

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование электрической машины основано на знании процесса электромагнитного преобразования энергии и опыте конструирования. По заданным исходным данным (мощности, напряжению, частоте вращения) следует определить линейные размеры статора и ротора, выбрать вид обложки и обмоточного провода, изоляционные материалы, сконструировать детали магнитопровода и всей машины в целом. Проектирование машины подразумевает наименьшую трудоемкость ее изготовления в производственных условиях, минимум расхода активных, изоляционных и конструктивных материалов, высокие энергетические показатели процесса преобразования электрической энергии в механическую. Проектирование проводится с учетом требований государственных и отраслевых стандартов. Оно позволяет уяснить взаимозависимость между исходными данными и параметрами спроектированной машины, определяющими ее размеры, рабочие и пусковые характеристики.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором наиболее распространены во всех отраслях народного хозяйства. Их преимущество заключено: в отсутствии изоляции обмотки ротора от стали сердечника, что упрощает конструкцию ротора; отсутствии скользящего контакта при соединении обмотки фазного ротора с пуско-регулирующим реостатом, что снижает осевые размеры двигателя и повышает его эксплуатационную надежность; низкой стоимости производства таких простых машин. Спроектированный двигатель при соблюдении всех стандартов должен легко сочленяться с производственными механизмами, что предусматривается при выборе высоты оси и диаметра вала, определяет глобальные и установочные размеры машины.

# 1 ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И ЭЛЕКТРОМАГИТНЫХ НАГРУЗОК

## 1.1 Выбор внешнего и внутреннего диаметра статора, электромагнитных нагрузок, длины статора и ротора

Техническое задание определило исходные параметры для проектирования двигателя:  $P_{2ном} =$  [кВт];  $U_{1фном} =$  [В];  $n_1 =$  [мин<sup>-1</sup>];  $m_1 =$   $f_1 =$  [Гц]; схема соединения фаз обмотки статора- звезда; горизонтальный вал; защищенное исполнение с самовентилирующей; продолжительные условия работы; климатические условия эксплуатации- У2; общепромышленное применение двигателя; класс нагревостойкости изоляции – F.

В соответствии с заданной синхронной частотой вращения магнитного поля машины находим нужное число полюсов на статоре:  $p = 60 f_1 / n_1 =$  ;  
 $2p =$  .

Из [1] при заданной мощности  $P_{2ном}$  и  $2p =$  по кривой рис.1 находим рекомендуемую высоту оси вращения  $h =$  [мм]. Учитывая требования стандарта к размерам листов электротехнической стали, из табл.1: выбираем стандартную высоту оси  $h =$  [мм], при этой высоте рекомендован наружный диаметр статора  $D_1 =$  [м].

Внутренний диаметр статора  $d_1$  находим из соотношения  $d_1 = K_g * D_1$  ; при  $2p =$  рекомендован  $K_g = 0.64-0.68$  принимаем  $K_g =$  ; тогда  $d_1 =$  [м].

Находим часть окружности статора, приходящуюся на один полюс:  $t = \pi * d_1 / 2p =$  [мм]. Определяем мощность, потребляемую двигателем из сети при номинальной механической нагрузке на валу:  $P_{2ном} = K_e * P_{2ном} / \eta_{ном}$  где  $K_e = E_{1фном} / U_{1фном}$  находим из кривой рис.2; при  $2p =$  и  $d_1 =$  [м] находим  $K_e =$  ; предварительное значение коэффициента полезного действия  $\eta = 0.85-0.9$ ; принимаем  $\eta_{ном} =$  ; тогда

$P_{1ном} =$  [кВт].

Находим рекомендованную величину линейной токовой нагрузки, приходящейся на единицу длины окружности статора из [1]: при  $d_1 =$  м, и  $2p =$  по кривой, приведенной на рис.3 находим  $A_1 =$  [А/м]. Из кривой, приведенной на рис.4 при  $d_1 =$  и  $2p =$  находим величину магнитной индукции в воздушном зазоре;  $B_6 =$  [Тл] . Главные размеры машины зависят от произведения  $A_1$  и  $B_6$ , а характеристики двигателя зависят от соотношения между  $A_1$  и  $B_6$ .

При выбранном соотношении  $A_1$  и  $B_6$  расчетная длина сердечника статора определится из выражения:  $l_1 = P_1 / d_1^2 * \omega_1 * K * K_{01} * A_1 * B_6$ , где коэффициент формы

кривой магнитного поля  $K = \dots$ ,  $\omega_1 = 2 * \pi * n_1 / 60 = \dots$  [с<sup>-1</sup>]; обмоточный коэффициент  $K_{01} = \dots$ ; тогда  $l_1 = \dots$

[м]. Проверяем соотношения  $l_1$  и  $\tau$ :  $\lambda = l_1 / \tau = \dots$ , это соотношение при  $2p = \dots$  близко к единице. При отсутствии радиальных вентиляционных каналов между пакетами сердечника статора осевая длина стали статора приравнивается полученной длине  $l_1$ . Сердечник ротора тоже будет собран в один пакет, поэтому его осевая длина  $l_1 = l_2$ .

Величину воздушного зазора между статором и ротором находим из выражения:  $\delta = (0.25 + d_1) * 10^{-3} = \dots$ ; округляем до

[мм]. Прогиб вала машины не должен превышать 10% от величины воздушного зазора.

## 1.2 Расчет конструктивных параметров обмотки статора

Для заданной мощности машины принимаем всыпную обмотку статора из круглых изолированных проводников. Чтобы найти число пазов в сердечнике статора, предварительно задаем длину зубцового деления  $t_1$ . Рекомендуемое  $t_1$  для всыпных обмоток находим из кривой, приведенной на рис.5. При известной величине  $\tau = \dots$  [м] находим  $t_1 = \dots$  [м]. Отсюда число пазов в сердечнике статора определим по:  $Z_1 = \pi * d_1 / t_1 = \dots$ . Из возможных вариантов  $Z_1$  выбираем такое число, при котором число пазов, принадлежащих одной фазе и расположенных под одним полюсом, было целым числом:

$q_1 = Z_1 / 2p * m_1 = \dots$  целое число. Тогда  $Z_1 = 2p * m_1 * q_1$ , рекомендуемое  $q_1 = 2-5$ ; чаще всего  $q = 3-4$ , принимаем  $q_1 = \dots$ ;  $Z_1 = \dots$ . Проверяем:  $t_1 = \pi * d_1 / Z_1 = \dots$  [мм]; отношение рекомендуемого  $t_1$  и полученного  $t_1 = \dots$ , разница не превышает  $\dots$  %.

Число эффективных проводников в одном пазу должно быть целым числом:  $u_{n1} = \text{целое число}$ ;  $u_{n1} = \pi * d_1 * A_1 / I_{1\text{фном}} * Z_1$ ;  $I_{1\text{фном}} = P_{1\text{ном}} / m_1 * U_{1\text{фном}} * \cos \varphi_{1\text{ном}} = \dots$  [А]. Предварительное

значение  $\cos \varphi$  находим из кривой рис.6 по [1]: при заданной  $P_{2\text{ном}}$  и  $2p = \dots$  получаем  $\cos \varphi_{1\text{ном}} = \dots$ . Тогда:  $u_{n1} = \dots$ ; округляем до  $u_{n1} = \dots$ .

## 1.3 Уточнение ранее принятых параметров статора

Число витков в фазах обмотки статора:  $m_1 * W_1 = 3W_1 = u_{n1} * Z_1 / 2 = \dots$

; это должно быть целое число. Число витков в одной фазе обмотки

статора:  $W_1 = m_1 * W_1 / m_1 = \text{целое число}$ ;  $W_1 = \dots$ ;

Число витков, включенных в одной фазе последовательно:  $W_a = u_{n1} * Z_1 / 2 * m_1 = \dots$

;  $W_a = W_1 = \text{целое число}$ . Проверяем линейную

токовую нагрузку по длине окружности ротора:  $A_1 = 2 * I_{1\text{фном}} * W_1 * m_1 / \pi * d_1 = \dots$

ранее принятой [ А/м]; сравнение с показывает, что разница не превышает %.

Магнитный поток на пару полюсов:  $\Phi = E_1 / 4,44 * W_1 * K_{01} * f_1$ ;  $K_e = E_{1\phi_{ном}} / U_{1\phi_{ном}} =$   
 $K_{01} =$  ;  $E_{1\phi_{ном}} = U_{1\phi_{ном}} * K_e =$  [В];  $\Phi =$   
 [Вб];  $K_{01} = K_{p1} * K_{y1}$ .

Магнитная индукция в воздушном зазоре:  $B_{\delta} = \Phi / a_{\delta} * \tau * l_1$ ;  $a_{\delta} = 0.64 - 0.7$ ;  
 принимаем  $a_{\delta} =$  ;  $B_{\delta} =$  [Тл],  
 что близко к ранее принятой индукции.

#### 1.4 Форма и размеры паза статора, заполнение паза

Площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки статора находим по фазному току и допустимой плотности тока:  $S_1 = I_{1\phi_{ном}} / j$  [мм<sup>2</sup>]. Из [1] находим рекомендуемое произведение  $A_i * j_i$ ; из кривой, приведенной на рис.7, при известном  $D_1$  и  $2p =$  находим  $A_i * j_i =$  [м<sup>3</sup>]. Тогда  $j_1 = A_i * j_i / A_1$ , где  $A_1 =$  [А/м] найдена ранее;  $j_1 =$  [А/мм<sup>2</sup>];  $S_1 =$  [мм<sup>2</sup>]. Так как при такой площади поперечного сечения диаметр изолированного круглого провода превышает мм, то рекомендуется принимать эффективный проводник, состоящим из двух элементарных. Площадь поперечного сечения элементарного проводника:  $S_{1\phi} = S_1 / 2 =$  [мм<sup>2</sup>]. Из [1] из табл.2 выбираем нужный проводник:  $S_{1\phi} =$  ;  $d =$  ;  $d_u =$  ;  $S_{1\phi} = 2 * S_{1\phi} =$  мм<sup>2</sup>; круглый изолированный медный проводник марки ПЭТ-155. Плотность тока в сечении выбранного проводника:  $j_1 = I_{1\phi_{ном}} / S_1 =$  [А/мм<sup>2</sup>].

Для размещения проводников выбираем трапецеидальную форму паза. Зубец сердечника статора в этом случае имеет параллельные стенки и одинаковую площадь поперечного сечения по своей высоте. Глубина паза на статоре  $h_{п1}$  равна высоте зубца,  $h_{п1} = h_{z1}$ . При расчетном магнитном потоке магнитная индукция по высоте зубца одинаковая. На рис.8 показан принятый паз сердечника статора с размерами.

Высота сердечника статора:  $h_{c1} = (D_1 - d_1) / 2 =$  [мм]. Допустимая магнитная индукция в яре статора:  $B_{я1} = 1.4 - 1.6$  [Тл], принимаем  $B_{я1} =$  [Тл], электротехническая сталь марки 2013. Высота яра при этом находится через известный поток и допустимую индукцию:  $\Phi / 2 = B_{я1} * K_c * l_1 * h_{я1}$ ;  $l_1 * h_{я1} =$  площадь сечения для движения потока в яре статора по его окружности;  $K_c =$  - коэффициент заполнения сердечника сталью; отсюда  $h_{я1} = \Phi / 2 * B_{я1} * K_c * l_1 =$  [м] = [мм].

На высоту паза статора остается размер:  $h_{п1} = h_{c1} - h_{я1} =$  [мм];  $h_{п1} = (D_1 - d_1) / 2 - h_{я1} =$  [мм].

Ширину зубца сердечника статора находим из равенства:  $B_{\delta} * \tau * l_1 = B_{z1} * l_1 * b_{z1} * K_c$ ; допустимая индукция в зубце статора -  $B_{z1} = 1.7 - 1.9$  [Тл], принимаем  $B_{z1} =$  [Тл];  $t_1 =$  [мм]; тогда  $b_{z1} = B_{\delta} * \tau * l_1 / B_{z1} * l_1 * K_c =$

[мм].

Большая ширина паза на статоре:  $b_1 = \pi (d_1 + 2 h_{п1}) / Z_1 - b_{z1} =$

[мм]. Следовательно:  $b_1 =$  [мм];  $h_{п1} =$  [мм];  
 $b_{z1} =$  [мм];  $h_{c1} =$  [мм];  $h_{я1} =$  [мм];  $h_{ш} =$  [мм];  $b_{ш1} =$  [мм];  $h_{ш} + h_k =$   
[мм]-высота шлица вместе с клином;  $h_1 = h_{п1} - (h_{ш} + h_k) =$   
[мм];  $h_k =$  [мм]. Ширину шлица  $b_{ш1}$  выбираем по [1]: в табл.3 при  $h =$  [мм]  
и  $2p =$

рекомендовано  $b_{ш1} =$  мм.

Меньшая ширина паза на статоре:  $b_2 = \pi (d_1 + 2 h_{ш} + 2h_k) / Z_1 - b_{z1} =$

[мм];  $b_2 =$  [мм].

Периметр паза определяет пространство, заполняемое проводниками и пазовой изоляцией:  $\Pi_1 = 2h_1 + b_1 + b_2 =$

[мм]. Площадь поперечного сечения паза, на которой должны разместиться проводники:  $S_{п1} = (b_1^1 + b_2^1) * h_1 / 2$  [мм];  $b_1^1, b_2^1$  - большая и меньшая ширина паза за вычетом толщины пазовой изоляции;  $b_1^1 = b_1 - 2\delta_{и} =$  [мм];

$b_2^1 = b_2 - 2\delta_{и} =$

[мм];  $h_1^1 = h_1 - 2\delta_{и} =$

[мм];  $S_{п1} =$

[мм<sup>2</sup>].

На рис.9 показано заполнение паза сердечника статора проводниками и изоляцией. Коэффициент заполнения паза статора изолированными проводниками должен быть близок по величине к  $K_3 =$  ; заполнения паза медью —  $K_M =$  . Число эффективных проводников в пазу получено расчетом обмотки статора,  $u_{п1} =$  . Элементарных проводников в пазу —  $n_3 =$  . Диаметр проводника: без изоляции —  $d =$  мм; с изоляцией —  $d_{и} =$  мм. Площадь поперечного сечения паза, заполненная изолированными проводниками:  $S_{п1} = d_u^2 * n_3 =$

[мм]. Коэффициент заполнения паза проводниками:  $K_3 = S_{п1}^1 / S_{п1} =$

. Коэффициент заполнения паза медью:  $K_M = S_{M1} / S_{п1}$ ;  $S_{M1} = d^2 * u_{п1} * n_3 =$   
мм<sup>2</sup>;  $K_M =$  .

### 1.5 Расчет конструктивных параметров ротора

Число фаз в обмотке короткозамкнутого ротора считают равным числу пазов сердечника ротора:  $m_2 = Z_2$ ; обмотка в каждой фазе ротора включает в себя 1/2 витка. Число пазов на роторе выбираем по рекомендациям: при  $Z_1 =$  и  $2p =$  в табл.4 рекомендуют  $Z_2 =$  без скоса пазов . Так как обычно рекомендуют  $Z_2 \leq 1.25Z_1$ , то принимаем:  $Z_2 =$  ; принимаем  $Z_2 =$  .

Внешний диаметр сердечника ротора:  $D_2 = d_1 - 2\delta =$

[мм];  $l_2 = l_1 =$  мм. Зубцовое деление сердечника ротора :  $t_2 = \pi D_2 / Z_2 =$

[мм];  $t_2 =$

[мм].

Внутренний диаметр ротора  $d_2$  равен диаметру вала машины:  $d_2 = d_B$ ;  $d_B = K_B * D_1$ .

Из [1] по табл.5 находим при  $h=71-250$  мм и  $2p=2-8$  величина  $K_B=$  ; тогда  $d_B=$

$$[м]= [мм].$$

Высота сердечника ротора:  $h_{c2}=(D_2-d_B)/2=$  [мм]. Высота ярма ротора  $h_{2я}=(D_2-2h_{2п}-d_B)/2$ .

Ток в одном стержне обмотки ротора:  $I_{2НОМ}=K_M * I_{2ФНОМ} * K_i [A]$ ;  $K_M$ —учитывает влияние тока намагничивания на отношение  $I_1/ I_2$ ; выбираем из[1] по кривой, приведенной на рис.10; при  $\cos \varphi_1=$  находим  $K_M=$  ; коэффициент трансформации токов –  $K_i= m_1 * W_1 * K_{01} / m_2 * W_2 * K_{02}$ ;  $K_i=$

Отсюда:  $I_{2НОМ}=$  [А]. Обмоточный коэффициент для обмотки ротора  $K_{02}=$  ,  $m_2=Z_2, W_2=1/2$  . К каждой фазе обмотки ротора относится один стержень и два участка короткозамыкающего кольца (влево и вправо по торцу сердечника ротора). площадь поперечного сечения стержня найдем:  $S_2=I_{НОМ}/j_2 [мм^2]$ ; допускаемая плотность тока для алюминиевых стержней  $j_2=2.5-3.5 [ A/мм^2]$ ; принимаем  $j_2=$  [А/мм<sup>2</sup>];  $S_2=$  [мм<sup>2</sup>].

## 1.6 Форма и размеры паза ротора, заполнение паза

При мощности  $P_{2НОМ}$  до 50 [кВт] принимают грушевидную форму для паза короткозамкнутой обмотки ротора, литую обмотку из алюминия, зубец получается с параллельными стенками. На рис.11 показан выбранный закрытый паз обмотки ротора с размерами. Принимаем: высота шлица -  $h_{ш} =$  мм; высота перемычки над пазом  $h_{ш}^1 =$  мм ;  $h_{ш} + h_{ш}^1 =$  мм.

Высоту паза  $h_{п2}$  выбираем по [1]: при известном  $D_1$  по кривой рис.12 находим  $h_{п2}=h_{z2} =$  мм при  $2p=$  . Ширину зубца  $b_{z2}$  находим по допустимой магнитной индукции:  $b_{z2} * B_{z2} = I_2 * K_c = B_0 * I_1 * t_2$ ;  $b_{z2} = B_0 * I_1 * t_2 / B_{z2} * I_2 * K_c$  допустимую индукцию принимаем-  $B_{z2} =$  [Тл] для стали марки 2013 рекомендуют принимать  $B_{z2} =$  [Тл]; тогда  $b_{z2} =$  [мм]. На больший размер ширины паза ротора согласно рис.12 приходится:  $b = t_2 - b_{z2} =$

[мм] на окружности с диаметром  $D_2$ .

Определяем  $b_1$  для закрытого паза:  $b_1 = [\pi (D_2 - 2h_{ш} + 2h_{ш}^1) - Z_2 * b_{z2}] / (\pi + Z_2) =$

[мм];  $b_1 =$  [мм]- ширина паза в

верхней его части. Ширину паза ротора в нижней его части найдем по:  $b_2 = [\pi (D_2 - 2h_{п2}) - Z_2 * b_{z2}] / (Z_2 - \pi) =$

[мм]; принимаем  $b_1 =$

[мм]. Высота основной части паза:  $h_1 = (b_1 - b_2) * Z_2 / 2\pi =$

[мм]. Принимаем  $h_1 =$  [мм]. Закругления грушевидного паза

в верхней его части и у основания паза: у основания следует принимать диаметр

закругления не менее 2.5-3 мм; тогда  $b_2/2=$  [мм]- радиус  
закругления паза у основания; радиус закругления паза в верхней его части- $b_1/2=$   
[мм]. Эти размеры закруглений принимаем с учетом технологических  
возможностей их выполнения.

### 1.7 Уточнение ранее принятых параметров ротора

Уточняем площадь поперечного сечения паза ротора. При грушевидной  
форме паза площадь поперечного сечения алюминиевого стержня найдем:  
 $S_2=\pi*(b_1^2+b_2^2)/8+(b_1+b_2)*h_1/2=$

[мм<sup>2</sup>]. Следовательно, фактическая плотность тока в стержне: $j_2=I_{2ном}/S_2=$   
[А/мм<sup>2</sup>]; площадь поперечного сечения стержня-  $S_2=$   
[мм<sup>2</sup>].

Уточняем ширину зубцов во всех сечениях по высоте зубца  $h_{z2}=h_{п2}/b_{z2}=\pi (D_2-$   
 $2h_{ш}+2h_{ш}^1)/Z_2-b_1=$

[мм<sup>2</sup>]; ранее получен размер  $b_{z2}=$  [мм] по допустимой  $B_z$   
; на уровне размера  $b_1$  ширина зубца соответствует выбранной ранее. На уровне  
размера  $b_2$ , у основания паза:  $b_{z2}=\pi (D_2-2h_{ш}-2h_{ш}^1-2h_1-b_1)/Z_2-b_2=$

[мм<sup>2</sup>]; ширина зубца у основания паза  
соответствует выбранной ранее. По всей высоте зубца его ширина одинаковая, а  
индукция во всех сечениях зубца не превышает допустимой величины  $B_z=$  [Тл].

Проверяем высоту паза в сердечнике ротора:

$h_{п2}=$   $h_{ш}+h_{ш}^1+b_1/2+h_1+b_2/2=$   
[мм]; соответствует ранее выбранной высоте паза,  $h_{п2}=h_{z2}=$  [мм].

### 1.8 Расчет размеров короткозамыкающего кольца

Короткозамыкающее кольцо обмотки ротора совмещаем с крыльями  
вентилятора. По техническому заданию – машина должна быть выполнена с  
самовентиляцией. Следует рассчитать площадь поперечного сечения этого кольца,  
его размеры. На рис.13 показано короткозамыкающее кольцо литой обмотки ротора  
с его размерами. Площадь поперечного сечения кольца найдем: $S_k=I_k/j_k$  [мм<sup>2</sup>], где  $I_k$   
–ток в кольце;  $I_k=I_2/2\sin(\pi/Z_2)$ ;  $\sin(\pi/Z_2)=$  ;  $I_k=$

[А]; принимаем  $j_k=$  [А/мм<sup>2</sup>];  
тогда  $S_k=$  [мм<sup>2</sup>]. Для упрощения принимаем форму

сечения короткозамыкающего кольца прямоугольной при той же площади этого  
сечения. Тогда:  $S_k=a_k*b_k$  ; для литой обмотки выбираем  $b_k>1.2h_{п2}$ ;  $b_k=$   
[мм], теперь  $a_k=S_k/b_k=$  [мм]; после выбора размеров  $S_k=a_k*b_k=$

[мм<sup>2</sup>].

Число вентиляционных лопаток для литой обмотки ротора принимают в 2-3  
раза меньше, чем число пазов ротора  $Z_2: n_1 = Z_2 / (2-3) =$  ;  
принимая  $n_1 =$  .



## 2 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ МАШИНЫ

### 2.1 Эскиз магнитной цепи, линейные размеры участков

В основе расчета лежит закон полного тока для замкнутой магнитной цепи. Для его поведения достаточно выделить из конструкции один сектор, включающий  $1/2p$  часть поперечного сечения машины. Расчет ведем на один полюс противоположной полярности, размещенный на роторе (на пару полюсов противоположной полярности). На рис.14 приведен эскиз магнитной цепи машины. Пунктиром показана средняя линия движения магнитного потока пары полюсов. Магнитная цепь разделена на несколько последовательно соединенных участков. Каждый из них имеет свои конкретные линейные размеры: поперечное сечение для движения магнитного потока, среднюю длину пути потока на этом участке. Принимаем, что по длине участка магнитная напряженность материала и индукция в нем не изменяют своей величины. Эти параметры меняются при переходе к соседнему участку, имеющему иной материал и линейные размеры, что при одном и том же магнитном потоке приводит к изменению индукции и напряженности магнитного поля. В соответствии с эскизом магнитной цепи это следующие участки: воздушный зазор между полюсом статора и ротора; зубцовая зона сердечника ротора; ярмо сердечника статора; ярмо сердечника ротора.

Для расчета магнитной цепи машины следует знать: линейные размеры участков (длину вдоль силовой линии, ширину по нормали к ней), площадь поперечного сечения (нормального к направлению силовой линии), магнитный поток полюса машины, магнитную индукцию в сечении каждого участка, напряженность магнитного поля по длине каждого участка. Падение магнитного напряжения всей цепи найдем как сумму падений магнитного напряжения на перечисленных участках.

### 2.2 Расчет магнитных напряжений на участках магнитной цепи

Магнитное напряжение в воздушном зазоре найдем из выражения:  $F_{\delta} = H_{\delta} * 2\delta = [A]$ ; два участка воздушного зазора на пути движения потока;  $\delta = 0.45$  мм; расчетная длина воздушного зазора -  $b_p = K_{\delta} * \delta$ ; коэффициент увеличения зазора -  $K_{\delta} = t_1 / (t_1 - j_1 * \delta)$ ;  $\gamma_1 = (b_{ш} / \delta)^2 / (5 + b_{ш} / \delta)$ ; ширина шлица статора -  $b_{ш1} =$  [мм];

$\gamma_1 =$

;

$K_{\delta} =$

;  $H_{\delta} = B_{\delta} / \mu_0$ ;  $\mu_0 =$

;  $F_{\delta} = B_{\delta} * 2\delta_p / \mu_0 =$

Магнитную индукцию в зубце статора найдем:  $B_{z1} * b_{z1} * l_1 * K_c = B_{\delta} * t_1 * l_1$ ;  
 $B_{z1} = B_{\delta} * t_1 * l_1 / b_{z1} * l_1 * K_c =$

[Тл];  $\Phi =$  [Вб].

Аналогично найдем магнитную индукцию в зубце ротора:

$B_{z2} = B_{\delta} * t_2 * l_2 / b_{z2} * l_2 * K_c =$  [Тл];  
 $B_{z2} =$  [Тл]. Индукция в зубцах статора и ротора не превышает допустимых значений.

Найдем магнитную индукцию в ярме статора: магнитный поток по ярму идет в двух разных направлениях (по окружности станицы влево и вправо);

$B_{я1} = \Phi / 2h_{я1} * l_1 * K_c =$   
 [Тл]. Индукцию в ярме ротора найдем аналогично:  $B_{я2} = \Phi / 2h_{я2} * l_2 * K_c =$   
 =

[Тл];

$h_{я2} = (D_2 - 2h_{п2} - d_b) / 2 =$

[мм].

Индукция в ярме статора и ротора находится в допустимых пределах.

Определяем магнитное напряжение зубцовой зоны сердечника статора:

$F_{z1} = H_{z1} * 2h_{z1} [A]$ ;  $h_{z1} = h_{п1}$  [мм]; в [1] по табл.6 из данных кривой намагничивания рулонной холоднокатаной изотропной стали марки 2013 находим при  $B_{z1} =$  [Тл]

напряженность магнитного поля  $H_{z1} =$  [А/м]. Тогда:  $F_{z1} =$   
 [А].

Вычисляем магнитное напряжение зубцовой зоны сердечника ротора:

$F_{z2} = H_{z2} * 2h_{z2} [A]$ ;  $h_{z2} = h_{п2} =$  [мм]; в [1] рулонной холоднокатаной изотропной стали марки 2013 при  $B_{z1} =$  [Тл] по данным табл.6 находим  $H_{z2} =$

[А]. Тогда:  $F_{z2} =$   
 [А].

Коэффициент насыщения стали зубцовой зоны статора и ротора:

$K_z = 1 + (F_{z1} + F_{z2}) / F_{\delta} =$  ; полученная величина  $K_z =$   
 близка к рекомендуемой – 1,2.

Подсчитываем магнитное напряжение в ярме статора:  $F_{я1} = H_{я1} * l_{я1} [A]$ , где  $l_{я1} =$   
 средняя длина магнитной силовой линии в ярме:  $l_{я1}^1 = \pi (D_1 - h_{я1}) / 2p =$

[мм];  $l_{я1} = l_{я1}^1 + 2 h_{я1} / 2 =$  [мм]

в [1] из табл.7 по данным кривой намагничивания стали марки 2013 при  $B_{я1} =$   
 [Тл] для ярма статора находим  $H_{я1} =$  [А/м]. Тогда:  $F_{я1} =$

[А].

Проводим расчет магнитного напряжения в ярме ротора:  $F_{я2} = H_{я2} * l_{я2} [A]$ , где  $l_{я2} =$   
 средняя длина магнитной силовой линии в ярме ротора;  $l_{я2} = \pi (d_b + h_{я2}) / 2p +$

$2(h_{я2}) / 2$ ;  $h_{я2} =$  [мм];  $B_{я1} =$  [Тл];  $d_b = d_2 =$  [мм];  $l_{я2} =$

[мм]. По данным [1] для кривой намагничивания стали марки

2013 при  $B_{я2} =$  [Тл] находим напряженность магнитного поля в ярме ротора  $H_{я2} =$   
 [А/м]. Тогда  $F_{я2} =$  [А].

Падения магнитного напряжения на отдельных участках замкнутой цепи  
 составили:  $F_{z1} =$  [А],  $F_{z2} =$  [А],  $F_{я1} =$  [А],  $F_{я2} =$  [А],  $F_{\delta} =$  [А].

Коэффициенты насыщения стали зубцов статора и ротора не превышают допустимой величины.

### 2.3 Определение намагничивающего тока

Расчет магнитной цепи машины проводим для режима холостого хода. Расчет провели с целью определения суммарного падения магнитного напряжения в замкнутом контуре магнитной цепи:  $F_{\Sigma} =$  [A].

Эти падения магнитного напряжения соответствуют расчетному потоку полюса:  $\Phi =$  [Вб]. Провести магнитный поток по участкам позволяет магнитодвижущая сила обмотки статора, которая определяется произведением тока намагничивания  $I_M$  и числа витков обмотки  $w_1$ . Наибольшее падение магнитного напряжения приходится на воздушный зазор:  $F_{\delta} / F_{\Sigma} =$  ; практически это соотношение у проектируемых машин составляет от 60 до 90%; соотношение для проектируемого двигателя соответствует принятому для машин.

Необходимый намагничивающий ток обмотки статора находим из выражения  $I_M = p \cdot F_{\Sigma} / (0.9 m_1 x \cdot w_1 \cdot K_{01}) =$

[A]. Относительное значение намагничивающего тока:

$I_M / I_{\Phi \text{ ном}} =$  . Рекомендуемое соотношение для этих токов от 0.2 до 0.35; размеры и обмотки рассчитаны верно, допустимые соотношения соблюдены. Ток холостого хода обмотки статора:  $I_{01} = I_0 = I_M =$  [A].

### 3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ФАЗЫ МАШИНЫ

#### 3.1 Расчет активного сопротивления фазы обмотки статора

Схема замещения фазы асинхронной машины и уравнения, описывающие соотношения между токами и напряжениями в ней, отражают физические процессы, происходящие в фазе машины. Зная параметры схемы замещения, можно рассчитывать любые режимы работы двигателя. Двигатель с вращающимся ротором сведен к неподвижной схеме, где вращение учтено в приведенном активном сопротивлении фазы ротора. На рис.15 приведена схема замещения фазы.

Параметры схемы замещения остаются неизменными при различных режимах работы машины: в пределах изменения скольжения от холостого хода до  $S_{ном}$

их изменением можно пренебречь. При расчете пусковых характеристик происходит изменение параметров, из-за насыщения стали магнитопровода.

Активное сопротивление фазы обмотки статора найдем из выражения:  $R_1 = \rho \cdot L_1 / S_1$  [Ом], где удельное сопротивление материала провода обмотки –  $\rho$  [Ом\*м] для меди при расчетной температуре в  $^{\circ}C$ ; общая длина эффективных проводников в фазе обмотки статора -  $L_1 = l_{1cp} \cdot w_1$  [м];  $l_{1cp}$  - средняя длина одного витка;  $l_{1cp} = 2(l_1 + l_l)$ ;  $l_l$  – длина лобовой части секции;  $l_l = K_l \cdot v_{kcp} + 2 \cdot B$ ;  $K_l = 1.3$  при  $2p =$  ; средняя ширина фазной катушки по серединам высоты пазов -  $v_{kcp} = \pi (d_1 + h_{1п}) \cdot B_1 / 2p$ ; укорочение шага -  $\beta_1 = 0.8 - 0.86$ ;  $y_1 = \beta_1 \cdot \pi d_1 / 2p$  – целое число;  $y_1 =$  = [мм]. Для насыпной обмотки статора принимаем длину вылета  $B =$  [мм]; тогда  $l_l =$  = [мм];  $l_{1cp} =$  [мм];  $L_1 =$  [м]. Отсюда  $R_1 =$  [Ом].

#### 3.2 Расчет активного сопротивления фазы короткозамкнутого ротора

К фазе обмотки ротора относится один стержень с сопротивлением  $R_c$  и две прилегающих к нему части короткозамыкающего кольца с сопротивлением  $R_k$ . Активное сопротивление фазы обмотки короткозамкнутого ротора найдем:  $R_2 = R_c + 2R_k / [2 \sin(\pi \cdot p / z_2)]^2$  [Ом]; сопротивление стержня –  $R_c = \rho_c \cdot l_2 / S_c$  [Ом]; для литой обмотки ротора из алюминия -  $\rho_c =$  [Ом\*м] при температуре в  $115^{\circ}C$ ;  $S_c = S_2 =$  [мм<sup>2</sup>]; сечение короткозамыкающего кольца –  $S_k =$  [мм<sup>2</sup>]. Сопротивление кольца  $R_k = \pi D_{kcp} \cdot \rho_c / z_2 \cdot S_k =$  [Ом];  $D_{kcp} = D_2 - h_{п2} =$  [мм];  $2R_k / [2 \sin(\pi \cdot p / z_2)]^2 =$  [Ом]. Сопротивление стержня  $R_c =$  [Ом]. Отсюда:  $R_2 =$  [Ом].

Приведенное активное сопротивление ротора:  $R_2^1 = R_2 * 4m_1(w_1 * K_{01})^2 / Z_2$  [Ом];  
 $R_2^1 = R_2 * K; K = m_1(w_1 * K_{01})^2 / m_2(w_2 * K_{02})^2 = m_1(w_1 * K_{01})^2 / Z_2 (1/2 * 1)^2 = 4 * m_1(w_1 * K_{01})^2 / Z_2 =$   
 $=$  [Ом];  $R_2^1 =$  [Ом].

### 3.3 Расчет индуктивного сопротивления фазы обмотки статора

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора найдем из выражения:  $X_1 = 15.8 * f / 100 * (w_1 / 100)^2 * l_1 / p * q_1 * (a_{п1} + a_{л1} + X_{g1})$  [Ом], где  $q_1$  - число пазов фазы под одним полюсом;  $a$  - коэффициент магнитной проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния ( $\lambda_{п1}, \lambda_{л1}, \lambda_{q1}$ ). Для пазовой магнитной проводимости по [1] в соответствии с рис.10 находим:  $\lambda_{п1} = h_1 / 3b_2 * K_B + (h_k / 6 b_2 + 3 h_k / b_2 + 2b_{ш} + h_{ш} / b_{ш}) * K_B^1$ ;  $h_1 =$  [мм];  $b_2 =$  [мм];  $h_k =$  [мм];  $b_{ш} =$  [мм];  $h_{ш} =$  [мм];  $K_B^1 = 0.25(6 * \beta - 1)$ ;  $\beta$  - укорочение шага обмотки; принимаем  $\beta =$  ;  $K_B^1 =$  ;  
 $K_B = 0.25 * (1 + 3 K_B^1) =$   
;  $\lambda_{п1} =$

Для лобовой магнитной проводимости:  $\lambda_{л1} = (0.34 * q_1 / l_1) * (l_l - 0.64 * \beta * \tau)$ ;  $l_l =$  [мм];  $\tau =$  [мм];  $\lambda_{л1} =$

Для дифференциальной проводимости:  $\lambda_{q1} = t_1 * \varepsilon / 126 * K_6$ ;  $\varepsilon =$  ;  $t_1 =$  [мм];  $b =$  [мм];  $K_6 =$  ;  $\lambda_{q1} =$

. Отсюда:  $X_1 =$  [Ом].

### 3.4 Расчет индуктивного сопротивления обмотки ротора

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора найдем из выражения:  $X_2 = 7.9 * f_1 * l_2 * 10^{-6} * (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{q2})$  [Ом], где  $\lambda_{п2}, \lambda_{л2}, \lambda_{q2}$  - коэффициент магнитной проводимости для потока пазового, лобового и дифференциального рассеяния;  $l_2 =$  [м]. По [1] в соответствии с рис.12 для пазовой проводимости находим:  $\lambda_{п2} = h_1 / 3b_1 * (1 - \pi b_1^2 / 8 Sc)^2 + 0.96$ ;  $h_1 =$  [мм];  $b_2 =$  [мм];  $Sc =$  [мм<sup>2</sup>];  $\lambda_{п2} =$

Для лобовой проводимости:  $\lambda_{л2} = 2.3 D_k / Z_2 l_2 [2 \sin(\pi * p / z_2)]^2 * \lg 4.7 D_k / (2a_k + b_k)$ ;  
 $D_2 = D_k =$  [мм];  $Z_2 =$  ;  $l_2 =$  [м];  $a_k =$  [мм];  $2 \sin(\pi * p / z_2) =$  ;  $\lambda_{л2} =$

Для дифференциальной проводимости:  $\lambda_{q2} = t_2 * \varepsilon / 126 * K_6$ ;  $\varepsilon =$  ;  $t_2 =$  [мм];  
 $b =$  [мм];  $K_6 =$  ;  $\lambda_{q2} =$  .  
Отсюда:  $X_2 =$  [Ом].

Приведенное сопротивление рассеяния фазы ротора:  
 $X_2^1 = X_2 \cdot 4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot K_{01})^2 / Z_2 =$

[Ом]

### 3.5 Определение индуктивного сопротивления взаимной индукции

Индуктивное сопротивление взаимной индукции между статором и ротором найдем из выражения:  $X_{12} = (U_{1\text{фном}} - I_M \cdot X_1) / I_M =$  [Ом]  
 (из рис.16 следует, что  $X_{12} = X_0$ ,  $I_0 = I_M$ ,  $R_{12} = R_0$ ). Активное сопротивление намагничивающего контура  $R_{12}$  позволяет учитывать потери мощности в стали:  $R_{12} = \Delta P_{c1} / m_1 \cdot I_M^2$  [Ом], где  $\Delta P_{c1}$ - основные потери мощности в стали сердечника статора ( в ярме и зубцах статора);  $R_{12} =$   
 [Ом],  $\Delta P_{c1} =$  [Вт].

### 3.6 Относительные значения найденных параметров

Для удобства при составлении параметров и упрощения расчетов характеристик параметры асинхронной машины выражаем в относительных единицах. За базисные значения принимаем номинальное фазное напряжение  $U_{1\text{фном}}$  и номинальный фазный ток обмотки статора  $I_{1\text{фном}}$ . Относительные параметры приводим со звездочкой:  $X_1^* = (I_{1\text{фном}} \cdot X_1) / U_{1\text{фном}} =$

$$\begin{aligned} & ; R_1^* = (I_{1\text{фном}} \cdot R_1) / U_{1\text{фном}} = & ; \\ X_2^{*1} & = (I_{1\text{фном}} \cdot X_2^1) / U_{1\text{фном}} = & ; \\ R_2^{*1} & = (I_{1\text{фном}} \cdot R_2^1) / U_{1\text{фном}} = & ; \\ X_{12}^* & = (I_{1\text{фном}} \cdot X_{12}) / U_{1\text{фном}} = & ; \\ R_{12}^* & = (I_{1\text{фном}} \cdot R_{12}) / U_{1\text{фном}} = & ; \end{aligned}$$

Относительные значения параметров схемы замещения:  $X_1^* =$  ;  $R_1^* =$   
 ;  $X_2^{*1} =$  ;  $R_2^{*1} =$  ;  $X_{12}^* =$  ;  $R_{12}^* =$  .

## 4 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Потери мощности в асинхронном двигателе подразделяют на: потери в стали статора (основные и добавочные), электрические потери в обмотках статора и ротора, вентиляционные и механические потери, добавочные потери при нагрузке. Основные потери мощности в стали находят только для сердечника статора, так как частота перемагничивания стали ротора в номинальном режиме очень мала. В пусковых режимах потери в стали ротора возрастают, их учитывают при расчетах нагрева ротора за время пуска двигателя. Электрические потери мощности при пуске во много раз превышают потери номинального режима.

### 4.1 Электрические потери мощности в обмотках статора и ротора

Электрические потери мощности в проводниках обмотки статора найдем из выражения:  $\Delta P_{\sigma 1} = R_1 \cdot m_1 \cdot I_{1\text{фном}}^2 =$  [Вт].

Электрические потери мощности в проводниках обмотки ротора:  $\Delta P_{\sigma 2} = R_2^1 \cdot m_2 \cdot (I_2^1)^2 =$  [Вт].  $\Delta P_{\sigma 2} = R_2 \cdot m_2 \cdot I_2^2 = Z_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 =$  [Вт].  $Z_2 = m_2$ ;  $R_2 =$  [Ом]. Коэффициенты приведения токов:  $K_i = 2m_1 \cdot w_1 \cdot K_{01} / Z_2 =$  ;  $R_2^1 =$  [Ом];  $I_2^1 = I_2 / K_i =$  [А];  $\Delta P_{\sigma 2} = R_2^1 \cdot m_1 \cdot (I_2^1)^2 =$  [Вт].

### 4.2 Основные потери мощности в стали сердечника статора

Основные потери мощности в стали сердечника статора найдем из выражения:  $\Delta P_{c1} = P_{1/50} \cdot (f_1/50)^3 \cdot (K_{\text{я}} \cdot V_{\text{я}}^2 \cdot m_{\text{я}} + K_{\text{з}} \cdot V_{\text{з}}^2 \cdot m_{\text{з}})$  [Вт], где  $P_{1/50}$  - удельные потери мощности, Вт/кг;  $K_{\text{я}} =$  и  $K_{\text{з}} =$  - учитывают влияние неравномерного распределения магнитного потока в стали ярма и зубцах статора;  $m_{\text{з}}$  и  $m_{\text{я}}$  - масса стали в ярме и зубцах статора, кг.

Массу стали в ярме статора найдем так:  $m_{\text{я1}} = K_{\text{с}} \cdot V_{\text{я1}} \cdot \rho_{\text{1}} =$  ;  $V_{\text{я1}} = S_{\text{я1}} \cdot l_{\text{я1}}$  - объем стали в ярме статора;  $S_{\text{я1}} = (\pi \cdot D_1^2 / 4) - \pi \cdot (d_1 + 2h_{1\text{п}})^2 / 4 =$  [мм<sup>3</sup>];  $V_{\text{я1}} = S_{\text{я1}} \cdot l_{\text{я1}} =$  [мм<sup>3</sup>];  $V_{\text{я1}} =$  [Тл];  $V_{\text{з1}} =$  [Тл].

Массу зубцов сердечника статора найдем так:  $m_{\text{з1}} = K_{\text{с}} \cdot V_{\text{з1}} \cdot \rho_{\text{1}} =$

$$[\text{кг}]; \mathbf{V}_{1z} = S_{z1} * I_1 * Z_1 =$$

$$[\text{м}^3]; S_{z1} = B_{z1} * h_{z1} =$$

$$[\text{мм}^2].$$

Отсюда:  $\Delta P_{c1} =$  [Вт].

#### 4.3 Расчет добавочных потерь мощности в стали машины

Добавочных потерь мощности в стали статора возникают на холостом ходу машины. Их можно разделить на поверхностные и пульсационные потери мощности. Поверхностные потери возникают в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсации индукции в воздушном зазоре. Пульсационные потери в стали зубцов статора и ротора возникают из-за пульсации индукции в самих зубцах. Для определения поверхностных потерь находим амплитуду пульсаций индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора:  $B_{12} = B_6 * K_c * \beta_{12}$  [Тл], где  $\beta_{12} = f(v_{ш}/\delta)$ . Для зубцов статора считаем  $\beta_1 = 0$ , так как пазы ротора выполнены закрытыми,  $v_{ш}/\delta = 0$ . Для зубцов ротора:  $\beta_2 = f(v_{ш1}/\delta)$ ;  $v_{ш1} =$  [мм]. По [1] из кривой рис.16 при  $v_{ш1}/\delta =$  находим, что  $\beta_2 =$ .

Потери мощности, приходится на единицу ( $\text{м}^2$ ) площади поверхности головок зубцов ротора найдем по:  $P_{2п} = 0.5 * K_2 * (Z_1 * n_1 / 10000)^{1.5} * (B_{12} * t_1 * 10^{-3})^2$  [Вт/м<sup>2</sup>], где  $K_2 = 1.4 - 1.8$ ; принимаем  $K_2 =$ ; амплитуда пульсации -  $B_{12} = B_6 * K_c * B_{12} =$  [Тл];  $P_{2п} =$  [Вт/м<sup>2</sup>].

Полные поверхностные потери на роторе:  $\Delta P_{2п} = P_{2п} * v_{z2} * I_2 * Z_2 =$  [Вт]. Суммарные потери мощности  $\Delta P_{п} = \Delta P_{1п} + \Delta P_{2п} =$  [Вт], так как  $\Delta P_{1п} =$ .

Если считать, что  $v_{ш2} =$  [мм], то по кривой рис.17 находим при  $v_{ш2}/\delta =$  коэффициент  $\beta_1 =$ . Удельные поверхностные потери зубцов статора:  $P_{1п} = 0.5 * K_1 * (Z_2 * n_1 / 10000)^{1.5} * (B_{12} * t_2 * 10^{-3})^2$  [Вт/м<sup>2</sup>], где  $K_1 =$ ;  $B_{12} =$   $= \beta_1 * B_6 * K_c =$  [Тл];  $P_{1п} =$

[Вт/м<sup>2</sup>]. Полные поверхностные потери на зубцах статора:  $P_{1п} = P_{1п} * v_{z1} * I_1 * Z_1 =$  [Вт]. В этом случае суммарные поверхностные потери мощности в стали статора и ротора:  $\Delta P_{п} = \Delta P_{1п} + \Delta P_{2п} =$  [Вт].

Для расчета пульсационных добавочных потерь мощности в стали зубцов статора и ротора следует найти амплитуду пульсаций индукции в среднем сечении зубцов:  $B_{п1} = \gamma * B_{z1} * \delta / 2 * t_1$  [Тл];  $B_{п2} = \delta * B_{z2} * \gamma / 2 * t_2$  [Тл]. Сечение зубцов статора и ротора по высоте паза не изменяется, по этому  $B_{z1} =$  [Тл];  $B_{z2} =$  [Тл]. Коэффициенты:  $\gamma_1 = (v_{ш1}/\delta)^2 / (5 + v_{ш1}/\delta) =$ ;  $\gamma_2 = (v_{ш2}/\delta)^2 / (5 + v_{ш2}/\delta) =$

. Амплитуда пульсаций индукции в статоре:  $B_{п1} =$  [Тл]. Амплитуда пульсаций индукции в роторе:  $B_{п2} =$  [Тл]. Пульсационные потери мощности в зубцах статора:  $\Delta P_{1yп} = 0.11 * (Z_2 * n_1 * B_{п1} / 10000)^2 * m_{z1} =$



[ Вт]. Пульсационные потери мощности в зубцах ротора:  $\Delta P_{2yp} = 0.11(Z_1 * n_1 * B_{п2}/1000)^2 * m_{z2} =$

[Вт]. Масса зубцов ротора:

$$m_{z2} = K_c * V_{z2} * \rho_1 = \quad [кг]; \quad V_{z2} = S_{z2} * l_2 * z_2 = \quad [м^3];$$

$$S_{z2} = B_{z2} * h_{z2} = \quad [мм^2]. \quad \text{Тогда: } \Delta P_{2yp} = \quad [Вт].$$

Суммарные добавочные пульсационные потери мощности в статоре и роторе:  $\Delta P_{2yp} + \Delta P_{1yp} = [Вт].$

Добавочные поверхностные и пульсационные потери мощности в стали машины:  $\Delta P_{2yp} + \Delta P_{1yp} + \Delta P_{2п} + \Delta P_{1п} = \Delta P_{cg} \quad [Вт].$

Общие потери мощности в стали статора и ротора:  $\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{cg} = \quad [Вт].$

#### 4.4 Механические и вентиляционные потери мощности

Механические потери мощности имеют место в подшипниках двигателя. Вентиляционные включают потери мощности на трение вентилирующего воздуха о поверхность деталей конструкции и на вращение вентилятора при самовентиляции машины. Суммарные потери мощности в подшипниках и вентиляционные находим из выражения:  $P_{мех} = K_T (n_1/1000)^2 * (10 D_2)^3 [Вт].$  Для двигателя с  $D_2 \quad [м]$  при  $2p =$  можно считать  $K_T =$  . Тогда:  $\Delta P_{мех} = \quad [Вт].$

#### 4.5 Добавочные потери мощности при номинальной нагрузке

Добавочные потери мощности в двигателе при номинальной механической нагрузкой на валу включают в себя: потери от действия потоков рассеяния, ступенчатости кривой магнитодвижущей силы обмоток статора и ротора, от поперечных потоков между стержнями короткозамкнутого ротора через листы сердечника ротора. Эти потери можно принять равными 0.5 % от подводимой из сети мощности  $P_{1ном}$ :  $\Delta P_{гном} = 0.005 P_{1ном} = \quad [Вт].$

При измерении нагрузки на валу считаем добавочные потери мощности пропорциональными отношению токов статора в квадрате:

$$P_g = P_{гном} * (I_{1ф}/I_{1фном})^2 = \quad [Вт].$$

#### 4.6 Определение коэффициента полезного действия, тока холостого хода двигателя

Коэффициента полезного действия спроектированного двигателя при номинальной механической нагрузке на валу найдем:  $\eta_{ном} = P_{2ном} / P_{1ном} =$

$$= P_{2ном} / (\Delta P_{гном} + \Delta P_{ном.}); \quad P_{2ном} = \quad [Вт]; \quad \Delta P_{ном.} = \Delta P_{э1} + \Delta P_{э2} + \Delta P_{c1} + \Delta P_{п1} + \Delta P_{п2} + \Delta P_{пу1} + \Delta P_{пу2} + \Delta P_{мех.} + \Delta P_{gном.} = \quad ;$$

$\eta_{\text{ном}} =$

[ %].

Ток в обмотке статора на холостом ходу двигателя найдем через его активную  $I_{\text{оа}}$  и реактивную  $I_{\text{ор}}$  составляющие:  $I_0 = \sqrt{I_{\text{оа}}^2 + I_{\text{ор}}^2}$  [А]. Активную составляющую находим через потери мощности в машине на холостом ходу. Это: потери на трение и вентиляцию ( $\Delta P_{\text{мех}}$ ); основные ( $\Delta P_{\text{с1}}$ ) и добавочные потери мощности в стали ( $\Delta P_{2\text{уп}} + \Delta P_{1\text{уп}} + \Delta P_{2\text{п}} + \Delta P_{1\text{п}}$ ); считаем их такими же по величине, как и при номинальной нагрузке на валу (постоянные потери мощности не зависят от нагрузки); электрические потери в меди обмотке статора на холостом ходу ( $\Delta P_{\text{эо}}$ ). Электрические потери холостого хода найдем:

$$\Delta P_{\text{эо}} = m_1 * I_{\text{м}}^2 * R_1 = \quad \text{[ Вт]. Тогда:}$$

$$(\Delta P_{\text{с1}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{сг}} + \Delta P_{\text{эо}}) = m_1 * I_{\text{оа}} * U_{1\text{фном}} =$$

$$; I_{\text{оа}} = (\Delta P_{\text{с1}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{сг}} + \Delta P_{\text{эо}}) / m_1 * U_{1\text{фном}} =$$

[А]. Реактивную составляющую тока холостого хода считаем равной вычисленному ранее току намагничивания в обмотке статора:  $I_{\text{ор}} = I_{\text{м}} =$  [А].

Ток в фазе обмотки статора на холостом ходу двигателя:  $I_0 =$

[А]. Коэффициент мощности двигателя на холостом ходу:

$$\text{Cos } \varphi_0 = I_{\text{оа}} / I_0 =$$

## 5 РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ

Эксплуатационные свойства проектируемого двигателя оценивают по его рабочим характеристикам. Они включают в себя зависимости от полезной механической мощности на валу  $P_2$  при  $U_{1ном} = \text{const}$  и  $f_{1ном} = \text{const}$  следующих параметров: потребляемой из сети мощности  $P_1$ ; тока в фазе обмотки статора  $I_{1ф}$ ; вращающего момента на валу  $M$ ; частоты вращения ротора  $n_2$ ; скольжения  $S$ ; коэффициента мощности в обмотке статора  $\cos\varphi_1$ ; коэффициент полезного действия  $\eta$ .

### 5.1 Исходные параметры для расчета характеристик

Расчет рабочих характеристик проведем с использованием Г-образной схемы замещения фазы машины, представленной на рис. 17. Расчет параметров проводим для практического диапазона работы двигателя: от  $S=0$  до  $1.4 S_{ном}$ . Расчет процесса пуска от  $S=1$  до  $S_{ном}$  требует учета изменения некоторых параметров схемы замещения и проводится отдельно в конце раздела.

Исходные данные, необходимые для проведения расчета рабочих характеристик:  $P_{2ном} = \quad [ \text{Вт} ]$ ;  $U_{1фном} = \quad [ \text{В} ]$ ;  $2p = \quad$ ;  $I_{1фном} = \quad [ \text{А} ]$ ;  $(\Delta P_{c1} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{сг}) = \quad [ \text{Вт} ]$ ;  $C_1 = 1 + X_1 / X_{12} = \quad$ ;  $\Delta P_{гном} = \quad [ \text{Вт} ]$ ;  $I_{оа} = \quad [ \text{А} ]$ ;  $I_{ор} = \quad [ \text{А} ] = I_{\mu}$ ;  $R_1 = \quad [ \text{Ом} ]$ ;  $R_2^1 = \quad [ \text{Ом} ]$ ;  $a = C_1 * R_1 = \quad [ \text{Ом} ]$ ;  $a^1 = C_1^2 = \quad$ ;  $v = C_1(X_1 + C_1 * X_2^1) = \quad [ \text{Ом} ]$ ;  $v^1 = 0$ . Предварительно принимаем  $S_{ном} = R_2^1 = \quad$ . Для проведения расчета в заданном диапазоне задаем конкретную величину скольжения  $S$  равную:

$\quad$ . После проведения расчетов уточним величину  $S_{ном}$ , соответствующую  $P_{2ном}$  по кривой  $S=f(P_2)$ .

### 5.2 Последовательность расчета необходимых параметров

Расчет параметров проводим в такой последовательности:

Используя исходные данные и текущие значение заданной величины скольжения:

- вычисляем меняющееся активное сопротивление обмотки ротора,

$a^1 * R^1 / S$ , оно меняется в зависимости от изменения  $S$ ;

- находим активное сопротивление ветви обмотки ротора в схеме замещения,

$R = a + a^1 * R^1 / S$ ;

- определяем индуктивное сопротивление ветви обмотки ротора,  $X = \omega C_1(X_1 + C_1 * X_2) =$  [ Ом];
- полное сопротивление указанной ветви находим по выражению  $Z = \sqrt{R^2 * X^2}$ ;
- в соответствии с законом Ома находим текущее значение тока в фазе обмотки ротора по схеме,  $I_2^{11} = U_{1\text{фном}} / Z$ ;
- вычисляем коэффициент мощности для рассматриваемой ветви ротора,  $\text{Cos}\varphi_2 = R / Z$ ;
- находим  $\text{Sin}\varphi_2 = X / Z$ ;
- определяем активную составляющую тока в фазе обмотки статора,  $I_{1a} = I_{0a} + I_2^{11} * \text{Cos}\varphi_2 =$  [ A];
- реактивную составляющую тока в фазе обмотки статора находим аналогично,  $I_{1p} = I_{0p} + I_2^{11} * \text{Sin}\varphi_2 =$  [ A];
- имея составляющие, находим текущее значение тока в фазе обмотки статора,  $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$ ;
- ток в фазе обмотки ротора приведен к обмотке статора,  $I_2^1 = C_1 * I_2^{11}$ ;
- активную мощность, потребляемую двигателем из сети, найдем по выражению  $P_1 = 3 U_{1\text{фном}} * I_{1a}$ ;
- электрические потери мощности в проводниках обмотки статора,  $\Delta P_{\text{э1}} = 3 I_{1\text{ф}}^2 * R_1$ ;
- электрические потери мощности в проводниках обмотки ротора,  $\Delta P_{\text{э2}} = 3 I_2^2 * R_2^1$ ;
- находим добавочные потери мощности в машине для режима, отличающегося от номинального,  $\Delta P_g = \Delta P_{\text{гном}} (I_{1\text{ф}} * I_{1\text{фном}})^2$ ;
- суммарные потери мощности при данной механической нагрузке на валу двигателя,  $\Delta P = \Delta P_{\text{э1}} + \Delta P_{\text{э2}} + \Delta P_c + \Delta P_{\text{мех.}} + \Delta P_g$ ;
- вычисляем полезную механическую мощность на валу двигателя,  $P_2 = P_1 - \sum \Delta P$ ;
- находим текущий коэффициент полезного действия при преобразовании электрической энергии в механическую,  $\eta = 1 - \sum \Delta P / P_1$ ;
- вычисляем текущую частоту вращения ротора,  $n_2 = n_1 (1 - S)$ ;
- находим вращающий момент на валу машины,  $M = 9.55 P_2 / n_2$ ;
- текущее значение коэффициента мощности в обмотке статора,  $\text{Cos}\varphi_1 = I_{1a} / I_1$ ;
- ;
- заносим рассчитываемые параметры в табл. 8 для соответствующего текущего скольжения;
- по данным, приведенным в табл. 8 строим рабочие характеристики проектируемого двигателя, представленные на рис.18.

### 5.3 Расчет параметров для номинальной нагрузки на валу

Расчет ведем в указанной выше последовательности и вносим данные в табл.8 при  $S_{\text{ном}} =$  [Ом];  $a^1 * R_2^1 / S =$  [Ом];  $R = a + a^1 * R_2^1 / S =$

$$\begin{aligned}
 & ; X = \quad [OM]; Z = \sqrt{R^2 * X^2} \quad [OM]; \\
 I_2^{11} = U_{1\phi_{НОМ}} / Z = & \quad [A]; \cos\varphi_2 = R / Z = \quad ; \sin\varphi_2 = X / Z = \\
 & ; I_{1a} = I_{0a} + I_2^{11} * \cos\varphi_2 = \quad [A]; I_{1p} = I_{0p} + I_2^{11} * \sin\varphi_2 = \\
 = & \quad [A]; I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \quad [A]; I_2^1 = C_1 * I_2^{11} = \quad [A]; \\
 P_1 = 3 U_{1\phi_{НОМ}} * I_{1a} = & \quad [кВт]; \Delta P_{\phi} = 3 I_1^2 * R_1 = \\
 & [Вт]; \Delta P_{\phi 2} = 3 I_2^2 * R_2^1 = \quad [Вт]; \\
 \Delta P_g = \Delta P_{g_{НОМ}} (I_{1\phi} / I_{1\phi_{НОМ}})^2 = & \quad [Вт]; \sum \Delta P = \Delta P_{\phi} \\
 + \Delta P_{\phi 2} + \Delta P_c + \Delta P_{мех.} + \Delta P_g = & \quad [Вт]; \\
 P_2 = P_1 - \sum \Delta P = & \quad [кВт]; \eta = 1 - \sum \Delta P / P_1 = \\
 & \% ; n_2 = n_1 (1 - S) = \quad [мин^{-1}]; \\
 M = 9.55 P_2 / n_2 = & \quad [Нм]; \cos\varphi_1 = I_{1a} / I_1 = \quad .
 \end{aligned}$$

После построения рабочих характеристик двигателя (рис.18) уточняем параметры двигателя при номинальной нагрузке на валу:  $P_{2НОМ} = \quad [кВт];$   
 $U_{1\phi_{НОМ}} = \quad [В]; I_{1\phi_{НОМ}} = \quad [А]; \cos\varphi_{1НОМ} = \quad ; \eta = \quad \% ; S_{НОМ} = \quad ;$   
 $M_{НОМ} = \quad [Нм]; n_2 = \quad [мин^{-1}].$

#### 5.4 Расчет и построение пусковых характеристик двигателя

Пусковые свойства двигателя характеризуются начальными пусковым моментом и начальным пусковым током, которые зависят от соотношения параметров машины в момент пуска. На некотором интервале времени начальный пусковой момент снижается, важно знать минимум пускового момента. Пусковые характеристики –  $M=f(S)$  и  $I_1 = f(S)$  строят при изменении скольжения от  $S=1$  до  $S_{НОМ}$ , указывая на них характерные точки при  $S_{кр}$ . При  $2p = \quad$  : отношение  $M_{п}/M_{НОМ}$  должно находиться в пределах от 2 до 2.2; отношение  $I_{п}/I_{1\phi_{НОМ}}$  - в пределах от 5 до 7.5.

Величину максимального вращающего момента на валу двигателя найдем из выражения:  $M_{макс} = m_1 * U_{1\phi_{НОМ}}^2 / 2\omega_1 * c_1 (R_1 + \sqrt{(R_1^2 + (X_1 + C_1 * X_2^1)^2)})$  [Н\*М], где  $\omega_1 = 2\pi f_1 / p = \quad [с^{-1}]; c_1 = \quad ; m_1 = \quad ; R_1 = \quad [OM]; X_1 = \quad [OM]; X_2^1 = \quad [OM]; M_{макс} =$

[Н\*М]. Кратность максимального момента:  $\lambda = M_{макс} / M_{НОМ}; n_2 = n_1 (1 - S) =$   
 $[мин^{-1}]; M_{НОМ} = 9.55 P_{2.НОМ} / n_{2НОМ} =$

[Н\*М];  $\lambda = \quad$  . Начальный пусковой момент найдем из выражения:  $M_{п} = m_1 * U_{1\phi_{НОМ}}^2 * R_2^1 / \omega_1 ((R_1 + C_1 * R_2^1)^2 + (X_1 + C_1 * X_2^1)^2) =$

[Нм]; кратность пускового момента -  $M_{п} / M_{НОМ} = \quad$  . Критическое скольжение:  $S_{кр} = \quad c_1 R_2^1 / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 * X_2^1)^2} =$

Вычислим величину текущего момента при  $S=0.5$ :  $M = 2 M_{макс} / (S_{кр}/S + S/S_{кр}) =$

[Н\*М]. Можно строить кривую  $M=f(S)$ , имея координаты точек:  $S=1, M_{п}; S=0.5; M = \quad ; M_{макс}; S_{кр}; M_{НОМ}; S_{НОМ}; S=0; M=0$ . Указанная кривая представлена на рис.19.

Для тех же значений скольжения находим величину тока в фазе обмотки статора. Приведенный пусковой ток в обмотке ротора найдем из выражения:  $I_2^1 = U_{1\phi_{ном}} / \sqrt{(R_1 + C_1 * R_2^1 / S)^2 + (X_1 + C_1 * X_2^1)^2}$ ,  $S_{п}=1$ ;  $I_{2п}^1 =$  [A];  $I_{2п}^1 / I_{2ном}^1 =$  .

При  $S_k$ :  $I_{2к}^1 =$  [A];

$I_{1к} = I_0 + I_{2к}^1 =$  [A]. При  $S=0$  ток  $I_{1\phi} = I_0 =$  [A]. Находим

ток при  $S=0.5$ :  $I_2^1 =$  [A];

$I_1 = I_0 + I_2^1 =$  [A]. Можно строить кривую  $I_1 = f(S)$ ,

имея координаты:  $S=1$ ;  $I_{1п} =$  ;  $S=0.5$ ,  $I_1 =$  ;  $S_{ном}$ ;  $I_{1\phi_{ном}} =$  ;

$S=0$ ;  $I_{10} =$  [A]. Указанная кривая представлена на рис.19.



## 6 ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

### 6.1 Выбор системы вентиляции

Для проектируемого двигателя принимаем искусственную вентиляцию, самовентиляцию. При этом охлаждение активных и конструктивных деталей машины производится потоком охлаждающего воздуха, всасываемым вентилятором, размещенным на роторе. Вытяжная система вентиляции обладает преимуществом перед нагнетательной системой в том, что в машину попадает холодный воздух; нет подогрева воздуха при прохождении его через вентилятор. Воздух поступает в машину через патрубок, движется вдоль оси машины, охлаждая поверхность статора и ротора. В двигателе с литой алюминиевой беличьей клеткой вентиляционные лопатки составляют одно целое с коротко замыкающими кольцами клеток.

Вентиляционный расчет определяет количество воздуха, которое необходимо прогонять через машину для поддержания необходимой температуры деталей, и давление этого воздуха (его напор), обеспечивающее прохождение требуемого количества воздуха через воздухопроводы. Подаваемый воздух должен отводить все потери мощности, выделяющиеся при работе двигателя и греющие детали конструкции.

### 6.2 Определение основных параметров вентиляционной системы

Количество охлаждающего воздуха, необходимое для отвода потерь мощности, находим из выражения:  $V_B = \sum \Delta P_{\text{НОМ}} / C_B * \Delta \Theta_B$  [м<sup>3</sup>/с], где  $\sum \Delta P_{\text{НОМ}}$  – потери мощности в двигателе при номинальной нагрузке на валу, Вт;  $C_B = 1100$  [Дж/ м<sup>3</sup> ] – удельная объемная теплоемкость охлаждающего машину воздуха;  $\Theta_B$  – превышение температуры воздуха за время пребывания в машине, ;  $\Theta_B = \Theta_{\text{ВЫХ}} - \Theta_{\text{ВХ}}$ . Для машин с изоляцией класса F можно принять температуру воздуха выше среднего значения (15 ) в 2 раза, то есть  $\Theta_B =$  [ ]. Для проектируемого двигателя: сумма потерь мощности -  $\sum \Delta P_{\text{НОМ}} =$  [Вт]; тогда  $V_B =$  [м<sup>3</sup>/с]. Напор (давление) подаваемого вентилятором воздуха находим из выражения:  $H = Z * V_B^2$  [Па], где  $Z$  – эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентиляционной системы машины,  $H * \text{с}^2/\text{м}^2$ .

У спроектированного двигателя аэродинамическое сопротивление воздухопровода от входного патрубка до выходного является постоянной величиной. На основании заводских аэродинамических испытаний, проведенных заводом-изготовителем подобных двигателей, получена кривая зависимости  $Z$  от  $K = P_{2\text{НОМ}}/n_{\text{НОМ}}$ . из кривой, приведенной в [1] на рис. 20, находим при  $K =$  = аэродинамическое сопротивление  $Z =$  [Па с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>]. По найденному  $Z$  и известному необходимому расходу воздуха  $V_B$  находим требуемый напор вентилятора:  $H = Z * V_B^2 =$  [Па].

Проверяем возможности конструктивных деталей двигателя по созданию требуемого расхода охлаждающего воздуха. Вентиляционные лопатки ротора



могут создать расход воздуха, определяемый по выражению:  $V_B^1 = 0,1 * m * n_{ном} * D_2^2 / 100 [м^3/с]$ , где значение коэффициента  $m = 1,25 - 3$  для двигателей с  $2p =$  . Формула приближенно учитывает суммарное вентиляционное воздействие всех конструктивных элементов машины. Принимаем минимальное значение коэффициента  $K = 1,25$ ; тогда:  $V_B^1 =$  [м<sup>3</sup>/с].

Так как полученный расход воздуха превышает необходимый на 12% ( $V_B^1 / V_B =$  ), то конструктивные элементы вентиляции смогут обеспечить достаточное охлаждение двигателя; установка отдельного вентилятора на валу ротора или независимого вентилятора не требуется (расположенного вне машины).

Окружная скорость на внешнем диаметре ротора при номинальной частоте вращения составит:  $v_2 = \pi D_2 * n_{ном} / 60 =$  [м/с]. Такой же будет и скорость вентилярующего машину воздуха, отводящего тепло от внутренней поверхности статора и внешней поверхности ротора. Для уменьшения вентиляционного шума выбираем нечетное число лопаток на роторе:  $n_L =$  .

## 7 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МАШИНЫ

В тепловом расчете рассматривают превышение температуры деталей конструкции  $\Theta_1$  над температурой окружающего воздуха, которая меняется за время суток и сезонов. Температуру детали можно найти как сумму превышения  $\Theta_1$

и температуры окружающего воздуха  $t_0$ :  $\Theta_1 + t_0 = t_i$ . Номинальные данные машины должны соответствовать заданному режиму работы при температуре  $t_0 =$ . Предельно допустимые превышения температуры отдельных деталей  $\Theta_i$  установлены ГОСТ. Для класса нагревостойкости изоляции F допустимые температуры составляют: обмотки машин переменного тока - [ ]; неизолированные обмотки, непрерывнозамкнутые на себя - [ ]; сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с изолированными обмотками - [ ]. Для асинхронного двигателя проводим расчет температуры проводников обмотки статора и ротора, сердечников статора и ротора.

### 7.1 Перепад температуры по толщине изоляции обмотки статора

Принимаем линейный закон изменения температуры по толщине изоляции обмотки статора:  $\Theta_n = C_1 * X + C_2$  [ ]. В этом случае тепловой поток от обмотки статора через пазовую изоляцию толщиной  $b_n$  соответствует закону Фурье:

$Q_n = \lambda_n * (\Theta_1 + \Theta_{c1}) S_n / b_n$  [Вт], где  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности материала пазовой изоляции, Вт/м;  $S_n = (v_1 + v_2 + 2h_1) * l_1$  [м<sup>2</sup>]- площадь поверхности паза статора, через которую тепловой поток  $Q_n$  переходит к более холодному сердечнику статора;  $b_n$ - толщина изоляции в пазу, м;  $(\Theta_1 - \Theta_{c1})$ - разница температур обмотки и сердечника статора, перепад температуры  $\Delta\Theta_1$ , [ ]. Для рассматриваемого двигателя:  $Q_n = \Delta P / Z_1 =$  Вт;  $\lambda_n =$  [Вт/м] ;  $b_n =$  [мм]- включает толщину изоляции проводника и два слоя пазовой изоляции ;  $v_1 =$  [мм];  $v_2 =$  [мм] –этот размер из периметра паза исключаем, так как в сторону клина тепловой поток не идет (тепловое сопротивление высоко) ;  $h_1 =$  [мм];  $S_n =$  [м<sup>2</sup>]; тогда  $\Delta\Theta_1 = \Delta P_{\sigma 1} * b_n / \lambda_n * S_n * Z_1 =$  [ ];  $(\Theta_1 + \Theta_{c1}) = \Delta\Theta_1 =$  [ ].

### 7.2 Превышение температуры сердечника и обмотки статора

Тепловой поток отводится от сердечника статора охлаждающим машину воздухом со стороны воздушного зазора. Некоторая часть тепла отводится с наружной поверхности корпуса за счет естественной конвекции. Тепловое влияние статора на ротор и наоборот считаем не существенным. Теплоотдача с внутренней поверхности статора к охлаждающему воздуху в воздушном зазоре машины происходит в соответствии с законом Ньютона-Рихмана:  $Q_1 = \alpha_1 (\Theta_{c1} - \Theta_0) * S_1$  [Вт], где

$Q_1 = (\Delta P_{c1} + \Delta P_{п1} + \Delta P_{пу1} + \Delta P_{э1}) =$  [Вт]-  
 потери мощности в обмотке и сердечнике статора;  $\alpha_1$ -коэффициент теплоотдачи от  
 внутренней поверхности статора к охлаждающему воздуху, [Вт/м<sup>2</sup>];  $\Theta_{c1}$ -  
 превышение температуры сердечника статора, [°C];  $\Theta_0$ - среднее превышение  
 температуры охлаждающего машину воздуха над окружающей средой, [°C];  $S_1$ -  
 площадь теплоотдающей поверхности статора, м<sup>2</sup>.

Для проектирования машины  $Q_1 =$  [Вт]; среднее превышение  
 температуры охлаждающего воздуха принято в вентиляционном расчете:  $\Theta_0 =$  [°C];  
 $\alpha_1 =$  [Вт/м<sup>2</sup>];  $v_2 =$  [м/с]-из вентиляционного  
 расчета;  $S_1^1 = \pi * d_1 * l_1 + 2(\pi D_1^2/4 - \pi d_1^2/4) + \pi D_1 * l_1 * K_n$  [м<sup>2</sup>]- площадь теплоотдающей  
 поверхности статора, учитывающая внутреннюю поверхность, торцевую с обеих  
 сторон и наружную оребренную ( $K_n$ - коэффициент увеличения поверхности за счет  
 оребрения);  $S_1^1 =$

[м<sup>2</sup>]. Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности корпуса в окружающую  
 неподвижную среду- $\alpha_n =$  [Вт/м<sup>2</sup>], площадь наружной поверхности –  $S_n =$   
 [м<sup>2</sup>]. При  $\alpha_1 =$  [Вт/м<sup>2</sup>] теплоотдача идет с поверхности  $S_1 =$   
 $S_1^1$  [м<sup>2</sup>]. Тогда  $(\Theta_{c1} - \Theta_0) = Q_1 / (\alpha_n * S_n + \alpha_1 * S_1 =$   
 [°C]. Превышение температуры сердечника статора:  $\Theta_{c1} = 52 + \Theta_0 =$  [°C].

Превышение температуры обмотки статора  $\Theta_1$  находим, учитывая перепад  
 температуры  $\Delta \Theta_1$  между проводниками обмотки и сердечником статора:  
 $\Theta_1 = \Theta_{c1} + \Delta \Theta_1 =$  [°C]. Учет оребрения наружной поверхности несколько снизит  
 превышения температуры обмотки и сердечника статора, полученные расчетом.

### 7.3 Превышение температуры сердечника и обмотки ротора

В конструкции короткозамкнутого ротора литая обмотка уложена в пазах  
 ротора без пазовой изоляции. Перепада температуры в пазовой изоляции нет,  
 поэтому проводим расчет средней температуры сердечника ротора вместе с его  
 обмоткой, учитывая потери мощности на роторе. Отвод тепла от сердечника ротора  
 происходит с внешней поверхности цилиндра и его торцевых поверхностей к  
 охлаждающему машину воздуху. Превышение температуры сердечника с обмоткой  
 найдем из выражения:  $Q_2 = \alpha_2(\Theta_2 - \Theta_0) * S_2$  [Вт], где  $\Theta_2$ - превышение температуры  
 ротора, [°C];  $\Theta_0$ - среднее превышение температуры охлаждающего воздуха в  
 машине (его пологрев), [°C];  $\alpha_2$ -коэффициент теплоотдачи с вращающихся  
 поверхностей ротора, [Вт/м<sup>2</sup>];  $S_2$ -теплоотдающая поверхность ротора, [м<sup>2</sup>].

Для проектируемого двигателя:  $Q_2 = (\Delta P_{мех} + \Delta P_{п2} + \Delta P_{пу2} + \Delta P_{гном} + \Delta P_{э2}) =$   
 [Вт];  $\alpha_2 =$  [Вт/м<sup>2</sup>];  
 $S_2 = \pi * D_2 * l_2 + (\pi D_2^2/4 - \pi d_2^2/4) * 2 =$

[м<sup>2</sup>]. Тогда:  $(\Theta_2 - \Theta_0) = Q_2 / \alpha_2 * S_2 =$  [ ]. Превышение температуры обмотки ротора и сердечника:  $(\Theta_2 - \Theta_0) =$  [ ];  $\Theta_0 =$  [ ];  $\Theta_2 =$  [ ].

Расчетное превышение температуры частей конструкции двигателя составили: обмотки статора- [ ]; сердечника статора- [ ]; сердечника ротора- [ ]. Превышения температуры деталей конструкции не превышает допустимых по классу нагревостойкости примененной изоляции (класс F).

## 8 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Расчетные параметры машины являются основанием для конструирования: составления продольного разреза с размерами; определения габаритных размеров спроектированного двигателя; уточнение некоторых размеров деталей в процессе сборки конструкции на чертеже; определение установочных размеров, веса деталей и всех машины в сборе. Конструирование машины предусматривает механические расчеты наиболее напряженных деталей, определение напряжений и упругих деформаций деталей, их сравнение с допустимыми для принятого материала детали.

### 8.1 Расчет вала машины на жесткость и прочность

Вал машины должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все механические нагрузки без появления остаточных деформаций. Иметь достаточную жесткость, чтобы при работе двигателя из-за прогиба вала ротор не задевал внутреннюю поверхность статора при малой величине воздушного зазора. Критическая частота вращения вала, вызывающая поперечные и крутильные резонансные колебания, должна быть достаточно удалена от рабочей частоты вращения вала.

Вал спроектированного двигателя, показанный на рис.21, имеет ступенчатую цилиндрическую форму. Число ступеней вала соответствует числу узлов машины, размещенных на валу: магнитопровод ротора, левый и правый подшипники качения, свободный конец вала с упругой муфтой для соединения с производственным механизмом. Размеры свободного конца вала выбираем по[1]: диаметр – мм, ширина шпонки- мм, длина шпонки- мм, наибольшая величина вращающего момента при продолжительности режима работы- Н\*м.

Жесткость вала характеризует его прогиб под действием радиальных сил. Основная из них – вес сердечника ротора. Прогиб определяют на участке вала с сердечником ротора и сравнивают с допуском. Массу стали сердечника ротора состоит из массы ярма и массы зубцов ротора. Массу стали в ярме найдем:  $m_{я2} = K_c \cdot V_{я2} \cdot \rho_2$ ;  $V_{я2} = S_{я2} \cdot l_{я2} = \frac{\pi (D_2 - 2h_{п2})^2}{4} \cdot l_{я2} / 4 =$  [мм<sup>2</sup>];  $m_{я2} =$  [кг];

$m_{я2} =$  [кг]. Массу стали в зубцах ротора найдем:  $m_{z2} = K_c \cdot V_{z2} \cdot \rho_2 =$  [кг];  $V_{z2} = S_{z2} \cdot l_{z2} \cdot z_2 =$  [м<sup>3</sup>];

$S_{z2} = b_{z2} \cdot h_{z2} =$  [мм<sup>2</sup>];  $b_{z2} =$  [мм];  $h_{z2} = h_{п2} =$  [мм];  $m_{z2} =$  [кг]. Массу сердечника ротора:  $m_2 = m_{я2} + m_{z2} =$  [кг].

Масса вала машины:  $m_B = V_B \cdot \rho_2 =$  [кг];

$V_B = S_B \cdot l_B =$  [м<sup>3</sup>];  $S_B = \pi d_B^2 / 4 =$  [мм<sup>2</sup>].

Масса ротора вместе с валом:  $m_p = m_2 + m_B =$  [кг]. Сила тяжести ротора, приложенная посередине между опорами подшипников:  $G_p = 9.81 \cdot m_p =$

[Н]. Расчет прогиба вала посередине магнитопровода ротора от действия силы  $G_p$  показал, что расчетный прогиб вала не превышает 10% от величины воздушного зазора (          мм). Вал будет изготовлен из стали марки  $E=2.06 \cdot 10^{11}$  [Па], предел текучести –  $3600 \cdot 10^5$  [Па]; допустимое напряжение материала -          [Н/м<sup>2</sup>];  $f_p =$           [мм].

Критическую частоту вращения вала находим из выражения

$$n_k = \sqrt{(1-m)/f_p} \quad [\text{мин}^{-1}].$$

Критическая частота вращения вала в несколько раз превышает рабочую частоту (          ).

Вал машины испытывает одновременное воздействие напряжений кручения и изгиба. Напряжение материала вала находим, учитывая сложное воздействие:

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_H^2 + 4(\alpha\tau)^2} \quad [\text{Н/м}^2]; \text{ где } \sigma_H - \text{напряжение изгиба вала, Н/м}^2. \text{ Напряжение от изгиба вала: } \sigma_H = M_{\text{НОМ}}/0.1 d_B^3 = \quad [\text{Н/м}^2].$$

$$\text{Напряжение при кручении вала: } \tau = k * M_{\text{НОМ}}/0.2 d_B^3 = \quad [\text{Н/м}^2],$$

$$\text{где коэффициент нагрузки } k=2. \text{ Тогда: } \sigma_B = \quad [\text{Н/м}^2].$$

Выбранный вал удовлетворяет требованиям по прочности, так как напряжение материала от кручения и изгиба ниже допустимого ( $252 \cdot 10^6$  [Н/м<sup>2</sup>]). Допустимое напряжение составляет 0.7 от предела текучести для ст.45.

## 8.2 Расчет и выбор подшипников

По данным 1 выбираем подшипники. Принимаем шарикоподшипники радиальные однорядные легкой серии. Шарикоподшипник показан на рис. 22. Его параметры: марка 211, диаметр под вал-          мм, внешний диаметр-          мм, ширина-          мм, динамическая грузоподъемность-  $C =$           Н, статическая грузоподъемность-  $C_0 =$           Н, максимальная частота вращения -          [мин<sup>-1</sup>], левый и правый подшипники одинаковые. На рис. 22 приведена схема для определения радиальных реакций в подшипниках.

Из уравнений равновесия сил относительно опор А и В находим радиальные реакции в подшипниках:  $R_A(a+v) - G_p * v = 0$ ;  $R_B(a+v) - G_p * v = 0$ ;  $a=v =$           мм;  $G_p =$           [Н];

$R_A = G_p * v / (a+v)$  ;  $R_B = G_p * v / (a+v)$  ;  $R_A =$           [Н];  $R_B =$           [Н]. Приведенную динамическую нагрузку принимаем  $Q = k * R$  [Н], где для машины общепромышленного назначения  $k=2$ . Тогда  $Q =$           [Н]. Принимаем

долговечность работы подшипников  $D =$           [час]. Динамическая нагрузка подшипника составит:  $C =$            $Q^3 / \sqrt{D * n_{\text{НОМ}}} =$           =

[Н]. Полученная динамическая нагрузка обоих подшипников не превышает допускаемой динамической грузоподъемности выбранных подшипников.

## 8.3 Выбор муфты для соединения рабочего конца вала с приводным механизмом

Для соединения рабочего конца вала двигателя (с диаметром  $d = \quad$  мм) с валом приводного механизма по 1 выбираем из табл.11 упругую муфту типа МУВП7. Муфта показана на рис.24. Основные данные выбранной муфты: максимальный вращательный момент -  $\quad$  [Нм]; минимальный диаметр под валом -  $\quad$  мм; максимальный диаметр под валом -  $\quad$  мм; наружный диаметр муфты -  $\quad$  мм; диаметр, проходящий через оси соединительных пальцев -  $\quad$  мм; диаметр пальца -  $\quad$  мм; число пальцев -  $\quad$ ; осевая длина одной из составляющих муфты (всего две части муфты) -  $\quad$  мм.

Поперечную силу  $F_n$ , отражающую воздействие соединительной муфты на вал двигателя и приложенную к рабочему концу вала, найдем из выражения:

$F_n = K_{\pi} * M_{\text{ном}} / R$  [Н], где  $M_{\text{ном}}$  - номинальный вращающийся момент на валу двигателя, [Нм]; степень воздействия упругой муфты -  $K_{\pi} = \quad$ ; радиус осей соединительных пальцев -  $R = \quad$  [мм];  $F_n = \quad$  [Н]. Эта сила создает дополнительный прогиб вала посреди участка с магнитопроводом. Первоначальное смещение ротора происходит из-за неточности обработки деталей, износа подшипников в процессе эксплуатации, прогиба вала от действия силы веса ротора вместе с валом. При расчете реакций опор в подшипниках  $R_b$  и  $R_a$  следует учитывать влияние силы  $F_n$  на величину радиальных усилий. Расчет этих усилий с учетом  $F_n$  показал, что нагрузка подшипников не превышает допустимой.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана конструкция, рассчитаны линейные размеры деталей, определены электрические, магнитные и механические нагрузки материала деталей асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Сводные расчетные параметры спроектированного двигателя:  $U_{1\text{ном}} = \quad \text{В}$ ;  $\text{Cos } \varphi_{1\text{ном}} = \quad$ ;  $P_{2\text{ном}} = \quad \text{кВт}$ ;  $I_{1\text{ном}} = \quad \text{А}$ ;  $n_{\text{ном}} = \quad \text{мин}^{-1}$ ;  $\eta_{\text{ном}} = \quad \%$ ; осевая длина двигателя с рабочим концом вала-  $l_{30} = \quad \text{мм}$ ; наружный диаметр станины-  $d_{30} = \quad \text{мм}$ ; длина рабочего конца вала –  $l_1 = \quad \text{мм}$ ; высота оси вращения от фундамента-  $h = \quad \text{мм}$ . Спроектированный двигатель по своим параметрам не уступает серийно выпускаемому той же мощности и соответствует всем отраслевым стандартам.

2. При разработке конструкции применены современные проводниковые, магнитные, электроизоляционные и конструктивные материалы, что позволило сохранить габаритные и установочно – присоединительные размеры спроектированного двигателя в пределах серийного выпускаемого.

3. Результаты электромагнитного, вентиляционного, теплового и механического расходов двигателя подтверждают работоспособность, долговечность и эксплуатационную надежность спроектированного двигателя.

4. Рабочие и пусковые характеристики спроектированного двигателя соответствуют типовым характеристикам и удовлетворяют требованиям к предельным значениям вращающего момента и пускового тока, а также параметрам двигателя при номинальной механической нагрузке на валу.



## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов / И. П. Копылов, Ф.А. Горямнов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова-М.: Энергия. – 1980. – 496 с.
2. Проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов / И. П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова- 3-е изд. испр. и допл.-М.:Высшая школа.-/ 2002. – 757 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболецкая. – М.: Энергоиздат.-1982.-504 с.
4. Справочник по электрическим машинам/ Под ред. И.П. Копылова; Б.К. Клокова.- М.: Энергоатомиздат.-1988.- 456 с.
5. Калинин В.С. и Карельская Н.Т. Курсовое проектирование по технологии электромашиностроения: Учеб. Пособие для техникумов.-М.: Высшая школа.-1989.- 360 с.
6. Кацман М.М. Расчет и конструирование электрических машин: Обмоточные данные. Ремонт.Модеонизация:Справочник.-М.:Энергоатомиздат.-1984.-360 с.
7. Петриков Л.В. Корначенко Г.Н. Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт.Модеонизация: Справочник.-М.:Энергоатомиздат.-1988.-496с.
8. Автоматизированное проектирование электрических машин: Учеб. Пособие для вузов / Под. Ред. Ю.Б. Бородулина.-М.:Высшая школа.-1989.-309с.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к курсовому проекту по дисциплине «Электрические машины»: с., разделов , рис. , табл. , перечень ссылок из 8 наименований.

Объектом курсового проекта явился асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, предназначенный для применения во всех отраслях промышленности Украины.

Предметом проекта явились расчетные параметры асинхронного двигателя, характеризующие основные размеры его деталей и конструктивное устройство, электрические, магнитные и механические нагрузки деталей, позволяющие изготовить работающую и надежную электрическую машину.

Целью курсового проекта явилась разработка конструкции двигателя, соответствующую исходным данным, учитывающей состояние современного отечественного и зарубежного электромашиностроения, требования к конструктивному исполнению и технологии промышленного изготовления машин, обеспечивающей высокую степень использования активных и конструктивных материалов, минимальную стоимость двигателя при заданной долговечности.

В курсовом проекте разработано: конструктивное исполнение деталей, их линейные размеры при заданных или рассчитанных нагрузках; выбраны материалы для отдельных деталей; просчитаны электрические, магнитные и механические нагрузки материала всех деталей, которые сопоставлены с предельно допустимыми; сделаны вентиляционный и тепловой расчеты машины; проверена степень использования электрической энергии при ее преобразовании в механическую энергию.

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК, АСИНХРОННЫЙ КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ РОТОР, КОНСТРУКЦИЯ, РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ.**

ВВЕДЕНИЕ.....	
1 ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И ЭЛЕКТРОМАГИТНЫХ НАГРУЗОК.....	
1.1 Выбор внешнего и внутреннего диаметра статора, электромагнитных нагрузок, длины статора и ротора.....	
1.2 Расчет конструктивных параметров обмотки статора.....	
1.3 Уточнение ранее принятых параметров статора.....	
1.4 Форма и размеры паза статора, заполнение паза.....	
1.5 Расчет конструктивных параметров ротора.....	
1.6 Форма и размеры паза ротора, заполнение паза.....	
1.7 Уточнение ранее принятых параметров ротора.....	
1.8 Расчет размеров короткозамыкающего кольца.....	
2 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ МАШИНЫ.....	
2.1 Эскиз магнитной цепи, линейные размеры участков.....	
2.2 Расчет магнитных напряжений на участках магнитной цепи.....	
2.3 Определение намагничивающего тока.....	
3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ФАЗЫ МАШИНЫ.....	
3.1 Расчет активного сопротивления фазы обмотки статора.....	
3.2 Расчет активного сопротивления фазы короткозамкнутого ротора.....	
3.3 Расчет индуктивного сопротивления фазы обмотки статора.....	
3.4 Расчет индуктивного сопротивления обмотки ротора.....	
3.5 Определение индуктивного сопротивления взаимной индукции.....	
3.6 Относительные значения найденных параметров.....	
4 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.....	
4.1 Электрические потери мощности в обмотках статора и ротора.....	
4.2 Основные потери мощности в стали сердечника статора.....	
4.3 Расчет добавочных потерь мощности в стали машины.....	
4.4 Механические и вентиляционные потери мощности.....	
4.5 Добавочные потери мощности при номинальной нагрузке.....	
4.6 Определение коэффициента полезного действия, тока холостого хода двигателя.....	
5 РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ.....	
5.1 Исходные параметры для расчета характеристик.....	
5.2 Последовательность расчета необходимых параметров.....	
5.3 Расчет параметров для номинальной нагрузки на валу.....	
5.4 Расчет и построение пусковых характеристик двигателя.....	
6 ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ.....	
6.1 Выбор системы вентиляции.....	
6.2 определение основных параметров вентиляционной системы.....	
7 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МАШИНЫ.....	
7.1 Перепад температуры по толщине изоляции обмотки статора.....	
7.2 Превышение температуры сердечника и обмотки статора.....	

7.3 Превышение температуры сердечника и обмотки ротора.....	
8 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИИ.....	
8.1 Расчет вала машины на жесткость и прочность.....	
8.2 Расчет и выбор подшипников.....	
ВЫВОДЫ.....	
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	
РЕЦЕНЗИЯ.....	
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ  
АКАДЕМИЯ**

Кафедра Электротехника и электрооборудование

**Пояснительная записка**

к курсовому проекту по дисциплине « Электрические машины»

Тема проекта:

**«АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ  
РОТОРОМ»**

Руководитель проекта:

доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование», кандидат технических наук В.Т. Климченков

« \_\_ » 2003

Разработчик проекта:

студент группы ЭСА-99-1зу заочного факультета

« \_\_ » 2003

Краматорск, 2003