Некоммерческое акционерное общество

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Кафедра электропривода
и автоматизации
промышленных установок

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

(расчет параметров и рабочих характеристик)

Методические указания по выполнению курсовых работ
для студентов специальности 5В071800 - Электроэнергетика

Алматы 2014

СОСТАВИТЕЛИ: Р.М.Шидерова, А.Н.Бестерекова, Э.Б. Даркембаева
Электрические машины. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (Расчет параметров и рабочих характеристик). Методические указания к курсовой работе для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика - Алматы: АУЭС, 2014.– 26 с.

Методические указания содержат варианты задания на курсовую работу, определение главных размеров асинхронного двигателя, расчет обмоток статора и ротора и включают в себя необходимые справочные материалы и таблицы [1].

Методические указания предназначены для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика.

Ил. 7, табл. 7, библ. – 7 назв.

Рецензент: к.х.н., Надиров Е.Г.

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинского университета энергетики и связи» на 2014 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2014 г.

Содержание

	Введение	4
1	Расчет магнитной цепи	5
2	Активные и индуктивные сопротивления обмотки статора и ротора	8
3	Потери в стали, механические и добавочные потери	17
4	Рабочие характеристики асинхронного двигателя	19
5	Приложения	22
	Список литературы	26

Введение

Курсовая работа должна научить студента применять полученные теоретические знания при решении конкретной инженерной задачи - проектировании асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором общепромышленного назначения.

Курсовая работа должна содержать:

а) задание на курсовую работу;

б) расчетную записку, содержащую электромагнитный расчет, эскизы, поясняющие основные решения, таблицы, в которые сводятся основные и расчетные данные. Текст должен содержать расчетные формулы в общем виде. У каждой величины, являющейся результатом вычислений, должна быть указана размерность.

При выполнении курсовой работы следует пользоваться рекомендуемой литературой.

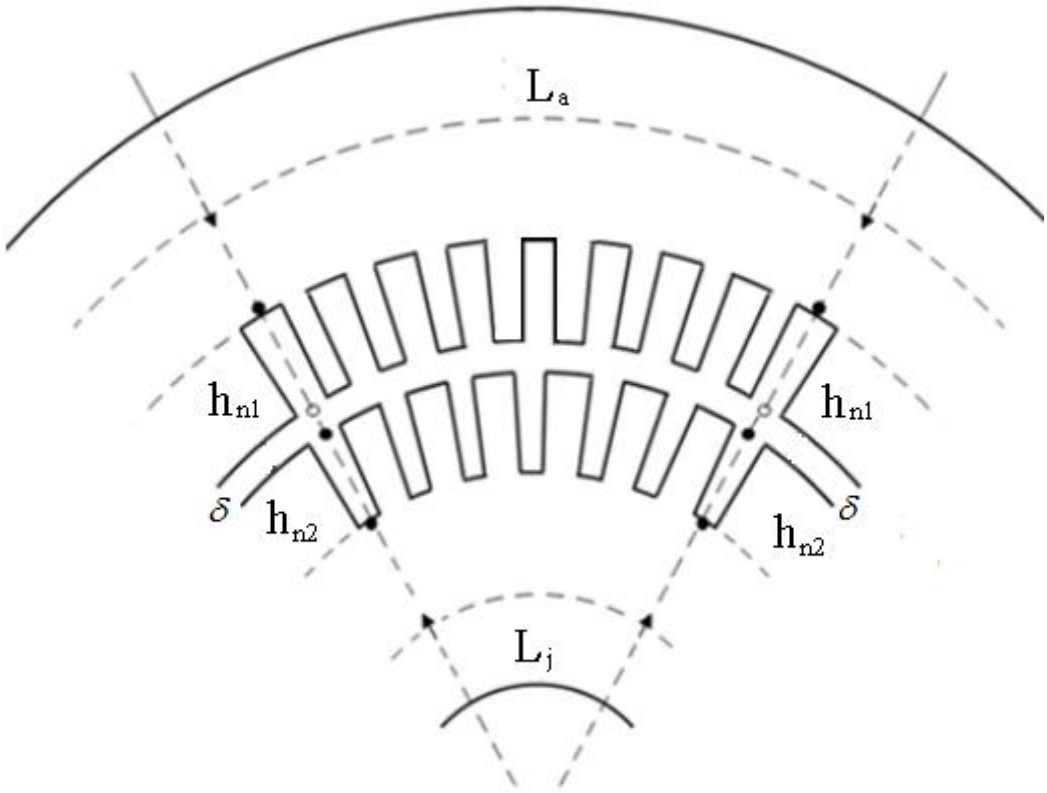
Курсовая работа, выполненная не по заданию, соответствующему цифрам шифра и первой букве фамилии, должна быть выполнена заново. На обложке пояснительной записки обязательно должен быть указан шифр.

Данные методические указания являются продолжением первой части методических указаний, где определены основные геометрические размеры и обмоточные данные асинхронного двигателя, также были приведены варианты для выполнения курсовой работы. Для выполнения дальнейших расчетов необходимо воспользоваться величинами, которые были рассчитаны в первой части.

Расчет характеристик выполняется на ЭВМ с использованием приложения Mathcad.

1 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводится для определения *МДС* и намагничивающего тока статора, необходимого для создания в двигателе требуемого магнитного потока. На рисунке 1.1 представлена расчетная часть магнитной цепи четырехполюсной машины, которая состоит из пяти последовательно соединенных участков: воздушного зазора, зубцовых слоев статора и ротора, спинки статора и спинки ротора. δ



L_a - ярмо статора, $h_{п1}$ – высота зубца статора, $h_{п2}$ – высота зубца ротора, δ- воздушный зазор, L_j - ярмо ротора.

Рисунок 1.1 – Магнитная цепь электрической машины с распределенными обмотками

1.1 *МДС* на магнитную цепь на пару полюсов $F_ц$ определяется как сумма магнитных напряжений всех перечисленных участков магнитной цепи

$$F_ц = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_{a1} + F_{a2}.$$

1.2 Магнитное напряжение воздушного зазора на пару полюсов F_δ , *А*:

$$F_\delta = 1{,}6 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot 10^6.$$

.

где $k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$ – коэффициент воздушного зазора;

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma\delta}, \quad \gamma_1 = \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta}.$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{Z2}}{t_{Z2} - \gamma\delta}, \quad \gamma_2 = \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta}.$$

1.3 Магнитное напряжение зубцового слоя статора F_{z1}, *А*:

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot L_{z1}, \text{ где } L_{z1} = 2 \cdot h_{z1}.$$

Напряженность магнитного поля в зубцах статора H_{Z1} определяется:

а) при трапецеидальных пазах непосредственно по приложению *С* для выбранной марки стали, для индукции [7.л.п.3.14]. (При высоте оси вращения $h \le 250$ мм применяется сталь *2013*, при $h > 250$ - сталь *2312*);

б) при прямоугольных пазах индукция в различных сечениях зубца различна, поэтому расчет напряженности производится по трем сечениям

$$H_{z1} = \frac{(H_{z1max} + 4H_{z1cp} + H_{z1min})}{6},$$

где H_{z1max}, H_{z1min} определяется по приложению *С* для индукции [7.л.3.21];

H_{z1cp} –для индукции $B_{z1cp} = (B_{z1max} + B_{z1min})/2$.

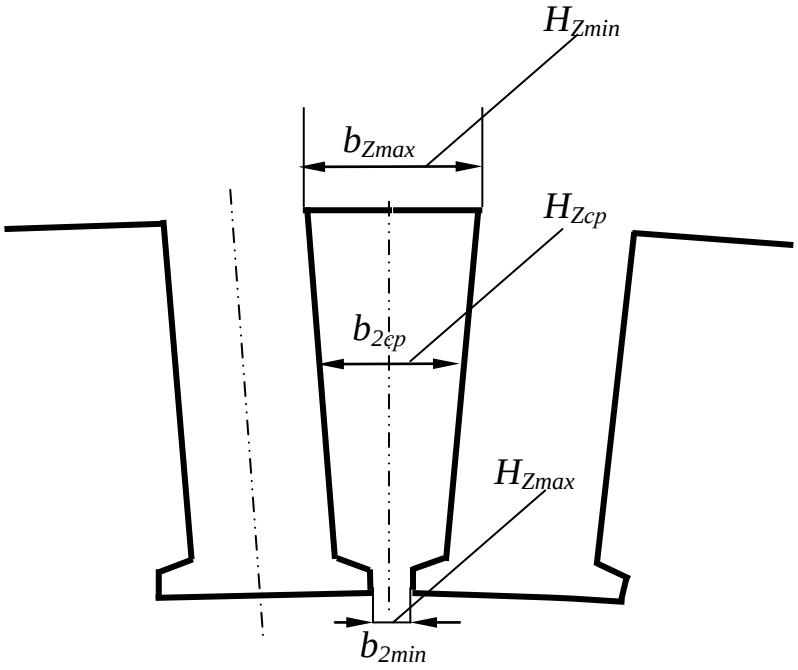


Рисунок 2.1- Трапецеидальные полуоткрытые пазы всыпной обмотки статора

где H_{z1max}, H_{z1min}, H_{z1cp} - напряженности поля в наибольшем, наименьшем и среднем сечениях зубца, определяемые по индукциям в этих сечениях зубцов.

$$B_{z1\max}, B_{z1\min}, B_{z1cp} = 0{,}5\left(B_{z1\max} + B_{z1\min}\right)$$

1.4 Магнитное напряжение зубцового слоя ротора F_{z2}, A:

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot L_{z2},$$

где $L_{z2} = 2 \cdot h_{z2}.$

Напряженность магнитного поля в зубцах ротора H_{z2} определяется:

а) при трапецеидальных пазах по таблицам приложения *С* для индукции [7.л.п.5.1];

б) при прямоугольных пазах – по трем сечениям аналогично по п.1.3.

$$H_{z2} = \frac{\left(H_{z2\,max} + 4H_{z2cp} + H_{z2\,min}\right)}{6}.$$

где $H_{z1\,max}, H_{z2min}$ определяются по таблицам приложения *С* для индукций [7.л.п.5.13];

H_{z1cp} для $B_{z2cp} = \left(B_{z2\,max} + B_{z2\,min}\right)/2.$

1.5 Магнитное напряжение ярма статора

$F_{a1} = H_{a1} \cdot L_{a1}$, где $L_{a1} = \pi\left(D_{a1} - h_{a1}\right)/2p.$

определяется по приложению D для индукции [7.л.п.3.22]

1.6 Магнитное напряжение ярма ротора F_{a2}, A:

$$F_{a2} = H_{a2} \cdot L_{a2},\ \text{где}\ L_{a2} = \pi\left(D_{a2} + h_{a2}\right)/2p,$$
$$h_{a2} = D_2 - D_{a2}/2 - h_{П2}.$$

определяется по приложению D_2 для индукции [7.л.п.5.14]

1.7 Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи определяется по пункте 1.1.

1.8 Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя

$$k_\mu = \frac{F_ц}{F_\delta}, \quad (k_\mu = 1{,}2 \div 1{,}6).$$

1.9 Намагничивающий ток I_μ, A:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{ц}}{0{,}9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot k_{об1}}.$$

а в процентах от номинального тока статора

$$I^{*}_{\mu\%} = \frac{I_{\mu}}{I_{ном}} \cdot 100\%.$$

2 Активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора

А. Сопротивление обмотки статора

2.1 Среднее значение зубцового деления статора $t_{ср1}$, м:

$$t_{ср1} = \pi\left(D_1 + h_{z1}\right)/Z_1.$$

2.2 Средняя ширина катушки (секции) статора $b_{ср1}$, м:

$$b_{ср1} = t_{ср1} \cdot y_{ср1}.$$

где $y_{ср1}$ – среднее значение шага обмотки статора (для двухслойной обмотки $y_{ср1}=y_1$ [7.л.п.2.7]

2.3 Средняя длина лобовой части статора для обмотки с мягкими катушками $l_{л1}$, м:

$$l_{л1} = \left(1{,}16 + 0{,}14p\right) \cdot b_{ср1},$$

для обмотки с жесткими катушками $l_{л1}$, м:

$$l_{л1} = 0{,}06 + h_{z1} + \frac{t_1 \cdot y_1}{\sqrt{1 - C_{л1}^2}}.$$

где $C_{л1} = \left(b_{Пл} - 2 \cdot b_{из} \cdot 10^{-3} + 0{,}003\right)/t_1$;

$2 \cdot b_{из}$ - двухсторонняя толщина изоляции в мм.

2.4 Средняя длина витка обмотки статора $l_{ср1}$, м:

$$l_{ср1} = 2(l_1 + l_{л1}).$$

2.5 Длина вылета лобовой части обмотки статора $l_{в1}$, м:

для обмотки с мягкими катушками

$$l_{в1} = (0{,}12 + 0{,}15p) \cdot b_{ср1} + 0{,}01;$$

для обмотки с жесткими катушками

$$l_{в1} = 0{,}03 + 0{,}5h_{z1} + \frac{y_1 \cdot C_{л1}/2}{\sqrt{1 - c_{л1}^2}}.$$

2.6 Активное сопротивление обмотки статора, приведенное к рабочей температуре 115^0 *C* (для класса изоляции *F*), r_1 , Ом:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{W_1 \cdot l_{ср1}}{a_1 \cdot n_{эл1} \cdot S_{эл1}}.$$

где ρ_{115} =0,0244 Ом·мм^2/м – удельное сопротивление меди при 115^{0}С.
a_1 и $n_{эл1}$ – определяется [7.л.п. 2.13 и 2.14]

2.7 То же в относительных единицах *(о.е.)*

$$r_{1*} = \frac{r_1 \cdot I_{1H}}{U_{1ф}}.$$

где I_{1H} ,$U_{1ф}$ - номинальные значения фазных тока и напряжения.

2.8 Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора состоит из трех частей: пазового рассеяния, дифференциального рассеяния и рассеяния лобовых частей.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора:
при трапецеидальном пазе (см.рисунок 2.1а)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b'_{П1}} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{h_2}{b'_{П1}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b'_{П1} + b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} \right) \cdot k'_{\beta 1}, .$$

при прямоугольном полуоткрытом пазе (см.рисунок 2.1б)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h_2}{3b_{П1}} \cdot k_{\beta 1} + \left(\frac{h_3}{b_{П1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} + \frac{3h_{k1}}{b_{П1} + 2b_{ш1}} \right) \cdot k'_{\beta 1},$$

при прямоугольном открытом пазе (см.рисунок 2.1в)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1 - h_2}{3b_{П1}} \cdot k_{\beta 1} + \frac{h_3 + h_{k1} + h_{ш1}}{b_{П1}} \cdot k'_{\beta 1},$$

где $k_{\beta 1}$ и $k'_{\beta 1}$- коэффициенты, учитывающие укорочение шага обмотки $\beta = y_1 / \tau$, (см.рисунок 8.1г)

2.9 Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния статора $\lambda_{Д1}$.

$$\lambda_{Д1} = \frac{0{,}9 t_1 \cdot (q_1 \cdot k_{об1})^2 \cdot k_{Д1} \cdot k_{ш1}}{\delta \cdot k_\delta}.$$

где $k_{Д1} = f(q_1)$- коэффициент дифференциального рассеяния, определяется по таблице 2.1.

$k_{ш1} = 1 - 0.033 b_{ш1}^2 / t_1 \cdot \delta$, где $k_{ш1}$- коэффициент, учитывающий влияние открытия паза.

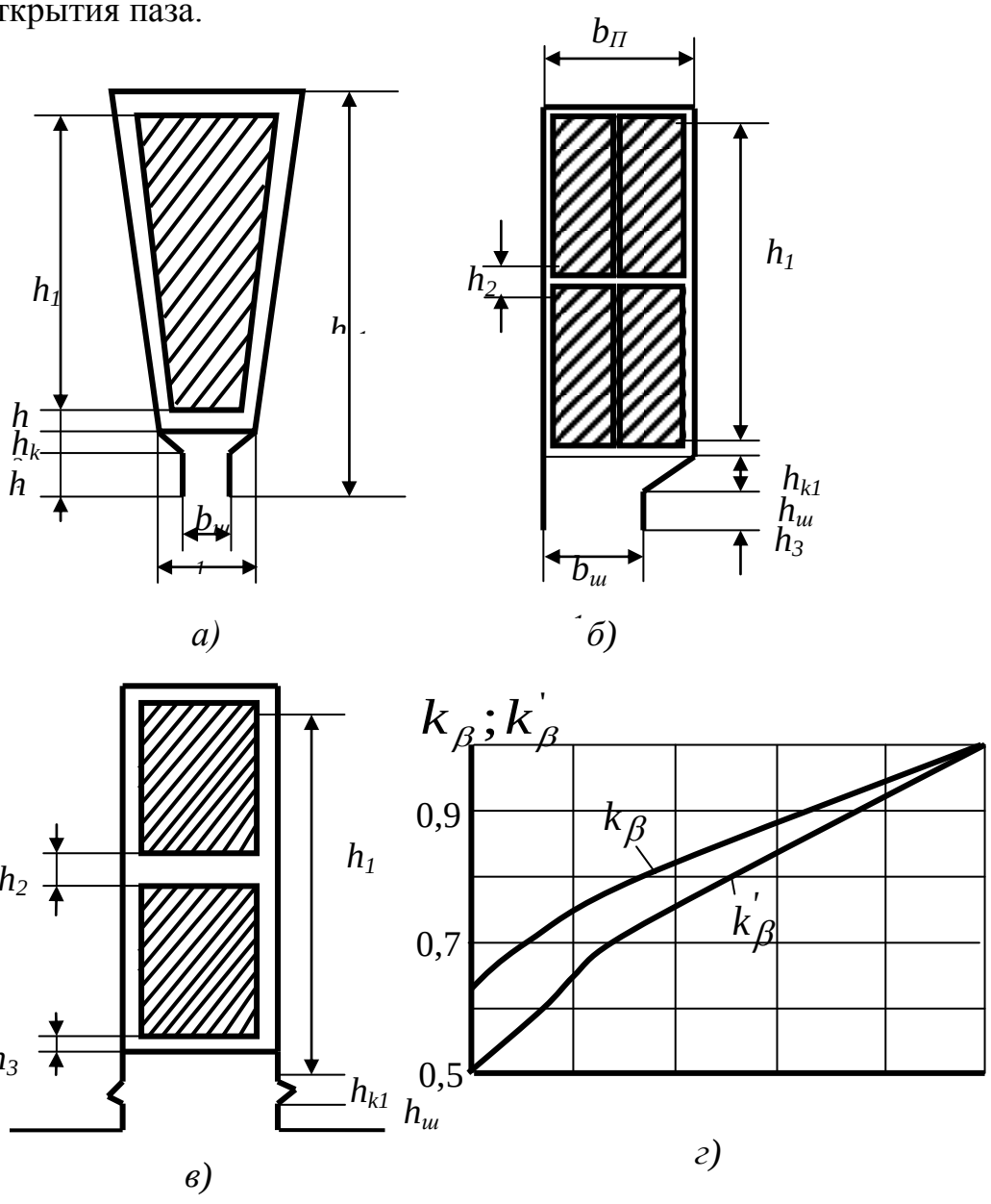


Рисунок 2.2 - К расчету магнитной проводимости пазового рассеяния статора

2.10 Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора $\lambda_{л1}$.

$$\lambda_{л1} = 0{,}34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{л1} - 0{,}64\beta_1 \cdot \tau).$$

2.11 Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{л1}.$$

2.12 Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора x_1 ,Ом:

$$x_1 = 1{,}58 f_1 \cdot l_1 \cdot W_1^2 \cdot \lambda_1 / (p \cdot q_1 \cdot 10^5).$$

Таблица 2.1

q_1	Коэффициент $k_{Д1}$	
	Однослойная обмотка с диаметральным шагом	Двухслойная обмотка с укороченным шагом
1,5	-	0,0470
2,0	0,0285	0,0235
2,5	-	0,0180
3,0	0,0141	0,0111
4,0	0,0089	0,0062
5,0	0,065	0,0043
6,0	0,0052	0,0030
8,0	-	0,0021

2.13 Индуктивное сопротивление в относительных единицах

$$x_{1*} = x_1 \cdot I_{1H} / U_{1ф}.$$

В. Сопротивление обмотки ротора

2.14 Среднее значение зубцового деления ротора $t_{ср2}$, м:

$$t_{ср2} = \pi (D_2 - h_{z2}) / Z_2.$$

2.15 Средняя ширина катушки обмотки ротора $b_{ср2}$, м:

$$b_{ср2} = t_{ср2} \cdot y_{ср2}.$$

где $y_{ср2}$ – средний шаг обмотки ротора;

$y_{ср2} = y_2$ - для петлевой обмотки;

$y_{ср2} = \frac{y_2' + y_2''}{2}$.- для стержневой волновой.

2.16 Средняя длина лобовой части катушки $l_{л2}$, м:

$$l_{л2} = \frac{b_{ср2}}{\sqrt{1 - C_{л2}^2}} + h_{z2} + 0{,}05;\ C_{л2} = \frac{b_{П2} - 2 \cdot b_{и2} \cdot 10^{-3} + 0{,}003}{t_2}.$$

где $2 \cdot b_{и2}$ - двухсторонняя толщина изоляции паза ротора, мм

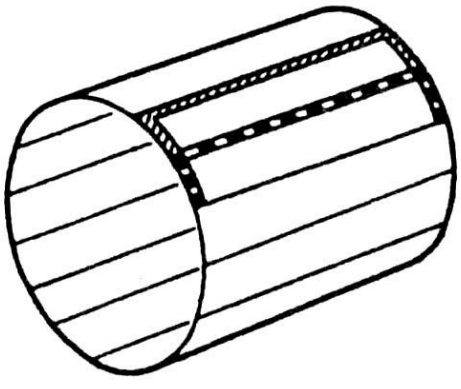
2.17 Средняя длина витка обмотки ротора $l_{ср1}$, м:

$$l_{ср1} = 2 \cdot (l_2 + l_{л2}).$$

2.18 Вылет лобовой части обмотки ротора $l_{в2}$, м:

$$l_{в2} = 0{,}7 \cdot l_{в1}.$$

2.19 Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора определяется следующим образом. Как говорилось выше, за фазу обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, принимают один стержень и два участка замыкающих колец (см.рисунок 2.2).



Риунок 2.3 - Фазы обмотки короткозамкнутого ротора

Токи в стержнях и замыкающих кольцах различны, поэтому их сопротивления при расчете общего сопротивления фазы должны быть приведены к одному току. Таким образом, сопротивление фазы короткозамкнутого ротора r_2 является расчетным параметром, полученным из условия равенства электрических потерь в сопротивлении r_2 от тока I_2 и суммарных потерь в стержне и участках замыкающих колец соответственно от тока в стержне I_c и тока в замыкающем кольце $I_{кл}$ реальной машины:

$$I_2^2 r^2 = I_C^2 r_C + 2 I_{КЛ}^2 r_{КЛ},$$

где, I_c - ток в стержне ротора, А;

$I_{кл}$ — ток в замыкающих кольцах, А;

r_C — сопротивление стержня, Ом;

$r_{кл}$ — сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями, Ом; (см.рисунок. 2.2).

I_c - называют током ротора и в расчетах обозначают I_2.

Учитывая, что

$$I_{кл} = I_c/\Delta = I_2/\Delta,$$

где, $\Delta = 2\sin\frac{\pi p}{Z_2}$, из [7.л.п.6.2], получаем

$$r_2 = r_c + 2\frac{r_{КЛ}}{\Delta^2}, \quad r_c = \rho_{115}\frac{l_C}{q_C}k_r, \; r_{кл} = \rho_{115}\frac{\pi D_{КЛ.СР}}{Z_2 q_{КЛ}},$$

где, l_c — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м;

$D_{кл\cdot ср}$ — средний диаметр замыкающих колец, м (см.рисунок. 6.1);

q_c — сечение стержня, м^2;

k_r — коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока; при расчете рабочих режимов в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального для всех роторов принимают $k_r = 1$;

r_2 - сопротивление для дальнейших расчетов должно быть приведено к числу витков первичной обмотки.

$$r_2' = r_2\frac{4m_1(w_1 k_{об1})^2}{z_2}.$$

2.20 Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора

$$k_{пр} = \frac{m_1 (w_1 k_{ОБ1})^2}{m_2 (w_2 k_{ОБ2})^2}.$$

Сопротивление r_2 для дальнейших расчетов должно быть приведено к числу витков первичной обмотки. Выражение коэффициента приведения для сопротивления фазы короткозамкнутого ротора получают, подставляя значения $m_2 = Z_2$, $w_2 = 1/2$, $k_{об2} = 1$ и учитывая влияние скоса пазов.

2.21 Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору r_2', Ом:

$$r_2' = k_{пр} \cdot r_2.$$

то же в относительных единицах

$$r_{2*}' = r_2' I_{1Н} / U_{1ф}.$$

2.22 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора

при грушевидные пазы $\lambda_{п1}$ (см.рисунок 2.3а)

$$\lambda_{п1} = \left[\frac{h_0}{3 b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8 q_c} \right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_ш}{2 b_1} \right] k_Д + \frac{h_ш}{b_ш},$$

при прямоугольном пазе $\lambda_{п2}$ (рисунок 2.3б)

$$\lambda_{п2} = \left(\frac{h_0}{3 b_П} + \frac{3 h_2}{b_П + 2 b_ш} \right) k_Д + \frac{h_ш}{b_ш},$$

где $k_Д = 1$- при расчете номинального режима двигателя во всех формулах.

при прямоугольном пазе (см.рисунок 2.3в)

$$\lambda_{п3} = \frac{h_0}{3 b_П} k_Д + \frac{h_ш}{b_ш}.$$

2.23 Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния ротора $\lambda_{Д1}$.

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_1}{12 \delta k_\delta} \xi.$$

где, ξ находится следующим образом:

$$\xi = 1 + \frac{1}{5}\left(\frac{\pi\rho}{z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_z}{1-(\rho/z_2)^2}.$$

2.24 Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки ротора рассчитывают в зависимости от размеров и расположения замыкающих колец обмотки (см.рисунок 6.1)

$$\lambda_{л2} = \frac{2{,}3 D_{кл.ср}}{z_2 l'_\delta \Delta^2} \lg \frac{4.7 D_{кл.ср}}{2(h_{кл}+b_{кл})},$$

где, $D_{кл.ср}$ — средний диаметр замыкающих колец, м;

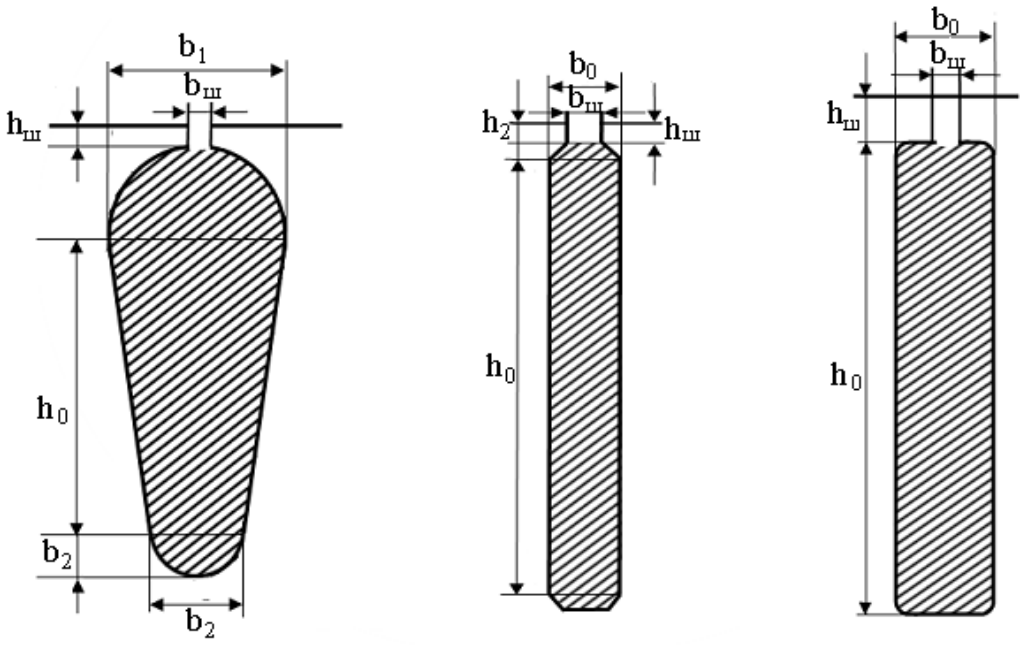
$\Delta = 2 \sin \pi\rho/Z_2$ — коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне;

$h_{кл}$ и $b_{кл}$ — средние высота и ширина колец, м [7.л.рисунок.6.1];

l'_δ - расчетная длина при наличии радиальных вентиляцинных каналов для обмотки ротора, м:

$$l'_\delta = l_2 - 0{,}5 n_к b_k.$$

где $n_к$ - при отсутствии радиальных каналов $n_к = 0$.



а) б) в)

Рисунок 2.4 - К расчету коффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов. Полузакрытые пазы.

При большом числе пазов ротора, приходящихся на пару полюсов: $Z_2/p \geq 10$, без заметной погрешности можно принять $\xi = 1$.

где, Δ_Z - определяют по кривой (см.рисунок 2.4.)

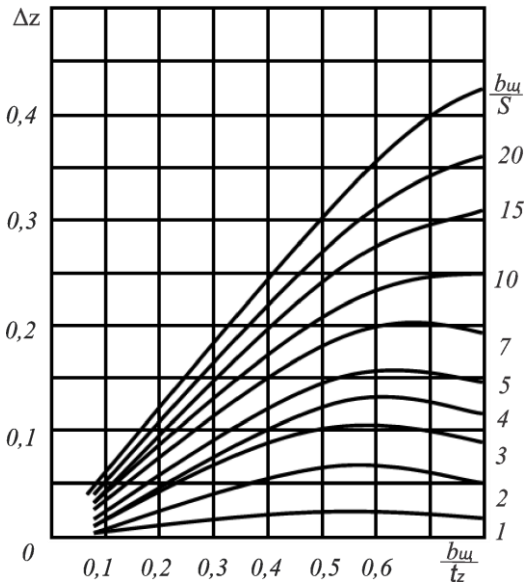


Рисунок 2.5 - коэффициент Δz в зависимости от размерных соотношений $b_ш/t_z$ и $b_ш/S$.

Таблица 2.2 – Коэффициент дифференциального рассеяния

q_2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
$k_{Д2}$	0,018	0,011	0,008	0,006	0,005	0,0043	0,0036	0,003

Коэффициент проводимости скоса, учитывающий влияние на ЭДС обмотки ротора скоса пазов $\lambda_{СК}$:

$$\lambda_{СК} = (t_{Z2}\beta_{СК}^2)/(12k_\delta k_\mu),$$

где, $\beta_{ск}$ — скос пазов, выраженный в зубцовых делениях ротора. При скосе пазов на одно зубцовое деление ротора $\beta_{ск} = 1$;

k_μ — коэффициент насыщения магнитной цепи.

$$k_\mu = F_u / F_\delta$$

2.25 Коэффициент проводимости рассеяния обмоток ротора.

$$\lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{Д2} + \lambda_{л2} + \lambda_{ск}.$$

2.26 Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора, χ_2, (Ом)

$$\chi_2 = 7{,}9\, f_1 l'_\delta 10^{-6}(\lambda_П + \lambda_Л + \lambda_Д + \lambda_{СК}).$$

2.27 Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора, x_2, (Ом)

$$x_2' = k_{пр} \cdot x_2$$

2.28 Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора *(о.е.)*

$$x_{2*}' = x_2' \cdot I_{1H} / U_{1ф}$$

3 Потери в стали, механические и добавочные потери

Потери в стали (магнитные потери) и механические не зависят от нагрузки, поэтому они называются постоянными потерями и могут быть определены до расчета рабочих характеристик.

3.1 Расчетная масса стали зубцов статора при трапецеидальных пазах, G_{z1}, (кг):

$$G_{z1} = 7{,}8 \cdot Z_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{Пl} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot 10^3.$$

то же при прямоугольных пазах, G_{z1}, (кг):

$$G_{z1} = 7{,}8 \cdot Z_1 \cdot b_{z1ср} \cdot h_{Пl} \cdot l_1 \cdot K_c \cdot 10^3.$$

3.2 Магнитные потери в зубцах статора, P_{z1}, (Вт):

а) для стали *2013*

$$P_{z1} = 4{,}4 B_{z1ср}^2 \cdot G_{z1}.$$

б) для стали *2312*

$$P_{z1} = 3{,}0 B_{z1ср}^2 \cdot G_{z1}.$$

где $B_{z1ср}$ - средние идукции в зубцах статора для трапецеидальных пазов, Тл:

$$B_{z1ср} = B_{z1}$$

для прямоугольных пазов, $B_{z1ср}$, Тл:

$$B_{z\,1cp} = \left(B_{z\,max} + B_{z\,min}\right)/2.$$

9.3 Масса стали ярма статора, G_{a1}, кг:

$$G_{a1} = 7{,}8\pi\left(D_{1H} - h_{a1}\right)\cdot h_{a1}\cdot l_1\cdot K_c\cdot 10^3.$$

9.4 Магнитные потери в ярме статора, P_{a1}, (Вт):

а) для стали *2013*

$$P_{a1} = 4{,}4B_{a1}^2\cdot G_{a1}.$$

б) для стали *2312*

$$P_{a1} = 3{,}0B_{a1}^2\cdot G_{a1}.$$

3.5 Суммарные магнитные потери в сердечнике статора, включающие добавочные потери в стали, $P_{ст}$, (Вт):

$$P_{ст} = P_{z1}\cdot\left(1 + 2\sqrt{t_1\cdot 100\left(k_\delta - 1\right)^2}\right) + P_{a1}.$$

3.6 Механические потери при степени защиты *IP23*, при радиальной системе вентиляции без радиальных каналов, при способе охлаждения *1COI*, $P_{мх}$, (Вт):

$$P_{мх} = 6\cdot\left(n_1/1000\right)^2\left(10\cdot D_1\right)^3.$$

с радиальными каналами, $P_{мх}$, (Вт):

$$P_{мх} = \left(n_k + 11\right)\cdot\left(n_1/1000\right)^2\cdot\left(10\cdot D_1\right)^3.$$

при степени защиты *IP44* и способе охлаждения *ICO141*, $P_{мх}$, (Вт):

$$P_{мх} = \left(n_1/1000\right)^2\cdot\left(D_{1H}\cdot 10\right)^4.$$

3.7 Дополнительные потери при номинальной нагрузке (под дополнительными потерями понимаются потери, возникающие от вытеснения тока в проводниках, от потока рассеяния и т.д.) определяются по эмпирической формуле, $P_{доб.н}$, (Вт):

$$P_{доб.н} = 0{,}005P_{2H}\cdot 10^3$$

4 Рабочие характеристики асинхронного двигателя

4.1 Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называются зависимости

$$P_1,\ I_1, cos\varphi_1, \eta, S = f(P_2)$$

Рабочие характеристики могут быть рассчитаны аналитическим методом на основе данных *Г*- образной схемы замещения асинхронного двигателя (см.рисунок 4.1).

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора, x_m, (Ом):

$$x_m \approx \frac{U_{1\phi}}{I_\mu} - x_1.$$

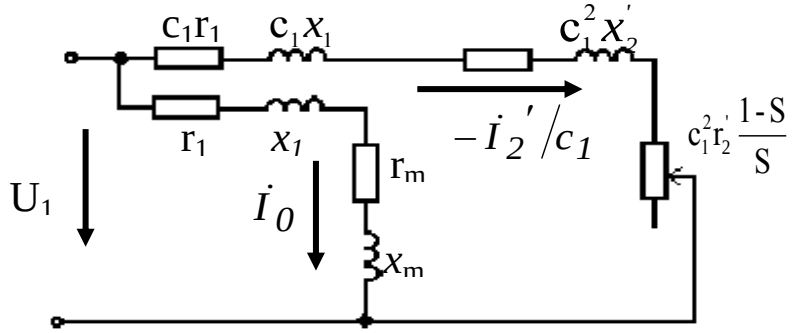


Рисунок 4.1

4.2 Коэффициент приведения параметров *Т*-образной схемы замещения к *Г*- образной:

$$C_1 \approx 1 + x_1 / x_m .$$

4.3 Активная составляющая тока холостого хода при *S=0*, I_{oa}, (А):

$$I_{oa} = \frac{P_{cm} + 3I_\mu^2 \cdot r_1}{3U_{1\phi}}.$$

4.4 Реактивная составляющая тока холостого хода при *S=0*, I_{op}, (А):

$$I_{op} \approx I_\mu.$$

4.5 Дальнейшие формулы для расчета рабочих характеристик сведены в таблицу 10.1.

Расчет производится для ряда скольжений:

$$S_1, S_2, ..., S_7 = k_i \cdot 0{,}2 \cdot r'_{2*},\ \text{где}\ \ k_i = 1,2...,6;$$

при этом номинальное скольжение:

$$S_н = r'_{*2}.$$

Таблица 4.1

Расчетная формула	Единицы	Скольжение S					
$C_1^2 \cdot r_2' / S$	*Ом*						
$R = c_1 r_1 + c_1^2 \cdot r_2' / S$	*Ом*						
$x = c_1\left(x_1 + c_1 x_2'\right)$	*Ом*						
$z = \sqrt{R^2 + x^2}$	*Ом*						
$I_2'' = I_2' / c_1 = U_{1ф} / z$	*А*						
$\cos\psi_2 = R/z$							
$\sin\psi_2 = x/z$							
$I_{1a} = I_{oa} + I_2'' \cos\psi_2$	*А*						
$I_{ap} = I_{ap} + I_2'' \sin\psi_2$	*А*						
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	*А*						
$I_2' = I_2'' \cdot c_1$	*А*						
$P_1 = 3U_{1ф} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	*кВт*						
$P_{э1} = 3I_1^2 \cdot r_1$	*Вт*						
$P_{э2} = 3I_2'^2 \cdot r_2'$	*Вт*						
$P_{доб} = P_{доб.н}\left(\frac{I_1}{I_{1H}}\right)$	*Вт*						
$\sum P = (P_{ст} + P_{мх} + P_{э1} + P_{э2} + P_{доп}) \cdot 10^{-3}$	*кВт*						
$P_2 = P_1 - \sum P$	*кВт*						
$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	-						
$\cos\varphi_1 = I_{1a} / I_1$							
$n = n_1(1 - S)$	*об/мин*						
$M_2 = P_2 \cdot 10^3 / \omega = 9{,}55 P_2 \cdot 10^3 / n$	*Н·м*						

4.6 По результатам расчетов, выполненных согласно таблице 10.1, производиться построение рабочих характеристик асинхронного двигателя (см.рисунок 4.2).

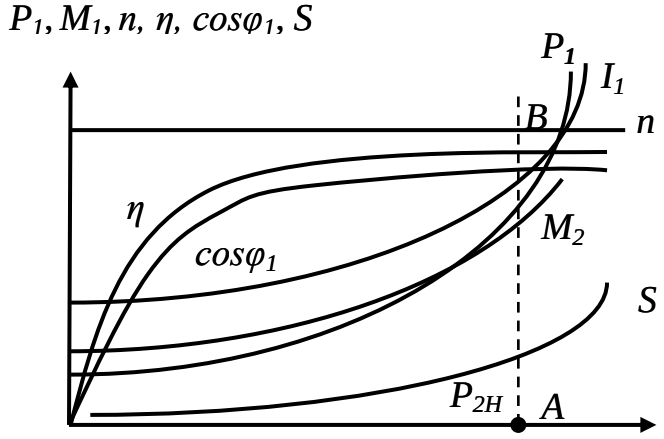


Рисунок 4.2 - Рабочие характеристики асинхронного двигателя

4.7 После построения рабочих характеристик на оси абсцисс откладывается номинальная мощность (точка *A*), через точку А проводится параллельно оси ординат линия *AB*, точками пересечения линии АВ с кривыми рабочих характеристик и определяются номинальные значения потребляемой мощности P_{1H}, тока I_{1H}, вращающего момента M_{2H}, коэффициента мощности $cos\varphi_1$, коэффициента полезного действия, скорости вращения ротора n_H и скольжения S_H.

4.8 Скольжение, соответствующее максимальному моменту:

$$S_m = c_1 r_2' / (x_1 + c_1 x_2').$$

4.9 Перегрузочная способность асинхронного двигателя:

$$k_{пер} = \frac{M_{\max}}{M_{ном}} \approx \frac{(S_H / S_m) + (S_m / S_H) + R_{кр}}{2 + R_{кр}},$$

где

$$R_{кр} = 2 r_1 S_m / c_1 r_2'.$$

Приложение С

Таблица С1- Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей. Сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, $A/м$									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	146	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	476	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	536	547	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	736	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 С2- Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей.Стали 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, $A/м$									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	608	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	986	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1780	1790	1840
1,7	1900	1840	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3060	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2,0	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10200
2,1	10600	11000	11500	12100	12600	13000	13500	14100	14700	15400
2,2	15900	16500	17300	17400	17800	18500	19100	19600	20300	21100
2,3	23100	24300	2550	26800	28100	29500	30900	32400	33900	36400

Приложение D

Таблица D1 – Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей. Сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, $A/м$									
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 D2 - Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей. Стали 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, $A/м$									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	306	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	696	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1120	1190	1240	1290
1,6	1370	144	1520	1590	16610	1720	1820	1910	2010	2110
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4310	4490	4670	4850	5400
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	10400	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Список литературы

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Юрайт, 2011. – 767с.

2. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока.- М.: СПб, 2008. – 580 с.

3. Иванов-Смоленский А.В. Электричсекие машины. Т.1.- М.: «Академия» – 2006. – 610 с.

4. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам.-М.: «Академия», 2005. – 620 с.

5. Иванов-Смоленский А.В. Электричсекие машины. Т.1.- М.: «Академия» – 2006. – 590 с.

6. Гольдберг О.Д. Инженерное проектирование и САПР электрических машин.-М.: «Академия», 2008г – 450 с.

7. Шидерова Р.М., Бестерекова А.Н., Даркембаева Э.Б. Электрические машины. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (Расчет геометрических размеров и обмоток). Методические указания к курсовой работе для студентов специальности 5В071800 – Электроэнергетика - Алматы: АУЭС, 2014.– 35с.