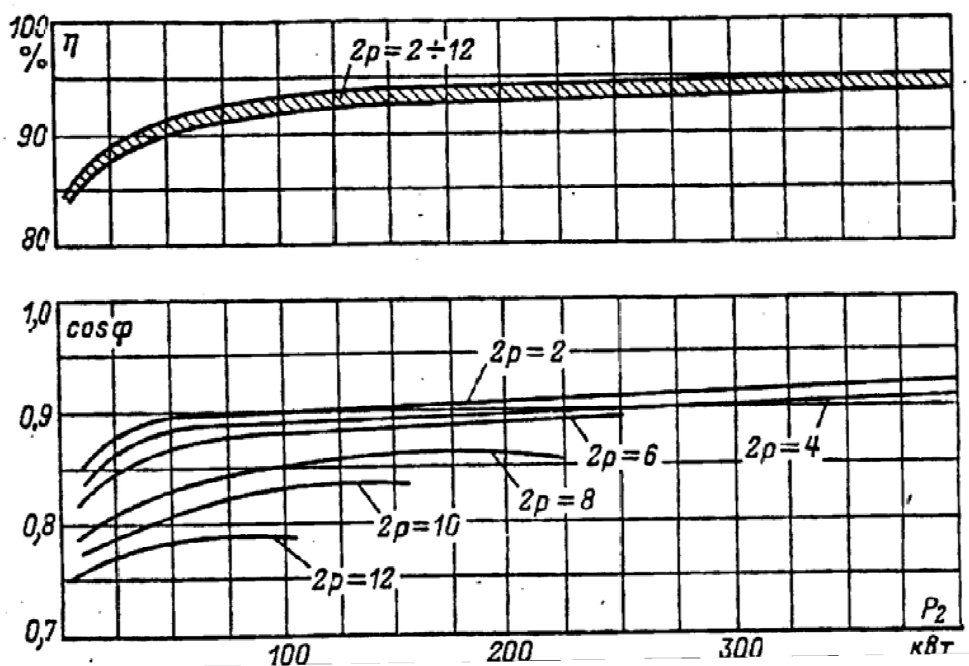


Рисунок 3- Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44.

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



Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

КП.13.02.10.04.19 ПЗ

Лист

6

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

2.6. Электромагнитные нагрузки предварительно определяются по рисунку 5 и 6 A , A/m , B_δ , T_δ

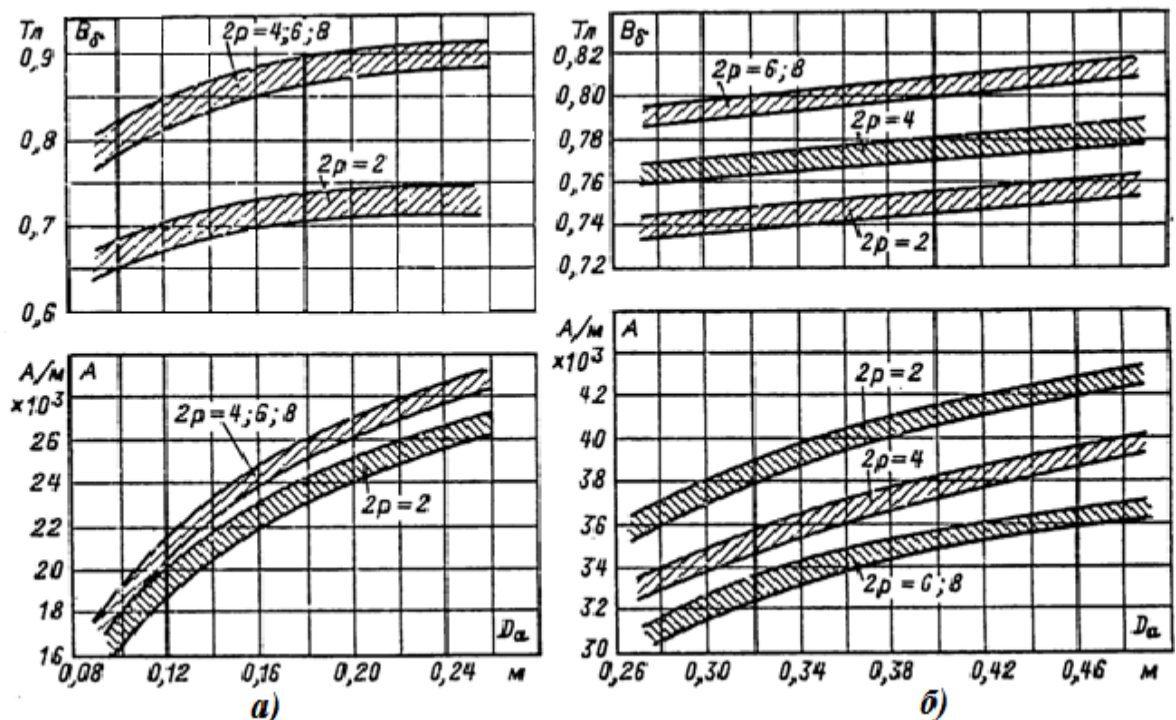


Рисунок 5 - Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

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

б) – при $h = 160 \div 250$ мм

Рисунок 6 – Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей 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 $K_{o\delta 1}$ зависит от типа обмотки статора.

Предварительно задаются:

для однослойных обмоток $K_{o\delta 1} = 0,95 \div 0,96$

для двухслойных обмоток при $2p = 2$ $K_{o\delta 1} = 0,9 \div 0,96$

для двухслойных обмоток при $2p > 2$ $K_{o\delta 1} = 0,91 \div 0,92$

2.8. Расчетная длина воздушного зазора

$$l_\delta = \frac{P' \cdot 10^3}{K_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{o\delta 1} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{12538,304}{1,1 \cdot (0,14688^2) \cdot (314) \cdot 0,955 \cdot (27 \cdot 10^3) \cdot 0,74} =$$

$$= \frac{12538,304}{1,1 \cdot 0,0215737344 \cdot 314 \cdot 0,955 \cdot 27000 \cdot 0,74} = \frac{12538,304}{142182,62} = 0,08818 \text{ м}$$

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

Ω – синхронная угловая скорость АД,

$$\Omega = 2\pi \frac{n_1}{60} = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{3000}{60} = \frac{18840}{60} = 314 \text{ или } \Omega = 2\pi \frac{f_1}{p} \text{ рад/с};$$

$$A = 27 \cdot 10^3 \text{ А/м}; B_\delta = 0,74 \text{ Тл}$$

$$2.9. \text{Отношение } \lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0,08818}{0,2306016} = 0,38239$$

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

Величина λ является критерием правильности выбора главных размеров D и $l_{об}$, которая должна находиться в пределах, указанных на рисунке 7.

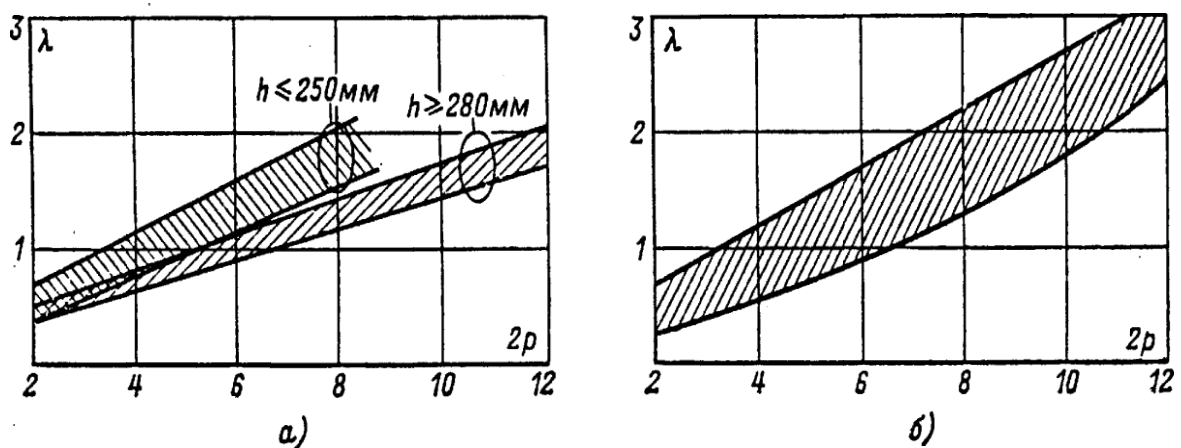


Рисунок 7 – Отношение $\lambda = l_{об}/\tau$ у двигателей серии 4А

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 определяются по рисунку

8 $t_{1\max}$, $t_{1\min}$, мм

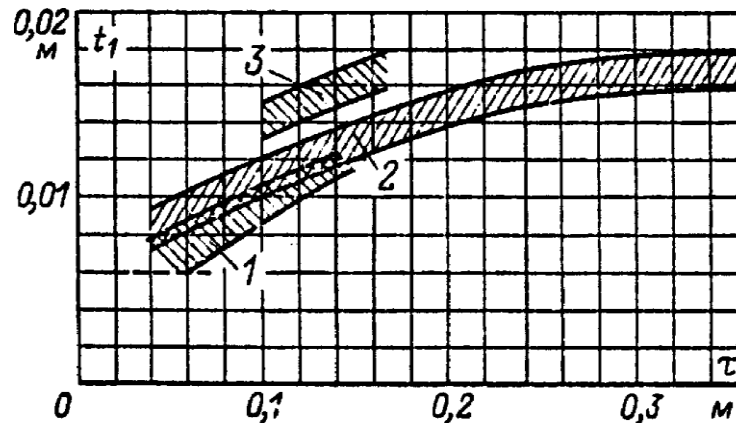


Рисунок 8 – Зубцовое деление статора асинхронных двигателей со
всыпной обмоткой

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

3.2. Число пазов статора

$$t_{1\max} = 0,016; \quad t_{1\min} = 0,0142$$

$$z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} = \frac{3,14 \cdot 0,14688}{0,016} = \frac{0,38151}{0,016} \approx 29$$

$$z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} = \frac{3,14 \cdot 0,14688}{0,013} \approx 32$$

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.

$$z_1 = 30 \quad m = 3$$

3.4. Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = \frac{z_1}{2p \cdot m} = \frac{30}{2 \cdot 3} = 5$$

3.5. Окончательное значение зубцового деления статора

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q_1} = \frac{3,14 \cdot 0,14688}{2 \cdot 3 \cdot 4} = \frac{0,4612032}{30} = 0,01537344 \text{ м}$$

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 (0,006–0,007 м)

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

$$u'_\Pi = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1H} \cdot z_1} = \frac{3,14 \cdot 0,14688 \cdot 27 \cdot 10^3}{19,34 \cdot 30} = \frac{12452,4864}{580,2} = 21,4624$$

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

I_{1H} – номинальный ток обмотки статора

$$I_{1H} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{10000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,89} = \frac{10000}{516,912} = 19,34 \text{ A}$$

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:

$$u_\Pi = a \cdot u'_\Pi = 1 \cdot 21,4624 = 21,4624$$

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

$$a = 1$$

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

$$w_1 = \frac{u_\Pi \cdot Z_1}{2a \cdot m} = \frac{21,4624 \cdot 24}{2 \cdot 1 \cdot 3} \approx 85$$

3.8. Окончательное значение линейной нагрузки

$$A = \frac{2I_{1H} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 19,34 \cdot 85 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,14688} = \frac{9863,4}{0,4612032} = 21386,23 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}$$

3.9. Выбор типа обмотки

Машины мощностью до 15 кВт 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

$$K_{об1} = K_p \cdot K_y = 0,966 \cdot 1 = 0,966$$

где K_p - коэффициент распределения, учитывающий уменьшение ЭДС распределенной по пазам обмотки по сравнению с сосредоточенной. K_p

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

находят из таблицы 3 для первой гармоники при соответствующем значении q , равном числу пазов на полюс и фазу

$$K_p = 0,966$$

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

K_y – коэффициент укорочения, учитывающий уменьшение ЭДС. Витка, вызванное укорочением шага обмотки

$$K_y = \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta\right)$$

$$K_y = \sin \pi = 1$$

Здесь $\beta = 0,8$ – для двухслойной обмотки.

Для однослойной обмотки K_y , всегда равен единице

3.11. Окончательное значение магнитного потока

$$\Phi = \frac{K_E \cdot U_{1H}}{4,44 \cdot w_1 \cdot K_{об1} \cdot f_1} = \frac{0,982 \cdot 220}{4,44 \cdot 85 \cdot 0,966 \cdot 50} = \frac{216,04}{18228,42} = 0,0118518 \text{ Вб}$$

Где K_E – коэффициент определяется по рисунку 2

3.12. Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = \frac{1 \cdot 0,0118518}{0,14688 \cdot 0,08818} = \frac{0,0118518}{0,0129518784} = 0,915 \text{ Тл}$$

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

3.13. Плотность тока в обмотке статора (предварительно)

$$J_1 = \frac{(A \cdot J_1)}{A} = \frac{141 \cdot 10^9}{99884,56} = 1411629,585 \frac{A}{m^2}$$

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

$$(A \cdot J_1) = 141 \cdot 10^9 \frac{A^2}{m^3}$$

Рисунок 9 – Среднее значение произведения (АJ) АД

а) – со степенью защиты IP44, $h \leq 132 \text{ мм}$;

б) – то же при $h = 280 \div 355 \text{ мм}$

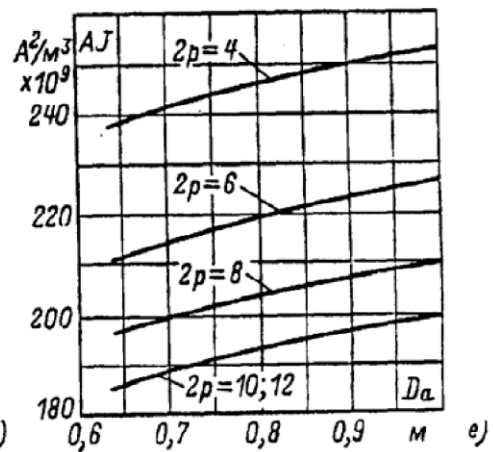
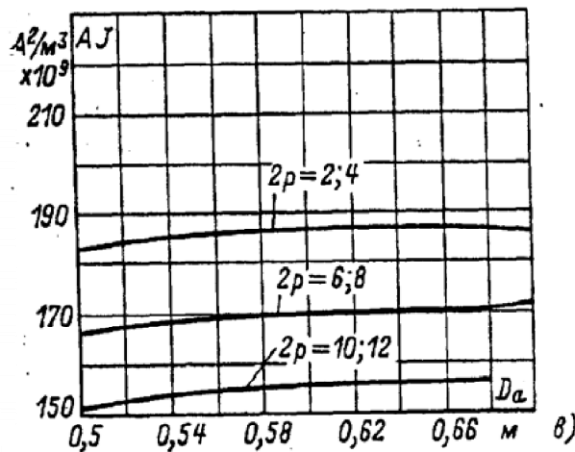
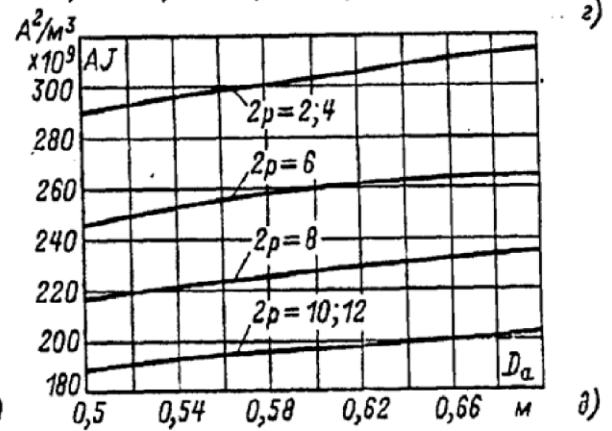
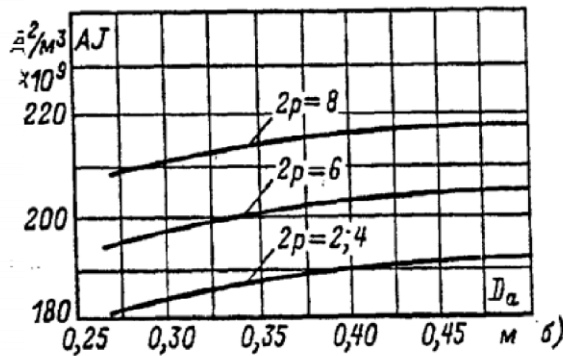
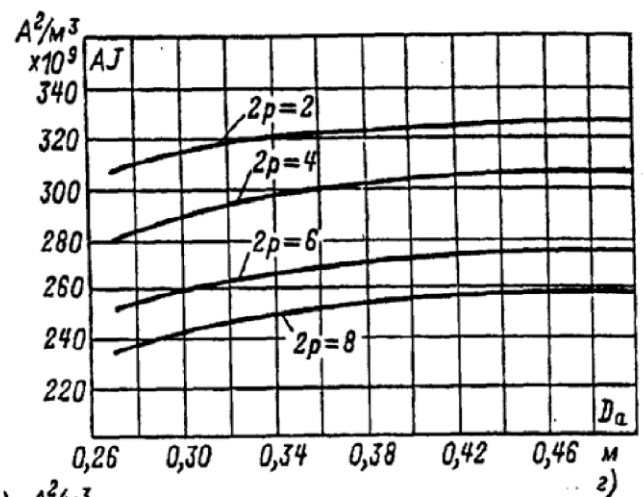
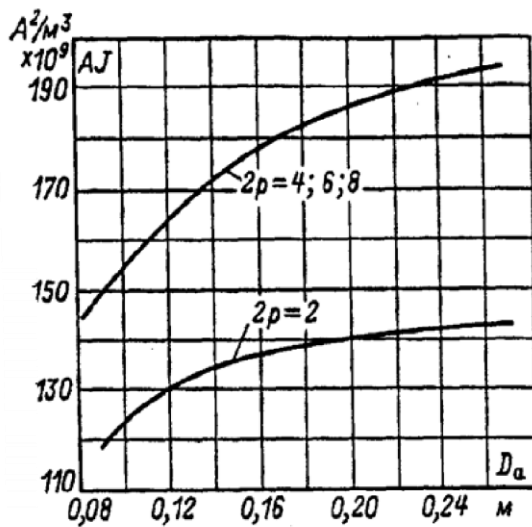
в) – то же при $h = 280 \div 355 \text{ мм}$;

г) со степенью защиты IP23, при $h = 160 \div 250 \text{ мм}$;

д) то же при $h = 280 \div 355 \text{ мм}$

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

е) – то же при $U = 6000 \text{ В}$



3.14. Сечение эффективного проводника (предварительно)

$$q_{\text{эф1}} = \frac{I_{1H}}{a \cdot J_1} = \frac{6,3661828}{4 \cdot 6850756,507229} = \frac{63661828 \cdot 10^{-7}}{27403026,028919} = 0,23231678 \cdot 10^{-6} = 0,23231678 \text{ мм}^2$$

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

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
------	------	---------	---------	------

КП.13.02.10.04.19 ПЗ

Лист

12

Если расчетное $q_{\phi 1} > 1,8 \text{ мм}$, 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 близко к расчетному сечению эффективного проводника

$$q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}} = q_{\phi 1}$$

$$n_{\text{эл}} = 1$$

$$q_{\text{эл}} = q_{\phi 1}$$

$$q_{\text{эл}} = 0,23231678 \text{ мм}^2$$

У всыпных обмоток $n_{\text{эл}} \leq 6$

3.15. Плотность тока в обмотке статора (окончательно)

$$J_1 = \frac{I_{1H}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = \frac{6,3661828}{4 \cdot 0,23231678 \cdot 1} = \frac{6,3661828}{0,92926712} = 6,85075654 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

4. Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

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

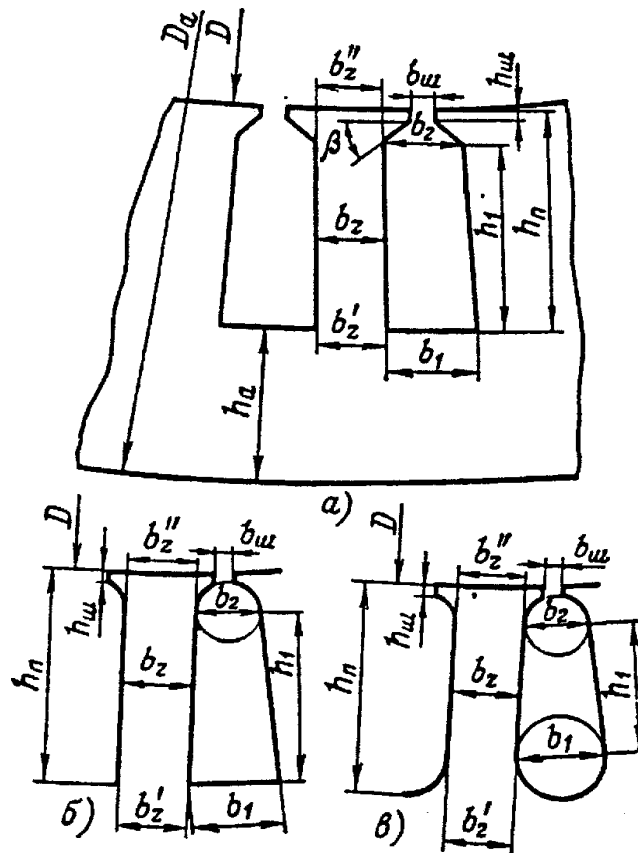


Рисунок 10 – К расчету размеров зубцовой зоны всыпной обмотки статора

4.2. Принимаются предварительно по таблице 5:

B_a – значение допустимой индукции в ярме статора, Тл

$$B_a = (1,15 - 1,35) \text{ Тл}$$

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

$$B_{z1} = (1,7 - 1,9) \text{ Тл}$$

4.3. Предварительный расчет размеров паза

Ширина зубца

$$\begin{aligned} e_{z1} &= \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot K_c} = \frac{0,846156 \cdot 0,006247 \cdot 0,10034 \cdot 10^3}{1,8 \cdot 0,10034 \cdot 0,97} = \frac{0,005286183339}{1,746} = \\ &= 3,027596 \text{ мм} \end{aligned}$$

Где; – длина стали сердечника статора;

K_c – определяется по таблице 6

$$K_c = 0,97$$

Высота ярма статора

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a \cdot l_{cm1} \cdot K_c} = \frac{0,0030406 \cdot 10^6}{2 \cdot 1,25 \cdot 0,10034 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = \frac{3,0406}{0,2433245} = 12,49607 \text{ мм}$$

4.4. Размеры паза в штампе принимаются:

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

$$e_u = (0,5 - 1,0) \text{ мм} - \text{ширина шлица паза}$$

4.5. Размеры паза в штампе рассчитываются:

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{(0,191 - 0,14325) \cdot 10^3}{2} - 12,49607 = 23,875 - 12,49607 = 11,37893, \text{ мм}$$

$$e_1 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - e_{z1} = \frac{3,14 \cdot (143,25 + 2 \cdot 11,37893)}{72} - 3,0275964141 =$$

$$\frac{0,5212646804}{72} - 3,027596 = 7,239787 - 3,0275964141599 = 4,2121908 \text{ мм}$$

$$e_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_u - e_u) - Z_1 \cdot e_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{3,14 \cdot (143,25 + 2 \cdot 0,75 - 0,75) - 72 \cdot 3,027}{72 - 3,14} =$$

$$= \frac{452,16 - 217,986912}{68,86} = \frac{234,173088}{68,86} = 3,4 \text{ мм}$$

$$h_1 = h_n - \left(h_u + \frac{e_2 - e_u}{2} \right) = 11,37893 - \left(0,75 + \frac{3,4 - 0,75}{2} \right) = 11,37893 - 2,075 = 9,30393 \text{ мм}$$

Величина e_2 справедлива для трапецеидальных пазов (рисунок 10а) с углом наклона граней части $\beta = 45^\circ$ у двигателей с $h \leq 250 \text{ мм}$.

Полученные в п.4.5

4.6. Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку

$$e_1' = e_1 - \Delta e_{\Pi} = 4,2121908 - 0,2 = 4,0121908 \text{ мм}$$

$$e_2' = e_2 - \Delta e_{\Pi} = 3,4 - 0,2 = 3,2, \text{ мм}$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_{\Pi} = 9,149674351 - 0,2 = 8,949674351 \text{ мм}$$

где Δe_{Π} ; Δh_{Π} – припуски по ширине и высоте паза.

Принимается $\Delta e_{\Pi} = 0,2 \text{ мм}$; $\Delta h_{\Pi} = 0,2 \text{ мм}$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников

$$S_{\Pi}' = \frac{e_1' + e_2'}{2} \cdot h_1' - S_{из} - S_{np} = \frac{4,01219 + 3,2}{2} \cdot 8,949674 - 7,5925 - 4,744876 = 32,273379 - 7,5925127 - 4,74487632 = 19,93599, \text{ мм}^2$$

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Где $S_{из}$ – площадь поперечного сечения корпусной изоляции

$$S_{из} = e_{из} (2h_{II} + e_1 + e_2) = 0,25 \cdot (2 \cdot 11,37893 + 4,2121908 + 3,4) = \\ = 0,25 \cdot 30,3700508 = 7,5925127, \text{ мм}^2$$

здесь $e_{из}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу (по таблице 7)

S_{np} – площадь поперечного сечения прокладок в пазу

$$S_{np} = 0,4 e_1 + 0,9 e_2 = 0,4 \cdot 4,2121908 + 0,9 \cdot 3,4 = 1,68487632 + 3,06 = \\ = 4,74487632 \text{ мм}^2$$

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

$$K_3 = 0,7$$

$$d_{из} = \sqrt{\frac{S'_n \cdot K_3}{u_{II} \cdot n_{эл}}} = \sqrt{\frac{19,93599 \cdot 0,7}{105,9828 \cdot 1}} = 0,363$$

$$d_{из}^2 = 0,131769$$

$$K_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot u_{II} \cdot n_{эл}}{S'_n} = \frac{0,131769 \cdot 105,9828 \cdot 1}{19,93599} \approx 0,7$$

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 показать размеры паза. Для этого надо принять другие значения B_a и B_{ZI} и повторить расчет п.4.2 – 4.7

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

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		16

5. Расчет ротора

5.1. Воздушный зазор δ определяется по рисунку 11.

$$\delta = 0,2 \text{ мм}$$

5.2. Число пазов ротора Z_2 определяется по таблице 8

$$Z_2 = 86$$

5.3. Внешний диаметр ротора

$$D_2 = D - 2\delta = 0,14325 - 2 \cdot 0,002 = 143,25 - 0,4 = 0,13925 \text{ м}$$

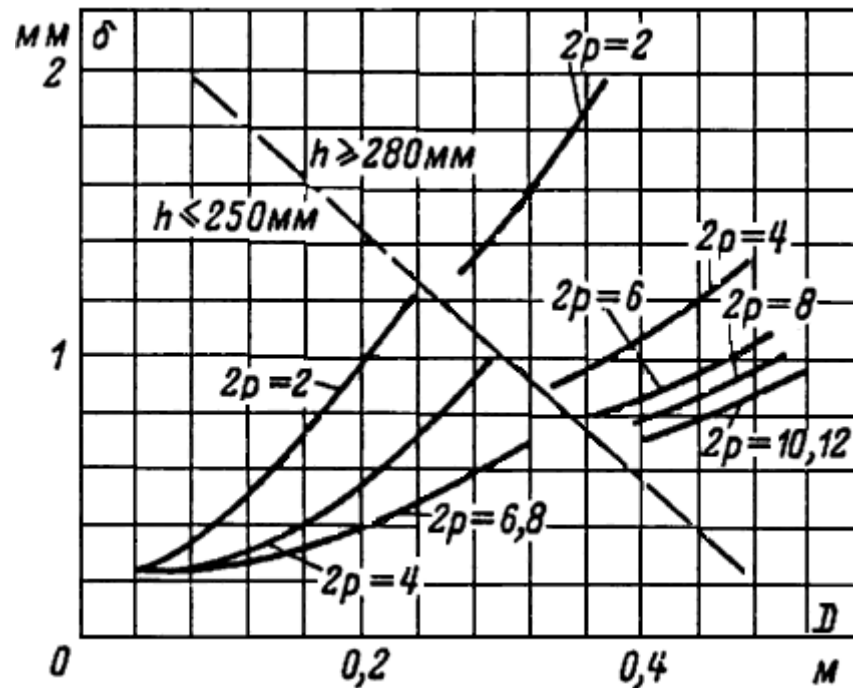


Рисунок 11 – К выбору воздушного зазора в асинхронных двигателях

5.4. Длина ротора принимается равной длине статора

$$l_1 = l_2, \text{ м}$$

5.5. Зубцовое деление

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 0,13925}{86} = \frac{0,437245}{86} = 0,005, \text{ м}$$

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

$$D_j = D_\phi = Da \cdot K_\phi = 0,191 \cdot 0,23 = 0,04393 \text{ м}$$

где K_ϕ определяется по таблице 9

5.7. Ток в стержне ротора

$$I_2 = K_j \cdot I_1 \cdot v_i \quad K_i = 0,75 \cdot 6,3661828 \cdot 22,186 = 105,93 \text{ А}$$

где K_i – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и

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

v_i – коэффициент приведения токов двигателя с короткозамкнутым ротором

$$K_j = 0,75 \quad \cos \varphi = 0,68$$

$$v_i = \frac{2m_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 318 \cdot 0,913056}{86} = \frac{1742,110848}{86} = 20,2571$$

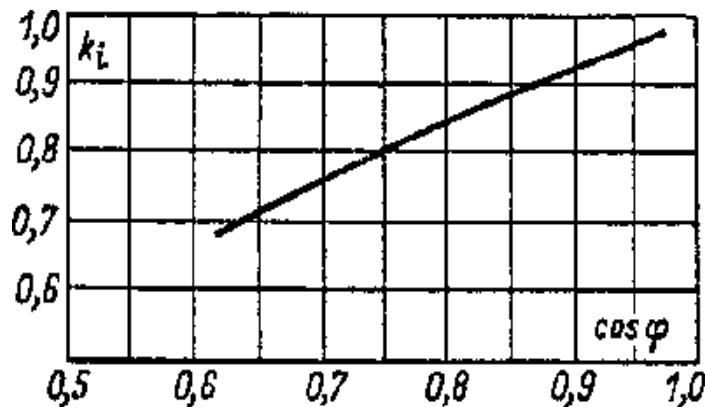


Рисунок 12 – коэффициент k_i в зависимости от $\cos \varphi$

5.8. Площадь поперечного сечения стержня

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{105,93}{3 \cdot 10^6} = 35,31 \text{ мм}^2$$

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

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

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

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

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

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

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

$$e_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{z2} \cdot l_{\text{ст2}} \cdot K_C} = \frac{0,8461562276 \cdot 0,005 \cdot 0,10034}{1,8 \cdot 0,10034 \cdot 0,97} = \frac{0,004230781138}{1,746} \cdot 10^3 =$$

$$= 2,423 \text{ мм}$$

где B_{Z2} – допустимая индукция (по таблице 5)

$$B_{Z2} = 1,8$$

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

5.11. Размеры паза (рисунок 13)

$$\vartheta_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{\text{ш}} - 2h'_{\text{ш}}) - Z_2 \cdot \vartheta_{Z2}}{\pi + Z_2} = \frac{3,14 \cdot (142,85 - 2 \cdot 0,75 - 2 \cdot 1,25) - 86 \cdot 2,423}{3,14 + 86} =$$

$$\frac{3,14 \cdot (142,85 - 1,5 - 2,5) - 86 \cdot 2,423}{3,14 + 86} = \frac{435,989 - 208,378}{89,14} = 2,5534 \text{ мм}$$

$$\hat{a}_2 = 0,75\hat{a}_1 = 2,5534 \cdot 0,75 = 1,91505 \text{ мм}$$

$$h_1(\vartheta_2) = \frac{Z_2(\pi(D_2 - 2h_{\text{ш}} - 2h'_{\text{ш}} - b_2) - Z_2(b_{Z2} + b_2))}{2\pi(\pi + Z_2)} =$$

$$= \frac{86 \cdot (3,14(139,25 - 2 \cdot 0,75 - 2 \cdot 0,3 - 1,91505) - 86(2,423 + 1,91505))}{2 \cdot 3,14 \cdot (3,14 + 86)} =$$

$$\frac{86 \cdot (3,14(139,25 - 4,01505) - 373,0723)}{6,28 \cdot 89,14} = \frac{86 \cdot (3,14 \cdot 135,23495 - 373,0723)}{559,7992} =$$

$$= \frac{86 \cdot 51,565443}{559,7992} = \frac{4434,628098}{559,7992} = 7,9218 \text{ мм}$$

$$h_1(\vartheta_2) = (\vartheta_1 - \vartheta_2) \frac{Z_2}{2\pi} = (2,5534 - 1,91505) \cdot \frac{86}{2 \cdot 3,14} = 0,63835 \cdot 13,694 = 8,74, \text{ мм}$$

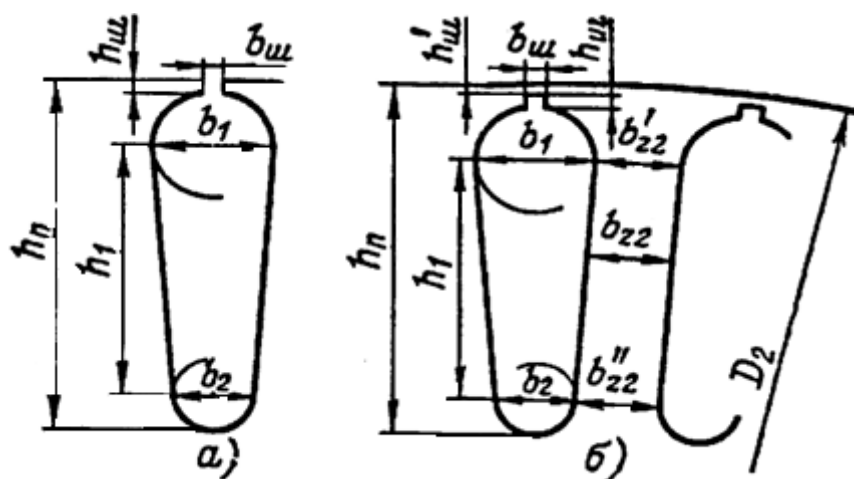


Рисунок 13 – Грушевидные пазы короткозамкнутого ротора

а) – полузакрытые; б) – закрытые

5.12. Полная высота паза

$$h_{i2} = h'_{\phi} + h_{\phi} + \frac{\hat{a}_1}{2} + h_1 + \frac{\hat{a}_2}{2} = 0,3 + 0,75 + \frac{2,5534}{2} + 8,74 + \frac{7,9218}{2} =$$

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$= 1,05 + 1,2767 + 8,74 + 3,9609 = 15,0276, \text{ и и}$$

5.13. Уточненная площадь сечения стержня должно соответствовать п

$$5.8 \quad q_c = \frac{I_2}{J_2} \text{ или чуть – чуть больше}$$

$$\begin{aligned} q_c &= \frac{\pi}{8} (\hat{a}_1^2 + \hat{a}_2^2) + \frac{1}{2} (\hat{a}_1 + \hat{a}_2) \cdot h_1 = \\ &= \frac{3,14}{8} \cdot (2,5534^2 + 1,91505^2) + \frac{1}{2} (2,5534 + 1,91505) \cdot 8,74 = \\ &= 0,3925 \cdot (6,51985156 + 3,6674165025) + 19,5271265 = \\ &= 3,9985 + 19,5271265 = 23,5256, \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

5.14. Плотность тока в стержне

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{105,93}{23,5256 \cdot 10^{-6}} = \frac{105,93}{23,5256 \cdot 10^{-6}} = 4,502754 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

5.15. Площадь поперечного сечения короткозамыкающих колец (рисунок 14)

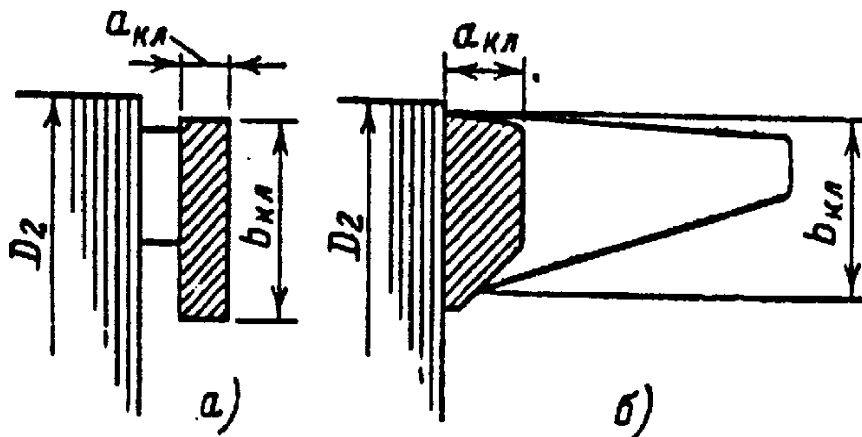


Рисунок 14 – размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора

а) – со сварной обмоткой; б) – с литой обмоткой

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{380,495}{2,55 \cdot 10^6} = 149,2137 \cdot 10^{-6} = 149,2137 \text{ мм}^2$$

где $I_{кл}$ – ток в кольце

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{105,93}{0,2784} = 380,495 \text{ А}$$

здесь I_2 – ток в стержнях ротора;

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \sin \pi \cdot \frac{4}{86} = 2 \sin \pi \cdot 0,04651 \approx 2 \sin 8^\circ = 2 \cdot 0,1392 = 0,2784$$

$J_{кл}$ – плотность тока в короткозамыкающих кольцах

Принимаются $J_{KL} = 0,85J_2 \frac{A}{M^2}$

$$J_{KL} = 0,85J_2 = 0,85 \cdot 3 \cdot 10^6 = 2,55 \cdot 10^6 \frac{A}{M^2}$$

5.16. Размеры короткозамыкающих колец

$$\hat{a}_{\hat{E}\hat{E}} = 1,25h_{i2} = 1,25 \cdot 15,0276 = 18,7845 \text{ мм} ;$$

$$\hat{a}_{\hat{E}\hat{E}} = \frac{q_{\hat{E}\hat{E}}}{\hat{a}_{\hat{E}\hat{E}}} = \frac{149,2137}{18,7845} = 7,94344 \text{ мм}$$

Средний диаметр короткозамыкающего кольца

$$D_{K.CP} = D_2 - \hat{a}_{\hat{E}\hat{E}} = 139,25 - 18,7845 = 120,4655 \text{ мм}$$

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

6. Расчет магнитной цепи

6.1. Значения магнитных индукций в зубцах статора и ротора

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{\vartheta_{z1} \cdot l_{CT1} \cdot K_C}, \text{ Тл}$$

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

6.2. Индукция в ярме статора

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

где h_a – расчетная высота ярма статора

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

6.3. Индукция в ярме ротора

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

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;

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

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

$$\text{Здесь } \gamma_1 = \frac{(\vartheta_{u1} / \delta)^2}{5 + \vartheta_{u1} / \delta}$$

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 зубах статора А / м

Определяется по таблице 12 при B_{z1}

6.6. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора

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

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

$$F_a = L_a \cdot H_a, A$$

Где L_a – длина средней магнитной линии ярма статора

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_j)}{2p}, m$$

H_a – напряженность поля при индукции B_a по таблице 11

6.9. Магнитное напряжение ярма ротора

$$F_j = L_j \cdot H_j, A$$

Где L_j – длина средней магнитной линии ярма ротора.

Для всех двигателей кроме двухполюсных

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

Здесь D_δ – диаметр вала двигателя;

h_j – высота спинки ротора

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

Для двигателей с $2p = 2$

$$L_j = 2h_j, m$$

H_j – напряженность поля при индукции B_j по таблице 11

6.10. Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи машины на пару полюсов

$$F_\Sigma = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j, A$$

6.11. Коэффициент насыщения магнитной цепи

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

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

6.12. Намагничивающий ток

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_u}{0,9m_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1}}, A$$

6.13. Относительное значение намагничивающего тока

$$\mathbf{6.14.} \quad I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1H}}$$

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

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		24

7. Параметры рабочего режима двигателя

7.1. Активное сопротивление фазы обмотки статора

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

Где L_1 – общая длина эффективных проводников фазы обмотки

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

Здесь l_{CP1} – средняя длина витка обмотки

$$l_{\text{CP1}} = 2(l_{\text{П1}} + l_{\text{Л}}), \text{ м}$$

В этом выражении:

$l_{\text{П1}}$ – длина пазовой части витка

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

$l_{\text{Л}}$ – длина лобовой части витка

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

Здесь $e_{\text{ТК}}$ – средняя ширина витка

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

Где β_1 – относительное укорочение шага обмотки статора (см. п. 3.10)

$K_{\text{Л}}$ – коэффициент выбирается по таблице 13;

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

$q_{\text{эф}}$ – 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

$$r_1^* = r_1 \frac{I_{1\text{Н}}}{U_{1\text{Н}}}$$

7.3. Активное сопротивление фазы обмотки ротора

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

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

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

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

В этих выражениях:

l_2 – длина стержня, м (см. п.5.4);

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

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

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

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

ρ_c и $\rho_{кл}$ – соответствующие 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

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

7.5.Относительное значение r_2'

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

7.6.Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

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

где $\lambda_{л1}$ – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния определяется по таблице 14 в зависимости от вида паза (рисунок 15)

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		26

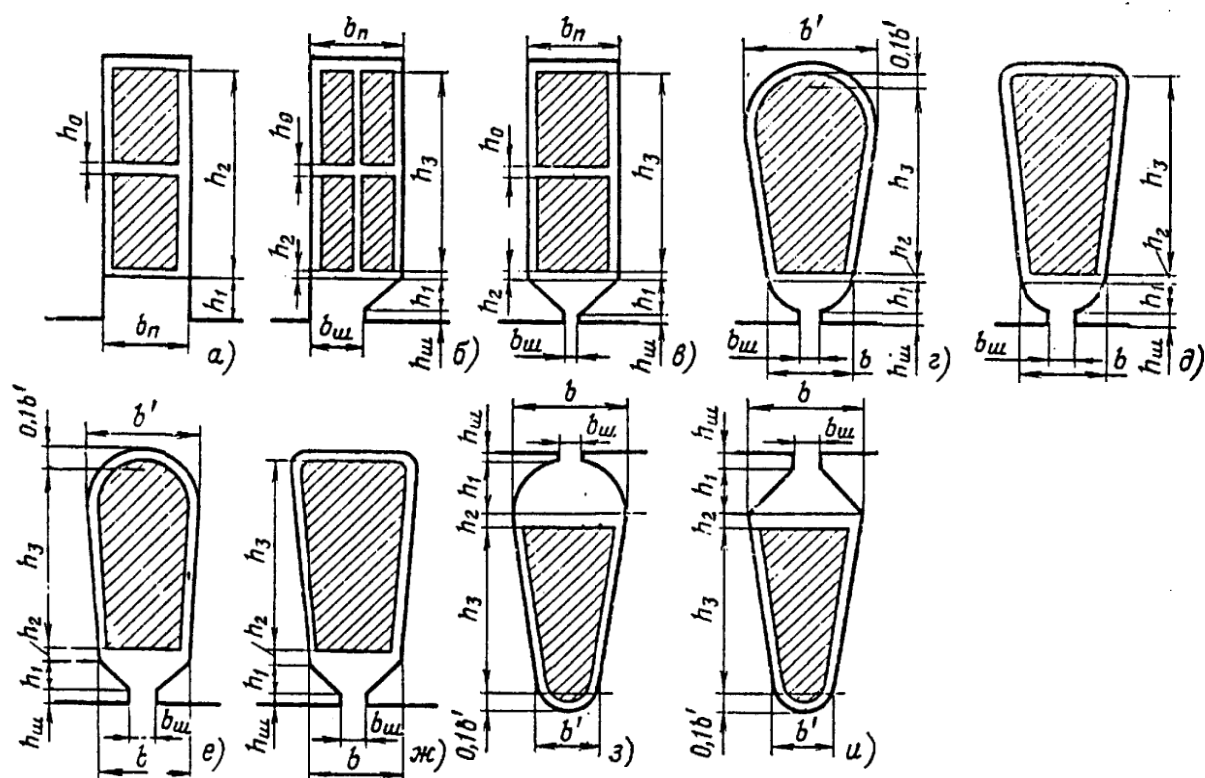


Рисунок 15 – к расчету коэффициентов магнитной проводимости пазов статора

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

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

$$K'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3\beta)$$

Коэффициент

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

$\lambda_{\text{л1}}$ – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \frac{1}{l'_\delta} (l_{\text{л1}} - 0,64\beta\tau)$$

$\lambda_{\text{д1}}$ – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{t_1}{12\delta \cdot K_\delta} \xi$$

Значение ξ определяется следующим образом:

При закрытых пазах статора и отсутствии скоса пазов

$$\xi = \left(2 \frac{t_2}{t_1} - \frac{t_1}{t_2} \Delta_z \right) K_\beta - K_{об1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2$$

При полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2K'_{ck} \cdot K_\beta - K_{об1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ck}^2)$$

В этих формулах:

t_1 и t_2 – зубцовые деления статора и ротора

Δ_z определяется по рисунку 16а;

$\beta_{ck} = \frac{b_{ck}}{t_2}$ – коэффициент скоса

При отсутствии скоса пазов $b_{ck} = 0$

K'_{ck} – определяется по рисунку 16д;

Рисунок 16 – Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния

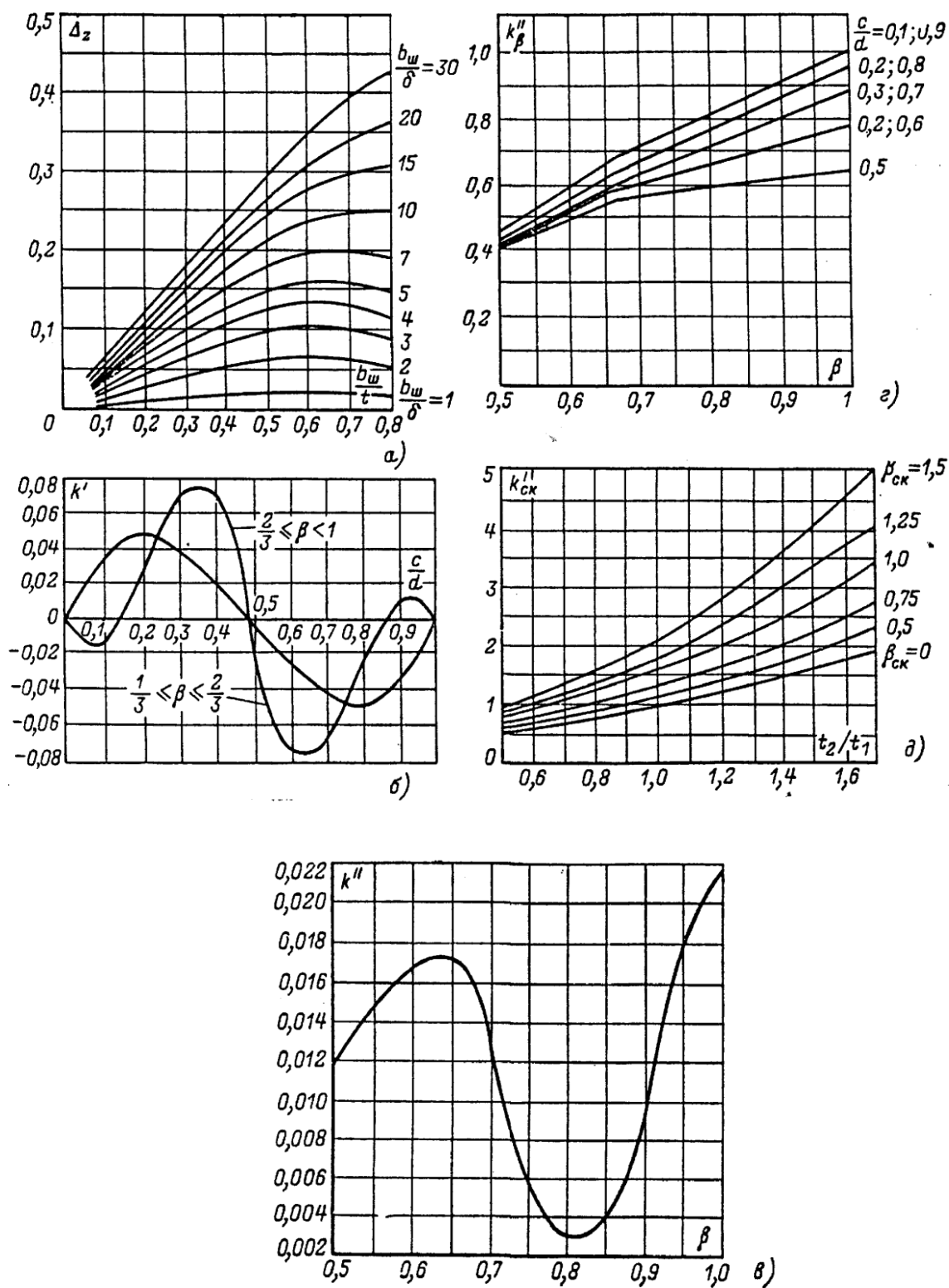
а) – коэффициент Δ_z в зависимости от размерных соотношений b_w/t и b_w/δ ;

б) – коэффициент k' в зависимости от дробной части числа q ;

в) – коэффициент k'' в зависимости от укорочений шага обмотки β ;

г) – коэффициент k'''_{β} в зависимости от укорочения шага обмотки β и дробной части числа q ;

∂ – коэффициент k'_{ck} в зависимости от соотношения t_2/t_1 и относительного скоса пазов β_{ck}



7.7. Относительное значение x_1

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

7.8. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 f_1 \cdot l'_\delta \cdot 10^{-6} (\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2}), \text{ Ом}$$

Где $l'_\delta = l_\delta$;

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

КП.13.02.10.04.19 ПЗ

Лист

29

$\lambda_{п2}$ – определяется по формулам в таблице 15 в зависимости от вида паза (рисунок 17)

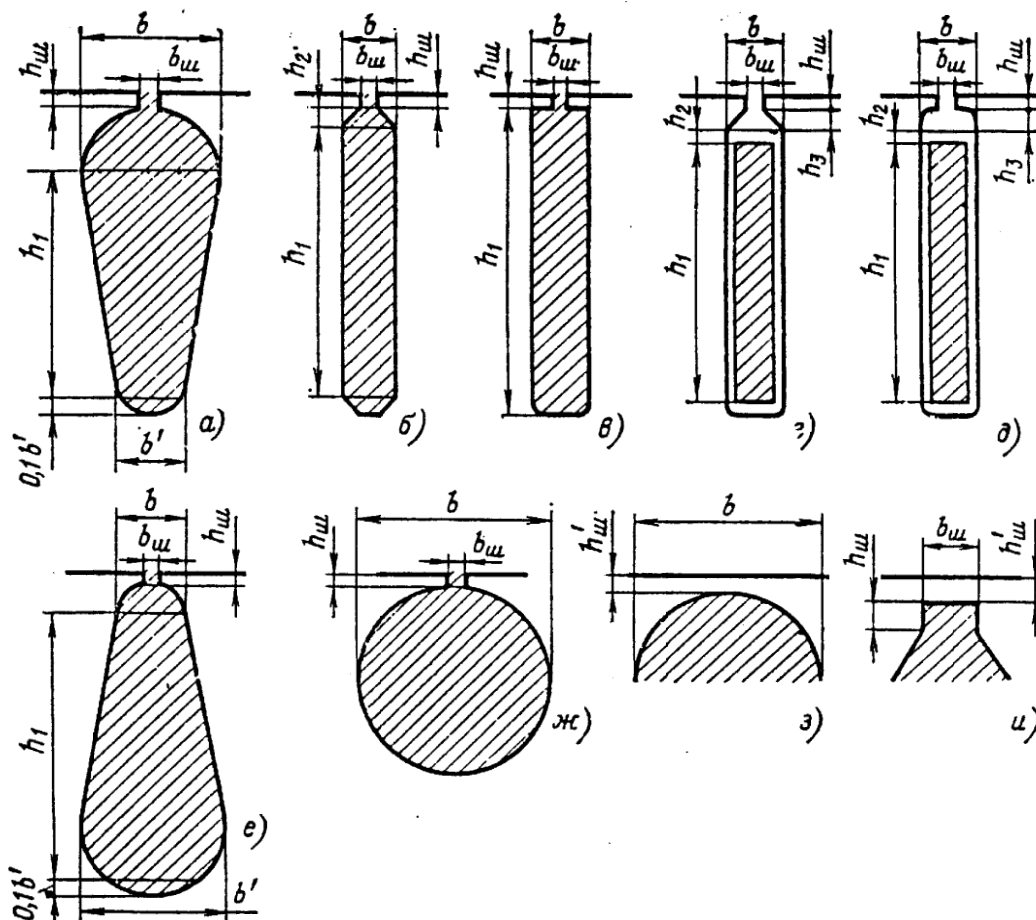


Рисунок 17 – К расчету магнитной проводимости пазов ротора

$\lambda_{д2}$ – 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

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \lg \frac{4,7D_{кл.ср}}{2a_{кл} + \epsilon_{кл}}$$

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

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

					КП.13.02.10.04.19 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		