

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций



Кафедра электрических машин и электрооборудования судов

Электрические машины

Курсовая работа

Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Специальность: 180400 “Электропривод и автоматика
промышленных установок и
технологических комплексов”

Вариант N19

Выполнил: Красовский А.В.

Преподаватель: Федотов Ю.В.

Санкт-Петербург

2008

Содержание:

I. Задание на курсовое проектирование.....	3
II. Расчетная часть.....	4
2.1 Исходные данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	4
2.2 Определение главных размеров.....	4
2.3 Расчет обмотки статора.....	7
2.4 Расчет размеров зубчатой зоны статора и воздушного зазора.....	10
2.5 Расчет ротора.....	13
2.6 Расчет магнитной цепи.....	17
2.7 Параметры рабочего режима двигателя.....	20
2.8 Расчет потерь.....	24
2.9 Расчет рабочих характеристик аналитическим методом.....	27
2.10 Расчет пусковых характеристик.....	28
2.11 Тепловой расчет.....	34
Размеры пазов статора и ротора; рабочие и пусковые характеристики двигателя.....	37
Список используемой литературы.....	46
Спецификация.....	47

1. Задание на курсовое проектирование

Произвести расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, со следующими параметрами:

- вариант N19
- мощность 28 кВт
- напряжение 380 В
- частота вращения 750 об/мин
- исполнение IP44
- класс изоляции Н

В состав пояснительной записки должны входить:

1. Титульный лист.
2. Задание на курсовое проектирование.
3. Содержание с указанием всех разделов, с которых они начинаются.
4. Расчетная часть.
5. Графический материал в следующем порядке: разрезы пазов статора и ротора, рабочие и пусковые характеристики двигателя.
6. Список используемой литературы.
7. Сборочный чертеж в двух проекциях на формате А1.

2. Расчетная часть

2.1 Исходные данные для проектирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

Вариант N 19

$P_{2h} := 28$ кВт. номинальная мощность асинхронного двигателя

$U_{1H} := 380$ - фазное напряжение обмотки статора

$n := 750$ об/мин. синхронная частота вращения

$f := 50$ Гц частота тока

Степень защиты IP44

Класс изоляции по нагреву H

2.2 Определение главных размеров асинхронного двигателя

Главными размерами АД являются диаметр статора и длина статора. Под диаметром статора понимают внутренний диаметр расточки статора его активную длину, а под длиной статора его активную длину.

2.2.1 Число пар полюсов

$$p := \frac{60f}{n} \quad p = 4$$

2.2.2 Предварительная высота оси вращения h определяется по рис. 1.

Затем по табл.1 принимается ближайшее меньшее стандартное значение h и соответствующий наружный диаметр статора D_a .

Принимаем $h=225$ и соответствующее значение

$$h := 225$$

$$D_a := 0.392 \text{ м}$$

2.2.3 Внутренний диаметр статора, где $K_d = 0.77$ определяется по табл.2

$$K_d := 0.74$$

$$D := K_d \cdot D_a$$

$$D = 0.29 \text{ м}$$

2.2.4 полюсное деление где $2p$ число полюсов АД.

$$\tau := \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$$

$$\tau = 0.114 \text{ м } 2p = 8 \text{ где } 2p \text{ число полюсов АД.}$$

2.2.5 Расчетная мощность АД

$$K_e := 0.959 \text{ определяется по рис 2}$$

$$\eta := 0.91 \text{ номинальный КПД (по рис3 или 4)}$$

$$\cos\phi := 0.83 \text{ нормальный расчетный коэф-т мощности (по рис3 или 4)}$$

$$P' := P_{2h} \cdot \frac{K_e}{\eta \cdot \cos\phi}$$

$$P' = 35.551 \text{ кВт}$$

2.2.6 Электромагнитные нагрузки предварительно определяются по рис. 5 или 6

$$A := 35 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

$$B_\delta := 0.80 \text{ Тл}$$

2.2.7 Обмоточный коэф-т $K_{об1}$ зависит от типа обмотки статора Предварительно задаются: для двухслойных обмоток при $2p > 2$

$$2p = 8$$

$$K_{об1} := 0.91$$

2.2.8 Расчетная длина воздушного зазора

$$K_B := 1.09 \text{ коэффициент формы поля в воздушном зазоре}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}$$

$$\omega = 78.54 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ - синхронная угловая скорость АД}$$

$$I_\delta := P' \cdot \frac{10^3}{K_B \cdot D^2 \cdot \omega \cdot K_{об1} \cdot A \cdot B_\delta}$$

$$I_\delta = 0.194 \text{ м}$$

2.2.9 Отношение

$$\lambda := \frac{I\delta}{\tau} \qquad \lambda = 1.7$$

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

Величина является критерием правильности выбора главных размеров \underline{D} и \underline{l} которая должна находится в пределах, указанных на рис.7. Если больше указанных пределов, то следует повторить расчет (по пунктам 2.2-2.9.) для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения h .

Если меньше указанных размеров, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h . Величина находится в пределах, указанных на рис.7. На этом выбор главных размеров заканчивается.

2.3 Расчет обмотки статора

2.3.1 Предельные значения зубчатого деления t_1 определяются по рис.8:

$$\tau = 0.114$$

$$t_{1\max} := 0.013 \text{ м}$$

$$t_{1\min} := 0.011 \text{ м}$$

2.3.2 Число пазов статора

$$Z_{1\max} := \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} \quad Z_{1\max} = 70.101$$

$$Z_{1\min} := \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} \quad Z_{1\min} = 82.847$$

2.3.3 Окончательное число пазов принимается из полученного в п.3.2.предела с учетом того, что Z_1 должно быть кратным числу фаз m , а также число пазов на полюс и фазу должно быть целым числом.

$$Z_1 := 72 \quad m := 3$$

2.3.4 Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 := \frac{Z_1}{2p \cdot m} \quad q_1 = 3$$

2.3.5 Окончательное значение зубчатого деления статора

$$t_1 := \pi \cdot \frac{D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q_1} \quad t_1 = 0.013 \text{ м}$$

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

2.3.6 Предварительное число эффективных проводников в пазу (при условии, что число параллельных ветвей в обмотке

$$a := 4 \quad P_2 := 28000$$

$$I_{1H} := \frac{P_2}{m \cdot U_{1H} \cdot \cos \phi \cdot \eta}$$

$$I_{1H} = 32.519 \text{ А}$$

$$I_{\Pi'} := \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1H} \cdot Z_1}$$

$$I_{\Pi'} = 13.623 \quad I_{1H} - \text{номинальный ток обмотки статора}$$

а - число параллельных ветвей обмотки, которое зависит от числа полюсов.

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

$$И_{п1} := a \cdot И_{п'}$$

$$И_{п1} = 54.492$$

$$И_{п} := 54$$

Полученное число эффективных проводников в пазу $И_{п}$ округляется до целого числа, а при двухслойной обмотке до целого четного числа. Чтобы это округление не было слишком грубым, сначала значение $И_{п}$ 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 четного числа.

2.3.7 Окончательное число витков фазы обмотки статора

$$w_1 := И_{п} \cdot \frac{Z_1}{2 \cdot a \cdot 3}$$

$$w_1 = 162$$

2.3.8 Окончательное значение линейной нагрузки

$$A := \frac{2 \cdot I_{1H} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} \quad A = 3.468 \times 10^4 \frac{A}{M}$$

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

2.3.9 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.

Применим двухслойную обмотку

2.3.10 Обмоточный коэффициент

$\beta := 0.8$ - укорочение шага обмотки.

$$K_y := \sin\left(\pi \cdot \frac{\beta}{2}\right) - \text{коэффициент укорочения, учитывающий уменьшение Э.Д.С. витка,}$$

вызванное укорочением шага обмотки.

$$K_y = 0.951$$

$$K_p := 0.960$$

- коэффициент распределения, учитывающий уменьшение Э.Д.С. распределенной по пазам обмотки по сравнению с сосредоточенной находят из табл. 3 для первой гармоники при соответствующем значении q_1 , равным числу пазов на полюс и фазу

$$q_1 = 3$$

$$K_{об1} := K_p \cdot K_y \quad K_{об1} = 0.913$$

2.3.11 Окончательное значение магнитного потока

$$\Phi := \frac{K_e \cdot 380}{4.44 \cdot w_1 \cdot K_{ob1} \cdot f} \quad \Phi = 0.011 \text{ Вб}$$

$K_e = 0.959$ определяется по рис 2

$$B_\delta = 0.8$$

2.3.12 Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta := \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} \quad B_\delta = 0.79 \text{ Тл}$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области (рис.5 или 6) более чем на 5%, следует принять другое значение U_n и повторить расчет. Значение U_n в нашем случае лежит в области, значит выбор верен.

2.3.13 Плотность тока в обмотке статора (предварительно)

$$A_{J1} := 213 \cdot 10^9 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \quad - \text{определяется из рис 9}$$

$$j_1 := \frac{A_{J1}}{A}$$

$$j_1 = 6.141 \times 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

2.3.14 Сечение эффективного проводника (предварительно)

Для насыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1.8 мм. Если расчетное $q_{\text{эф}} > 1.8$ мм то проводник разделяется на несколько элементарных. Для этого по табл.4 подбирается $q_{\text{эл}}$ и число элементарных проводников пэл., составляющих один эффективный, таким образом, чтобы их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника

$$q_{\text{эф}} := \frac{I_{1H}}{a \cdot j_1} \quad q_{\text{эф}} = 1.324 \times 10^{-6} \text{ м}^2$$

У насыпных обмоток пэл ≤ 6 принимаем

$$n_{\text{эл}} := 1 \quad \text{т.к.} \quad q_{\text{эф}} < 1.8$$

$$q_{\text{эл}} := 1.368 \text{ мм}^2$$

$$q_{\text{эф1}} := n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}} \quad q_{\text{эф1}} = 1.368 \text{ мм}^2$$

2.3.15 Плотность тока в обмотке статора (окончательно)

$$j_1' := \frac{I_{1H}}{a \cdot q_{\text{эф1}}} \quad j_1' = 5.943 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

2.4 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

2.4.1 Для выпинной обмотки рекомендуется выбирать паз статора, показанный на рис. 10а.

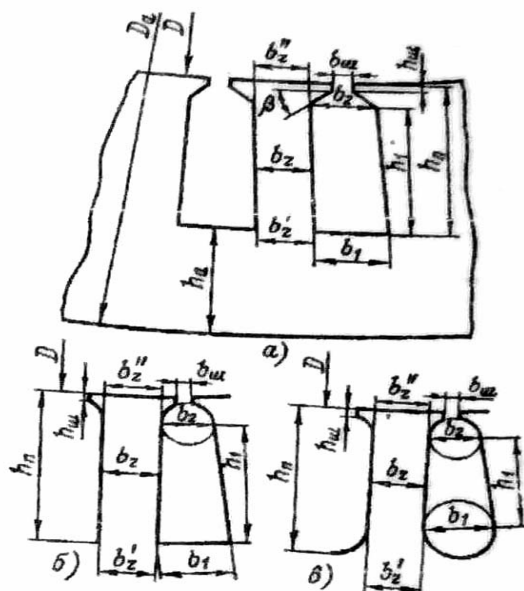


Рис. 10. К расчёту размеров зубцовой зоны выпинной обмотки статора

2.4.2 Принимаются предварительно по табл. 5

$B_a := 1.15$ Тл значение допустимой индукции в ярме статора

$B_{z1} := 1.7$ Тл значение допустимой индукции в зубцах статора

2.4.3 Предварительный расчет размеров паза

$I_{ст1} := I_{\delta}$ - длина стали сердечника статора

$K_c := 0.97$ - определяется по таблице 6

$I_{ст1} = 0.194$

Ширина зубца

$$b_{z1} := \frac{B_{\delta} \cdot l_1 \cdot I_{\delta}}{B_{z1} \cdot I_{ст1} \cdot K_c} \quad b_{z1} = 6.141 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Высота ярма статора

$$h_a := \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot I_{ст1} \cdot K_c} \quad h_a = 0.026 \text{ м}$$

2.4.4 Размеры паза в штампе принимаются

$h_{ш} := 1$ мм высота шлица паза $h_{ш} = (0.5-1.0)$ мм

$b_{ш} := 2$ мм ширина шлица паза $b_{ш} = (1.8-4.0)$ мм

2.4.5 Размеры паза в штампе рассчитываются:

$$h_{\Pi 1} := \frac{D_a - D}{2} - h_a \quad h_{\Pi 1} = 0.025 \text{ м}$$

$$b_1 := \frac{\pi \cdot (D \cdot 10^3 + 2 \cdot h_{\Pi 1})}{Z_1} - B_{Z1} \quad b_1 = 10.959 \text{ мм}$$

$$b_2 := \frac{\pi \cdot (D \cdot 10^3 + 2 \cdot h_{\text{ш}} - b_{\text{ш}}) - Z_1 \cdot B_{Z1} \cdot 10^3}{Z_1} \quad b_2 = 6.517 \text{ мм}$$

$$h_1 := h_{\Pi 1} \cdot 10^3 - \left(h_{\text{ш}} + \frac{b_2 - b_{\text{ш}}}{2} \right) \quad h_1 = 22.018 \text{ мм}$$

2.4.6 Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку

$$\Delta b_{\Pi} := 0.2 \text{ мм}$$

$$\Delta h_{\Pi} := 0.2 \text{ мм}$$

$$b_1' := b_1 - \Delta b_{\Pi}$$

$$b_1' = 10.759 \text{ мм}$$

$$b_2' := b_2 - \Delta b_{\Pi}$$

$$b_2' = 6.317 \text{ мм}$$

$$h_1' := h_1 - \Delta h_{\Pi}$$

$$h_1' = 21.818 \text{ мм}$$

$b_{\text{из}} := 0.4 \text{ мм}$ - односторонняя толщина изоляции в пазу (по таб.7)

площадь поперечного сечения корпусной изоляции:

$$S_{\text{из}} := b_{\text{из}} \cdot \left(2 \cdot h_{\Pi 1} \cdot 10^3 + b_1 + b_2 \right) \quad S_{\text{из}} = 27.212 \text{ мм}^2$$

площадь поперечного сечения прокладок в пазу:

$$S_{\text{пр}} := 0.4 \cdot b_1 + 0.9 \cdot b_2 \quad S_{\text{пр}} = 10.249 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников:

$$S_{\Pi'} := \frac{(b_1' + b_2')}{2} \cdot h_1' - S_{\text{из}} - S_{\text{пр}} \quad S_{\Pi'} = 148.824 \text{ мм}^2$$

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

$$d_{из} := 1.405$$

$$K_3 := \frac{\left(d_{из}^2 \cdot I_{п} \cdot n_{эл}\right)}{S_{п'}} \quad K_3 = 0.716$$

Применим механизированную укладку обмоток т.к.
K₃ лежит в пределах 0,7-0,72

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

2.5 Расчет ротора

2.5.1 Воздушный зазор определяется по рис. 11

$$\delta := 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

2.5.2 Число пазов ротора определяется по табл.8

$$Z_2 := 89$$

2.5.3 Внешний диаметр ротора

$$D_2 := D - 2 \cdot \delta \quad D_2 = 0.289 \text{ м}$$

2.5.4 Длина ротора принимается равной длине статора

$$l_2 := l_{\text{ст1}} \quad l_2 = 0.194 \text{ м}$$

2.5.5 Зубцовое деление

$$t_2 := \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} \quad t_2 = 0.01 \text{ м}$$

2.5.5 Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал определяется по табл.9 при $h=225$

$$K_B := 0.23$$

$$D_B := D_a \cdot K_B \quad D_B = 0.09 \text{ м}$$

$$D_j := D_B \quad D_j = 0.09 \text{ м}$$

2.5.6 Ток в стержне ротора

$$v_i := 2 \cdot m \cdot w_1 \cdot \frac{K_{\text{об1}}}{Z_2}$$

$v_i = 9.938$ - коэффициент приведения токов для двигателей с короткозамкнутым ротором

$K_i := 0.88$ - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на отношение 11/12 Определяется по рис.12

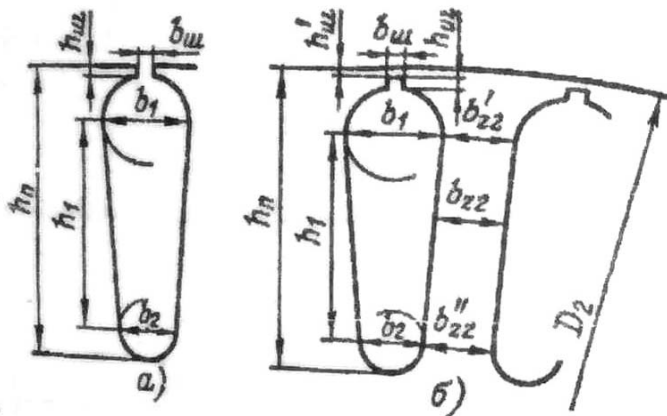
$$I_2 := K_i \cdot I_{1H} \cdot v_i \quad I_2 = 284.403 \text{ А}$$

2.5.8 Площадь поперечного сечения стержня

$J_2 := 2.5 \cdot 10^6$ плотность тока в стержне литой клетки ротора принимается в пределах 2.5-3.5*10⁶

$$q_c := \frac{I_2}{J_2} \quad q_c = 1.138 \times 10^{-4} \text{ м}^2$$

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 $h = 160-250$ мм применяют закрытые пазы (рис. 13,б)



а) полузакрытые; б) закрытые

Рис. 13. Грушевидные пазы короткозамкнутого ротора

$$\begin{aligned} v_{\text{шр}} &:= 1.5 \text{ мм} & h_{\text{шр}} &:= 0.7 \text{ мм} \\ h_{\text{шр}'} &:= 0.3 \text{ мм} & & \text{высота перемычки над пазом в двигателях с } 2p=8 \end{aligned}$$

2.5.10 Допустимая ширина зубца

$$\begin{aligned} B_\delta &= 0.8 \text{ Тл} & \text{допустимая индукция (по рис.5)} \\ B_{z2} &:= 1.85 \text{ Тл} & \text{из табл.5, допустимая индукция на зубцах ротора} \\ I_{\text{ст}2} &:= I_\delta \\ I_{\text{ст}2} &= 0.194 \end{aligned}$$

$$v_{z2} := B_\delta \cdot t_2 \cdot \frac{I_\delta}{B_{z2} \cdot I_{\text{ст}2} \cdot K_c} \quad v_{z2} = 4.546 \times 10^{-3}$$

2.5.11 Размеры паза (рис. 13)

$$v_1 := \frac{\left[\pi \cdot \left(D_2 \cdot 10^3 - 2 \cdot h_{\text{шр}'} - 2 \cdot h_{\text{шр}} \right) - Z_2 \cdot v_{z2} \cdot 10^3 \right]}{\pi + Z_2}$$

$$v_1 = 5.39 \text{ мм}$$

$$b_2 := \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_c \cdot 10^6}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad b_2 = 3.932 \text{ мм}$$

$$h_{1p} := (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} \quad h_{1p} = 20.656 \text{ мм}$$

2.5.12 Полная высота паза

$$h_{п2p} := h_{шp'} + h_{шp} + \frac{b_1}{2} + h_{1p} + \frac{b_2}{2}$$

$$h_{п2p} = 26.317 \text{ мм}$$

2.5.13 Уточненная площадь сечения стержня

$$q_{cy} := \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) \cdot h_{1p}$$

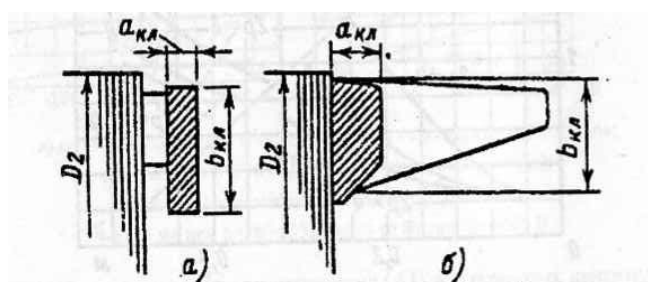
$$q_{cy} = 113.761 \text{ мм}^2$$

2.5.14 Плотность тока в стержне

$$J_{2p} := \frac{I_2}{q_{cy}} \quad J_{2p} = 2.5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

2.5.15 Плотность поперечного сечения короткозамыкающих

колец (рис. 14)



а) со сварной обмоткой; б) с литой обмоткой
Рис. 14. Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора

$$J_{кл} := 0.85 \cdot J_{2p} \quad J_{кл} = 2.125 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

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

$$\Delta := 2 \cdot \sin \left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2} \right) \quad \Delta = 0.281$$

$$I_{кл} := \frac{I_2}{\Delta} \quad I_{кл} = 1.01 \times 10^3 \text{ А}$$

где,

I_2 - ток в стержнях ротора

$I_{кл}$ - ток в кольце

$$q_{кл} := \frac{I_{кл}}{J_{кл}} \quad q_{кл} = 475.52 \text{ мм}^2$$

2.5.16 Размеры короткозамыкающих колец

$$b_{кл} := 1.25 \cdot h_{п2р} \quad b_{кл} = 32.896 \text{ мм}$$

$$a_{кл} := \frac{q_{кл}}{b_{кл}} \quad a_{кл} = 14.455 \text{ мм}$$

Средний диаметр короткозамыкающего кольца

$$D_{ксп} := D_2 \cdot 10^3 - b_{кл} \quad D_{ксп} = 255.984 \text{ мм}$$

2.6 Расчет магнитной цепи

2.6.1 Значения магнитных индукций в зубцах статора и ротора

$$B_{z1} := B_{\delta} \cdot t_1 \cdot \frac{I_{\delta}}{B_{z1} \cdot I_{CT1} \cdot K_c} \quad B_{z1} = 1.7 \text{ Тл}$$

$$B_{z2} := B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \frac{I_{\delta}}{B_{z2} \cdot I_{CT2} \cdot K_c} \quad B_{z2} = 1.85 \text{ Тл}$$

2.6.2 Индукция в ярме статора

$$B_a = 1.15$$

$$h_a := \left[\frac{(D_a - D)}{2} \right] - h_{п1}$$

$$h_a = 0.026 \text{ м} \quad \text{- расчетная высота ярма статора}$$

где

$$B_a := \frac{\Phi}{(2 \cdot h_a \cdot I_{CT1} \cdot K_c)} \quad B_a = 1.15 \text{ Тл}$$

2.6.3 Индукция в ярме ротора

$$h_j := \frac{(2 + p)}{3.2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{п2p} \cdot 10^{-3} \right)$$

$$h_j = 0.055 \text{ м} \quad \text{- расчетная высота ярма ротора}$$

$$B_j := \frac{\Phi}{(2 \cdot h_j \cdot I_{CT2} \cdot K_c)} \quad B_j = 0.533 \text{ Тл}$$

2.6.4 Магнитное напряжение воздушного зазора

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \quad \mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

$$\gamma_1 := \frac{\left(\frac{B_{ш}}{\delta \cdot 10^3} \right)^2}{5 + \frac{B_{шp}}{\delta \cdot 10^3}} \quad \gamma_1 = 1.481 \quad \delta - \text{воздушный зазор, м}$$

$$K_{\delta} := \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta} \quad K_{\delta} = 1.076$$

$$F_{\delta} := \frac{(2 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot K_{\delta})}{\mu_0} \quad F_{\delta} = 821.647 \text{ А}$$

2.6.5 Магнитное напряжение зубцовой зоны статора

$$\begin{aligned} h_{z1} &:= h_{\pi 1} \\ h_{z1} &= 0.025 \text{ расчетная высота зубца статора, м} \\ H_{z1} &:= 1250 \frac{\text{А}}{\text{м}} \\ F_{z1} &:= 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} \quad F_{z1} = 63.192 \text{ А} \end{aligned}$$

2.6.6 Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора

$$\begin{aligned} h_{z2} &:= h_{\pi 2p} \cdot 10^{-3} \quad h_{z2} = 0.026 \text{ - расчетная высота зуба ротора, м} \\ H_{z2} &:= 2340 \\ F_{z2} &:= 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} \quad F_{z2} = 123.162 \text{ А} \end{aligned}$$

2.6.7 Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$K_{z1} := 1 + \frac{(F_{z1} + F_{z2})}{F_{\delta}} \quad K_{z1} = 1.227$$

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

2.6.8 Магнитное напряжение ярма статора.

$$\begin{aligned} L_a &:= \pi \cdot \frac{(D_a - h_a)}{2 \cdot p} \quad L_a = 0.144 \text{ м - длина средней магнитной линии ярма статора} \\ B_a &= 1.15 \text{ Тл} \\ H_a &:= 277 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad \text{- напряженность поля при индукции } B_a \text{ по таб.11} \\ F_a &:= L_a \cdot H_a \quad F_a = 39.847 \frac{\text{А}}{\text{м}} \end{aligned}$$

2.6.9 Магнитное напряжение ярма ротора

$$\begin{aligned} h_j &= 0.055 \text{ м} \quad \text{- высота спинки ротора} \\ L_j &:= \pi \cdot \frac{(D_b - h_j)}{2 \cdot p} \quad L_j = 0.014 \text{ м - длина средней магнитной линии ярма ротора.} \\ B_j &= 0.533 \text{ Тл} \end{aligned}$$

$$H_j := 72 \frac{A}{m}$$

$$F_j := L_j \cdot H_j \qquad F_j = 0.984 \frac{A}{m}$$

2.6.10 Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи полюсов

машины на пару

$$F_\mu := F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j \qquad F_\mu = 1.049 \times 10^3 \text{ A}$$

2.6.11 Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$K_\mu := \frac{F_\mu}{F_\delta} \qquad K_\mu = 1.276$$

2.6.12 Намагничивающий ток

$$I_\mu := \frac{p \cdot F_\mu}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{об1}} \qquad I_\mu = 10.54 \text{ A}$$

2.6.13 Относительное значение намагничивающего тока

$$\Gamma'_\mu := \frac{I_\mu}{I_{1H}} \qquad \Gamma'_\mu = 0.324$$

Значение Γ'_μ служит критерием правильности расчетов размеров и обмотки двигателя.

Величина Γ_μ должна быть в пределах от 0,18 -0,35

Следовательно, расчет верен.

2.7 Параметры рабочего режима двигателя

2.7.1 Активное сопротивление фазы обмотки

$$\rho := \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \quad \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

- удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, (по табл.20). Для изоляции обмоток с классом нагревостойкости Н расчетная температура принимается равной 115*С

$$q_{\text{эф}} = 1.324 \times 10^{-6} \text{ м}^2 - \text{сечение эффективного проводника (см. п.3.14.)}$$

$$I_{\text{п1}} := I_{\text{ст1}} \quad I_{\text{п1}} = 0.194 \text{ м} - \text{длина пазовой части витка}$$

$$\beta_1 := 0.8 - \text{относительное укорочение шага обмотки статора (см. п. 3.10)}$$

$$v_{\text{тк}} := \frac{[\pi \cdot (D + h_{\text{п1}})] \cdot \beta_1}{2 \cdot p} \quad v_{\text{тк}} = 0.099 \text{ м} - \text{средняя ширина витка}$$

$$K_{\text{л}} := 1.90 - \text{коэффициент выбирается по табл. 13}$$

$V := 0.01 \text{ м}$ -длина вылета прямолинейной части секции из паза до начала отгиба лобовой части.

$$I_{\text{л}} := K_{\text{л}} \cdot v_{\text{тк}} + 2 \cdot V$$

$$I_{\text{л}} = 0.208 \text{ м} - \text{длина лобовой части витка}$$

$$I_{\text{ср1}} := 2 \cdot (I_{\text{п1}} + I_{\text{л}}) \quad I_{\text{ср1}} = 0.804 \text{ м} - \text{средняя длина витка обмотки}$$

$$L_1 := I_{\text{ср1}} \cdot w_1 \quad L_1 = 130.224 \text{ м} - \text{длина эффективных проводников фазы обмотки}$$

$$r_1 := \rho \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} \quad r_1 = 0.523 \text{ Ом}$$

2.7.2 Относительное значение сопротивления r_1'

$$r_1' := r_1 \cdot \frac{I_{1\text{H}}}{U_{1\text{H}}} \quad r_1' = 0.045 \text{ Ом}$$

2.7.3 Активное сопротивление фазы обмотки ротора

$$\Delta = 0.281 \quad \rho_{\text{кл}} := \frac{10^{-6}}{20.3} \quad \rho_{\text{с}} := \rho_{\text{кл}}$$

- соответственно удельные сопротивления материала стержня и замыкающих колец при расчетной температуре (по табл. 20)

$$q_{\text{кл}} = 475.52 \text{ мм}^2 - \text{площадь поперечного сечения замыкающего кольца (см. п. 5.15.)}$$

$q_{cy} = 113.761 \text{ мм}^2$ - площадь поперечного сечения стержня (см. п.5.13.);

$$D_{\text{кл.ср}} := D_2 \cdot 10^3 - v_{\text{кл}}$$

$D_{\text{кл.ср}} = 255.984$ - средний диаметр замыкающих колец

$I_2 = 0.194 \text{ м}$ - длина стержня, (см. п.5.4.)

$$r_{\text{кл}} := \rho_{\text{кл}} \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{кл.ср}} \cdot 10^{-3}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}}} \quad r_{\text{кл}} = 9.361 \times 10^{-13} \text{ Ом}$$

$$r_c := \rho_c \cdot \frac{I_2}{q_{cy}} \quad r_c = 8.387 \times 10^{-11} \text{ Ом}$$

$$r_2 := r_c + 2 \cdot \frac{r_{\text{кл}}}{\Delta} \quad r_2 = 1.075 \times 10^{-10} \text{ Ом}$$

2.7.4 Приведение r_2 к числу витков обмотки статора

$$r'_2 := r_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{\left(w_1 \cdot K_{\text{обл}} \cdot 10^3 \right)^2}{Z_2} \quad r'_2 = 0.315 \text{ Ом}$$

2.7.5 Относительное значение r'_2

$$r\ddot{e}_2 := r'_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} \quad r\ddot{e}_2 = 0.027 \text{ Ом}$$

2.7.6 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$K_{\text{ск}} := 2.6$$

$$v_{\text{ск}} := 0.014$$

$$\beta_{\text{ск}} := \frac{v_{\text{ск}}}{t_2} \quad \beta_{\text{ск}} = 1.373 \text{ - коэффициент скоса}$$

$$t_1 = 0.013 \text{ м} \quad \text{- зубцовые деления статора и ротора}$$

$$t_2 = 0.01 \text{ м}$$

$$\frac{t_1}{t_2} = 1.241$$

$$\lambda_{\text{л1}} := 0.34 \cdot \left(\frac{q_1}{I\delta} \right) \cdot (I_{\text{л}} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau)$$

$$\lambda_{\text{л1}} = 0.789 \text{ - коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния } \lambda_{\text{л1}}$$

В расчетных формулах (табл. 14) коэффициенты K_r , K'_r определяют: при двухслойной обмотке с укороченным шагом, когда β от $2/3$ до 1

$$\beta = 0.8$$

$$K'_\beta := 0.25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) \quad K'_\beta = 0.85$$

$$K_\beta := 0.25 \cdot (1 + 3 \cdot K'_\beta) \quad K_\beta = 0.888$$

$$h_2 := 0.5 \quad h_3 := h_1 - 2 \cdot b_{из} \quad h_3 = 21.218$$

$$h_{1'} := h_{п1} \cdot 10^3 - h_3$$

$$\lambda_{п1} := \frac{h_3}{3 \cdot b_2} \cdot K_\beta + \left(\frac{h_2}{b_2} + 3 \cdot \frac{h_{1'}}{b_2 + 2 \cdot b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) \cdot K'_\beta$$

$\lambda_{п1} = 3.434$ - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния, определяется по табл. 14 в зависимости от вида паза (рис. 15)

Значение ζ , определяется следующим образом: при полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\zeta := 2 \cdot K_{ск} \cdot K_\beta - K_{об1} \cdot 2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ск}) \quad \zeta = 3.34$$

$$\lambda_{д1} := \frac{t_1 \cdot \zeta}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \quad - \text{коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния}$$

$$\lambda_{д1} \quad \lambda_{д1} = 5.458$$

$$I'_\delta := I_{ст1}$$

$$x_1 := 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \left(\frac{I'_\delta}{p \cdot q_1} \right) \cdot (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) \quad x_1 = 3.24 \text{ Ом}$$

2.7.7 Относительное значение $X1$

$$x_{\check{e}1} := x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} \quad x_{\check{e}1} = 0.277$$

2.7.8 Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора

- для ротора с литыми обмотками определяется по формуле:

$$\lambda_{л2} := 2.3 \cdot \frac{D_{кл.ср} \cdot 10^{-3}}{Z_2 \cdot I'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \log \left[4.7 \cdot \left(\frac{D_{кл.ср} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot a_{кл} \cdot 10^{-3} + b_{кл} \cdot 10^{-3}} \right) \right]$$

$$\lambda_{л2} = 0.556$$

$$\Delta_Z := 0.02 \quad - \text{определяется по рис. 17,а.}$$

$$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-4}} = 3.333 \quad - b_{ш}/\delta$$

$$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{0.013} = 0.154 - b_{III}/t$$

$$\zeta_p := 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} \quad \zeta_p = 0.984$$

$$\lambda_{д2} := t_2 \cdot \frac{\zeta_p}{12 \cdot \delta \cdot K_\delta} \quad \lambda_{д2} = 1.296$$

$\lambda_{п2}$ - по формулам в табл.15 в зависимости от вида паза (рис. 16)

$$\lambda_{п2} := \left[\left(\frac{h_1}{3 \cdot B_1} \right) \cdot \left(1 - \pi \cdot \frac{B_1^2}{8 \cdot q_c \cdot 10^6} \right)^2 + 0.66 - \frac{B_{III}}{2 \cdot B_1} \right] \cdot 1 + \frac{h_{III}}{B_{III}} \quad \lambda_{п2} = 2.077$$

$$x_2 := 7.9 \cdot f \cdot \Gamma_\delta \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л1} + \lambda_{д2})$$

$$x_2 = 3.184 \times 10^{-4} \text{ Ом}$$

2.7.9 Приведение X_2 к числу витков статора

$$x'_2 := x_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2} \quad x'_2 := 0.43 \text{ Ом}$$

2.7.10 Относительное значение

$$x\ddot{e}_2 := x'_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} \quad x\ddot{e}_2 = 0.037$$

2.8 Расчет потерь

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

2.8.1 Потери в стали основные

$K_c := 0.97$ - коэффициент, учитывающий неоднородность стали

$\gamma_c := 7.8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - удельная масса стали

$B_{z1\max} := 7.629 \cdot 10^{-3}$ $B_{z1\min} := 6.731 \cdot 10^{-3}$

$B_{z1cp} := \frac{B_{z1\max} + B_{z1\min}}{2}$ $B_{z1cp} = 7.18 \times 10^{-3}$

B_{z1cp} - средняя ширина зубца статора

$h_{z1} = 0.025$ - расчетная высота зубца статора (определена в разделе 6)

$h_a = 0.026$ - высота ярма статора (определена в разделе 6)

m_{z1} m_a масса стали ярма и зубцов статора

$m_{z1} := h_{z1} \cdot B_{z1cp} \cdot Z_1 \cdot I_{ст1} \cdot K_c \cdot \gamma_c$

$m_{z1} = 19.149 \text{ кг}$

$m_a := \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot I_{ст1} \cdot K_c \cdot \gamma_c$

$m_a = 43.314 \text{ кг}$

$B_a = 1.15$

$B_{z1} = 1.7$ -индукция в ярме и зубцах статора (определены в разделе 6)

K_{da} K_{dz} - коэффициенты для машин мощностью меньше 250 кВт принимаются

$K_{da} := 1.6$

$K_{dz} := 1.8$

$\beta_{степ} := 1.5$ - показатель степени (по табл. 16)

$P_{1.0.50} := 2.5 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

$P_{ст.осн} := P_{1.0.50} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{\beta} \cdot (K_{da} \cdot B_a^2 \cdot m_a + K_{dz} \cdot B_{z1} \cdot m_{z1})$ $P_{ст.осн} = 375.623 \text{ Вт}$

2.8.2 Поверхностные потери в роторе

Принимаем $\beta_{02} := 0.2$

$$B_{02} := \beta_{02} \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad B_{02} = 0.172$$

Принимаем $K_{02} := 1.5$

$$P_{\text{пов}2y} := 0.5 \cdot K_{02} \cdot \left(Z_2 \cdot \frac{n}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 \quad P_{\text{пов}2y} = 61.361 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$P_{\text{пов}2} := P_{\text{пов}2y} \cdot (t_2 - v_{\text{шр}} \cdot 10^{-3}) \cdot Z_2 \cdot I_{\text{ст}1} \quad P_{\text{пов}2} = 9.2 \text{ Вт}$$

2.8.3 Пульсационные потери в зубцах ротора

$B_{z2\text{cp}}$ - средняя ширина зубца ротора

$$B_{z2\text{max}} := 8.826 \cdot 10^{-3} \quad B_{z2\text{min}} := 7.767 \cdot 10^{-3}$$

$$B_{z2\text{cp}} := \frac{(B_{z2\text{max}} + B_{z2\text{min}})}{2} \quad B_{z2\text{cp}} = 8.296 \times 10^{-3}$$

$h_{z2} = 0.026$ - расчетная высота зубца ротора (п.6.6.)

m_{z2} - масса стали зубцов ротора

$$m_{z2} := h_{z2} \cdot B_{z2\text{cp}} \cdot Z_2 \cdot I_{\text{ст}1} \cdot K_c \cdot \gamma_c \quad m_{z2} = 28.477 \text{ кг}$$

$$B_{z2\text{cp}} := B_{z2} \quad B_{z2} = 1.85 \text{ - определена выше (п.6.1.)}$$

$\gamma_1 = 1.481$ - определена выше (п.6.4.)

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

$$B_{\text{пул}2} := \gamma_1 \cdot \delta \cdot \frac{B_{z2\text{cp}}}{2 \cdot t_2}$$

$$B_{\text{пул}2} = 0.081 \text{ Тл}$$

$$P_{\text{пул}2} := 0.11 \cdot \left(Z_2 \cdot n \cdot \frac{B_{\text{пул}2}}{1000} \right)^2 \cdot m_{z2} \quad P_{\text{пул}2} = 90.742 \text{ Вт}$$

2.8.4 Сумма добавочных потерь в стали

$$P_{\text{ст.доб}} := P_{\text{пов}2} + P_{\text{пул}2}$$

$$P_{\text{ст.доб}} = 99.942 \text{ Вт}$$

2.8.5 Полные потери в стали

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

$$P_{\text{ст}} = 475.564 \text{ Вт}$$

2.8.6 Механические потери

Механические потери для обдуваемых двигателей (степень защиты IP44) определяются:

$$K_T := 1.3 \cdot (1 - D_a) \quad \text{для двигателей с } 2p \geq 4$$

$$K_T = 0.79$$

$$P_{\text{мех}} := K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 \quad P_{\text{мех}} = 104.982 \text{ Вт}$$

2.8.7 Добавочные потери при номинальном режиме

$$P_{\text{добн}} := 0.005 \cdot \frac{P_{2h}}{\eta} \cdot 10^3 \quad P_{\text{добн}} = 153.846 \text{ Вт}$$

2.8.8 Ток холостого хода двигателя

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_\mu = 10.54 \text{ А} \quad \text{см п 6.12}$$

$P_{\text{элхх}}$ - электрические потери в статоре при холостом ходе

$$P_{\text{элхх}} := m \cdot I_\mu^2 \cdot r_l \quad P_{\text{элхх}} = 174.389 \text{ Вт}$$

$I_{\text{ххэ}}$ - активная составляющая тока холостого хода

$$I_{\text{хха}} := \frac{(P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{элхх}})}{m \cdot U_{1H}} \quad I_{\text{хха}} = 0.662 \text{ А}$$

$$I_{\text{хх}} := \sqrt{I_{\text{хха}}^2 + I_\mu^2} \quad I_{\text{хх}} = 10.561 \text{ А}$$

2.8.9 Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \phi_{\text{хх}} := \frac{I_{\text{хха}}}{I_{\text{хх}}} \quad \cos \phi_{\text{хх}} = 0.063$$

2.9 Расчет рабочих характеристик аналитическим методом

2.9.1 Параметры из схемы замещения фазы обмотки машины

$$r_{12} := \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} \quad r_{12} = 1.127 \text{ Ом}$$

$$x_{12} := \frac{U_{1H}}{I_{\mu}} \quad x_{12} = 36.053 \text{ Ом}$$

$$c_1 := 1 + \frac{x_1}{x_{12}} \quad c_1 = 1.09$$

2.9.2 Активный ток холостого хода

$$I_{\text{oa}} := \frac{\left(P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 \right)}{3 \cdot U_{1H}} \quad I_{\text{oa}} = 0.482 \text{ А}$$

2.9.3 Расчетные величины для формуляра расчета (табл. 17)

$$a' := c_1^2 \quad a' = 1.188$$

$$a := c_1 \cdot r_1 \quad a = 0.57 \text{ Ом}$$

$$b' := 0$$

$$b := c_1 \cdot (x_1 + c_1 + x'_2)$$

2.9.4 Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в табл. 17. Расчет выполняют, задаваясь значениями скольжений

$S=0.003; 0.01; 0.015; 0.02; 0.025; 0.03; S_n$

Последовательность расчёта понятна из формуляра. После окончания расчёта строятся рабочие характеристики: $P_1, I_1, \cos\phi, n, S = f(P_2)$

По характеристике $S = f(P_2)$ определяется значение S_n соответствующее мощности P_{2H} .

После этого выполняется расчет для скольжения S_n и заполняется последняя графа таблицы.

Вид рабочих характеристик представлен на рис. 19.

2.10 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 расчётах этих характеристик следует учитывать эффект вытеснения тока.

2.10.1 Расчетные точки характеристик определяются при скольжениях
 $S = 1.0, 0.8, 0.5, 0.2, 0.15, 0.1$, $S_{кр}$ по формуляру (табл. 18). Критическое скольжение приближенно равно:

$$S_{кр} := \frac{r'_2}{\frac{x_1}{c_1} + x'_2} \quad S_{кр} = 0.093$$

Необходимые пояснения для расчета по формуляру (табл. 18) приводятся ниже. Расчет параметров начинается для скольжения $S=1.0$ и представлен в качестве примера в пояснительной записке. Для других скольжений расчеты заносятся непосредственно в табл. 18.

2.10.2 Параметры с учетом вытеснения тока.

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

$$h_c := h_{п2р} - h_{шр'} - h_{ш} \quad h_c = 25.017 \text{ мм}$$

$s := 1$ скольжение

$\zeta_{првсто}$ - приведенная высота стержня обмотки ротора. Для литой алюминиевой обмотки ротора:

при расчетной температуре 75°C

$$\zeta_{првсто} := 65.15 \cdot h_c \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{s}$$

$$\zeta_{првсто} = 1.63$$

2.10.3 Для значения $\zeta_{првсто}$ по Рис- 20 определяется величина

$$\phi := 0.42$$

а по рис.21 величина $\phi' = Kg$

где Kg -коэффициент демпфирования $\phi' := 0.99$

2.10.4 Глубина проникновения тока в стержне

$$h_r := \frac{h_c}{1 + \phi} \quad h_r = 17.617 \text{ мм}$$

2.10.5 Площадь сечения стержня, ограниченная величиной h при $h_r \geq b_2/2$

$$B_r := B_2 - \frac{(B_2 - B_1)}{h_1} \cdot \left(h_r - \frac{B_2}{2} \right)$$

$$B_r = 4.969 \text{ мм}$$

$$B_1 = 5.39 \text{ мм}$$

$$B_2 = 3.932 \text{ мм}$$

$$h_1 = 22.018 \text{ мм} \quad - \text{ (см. п. 5.11)}$$

$$q_r := \pi \cdot \frac{B_2^2}{8} + \frac{(B_2 + B_r)}{2} \cdot \left(h_r - \frac{B_2}{2} \right) \quad q_r = 75.726 \text{ мм}^2$$

2.10.6 Коэффициент K_r определяющий отношение площади всего сечения стержня q_c к площади стержня, ограниченного высотой h

$$q_c := \pi \cdot \frac{(B_1^2 - B_2^2)}{8} + \frac{(B_1 - B_2)}{2} \cdot h_1 \quad q_c = 21.392 \text{ мм}^2$$

$$K_r := \frac{q_c}{q_r} \quad K_r = 0.282$$

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

$$K_R := 1 + \frac{r_c \cdot (K_r - 1)}{r_2} \quad K_R = 0.44$$

$$r_c = 8.387 \times 10^{-11} \text{ Ом}$$

$$r_2 = 1.075 \times 10^{-10} \text{ Ом} \quad - \text{ см. п. 7.3.}$$

2.10.8 Приведенное активное сопротивление ротора с учетом эффекта вытеснения тока.

$$r'_{2\zeta} := K_R \cdot r'_2 \quad r'_{2\zeta} = 0.139 \text{ Ом}$$

$$r'_2 = 0.315 \text{ Ом} \quad - \text{ см. п. 7.4}$$

2.10.9 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока $\lambda_{п2\zeta}$ определяется по формуле (табл. 15) в зависимости от принятого вида паза ротора (рис. 16) и с учетом коэффициента K_g рис 21

$$K_D := \phi' \quad \phi' = 0.99$$

$$\lambda_{п2\zeta} := \left[\frac{h_1}{3 \cdot B_1} \cdot \left(1 - \pi \cdot \frac{B_1^2}{8 \cdot q_{cy}} \right) + 0.66 - \frac{B_{шp}}{2 \cdot B} \right] \cdot K_D + \frac{h_{ш}}{B_{шp}} \quad \lambda_{п2\zeta} = 2.39$$

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

$$K_X := \frac{(\lambda_{п2\zeta} + \lambda_{л2} + \lambda_{л2})}{(\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{л2})} \quad K_X = 1.098$$

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

$$x'_{2\zeta} := x'_2 \cdot K_X \quad x'_{2\zeta} = 0.472 \text{ Ом}$$

$$x'_2 = 0.43 \quad - \text{см. п. 7.9}$$

2.10.12 Ток ротора без учета влияния насыщения магнитопровода полями рассеяния

$$\Gamma_2 := \frac{U_{1H}}{\sqrt{\frac{(r_1 - r'_{2\zeta})^2}{s} + (x_1 + x'_{2\zeta})^2}} \quad \Gamma_2 = 101.819 \text{ А}$$

$$r_1 = 0.523 \text{ Ом} \quad - \text{см. пп. 7.1 и 7.6}$$

$$x_1 = 3.24 \text{ Ом}$$

2.10.13 далее при расчете параметров машины будет учитываться влияние насыщения магнитопровода полями рассеяния. Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора

$K_{нас} := 1.14$ - коэффициент, учитывающий увеличение кратности тока при насыщении

$K'_\beta = 0.85$ - коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза при укороченном шаге (см. п. 7.6.)

$K_{об1} = 0.91$ - обмоточный коэффициент (см. п. 3.10.);

$K_y = 0.951$ - коэффициент укорочения шага (см. п. 3.10.)

$I_{н1} := 12$ - число эффективных проводников в пазу статора

$a := 4$ - число параллельных ветвей обмотки статора

$I_1 := \Gamma_2$ - ток статора соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения

$$I_1 = 101.819 \text{ А}$$

$$F_{п.ср} := 0.7 \cdot K_{нас} \cdot I_1 \cdot \frac{I_{н1}}{a} \cdot \left(K'_\beta + K_y \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad F_{п.ср} = 377.855 \text{ А}$$

2.10.14 Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре

$$C_N := 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} \quad C_N = 1.045$$

$$t_1 = 0.013$$

$$t_2 = 0.01 \quad - \text{зубцовые деления статора и ротора (см. пп.3.5 и 5.5)}$$

$$B_{\phi\delta} := \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \quad B_{\phi\delta} = 0.377 \text{ Тл}$$

2.10.14 По рис. 22 определяем коэффициент характеризующий отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины

$$x_\delta := 0.97$$

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

$$h' := h_{п2р} - h_1 - h_{ш} \quad h' = 3.298 \text{ мм}$$

$$h_{п2р} = 26.317$$

$$h_1 = 22.018 \quad h_{ш} = 1 \quad b_{ш} = 2 \text{ мм}$$

$$C_1 := \left(t_1 \cdot 10^3 - b_{ш} \right) \cdot (1 - x_\delta) \quad C_1 = 0.32 \text{ мм}$$

$$\Delta_{\lambda_{п1нас}} := \frac{h_{ш} + 0.58 \cdot h'}{b_{ш}} \quad \Delta_{\lambda_{п1нас}} = 1.457$$

$$\lambda_{п1нас} := \lambda_{п1} - \Delta_{\lambda_{п1нас}} \quad \lambda_{п1нас} = 1.978$$

2.10.17 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом насыщения

$$\lambda_{д1нас} := \lambda_{д1} \cdot x_\delta \quad \lambda_{д1нас} = 5.295$$

2.10.18 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом насыщения

$$x_{1нас} := x_1 \cdot \frac{(\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1})}{(\lambda_{л1} + \lambda_{д1} + \lambda_{п1})} \quad x_{1нас} = 2.698 \text{ Ом}$$

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

$$C_2 := (t_2 \cdot 10^3 - b_{\text{шр}}) \cdot (1 - x_\delta) \quad C_2 = 0.261 \text{ мм}$$

$$\Delta \lambda_{\text{п2нас}} := \frac{h_{\text{шр}}}{b_{\text{шр}}} \cdot \frac{C_2}{b_{\text{шр}} + C_2} \quad \Delta \lambda_{\text{п2нас}} = 0.069$$

$$\lambda_{\text{п2}\zeta_{\text{нас}}} := \lambda_{\text{п2}\zeta} - \Delta \lambda_{\text{п2нас}} \quad \lambda_{\text{п2}\zeta_{\text{нас}}} = 2.321$$

2.10.19 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом насыщения

$$\lambda_{\text{д2нас}} := \lambda_{\text{д2}} \cdot x_\delta \quad \lambda_{\text{д2нас}} = 1.257$$

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

$$x'_{2\zeta_{\text{нас}}} := x'_2 \cdot \frac{(\lambda_{\text{п2}\zeta_{\text{нас}}} + \lambda_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}})}{(\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}})} \quad x'_{2\zeta_{\text{нас}}} = 0.452 \text{ Ом}$$

2.10.22 Сопротивление взаимной индукции обмоток в пусковом режиме

$$x_{12\text{n}} := x_{12} \cdot \frac{F_\mu}{F_\delta} \quad x_{12\text{n}} = 46.021 \text{ Ом}$$

2.10.23 Ток в обмотке ротора и статора

$$C_{1\text{пнас}} := 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{n}}} \quad C_{1\text{пнас}} = 1.059$$

$$b_n := x_{1\text{нас}} + C_{1\text{пнас}} \cdot x'_{2\zeta_{\text{нас}}} \quad b_n = 3.177$$

$$a_n := r_1 + C_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r'_{2\zeta}}{s} \quad a_n = 0.67$$

$$\Gamma_2 := \frac{U_{1\text{H}}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad \Gamma_2 = 117.043$$

$$I_1 := \Gamma_2 \cdot \frac{\sqrt{a_n^2 + (b_n + x_{12\text{n}})^2}}{C_{1\text{пнас}} \cdot x_{12\text{n}}} \quad I_1 = 118.204 \text{ А}$$

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

$$I_1 = 118.204 \quad I_{1.1} := I_1 \cdot K_{\text{нас}} \cdot I_{1.1} = 134.753$$

Значение отличается менее 15 % - расчет верен

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

$$I'' := \frac{I_1}{I_{1H}} \quad I'' = 3.635 \text{ A}$$

2.10.25 Относительное значение момента

$$I'_2 = 101.819$$

$$S' := 1$$

$$M'' := \left(\frac{I'_2}{I'_{2H}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s}{S'} \quad M'' := 1$$

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

$$M''_n := \left(\frac{I'_2}{I'_{2H}} \right)^2 \cdot K_R \cdot S_H \quad M''_n := \frac{M_n}{M_H}$$

2.10. 26 Действительное критическое скольжение определяется после расчета всех пусковых характеристик (табл. 18) по средним значениям сопротивлений соответствующим скольжениям

$$x_{1\text{нас}} = 2.698$$

$$C_{1\text{пнас}} = 1.059$$

$$x'_{2\zeta\text{нас}} = 0.452$$

$$S_{\text{крд}} := \frac{r'_2}{\frac{x_{1\text{нас}}}{C_{1\text{пнас}}} + x'_{2\zeta\text{нас}}}$$

$$S_{\text{крд}} = 0.105$$

2.11 Тепловой расчет

2.11.1 Превышение температуры внутренней поверхности статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$P_{\text{ст.осн}} = 375.623 \text{ Вт}$$

$$I_{\text{ст1}} = 0.194 \text{ м}$$

$$I_{\text{ср1}} = 0.804 \text{ м}$$

$P_{\text{э1}}$ - электрические потери в обмотках статора

$$P_{\text{э1}} := m \cdot I_{\text{1Н}}^2 \cdot r_1 \quad P_{\text{э1}} = 1659.95 \text{ Вт}$$

$K_p := 1.45$ - для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости Н

$P'_{\text{эп1}}$ - электрические потери в пазовой части обмотки статора

$$P'_{\text{эп1}} := K_p \cdot P_{\text{э1}} \cdot 2 \cdot \frac{I_{\text{ст1}}}{I_{\text{ср1}}} \quad P'_{\text{эп1}} = 1159.907 \text{ Вт}$$

$K := 0.18$ - коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора передается через станину в окружающую среду (табл. 19);

$\alpha_1 := 95$ - коэффициент теплоотдачи с поверхности (рис.23 или рис.26);

$$\Delta\theta_{\text{пов1}} := K \cdot \frac{(P'_{\text{эп1}} + P_{\text{ст.осн}})}{\pi \cdot D \cdot I_{\text{ст1}} \cdot \alpha_1} \quad \Delta\theta_{\text{пов1}} = 16.483 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.11.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки ротора

$d_{\text{из}} = 1.405 \text{ мм}$ - диаметр изолированного провода обмотки статора (табл. 4)

$d := 1.32 \text{ мм}$ - диаметр неизолированного провода обмотки статора

$\lambda'_{\text{эКВ}} := 1.25$ - определяется по рис. 24 для значения

$$\frac{d}{d_{\text{из}}} = 0.94$$

$v_{\text{изп1}} := 0.4 \text{ мм}$ - односторонняя толщина изоляции в пазу (определена выше по табл. 7)

$\lambda_{\text{эКВ}} := 0.16 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$ - для классов нагревостойкости В, F, Н средняя эквивалентная

теплопроводность пазовой изоляции

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

$$\Pi_{\text{п1}} := 2 \cdot h_{\text{п1}} \cdot 10^3 + v_1 + v_2 \quad \Pi_{\text{п1}} = 59.876 \text{ мм}$$

$$\Delta\theta_{\text{изп1}} := \frac{P'_{\text{эп1}}}{Z_1 \cdot I_{\text{ст1}} \cdot \Pi_{\text{п1}}} \left[\frac{v_{\text{изп1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{(v_1 + v_2)}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right] \quad \Delta\theta_{\text{изп1}} = 4.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.11.2 Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей обмотки ротора

$$I_L = 0.208$$

$I_{cp1} = 0.804$ - см. расчет активного сопротивления обмотки статора.

$$P'_{эл1} := K_p \cdot P_{эл} \cdot 2 \cdot \frac{I_L}{I_{cp1}} \quad P'_{эл1} = 1247.03 \text{ Вт}$$

$P'_{эл1}$ - электрические потери в лобовых частях обмотки

$v_{изл1} := 0$ изоляция в лобовых частях обмотки отсутствует.

Тогда

$$P_{л1} := P_{п1}$$

$$\Delta\theta_{изл1} := \frac{P'_{эл1}}{2 \cdot Z_2 \cdot I_L \cdot 10^{-3} \cdot P_{л1}} \cdot \left(\frac{v_{изл1}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{п1}}{12 \cdot \lambda'_{экв}} \right) \quad \Delta\theta_{изл1} = 0.947 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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

$v_{тк} = 0.099$ м - см. расчет активного сопротивления обмотки статора.

$B = 0.01$ м - длина прямолинейной части секции из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части

$K_{выл} := 0.50$ - определяется по табл. 13

- длина вылета лобовых частей обмотки статора

$$I_{выл1} := K_{выл} \cdot v_{тк} + B \quad I_{выл1} = 0.06 \text{ м}$$

$$\Delta\theta_{повл1} := \frac{K \cdot P'_{эл1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot I_{выл1} \cdot \alpha_1} \quad \Delta\theta_{повл1} = 21.774 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.11.4 Среднее превышение температуры воздуха обмотки статора над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta\theta'1 := \frac{(\Delta\theta_{пов1} + \Delta\theta_{изп1}) \cdot 2 \cdot I_L}{I_{cp1}} + \frac{(\Delta\theta_{изл1} + \Delta\theta_{повл1}) \cdot (2 \cdot I_L)}{I_{cp1}} \quad \Delta\theta'1 = 22.446 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.11.6 Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды Для двигателей со степенью защиты IP44

$P_p := 0.42$ - условный периметр поперечного сечения ребер станины (по рис. 25)

$$\alpha_v := 17.5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}} - \text{коэффициент подогрева воздуха (по рис. 23)}$$

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

$$S_{\text{кор}} := (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (I_{\text{ст1}} + 2 \cdot I_{\text{выл1}}) \quad S_{\text{кор}} = 1.436 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{э1}} := 2.104 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{э2}} := 0.483 \text{ кВт}$$

$$\Sigma P := 3.03$$

$$\Sigma P' := \Sigma P + (K_p - 1) \cdot (P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) \quad \Sigma P' = 4.194 \text{ Вт}$$

$\Sigma P'_B$ - сумма потерь, отводимых в воздух внутри машины

$$\Sigma P'_B := \Sigma P' - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эл1}} + P_{\text{ст.осн}}) \quad \Sigma P'_B = -1326.378 \text{ Вт}$$

$$\Delta_{\theta_B} := \frac{\Sigma P'_B - 1}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_B} \quad \Delta_{\theta_B} = -52.819$$

2.11.7 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды

$$\Delta_{\theta 1} := \Delta_{\theta'1} + \Delta_{\theta_B} \quad \Delta_{\theta 1} = -30.373$$

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

$$L := 2.5 \text{ при } 2p = 8 \text{ и } h = 225$$

$$K_L := L \cdot \sqrt{n \cdot \frac{D_a}{100}} \quad K_L = 4.287$$

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

Необходимый расход воздуха:

- для двигателей со степенью защиты IP44

$$Q_B := K_L \cdot \frac{\Sigma P'_B - 1}{1100 \cdot \Delta_{\theta_B}} \quad Q_B = 0.098 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

2.11.9 Фактический расход воздуха, получаемый с помощью вентилятора:

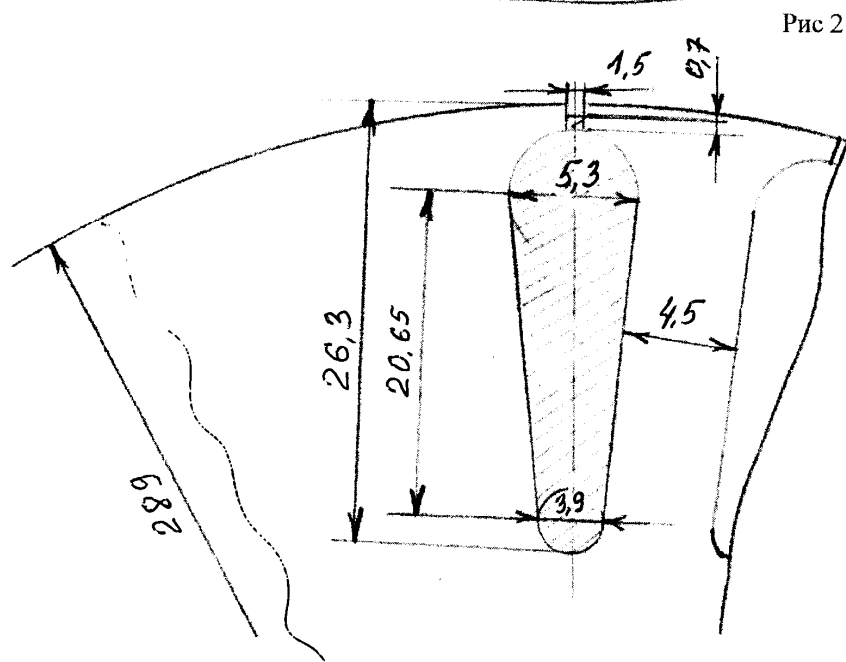
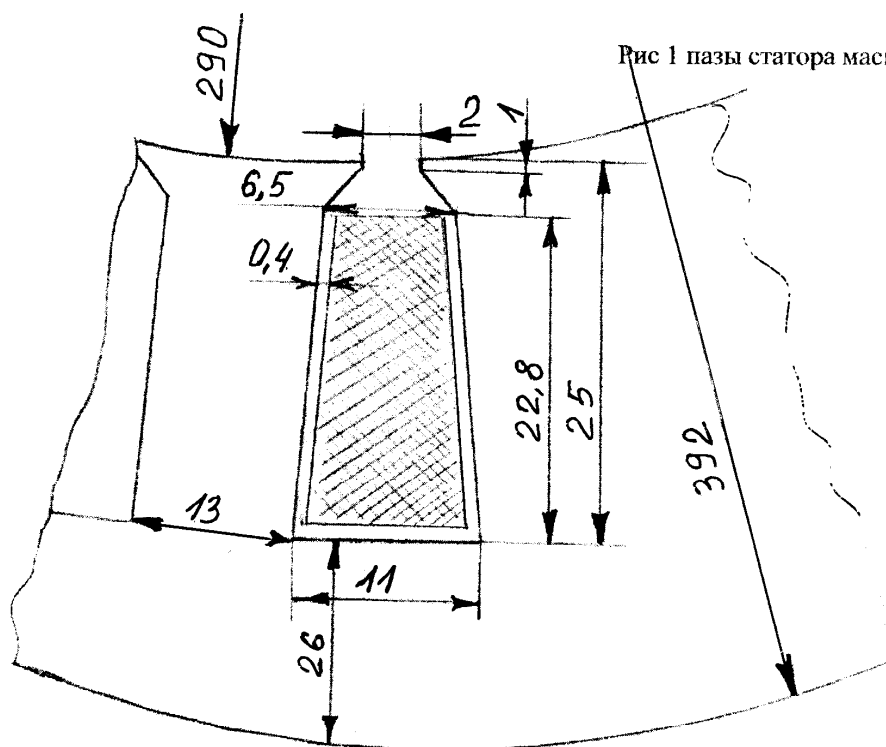
для двигателей со степенью защиты IP44

$$Q'_B := 0.6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} \quad Q'_B = 0.271 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

2.11.10 Сопоставление требуемого и получаемого расхода воздуха.

Получаемый расход воздуха Q'_B должен быть больше требуемого для охлаждения двигателя Q_B

$$0.271 > 0.098 \quad Q'_B > Q_B \quad \text{Данное условие выполняется расчет верен.}$$



Формуляр расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя

$P_{2h} = 28 \text{ кВт}$; $U_{1H} = 380 \text{ В}$; $I_{1H} = 32.5 \text{ А}$; $2p=8$; $P_{\text{ст}}+P_{\text{мех}} = 0.581 \text{ кВт}$; $P_{\text{добн}} = 0.154 \text{ кВт}$; $I_{0a} = 0.482 \text{ А}$;
 $I_{0p} = 10.54 \text{ А}$; $r_1 = 0.523 \text{ Ом}$; $r'_2 = 0.315 \text{ Ом}$; $s_1 = 1.09$; $a = 0.57 \text{ Ом}$; $b' = 0$; $b = 5.188 \text{ Ом}$

Таблица 17

№	Расчетная формула	Единица	Скольжение						
			0.003	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.029
1	$a' \cdot r'_2 / s$	Ом	124.727	37.418	24.945	18.709	14.967	12.473	12.903
2	$b' \cdot r'_2 / s$	Ом	0	0	0	0	0	0	0
3	$R = a + a' r'_2 / s$	Ом	125.297	37.988	25.516	19.279	15.538	13.043	13.473
4	$X = b + b' r'_2 / s$	Ом	5.188	5.188	5.188	5.188	5.188	5.188	5.188
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	125.405	38.341	26.038	19.965	16.381	14.037	14.437
6	$I_2'' = U_{1H} / Z$	А	3.03	9.911	14.594	19.033	23.198	27.072	26.321
7	$\cos \varphi'_2 = R / Z$	-	0.999	0.991	0.98	0.966	0.949	0.929	0.933
8	$\sin \varphi = X / Z$	-	0.041	0.135	0.199	0.26	0.317	0.37	0.359

Продолжение таблицы 17

9	$I_{1A} = I_{0A} + I_2'' \cos \varphi_2'$	А	3.51	10.302	14.784	18.862	22.486	25.638	25.045
10	$I_{1P} = I_{0P} + I_2'' \sin \varphi_2'$	А	13.568	20.36	24.842	28.92	32.544	35.695	35.103
11	$I_1 = \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1P}^2}$	А	14.014	22.818	28.908	34.527	39.557	43.948	43.122
12	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	А	3.303	10.802	15.906	20.744	25.283	29.505	28.686
13	$P_1 = 3U_{1H} \cdot I_{1A} \cdot 10^{-3}$	кВт	4.001	11.745	16.854	21.503	25.635	29.227	28.552
14	$P_{Э1} = 3I_1'^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0.308	0.817	1.312	1.871	2.456	3.032	2.919
15	$P_{Э2} = 3I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0.01	0.11	0.239	0.407	0.604	0.823	0.778
16	$P_{ДОБ} = P_{ДОБ.Н} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2 \cdot 10^{-3}$	кВт	0.029	0.076	0.122	0.173	0.228	0.281	0.271
17	$\sum P = P_{СТ} + P_{МEX} + P_{Э1} + P_{Э2} + P_{ДОБ}$	кВт	0.581	0.582	0.582	0.583	0.584	0.585	0.585
18	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	3.421	11.163	16.272	20.92	25.051	28.642	28.00
19	$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	-	0.855	0.95	0.965	0.973	0.977	0.98	0.98
20	$\cos \varphi = I_{1A} / I_1$	-	0.25	0.451	0.511	0.546	0.568	0.583	0.581

График зависимости $\cos\phi$ А от P_2

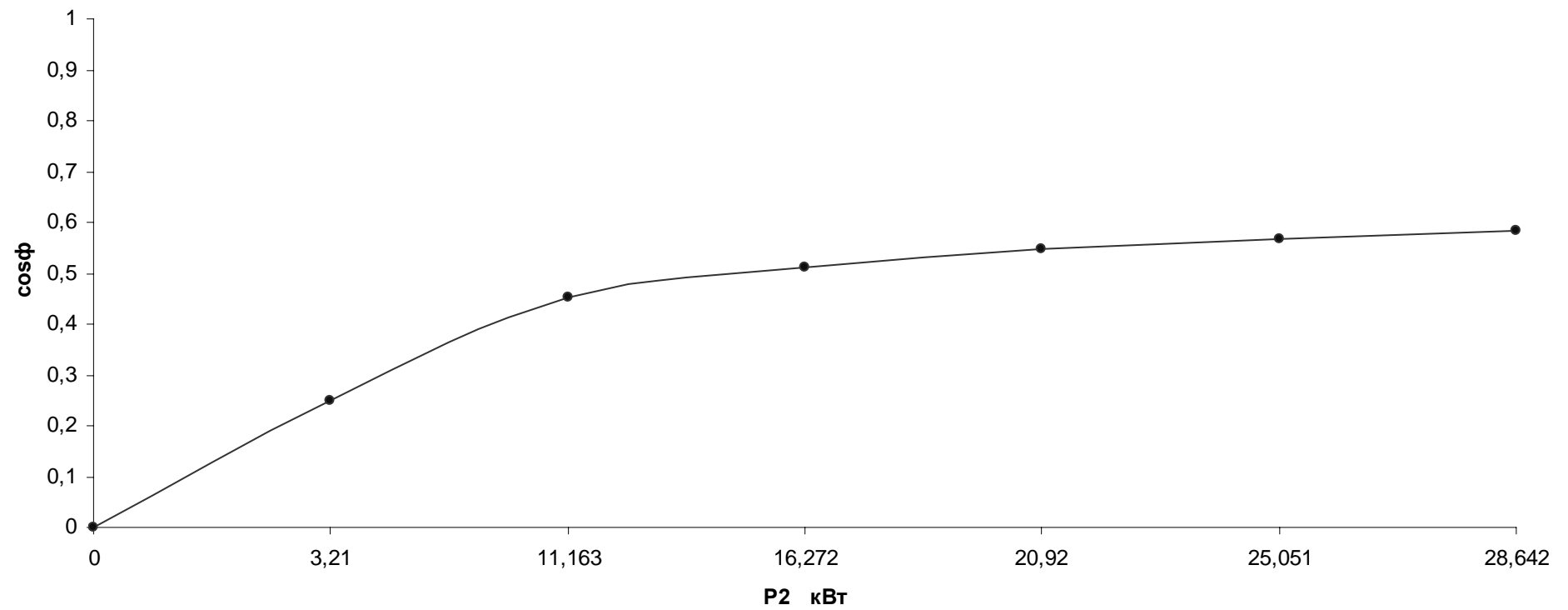


График зависимости S от P2

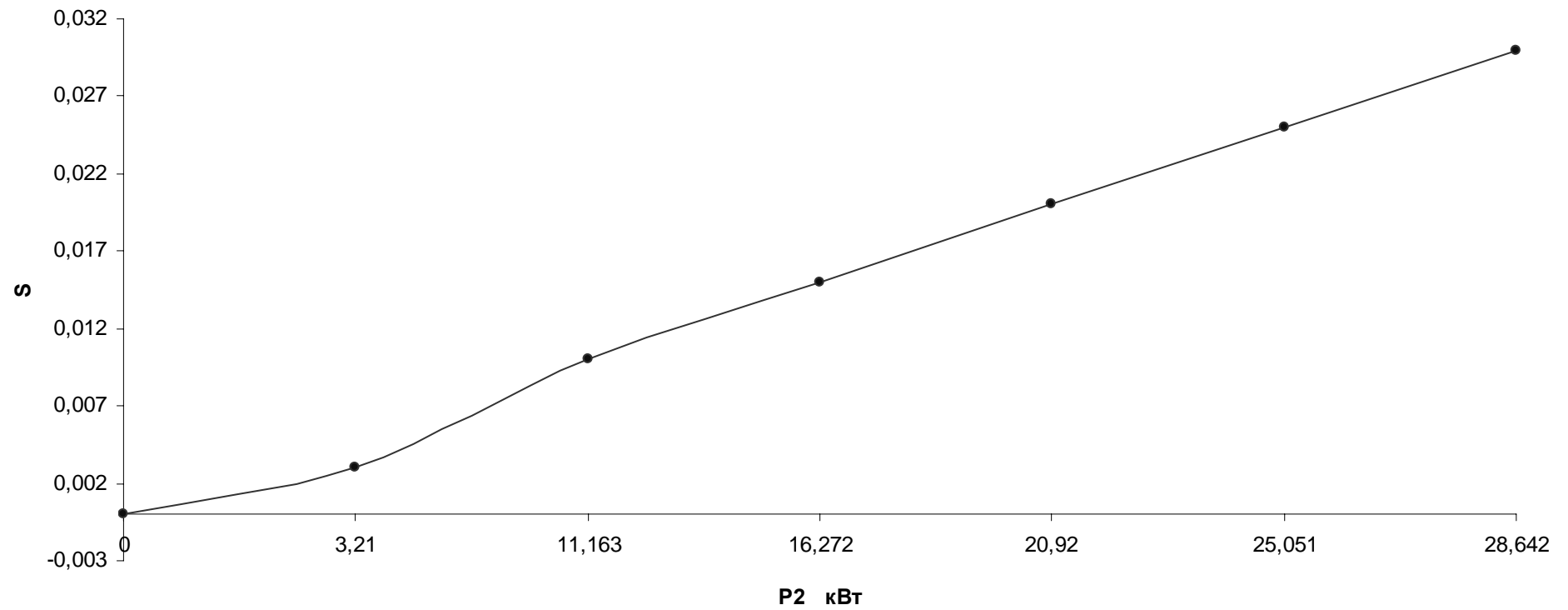


График зависимости P1 от P2

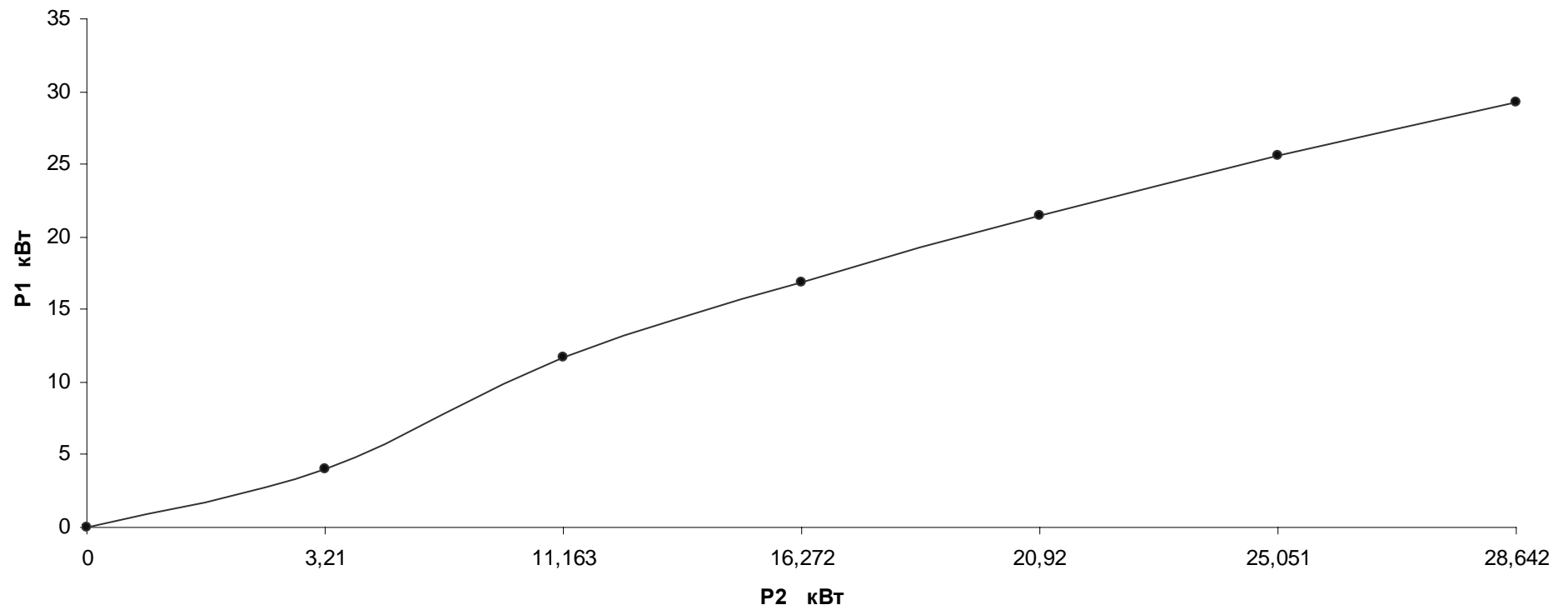
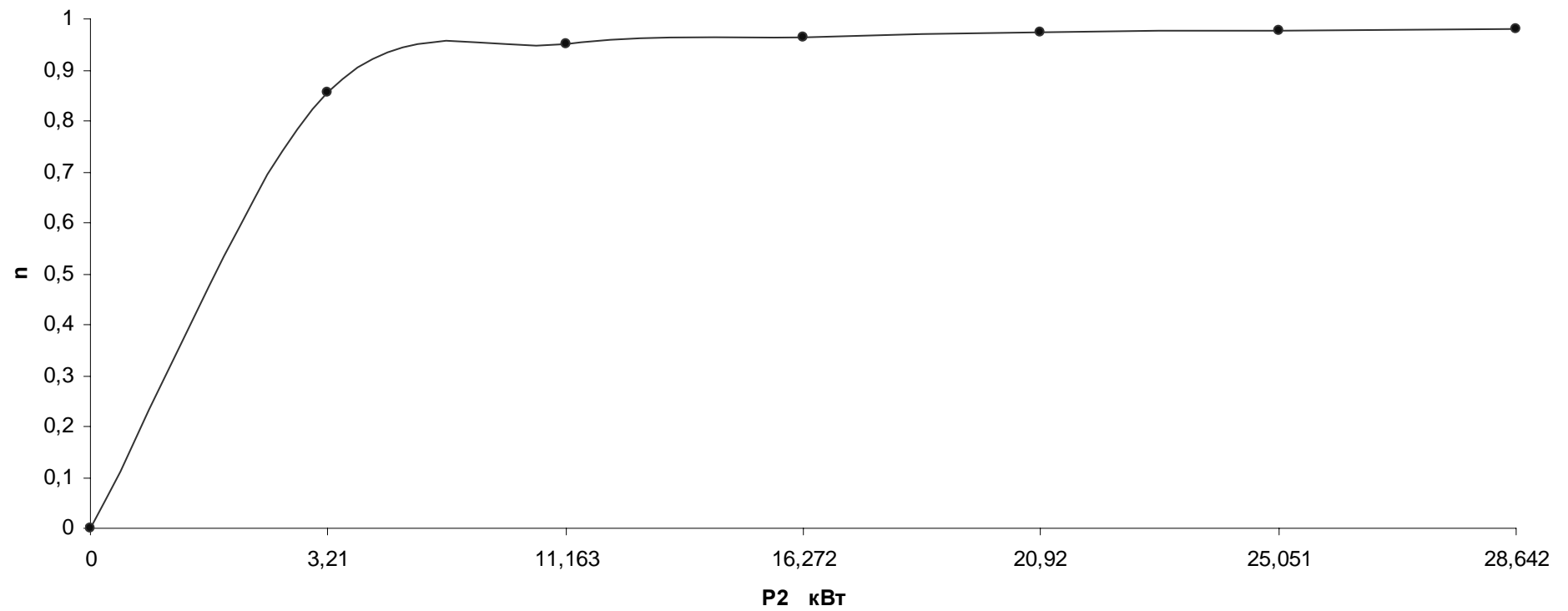


График зависимости η от P_2



Формуляр расчета пусковых характеристик асинхронного двигателя

$P_{2h} = 28 \text{ кВт}; U_{1H} = 380 \text{ В}; x_{12n} = 46.021 \text{ Ом}; x_1 = 1.034 \text{ Ом}; x'_2 = 0.432 \text{ Ом}; r_1 = 0.16 \text{ Ом}; r'_2 = 0.315 \text{ Ом}; I'_{1H} = A; I'_{2H} \approx A; S_H =$

Таблица 18

№	Расчетная формула	Единица	Скольжение				
			1	0.8	0.5	0.2	0.15
1	ξ	-	1.63	1.458	1.152	0.729	0.631
2	φ	-	0.42	0.3	0.35	0.12	0.08
3	$K_r = q_c / q_r$	-	0.282	0.255	0.266	0.214	0.205
4	$K_R = 1 + \frac{r_c}{r'_2} (K_r - 1)$	-	0.44	0.419	0.428	0.387	0.38
5	$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2$	Ом	0.139	0.132	0.135	0.122	0.12
6	$K_g(K_D)$	-	1	1	1	1	1
7	$K_x = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2}$	-	1.047	1.049	1.09	1.06	1.04
8	$x'_{2\xi} = K_x \cdot x'_2$	Ом	0.45	0.45	0.47	0.45	0.45

Продолжение таблицы 18

9	$x'_{2\xi_{нас}} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi_{нас}}}{\sum \lambda_2}$	Ом	0.43	0.43	0.45	0.43	0.44
10	$x_{1нас} = \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} X_1$	Ом	2.69	2.69	2.69	2.69	2.69
11	$c_{1П.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12П}}$	-	1.059	1.059	1.059	1.059	1.059
12	$a_{II} = r_1 + c_{1П.нас} \frac{r'_{2\xi}}{S}$	Ом	0.67	0.698	0.809	1.168	1.368
13	$b_{II} = x_{1нас} + c_{1П.нас} \cdot x'_{2\xi_{нас}}$	Ом	3.158	3.159	3.177	3.165	3.173
14	$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{a_{II}^2 + b_{II}^2}}$	А	117.708	117.473	115.922	112.644	109.985
15	$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{a_{II}^2 + (b_{II} + x_{12П})^2}}{c_{1П} \cdot x_{12П}}$	А	118.831	118.596	117.078	113.755	111.1
16	$I_{1*} = I_1 / I_{1H}$	-	3.654	3.647	3.6	3.498	3.417
17	$M_* = (\frac{I'_2}{I'_{2H}})^2 K_R \frac{S_H}{S'}$	-	0.93	0.98	1.03	1.97	2.31

Список используемой литературы

1. Электрические машины. Методические указания. Под ред. Ю.В. Федотов, СПб. СПГУВК, 72с.
2. Проектирование по электрическим машинам. Под общей редакцией И.П. Копылова и Б.К. Клокова. М. Энергоатомиздат, 1989, -688с.
3. Расчет и конструирование асинхронных машин. Под ред. Белоусова П.С. Учебное пособие: СПГУВК, 1993. 102с.
4. Справочник по электрическим машинам. Под общей редакцией И.П. Копылова и Б.К. Клокова. М. Энергоатомиздат, 1988, -456с.
5. Mathcad 13. Д.В. Кирьянов. СПб БХВ 2006, -688с.

[illegible]