

## Исходные данные для проектирования

Номинальный режим работы - продолжительный (S1).

Номинальная отдаваемая мощность  $P_2$ , Вт:  $P_2 = 14000$

Номинальное напряжение  $U$ , В:  $U = 220$

Номинальная частота вращения  $n$ , об/мин:  $n = 750$

Предел регулирования частоты вращения вверх от номинальной ослаблением поля главных полюсов  $n_{\max}$ , об/мин:

$$n_{\max} = 1500$$

Предел регулирования частоты вращения вниз от номинальной изменением напряжения на якоре  $n_{\min}$ , об/мин:

$$n_{\min} = 250$$

Кратковременная перегрузка по току  $k_{\text{пр}} = I_{\max}/I_{\text{н}}$ :  $k_{\text{пр}} = 1.5$

Род возбуждения - параллельное со стабилизирующей последовательной обмоткой.

Источник и условия питания - тиристорные преобразователи с коэффициентом пульсации не более 1,1.

Степень защиты от внешних воздействий - закрытое исполнение (IP22).

Способ охлаждения - с наружным обдувом вентилятором, расположенным на валу двигателя (ICO1).

Исполнение по способу монтажа - с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с одним горизонтально направленным цилиндрическим концом вала (IM1001).

Климатические условия и категория размещения - в закрытых отапливаемых и вентилируемых помещениях с умеренным климатом (У4).

Форма выступающего конца вала - цилиндрическая.

Способ соединения с приводным механизмом - упругая муфта.

## 1. Магнитная цепь машины. Размеры, конфигурация, материал.

### Главные размеры

Высота оси вращения  $h$ , мм:  $h = 225$

Минимально допустимое расстояние от нижней части корпуса машины до опорной плоскости лап  $h_1$ , мм:

$$h_1 = 7$$

Максимально допустимый наружный диаметр корпуса  $D_{\text{корп}}$ , мм:

$$D_{\text{корп}} = 2 \cdot (h - h_1) \quad D_{\text{корп}} = 436$$

Максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора  $D_{\text{н1}}$ , мм:

$$D_{\text{н1}} = D_{\text{корп}} \quad D_{\text{н1}} = 436$$

Максимально допустимый внутренний диаметр сердечника статора  $D_{\text{н2}}$ , мм:

$$D_{\text{н2}} = 230$$

Коэффициенты  $k_H$  и  $k_T$  для определения расчётной мощности:  $k_H = 0.915$

$$k_m = 0.978$$

Коэффициент полезного действия  $\eta$ , о. е.:  $\eta = 0.805$

Расчётная мощность  $P_{\text{расч}}$ , Вт:  $P_{\text{расч}} = \frac{k_H \cdot k_m \cdot P_2}{\eta} \quad P_{\text{расч}} = 1.556 \times 10^4$

### Изоляция класса нагревостойкости F

Предварительные значения электромагнитных нагрузок  $A_{32}$ , А/см и  $B_{3\delta}$ , Тл:

$$A_{32} = 165$$

$$B_{3\delta} = 0.615$$

Расчётный коэффициент полюсной дуги  $\alpha$ :  $\alpha = 0.62$

Расчётная длина сердечника якоря  $l_{\text{ря}}$ , мм:  $l_{\text{ря}} = \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot P_{\text{расч}}}{D_{\text{н2}}^2 \cdot \pi \cdot A_{32} \cdot B_{3\delta} \cdot \alpha}$

$$l_{\text{ря}} = 380.324$$

Определяем отношение  $\lambda = l_{\text{ря}}/D_{\text{H2}}$ :  $\lambda = \frac{l_{\text{ря}}}{D_{\text{H2}}} \quad \lambda = 1.654$

Допустимое значение  $\lambda_{\text{max}}$ :  $\lambda_{\text{max}} = 1.34$

### Сердечник якоря

Принимаем для сердечника якоря: сталь 2013, толщина 0,5 мм, листы сердечника якоря лакированные; форма пазов полузакрытая овальная; род обмотки двухслойная выпная; скос пазов на 1/2 зубцового деления.

Коэффициент заполнения сердечника сталью  $k_c$ :  $k_c = 0.98$

Припуск на сборку сердечника по ширине паза  $b_c$ , мм:  $b_c = 0.2$

Припуск на сборку сердечника по высоте паза  $h_c$ , мм:  $h_c = 0.2$

Конструктивная длина сердечника якоря  $l_2$ , мм:  $l_2 = 152$

Эффективная длина сердечника якоря при отсутствии радиальных каналов  $l_{\text{эф}}$ , мм:

$$l_{\text{эф}} = k_c \cdot l_2 \quad l_{\text{эф}} = 148.96$$

Предварительное значение внутреннего диаметра листов якоря  $D_2$ , мм:  $D_2 = 50$

### Сердечник главных полюсов

Принимаем для сердечника главных полюсов сталь 3411, толщина 1 мм, листы сердечников полюсов неизолированные; компенсационная обмотка не требуется; вид воздушного зазора между главными полюсами и якорем эксцентричный.

Коэффициент заполнения сердечника главных полюсов сталью  $k_{\text{сгп}}$ :  $k_{\text{сгп}} = 0.95$

Число пар полюсов  $p$ :  $p = 4$

Воздушные зазоры у оси  $\delta_1$  и у края  $\delta_2$  полюса соответственно, мм:  $\delta_1 = 1.07$

$$\delta_2 = 3.2$$

Эквивалентный воздушный зазор  $\delta$ , мм:  $\delta = 0.75 \cdot \delta_1 + 0.25 \cdot \delta_2 \quad \delta = 1.603$

Длина сердечника полюса  $l_{\text{п}}$ , мм:  $l_{\text{п}} = l_2 \quad l_{\text{п}} = 152$

Полюсное деление  $\tau$ , мм:  $\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{H2}}}{2 \cdot p} \quad \tau = 90.321$

Расчётная ширина полюсной дуги  $b_{\text{нп}}$ , мм:  $b_{\text{нп}} = \alpha \cdot \tau \quad b_{\text{нп}} = 55.999$

Предварительная магнитная индукция в сердечнике полюса  $B_n$ , Тл:  $B_n = 1.45$

Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре  $\Phi$ , Вб:

$$\Phi = B_n \cdot b_{\text{нп}} \cdot l_2 \cdot 10^{-6} \quad \Phi = 5.235 \times 10^{-3}$$

Эффективная длина сердечника полюса  $l_{\text{эфп}}$ , мм:  $l_{\text{эфп}} = k_c \cdot l_n \quad l_{\text{эфп}} = 148.96$

Коэффициент магнитного рассеяния  $\sigma$ :  $\sigma = 1.2$

Ширина сердечника полюса  $b_{\text{сп}}$ , мм:  $b_{\text{сп}} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{l_{\text{эфп}} \cdot B_n} \quad b_{\text{сп}} = 29.083$

Ширина уступа полюса, предназначенная для упора обмотки возбуждения при её креплении  $b_{\text{уп}}$ , мм:

$$b_{\text{уп}} = 0.1 \cdot b_{\text{сп}} \quad b_{\text{уп}} = 2.908$$

Высота от уступа полюса до воздушного зазора  $h_{\text{уп}}$ , мм:  $h_{\text{уп}} = \frac{(b_{\text{нп}} - b_{\text{сп}}) \cdot B_n}{1.67 \cdot B_n}$

$$h_{\text{уп}} = 6.836$$

### Сердечники добавочных полюсов

Принимаем для сердечников добавочных полюсов сталь марки 3411 толщиной 1 мм, листы сердечников полюсов неизолированные.

Коэффициент заполнения сердечника добавочных полюсов сталью  $k_{\text{сдп}}$ :

$$k_{\text{сдп}} = 0.98$$

Число пар добавочных полюсов  $p_d$ , мм:  $p_d = 2$

Длина наконечника добавочного полюса  $l_{\text{нд}}$ , мм:  $l_{\text{нд}} = l_2 \quad l_{\text{нд}} = 152$

Длина сердечника добавочного полюса  $l_d$ , мм:  $l_d = l_{\text{нд}} - 2.5 \quad l_d = 142$

Ширина сердечника добавочного полюса  $b_d$ , мм:  $b_d = 19$

Величина воздушного зазора  $\delta_d$ , мм:  $\delta_d = 3.3$

## Станина

Принимаем монолитную станину из стали марки Ст3.

Длина станины  $l_{1\text{ст}}$ , мм:  $l_{1\text{см}} = l_2 + 0.5 \cdot \tau$   $l_{1\text{см}} = 197.16$

Предварительная магнитная индукция в станине  $B_{1\text{ст}}$ , Тл:  $B_{1\text{см}} = 1.15$

Высота станины  $h_{1\text{ст}}$ , мм:  $k_{\text{см}} = 1$   $h_{1\text{см}} = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot k_{\text{см}} \cdot l_{1\text{см}} \cdot B_{1\text{см}}} \cdot 10^6$   $h_{1\text{см}} = 13.853$

Магнитная индукция в месте распространения магнитного потока в станине при входе его в главный полюс  $B_{\text{сп}}$ , Тл:

$$B_{\text{сп}} = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot (l_n + b_{\text{сп}}) \cdot h_{1\text{см}}} \cdot 10^6 \quad B_{\text{сп}} = 1.252$$

Внутренний диаметр станины  $D_{1\text{ст}}$ , мм:  $D_{1\text{см}} = D_{\text{н1}} - 2 \cdot h_{1\text{см}}$   $D_{1\text{см}} = 408.295$

Высота главного полюса  $h_{\text{п}}$ , мм:  $h_{\text{п}} = \frac{D_{1\text{см}} - 4 \cdot \delta - D_{\text{н2}}}{2}$   $h_{\text{п}} = 85.942$

Высота добавочного полюса  $h_{\text{д}}$ , мм:  $h_{\text{д}} = \frac{D_{1\text{см}} - 4 \cdot \delta_{\text{д}} - D_{\text{н2}}}{2}$   $h_{\text{д}} = 82.547$

## 2. Обмотка якоря.

**Тип и шаги обмотки якоря. Количество витков обмотки, коллекторных пластин, пазов.**

Ток якоря двигателя  $I_2$ , А:  $I_2 = \frac{k_{\text{м}} \cdot P_2}{\eta \cdot U}$   $I_2 = 77.312$

Принимаем волновую обмотку из провода ПЭТ - 155.

Количество параллельных ветвей  $a$ :  $a = 2$

Предварительное количество витков обмотки якоря  $w_2$ :  $w_2 = \frac{30 \cdot k_{\text{н}} \cdot U}{\left(\frac{2 \cdot p}{a}\right) \cdot \pi \cdot \Phi}$   
 $w_2 = 384.544$

Количество секций, расположенных по ширине паза  $N_{\text{ш}}$ :  $N_{\text{ш}} = 3$

Предварительное количество витков в секции  $w_{c2}$ :  $w_{c2} = \frac{1.8 \cdot w_2}{D_{H2}}$   $w_{c2} = 3.009$   
 $w_{c2} = 3$

Предварительное количество пазов якоря  $Z_2$ :  $Z_2 = \frac{w_2}{N_{\psi} \cdot w_{c2}}$   $Z_2 = 42.727$   
 $Z_2 = 31$

Количество коллекторных пластин  $K$ :  $K = N_{\psi} \cdot Z_2$   $K = 93$

Зубцовое деление по наружному диаметру якоря  $t_2$ , мм:  $t_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{Z_2}$   $t_2 = 23.309$

Наружный диаметр коллектора  $D_K$ , мм:  $D_K = 0.77 \cdot D_{H2}$   $D_K = 177.1$

Коллекторное деление  $t_K$ , мм:  $t_K = \frac{\pi \cdot D_K}{K}$   $t_K = 5.983$

Максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами  $U_{\text{кmax}}$  при коэффициенте искажения поля  $k_{\psi}$ , В:

$$k_{\psi} = 1.7 \quad U_{\text{кmax}} = \frac{2 \cdot p \cdot U \cdot k_{\psi}}{\alpha \cdot K} \quad U_{\text{кmax}} = 51.89 \quad U_{\text{кmax}} = 50$$

Уточняем число витков обмотки якоря  $w_{y2}$ :  $w_{y2} = N_{\psi} \cdot K$   $w_{y2} = 279$

Количество эффективных проводников в пазу  $N_{\text{пэф}}$ :  $N_{\text{пэф}} = 2 \cdot N_{\psi} \cdot w_{c2}$   
 $N_{\text{пэф}} = 18$

Ток в пазу  $I_{\text{п}2\Sigma}$ , А:  $I_{\text{п}2\Sigma} = \frac{N_{\text{пэф}} \cdot I_2}{a}$   $I_{\text{п}2\Sigma} = 695.81$

Уточнённая линейная нагрузка  $A_{2y}$ , А/см:  $A_{2y} = \frac{20 \cdot w_{y2} \cdot I_2}{\pi \cdot D_{H2} \cdot a}$   $A_{2y} = 298.521$

Примечание. Полученное значение  $A_{2y}$  не должно отличаться от принятого при определении главных размеров  $A_{y2}$  более чем на 10 %; в ином случае следует применять обмотку якоря с изменённым количеством витков.

Коэффициент укорочения обмотки  $\varepsilon$ :  $\varepsilon = \frac{1}{4}$

Реальные пазы  $Z_p$ :  $Z_p = \frac{Z_2}{2 \cdot p} + \varepsilon$   $Z_p = 4.125$

Элементарные пазы  $Z_3$ :  $Z_3 = \frac{K - 1}{p}$   $Z_3 = 23$

$$\text{Шаг по реальным пазам } y_n: \quad y_n = Z_p \quad y_n = 4.125$$

$$\text{Первый частичный шаг } y_1: \quad y_1 = N_{\text{ш}} \cdot y_n \quad y_1 = 12.375$$

$$\text{Второй частичный шаг } y_2: \quad y_2 = Z_3 - y_1 \quad y_2 = 10.625$$

$$\text{Высота паза якоря } h_{\text{п}2}, \text{ мм:} \quad h_{\text{п}2} = 25$$

$$\text{Высота спинки якоря } h_{\text{с}2}, \text{ мм:} \quad h_{\text{с}2} = \frac{D_{\text{H}2} - U_{\text{кmax}}}{2} - h_{\text{п}2} \quad h_{\text{с}2} = 65$$

### Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами

Предварительная магнитная индукция в спинке якоря  $B_{\text{с}2}$ , Тл:

$$B_{\text{с}2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot l_{\text{эф}} \cdot h_{\text{с}2}} \quad B_{\text{с}2} = 0.27 \quad B_{\text{с}2\text{мадл}} = 1.15$$

Предварительная магнитная индукция в зубцах статора  $B_{\text{з}2\text{табл}}$ , Тл:  $B_{\text{з}2\text{мадл}} = 1.65$

$$\text{Ширина зубца } b_{\text{з}2}, \text{ мм:} \quad b_{\text{з}2} = \frac{t_2 \cdot B_{\text{з}} \delta}{k_{\text{с}} \cdot B_{\text{з}2\text{мадл}}} \quad b_{\text{з}2} = 8.865$$

$$\text{Высота шлица паза } h_{\text{ш}2}, \text{ мм:} \quad h_{\text{ш}2} = 0.8$$

$$\text{Радиус паза больший } r_1, \text{ мм:} \quad r_1 = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{ш}2}) - Z_2 \cdot b_{\text{з}2}}{2 \cdot (Z_2 + \pi)} \quad r_1 = 6.484$$

$$\text{Радиус паза меньший } r_2, \text{ мм:} \quad r_2 = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{п}2}) - Z_2 \cdot b_{\text{з}2}}{2 \cdot (Z_2 - \pi)} \quad r_2 = 5.217$$

Проверка ширины зубцов  $b_{\text{з}1}$  и  $b_{\text{з}2}$ , мм:

$$b_{\text{з}1} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{ш}2} - 2 \cdot r_1)}{Z_2 - 2 \cdot r_1} \quad b_{\text{з}1} = 37.532$$

$$b_{\text{з}2} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{п}2} + 2 \cdot r_2)}{Z_2 - 2 \cdot r_2} \quad b_{\text{з}2} = 29.09$$

$$\text{Расстояние между центрами радиусов } h_{1\text{ц}}, \text{ мм:} \quad h_{1\text{ц}} = h_{\text{п}2} - h_{\text{ш}2} - r_1 - r_2$$

$$h_{1\text{ц}} = 12.499$$

Площадь поперечного сечения паза в штампе  $S_{п2ш}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{п2ш} = \frac{\pi}{2} \cdot (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) \cdot h_{1ц} \quad S_{п2ш} = 255.034$$

Площадь поперечного сечения паза в свету  $S_{п2с}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{п2с} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[ \left( r_1 - \frac{b_c}{2} \right)^2 + \left( r_2 - \frac{b_c}{2} \right)^2 \right] + (r_1 + r_2) \cdot h_{1ц} \quad S_{п2с} = 251.39$$

Односторонняя толщина корпусной изоляции  $b_{ик}$  при  $h = 160$  мм, мм:  $b_{ук} = 0.5$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции  $S_{ик}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{ук} = b_{ук} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_1 + \pi \cdot r_2 + 2 \cdot h_{1ц}) \quad S_{ук} = 41.063$$

Площадь поперечного сечения клина и прокладок  $S_{кп}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{кп} = 5 \cdot r_1$

$$S_{кп} = 32.418$$

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой  $S_{п2о}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{п2о} = S_{п2с} - S_{ук} - S_{кп} \quad S_{п2о} = 177.908$$

Количество элементарных проводов в эффективном  $c$ :  $c = 2$

Предварительный диаметр провода с изоляцией  $d_{и}$ , мм:  $d_u = \sqrt{\frac{0.75 \cdot S_{п2о}}{c \cdot N_{пзф}}}$

$$d_u = 1.925 \quad d_u = 1.485$$

Диаметр провода без изоляцией  $d_{ни}$ , мм:  $d_{ну} = 1.4$

Коэффициент заполнения паза  $k_{п}$ :  $k_{п} = \frac{N_{пзф} \cdot c \cdot d_u^2}{S_{п2о}}$   $k_{п} = 0.446$

Примечание. Значения  $k_{п}$  выше 0,75 не следует применять, так как при этом обмотка укладывается в пазы под значительным механическим усилием, способным повредить изоляцию, что может повлечь за собой короткое замыкание витков или пробой обмотки на корпус. При малых значениях  $k_{п}$  (менее 0,65), в связи с увеличением плотности тока в пазу, увеличивается температура обмотки. Это может потребовать удлинения сердечников статора и ротора. Кроме того, для уплотнения обмотки в пазу потребуются утолщённые клинья.

Площадь поперечного сечения неизолированного провода  $S_{\text{нпр}}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{\text{нпр}} = 1.539$

Плотность тока в обмотке  $J_2$ , А/мм<sup>2</sup>:  $J_2 = \frac{l_2}{a \cdot c \cdot S_{\text{нпр}}}$   $J_2 = 12.559$

Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в обмотке  $A_{2y} J_2$ , А<sup>2</sup>/(см\*мм<sup>2</sup>):

$$A_{2y} \cdot J_2 = 3.749 \times 10^3$$

Среднее зубцовое деление якоря  $t_{\text{ср}}$ , мм:  $t_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{н2}} - h_{\text{п2}})}{Z_2}$   $t_{\text{ср}} = 20.775$

Средняя ширина секции обмотки  $b_{\text{ср}}$ , мм:  $b_{\text{ср}} = t_{\text{ср}} \cdot y_{\text{п}}$   $b_{\text{ср}} = 85.697$

Средняя длина одной лобовой части секции  $l_{\text{л2}}$ , мм:  $l_{\text{л2}} = (0.7 + 0.4 \cdot p) \cdot b_{\text{ср}} + 15$   
 $l_{\text{л2}} = 212.103$

Средняя длина витка обмотки  $l_{\text{ср2}}$ , мм:  $l_{\text{ср2}} = 2 \cdot (l_2 + l_{\text{л2}})$   $l_{\text{ср2}} = 728.207$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С  $r_{20}$ , Ом:  $r_{20} = \frac{w_{y2} \cdot l_{\text{ср2}}}{57 \cdot a^2 \cdot c \cdot S_{\text{нпр}} \cdot 10^3}$   
 $r_{20} = 0.29$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С  $r_{20\text{ое}}$ , о.е.:  $r_{20\text{ое}} = \frac{r_{20} \cdot l_2}{U}$   
 $r_{20\text{ое}} = 0.102$

Длина вылета лобовой части обмотки  $l_{\text{в2}}$ , мм:  $l_{\text{в2}} = (0.12 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{\text{ср}} + 7.5$   
 $l_{\text{в2}} = 65.774$

Ширина шлица паза  $b_{\text{ш2}}$ , мм:  $b_{\text{ш2}} = d_{\text{ш}} + 2 \cdot b_{\text{шк}} + 0.3$   $b_{\text{ш2}} = 2.785$

### 3. Обмотка добавочных полюсов.

Поперечная МДС якоря  $F_2$ , А:  $F_2 = \frac{w_{y2} \cdot l_2}{2 \cdot p \cdot a}$   $F_2 = 1.348 \times 10^3$

Предварительное количество витков катушки добавочного полюса у некомпенсированной машины  $w_{\text{д}}$ :

$$k_{\partial H} = 1.25 \quad a_{\partial} = 1 \quad w_{\partial} = \frac{k_{\partial H} \cdot F_2 \cdot a_{\partial}}{l_2} \quad w_{\partial} = 21.797 \quad w_{\partial} = 44$$

Уточнённая МДС катушки  $F_d$ , А:  $F_{\partial} = \frac{w_{\partial} \cdot l_2}{a_{\partial}} \quad F_{\partial} = 3.402 \times 10^3$

Уточнённое отношение МДС некомпенсированной машины:  $k_{\partial H} = \frac{F_{\partial}}{F_2}$   
 $k_{\partial H} = 2.523$

Принимаем предварительно плотность тока в обмотке  $J_d$ , А/мм<sup>2</sup>:  $J_{\partial} = 3.3$

Предварительная площадь поперечного сечения проводника  $S_d$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{\partial} = \frac{l_2}{a_{\partial} \cdot J_{\partial}}$   
 $S_{\partial} = 23.428$

Принимаем провод ПЭТП - 155.

Предварительно больший размер меди (по ширине катушки)  $b_{dk}$ , мм:  $b_{\partial k} = 4$

Предварительно меньший размер меди (по высоте катушки)  $a_{dk}$ , мм:  $a_{\partial k} = 2.36$

Площадь поперечного сечения проводника  $S_{dk}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{\partial k} = 8.891$

Уточнённая плотность тока в обмотке  $J_{уд}$ , А/мм<sup>2</sup>:  $J_{y\partial} = \frac{l_2}{a_{\partial k} \cdot S_{\partial k}} \quad J_{y\partial} = 3.685$

Предварительная ширина катушки  $b_{kd}$ , мм:  $b_{k\partial} = 0.12 \cdot D_{H2} \quad b_{k\partial} = 27.6$

Средняя длина витка катушки из изолированных проводников  $l_{срд}$ , мм:

$$l_{срд} = 2 \cdot (l_{\partial} + b_{\partial}) + \pi \cdot (b_{k\partial} + 5) \quad l_{срд} = 424.416$$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С  $r_d$ , Ом:  $r_{\partial} = \frac{2 \cdot \rho_{\partial} \cdot w_{\partial} \cdot l_{срд}}{57 \cdot a_{\partial k} \cdot S_{\partial k} \cdot 10^3}$   
 $r_{\partial} = 0.062$

#### 4. Стабилизирующая последовательная обмотка главных полюсов.

Принимаем размеры и марку провода такими же, как и у обмотки добавочных полюсов.

МДС стабилизирующей обмотки на полюс  $F_{\text{пос}}$ , А:  $F_{\text{пос}} = 0.15 \cdot F_2$

$$F_{\text{пос}} = 202.22$$

Количество витков в катушке  $w_{\text{пос}}$ :  $a_{\text{пос}} = 1$   $w_{\text{пос}} = \frac{F_{\text{пос}} \cdot a_{\text{пос}}}{I_2}$   $w_{\text{пос}} = 2.616$

Уточнённая количество витков в катушке  $w_{\text{пос}}$ :  $w_{\text{пос}} = 5$

Уточнённое значение МДС обмотки  $F_{\text{пос}}$ , А:  $F_{\text{пос}} = \frac{w_{\text{пос}} \cdot I_2}{a_{\text{пос}}}$   $F_{\text{пос}} = 386.561$

Ширина катушки  $b_{\text{кпос}}$ , мм:  $b_{\text{кпос}} = 0.1 \cdot D_{H2}$   $b_{\text{кпос}} = 23$

Средняя длина витка многослойной катушки из изолированных проводов  $l_{\text{кпос}}$ , мм:

$$l_{\text{кпос}} = 2 \cdot (l_n + b_{\text{сп}}) + \pi \cdot (b_{\text{кпос}} + 5) \quad l_{\text{кпос}} = 450.131$$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С  $r_{\text{пос}}$ , Ом:  $r_{\text{пос}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot w_{\text{пос}} \cdot l_{\text{кпос}}}{57 \cdot a_{\text{пос}}^2 \cdot S_{\text{ок}} \cdot 10^3}$   
 $r_{\text{пос}} = 0.036$

#### 5. Характеристика намагничивания машины.

Сопротивление обмотки якорной цепи двигателя, приведённое к стандартной рабочей температуре  $r_{2\Sigma}$ , Ом:

$$m_m = 1.38 \quad r_{2\Sigma} = m_m \cdot (r_{20} + r_{\partial} + r_{\text{пос}}) \quad r_{2\Sigma} = 0.535$$

Уточнённая ЭДС при номинальном режиме работы двигателя  $E_2$ , В:  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$

$$E_2 = U - I_2 \cdot m_m \cdot r_{2\Sigma} - \Delta U_{\text{щ}} \quad E_2 = 160.949$$

Уточнённый магнитный поток  $\Phi_y$ , Вб:  $\Phi_y = \frac{30 \cdot E_2}{\left(\frac{2 \cdot \rho}{a}\right) \cdot n \cdot w_{y2}}$   $\Phi_y = 5.769 \times 10^{-3}$

Площадь поперечного сечения в воздушном зазоре  $S_{\delta}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{\delta} = b_{\text{нп}} \cdot l_{\text{нп}}$   
 $S_{\delta} = 8.512 \times 10^3$

Уточнённая магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_{y\delta}$ , Тл:  $B_{y\delta} = \frac{\Phi_{\text{у}} \cdot 10^6}{S_{\delta}}$   
 $B_{y\delta} = 0.678$

Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря  $k_{\delta 2}$ :

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш}2}}{t_2 - b_{\text{ш}2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{\text{ш}2}}} \quad k_{\delta 2} = 1.032 \quad k_{\delta} = k_{\delta 2} \quad k_{\delta} = 1.032$$

МДС воздушного зазора  $F_{\delta}$ , А:  $F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{y\delta} \cdot 10^3$   $F_{\delta} = 896.486$

Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов  $S_{32}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{32} = \frac{Z_2}{2 \cdot p} \cdot \alpha \cdot b_{32} \cdot l_{\text{эф}}$   
 $S_{32} = 1.041 \times 10^4$

Утонённая магнитная индукция в зубцах  $B_{32}$ , Тл:  $B_{32} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{32}}$   $B_{32} = 0.503$

Напряжённость магнитного поля в зубцах  $H_{32}$ , А/см:  $H_{32} = 0.79$

Средняя длина пути магнитного потока  $l_{32}$ , мм:  $l_{32} = h_{\text{п}2} - 0.2 \cdot r_2$   $l_{32} = 23.957$

МДС для зубцов  $F_{32}$ , А:  $F_{32} = 0.1 \cdot H_{32} \cdot l_{32}$   $F_{32} = 1.893$

Площадь поперечного сечения спинки якоря  $S_{\text{с}2}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{\text{с}2} = h_{\text{с}2} \cdot l_{\text{эф}}$   
 $S_{\text{с}2} = 9.682 \times 10^3$

Уточнённая магнитная индукция в спинке якоря  $B_{\text{с}2}$ , Тл:  $B_{\text{с}2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{\text{с}2}}$   
 $B_{\text{с}2} = 0.27$

Напряжённость магнитного поля в спинке якоря  $H_{\text{с}2}$ , А/см:  $H_{\text{с}2} = 0.89$

Средняя длина пути магнитного потока  $l_{c2}$ , мм:  $l_{c2} = \frac{\pi \cdot (D_2 + h_{c2})}{4 \cdot p} + \frac{h_{c2}}{2}$   
 $l_{c2} = 55.08$

МДС для спинки якоря  $F_{c2}$ , А:  $F_{c2} = 0.1 \cdot H_{c2} \cdot l_{c2}$   $F_{c2} = 4.902$

Площадь поперечного сечения сердечника полюса  $S_n$ , мм<sup>2</sup>:  $S_n = b_{cn} \cdot l_{эфn}$   
 $S_n = 4.332 \times 10^3$

Уточнённая магнитная индукция в сердечнике полюса  $B_n$ , Тл:  $B_n = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{S_n}$   
 $B_n = 1.45$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике полюса  $H_n$ , А/см:  $H_n = 6$

Средняя длина пути магнитного потока машины  $l_{cn}$ , мм:  $l_{cn} = l_n$   $l_{cn} = 152$

МДС для сердечника полюса  $F_{cn}$ , А:  $F_{cn} = 0.1 \cdot H_n \cdot l_{cn}$   $F_{cn} = 91.2$

Эквивалентный зазор в стыке между главным полюсом и станиной  $\delta_{n1}$ , мм:

$$\delta_{n1} = 2 \cdot l_n \cdot 10^{-4} + 0.1 \quad \delta_{n1} = 0.13$$

МДС для зазора  $F_{n1}$ , А:  $F_{n1} = 0.8 \cdot \delta_{n1} \cdot B_n \cdot 10^3$   $F_{n1} = 151.264$

Площадь поперечного сечения станины  $S_{c1}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{c1} = h_{1cm} \cdot l_{1cm}$   $S_{c1} = 2.731 \times 10^3$

Уточнённая магнитная индукция в станине  $B_{c1}$ , Тл:  $B_{c1} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{c1}}$   $B_{c1} = 1.15$

Напряжённость магнитного поля в станине  $H_{c1}$ , А/см:  $H_{c1} = 11.9$

Средняя длина пути магнитного потока  $l_{c1}$ , мм:  $l_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{1cm} + h_{1cm})}{4 \cdot p} + \frac{h_{1cm}}{2}$   
 $l_{c1} = 89.815$

МДС для станины  $F_{c1}$ , А:  $F_{c1} = 0.1 \cdot H_{c1} \cdot l_{c1}$   $F_{c1} = 106.88$

Суммарная МДС магнитной цепи  $F_{\Sigma}$ , А:  $F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{32} + F_{сн} + F_{п1} + F_{с1}$   
 $F_{\Sigma} = 1.248 \times 10^3$

Коэффициент насыщения магнитной цепи  $k_{нас}$ :  $k_{нас} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta} + F_{п1}} \quad k_{нас} = 1.191$

## 6. Параллельная обмотка главных полюсов.

Коэффициент  $k_{p2} = f(F_2/F_{\Sigma})$  при  $F_2/F_{\Sigma} = 0,868$  выбирается из графика:

$$\frac{F_2}{F_{\Sigma}} = 1.08 \quad k_{p2} = 0.16$$

Размагничивающее действие  $F_{p2}$ , А:  $F_{p2} = k_{p2} \cdot F_2 \quad F_{p2} = 215.701$

МДС обмотки параллельного возбуждения главных полюсов  $F_{п}$ , А:

$$F_{п} = F_{\Sigma} + F_{p2} - F_{нос} \quad F_{п} = 1.077 \times 10^3$$

Предварительная ширина катушки обмотки параллельного возбуждения  $b_{кп}$ , мм:

$$b_{кп} = 0.12 \cdot D_{H2} \quad b_{кп} = 27.6$$

Средняя длина витка обмотки  $l_{срп}$ , мм:  $b_3 = 1.25 \quad b_u = 1.25$

$$l_{срп} = 2 \cdot (l_{п} + b_{сн}) + \pi \cdot (b_{кп} + 2 \cdot b_3 + 2 \cdot b_u) \quad l_{срп} = 464.582$$

Предварительное поперечное сечение провода  $S$ , мм<sup>2</sup>:  $m = 1.38$

$$S = \frac{1.15 \cdot m \cdot 2 \cdot p \cdot F_{п} \cdot l_{срп}}{57 \cdot U \cdot 10^3} \quad S = 0.507 \quad S = 0.273$$

Уточнённый коэффициент запаса  $k_{зап}$ :  $k_{зап} = \frac{1.15 \cdot 0.273}{0.283} \quad k_{зап} = 1.109$

Номинальный диаметр неизолированного провода  $d$ , мм:  $d = 0.59$

Номинальный диаметр изолированного провода  $d_{из}$ , мм:  $d_{из} = 0.645$

Предварительное значение плотности тока в обмотке  $J_{п}$ , А/мм<sup>2</sup>:  $J_{п} = 3.45$

Предварительное количество витков одной катушки  $w_n$ : 
$$w_n = \frac{k_{зап} \cdot F_n}{J_n \cdot S}$$
$$w_n = 1.268 \times 10^3$$

Принимаем круглый провод марки ПЭТ - 155

Уточнённое (округлённое) количество витков одной катушки  $w_n$ : 
$$w_n = 1400$$

Уточнённое значение плотности тока в обмотке  $J_n$ , А/мм<sup>2</sup>: 
$$J_n = \frac{k_{зап} \cdot F_n}{w_n \cdot S}$$
$$J_n = 3.126$$

Сопротивление обмотки при  $t = 20^\circ \text{C}$   $r_n$ , Ом: 
$$r_n = \frac{2 \cdot \rho \cdot w_n \cdot l_{срн}}{57 \cdot S \cdot 10^3}$$
$$r_n = 334.382$$

Максимальный ток обмотки  $I_{n\max}$ , А: 
$$I_{n\max} = \frac{U}{m \cdot r_n}$$
$$I_{n\max} = 0.477$$

Максимальная МДС  $F_{n\max}$ , А: 
$$F_{n\max} = I_{n\max} \cdot w_n$$
$$F_{n\max} = 667.465$$

## 7. Размещение обмоток главных и добавочных полюсов.

### Параллельная обмотка главных полюсов.

Принимаем трапецеидальную форму поперечного сечения катушки с раскладкой витков по средней ширине  $N_{шк} = 34$ , по высоте  $N_{БК} = 42$ .

Ширина катушки  $b_{кг}$ , мм: 
$$N_{шк} = 34 \quad b_{к2} = 1.05 \cdot N_{шк} \cdot d_{у3} \quad b_{к2} = 23.027$$
$$b_{к2} = 23$$

Высота катушки  $h_{кг}$ , мм: 
$$N_{БК} = 42 \quad h_{к2} = 1.05 \cdot N_{БК} \cdot d_{у3} \quad h_{к2} = 28.445$$
$$h_{к2} = 29$$

### Стабилизирующая последовательная обмотка.

Ширина катушки  $b_{кс}$ , мм: 
$$b_{кс} = 1.05 \cdot b_{к0} \quad b_{кс} = 28.98 \quad b_{кс} = 20$$

Высота катушки  $h_{кс}$ , мм: 
$$h_{кс} = 1.05 \cdot a_{0к} \quad h_{кс} = 2.478 \quad h_{кс} = 3$$

### Обмотка добавочных полюсов.

Ширина катушки  $b_{дп}$ , мм:  $b_{дп} = 1.05 \cdot b_{кд}$   $b_{дп} = 28.98$   $b_{дп} = 20$

Высота катушки  $h_{дп}$ , мм:  $N_{\delta} = 8$   $h_{дп} = 1.05 \cdot N_{\delta} \cdot a_{дк}$   $h_{дп} = 19.824$   
 $h_{дп} = 20$

### 8. Щётки и коллектор.

Ширина щётки  $t_{щ}$ , мм:  $t_{щ} = 10$

Длина щётки  $a_{щ}$ , мм:  $a_{щ} = 12.5$

Число перекрытых щёткой коллекторных делений  $\gamma$ :  $\gamma = \frac{t_{щ}}{t_k}$   $\gamma = 1.672$

Укорочение шага по коллектору  $\varepsilon_k$ :  $\varepsilon = \frac{K}{2 \cdot p} - y_1$   $\varepsilon = -0.75$

Ширина зоны коммутации  $b_{зк}$ , мм:  $b_{зк} = \frac{\left( \gamma + N_{щ} - \frac{a}{p} + |\varepsilon| \right) \cdot t_k \cdot D_{H2}}{D_k}$   
 $b_{зк} = 38.238$

Отношение ширины зоны коммутации к расстоянию между соседними наконечниками главных полюсов  $k_{зк}$ :

$k_{зк} = \frac{b_{зк}}{\tau - b_{сн}}$   $k_{зк} = 0.624$

Контактная плотность одной щётки  $S_{щ}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{щ} = t_{щ} \cdot a_{щ}$   $S_{щ} = 125$

Необходимая контактная площадь всех щёток  $S_{щ\Sigma}$ , мм<sup>2</sup>:  $J = 8$   $S_{щ\Sigma} = \frac{2 \cdot I_2 \cdot 10^2}{J}$   
 $S_{щ\Sigma} = 1.933 \times 10^3$

Количество щёток на одном бражете  $N_{щ\delta}$ :  $N_{щ\delta} = \frac{S_{щ\Sigma}}{2 \cdot p \cdot S_{щ}}$   $N_{щ\delta} = 1.933$   
 $N_{щ\delta} = 2$

Уточнённая контактная площадь всех щёток  $S_{ущ\Sigma}$ , мм<sup>2</sup>:  $S_{ущ\Sigma} = N_{щ\delta} \cdot 2 \cdot p \cdot S_{щ\Sigma}$   
 $S_{ущ\Sigma} = 3.092 \times 10^4$

Уточнённая плотность тока под щётками  $J_{щ}$ , А/см<sup>2</sup>:  $J_{щ} = \frac{2 \cdot l_2 \cdot 10^2}{S_{yщ\Sigma}} \quad J_{щ} = 0.5$

Активная длина коллектора  $l_k$ , мм:  $l_k = N_{щ\delta} \cdot (a_{щ} + 8) + 10 \quad l_k = 51$

Окружная скорость коллектора при номинальной частоте вращения  $v_k$ , м/с:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60000} \quad v_k = 6.955$$

## 9. Коммутационные параметры.

Проводимость рассеяния овального полузакрытого паза  $\lambda_{п2}$ :  $v_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000}$

$$v_2 = 9.032 \quad \lambda_{п2} = 0.6 \cdot \frac{h_{п2}}{2 \cdot r_2} + \frac{h_{щ2}}{b_{щ2}} + \frac{l_{п2}}{l_2} + \frac{2.5 \cdot 10^6}{w_{с2} \cdot l_2 \cdot A_{2y} \cdot v_2} \cdot \frac{a}{2 \cdot p} \quad \lambda_{п2} = 3.629$$

Максимальная окружная скорость якоря  $v_{2max}$ , м/с:  $v_{2max} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n_{max}}{60000}$

$$v_{2max} = 18.064$$

Реактивная ЭДС коммутирующих секций  $E_p$ , В:

$$E_p = 2 \cdot w_{с2} \cdot l_2 \cdot A_{2y} \cdot v_{2max} \cdot \lambda_{п2} \cdot 10^{-7} \quad E_p = 1.785$$

Среднее значение магнитной индукции в зазоре под добавочным полюсом  $B_{\delta d}$ , Тл:

$$B_{\delta d} = \lambda_{п2} \cdot A_{2y} \cdot 10^{-4} \quad B_{\delta d} = 0.108$$

Коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря  $k_{\delta d2}$ :

$$k_{\delta d2} = 1 + \frac{b_{щ2}}{t_2 - b_{щ2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{щ2}}} \quad k_{\delta d2} = 1.032$$

Общий коэффициент воздушного зазора  $k_{\delta d}$ :

$$k_{\delta d} = k_{\delta d2} \quad k_{\delta d} = 1.032$$

Необходимый зазор под добавочным полюсом  $\delta_d$ , мм:

$$\delta_d = \frac{F_\Sigma - F_2}{0.08 \cdot B_{\delta d} \cdot k_{\delta d}} \cdot 10^{-4} \quad \delta_d = -1.123$$

Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом при номинальной нагрузке  $\Phi_{\delta d}$ , Вб:

$$\Phi_{\delta d} = b_{zk} \cdot l_{nd} \cdot B_{\delta d} \cdot 10^{-6} \quad \Phi_{\delta d} = 6.296 \times 10^{-4}$$

Магнитный поток в зазоре под добавочным полюсом при перегрузке  $\Phi_{\delta dp}$ , Вб:

$$l_{2max} = 1.5 \cdot l_2 \quad l_{2max} = 115.968 \quad \Phi_{\delta dp} = \Phi_{\delta d} \cdot \frac{l_{2max}}{l_2} \quad \Phi_{\delta dp} = 9.444 \times 10^{-4}$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при номинальной нагрузке  $\Phi_d$ , Вб:

$$\Phi_d = \sigma \cdot \Phi_{\delta d} \quad \Phi_d = 7.555 \times 10^{-4}$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при перегрузке  $\Phi_{dp}$ , Вб:

$$\Phi_{dp} = \Phi_d \cdot \frac{l_{2max}}{l_2} \quad \Phi_{dp} = 1.133 \times 10^{-3}$$

Площадь сечения сердечника добавочного полюса  $S_{dp}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{dp} = b_d \cdot l_d \cdot k_{c dp}$$

$$S_{dp} = 2.644 \times 10^3$$

Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса при перегрузке  $B_{dp}$ , Тл:

$$B_{dp} = \frac{\Phi_{dp}}{S_{dp}} \cdot 10^6 \quad B_{dp} = 0.429$$

Расчётная магнитная индукция на участках станины, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов  $B_{c1}$ , Тл:

$$B_{c1} = \frac{\sigma \cdot \Phi_y + \Phi_{dp}}{2 \cdot S_{c1}} \cdot 10^6 \quad B_{c1} = 1.475$$

Расчётная магнитная индукция на участках спинки якоря, в которых суммируются магнитные потоки главных и добавочных полюсов  $B_{c2}$ , Тл:

$$B_{c2} = \frac{\Phi_y + \Phi_{\partial n}}{2 \cdot S_{c2}} \cdot 10^6 \quad B_{c2} = 0.356$$

## 10. Номинальный режим.

Масса стали зубцов якоря с овальными полузакрытыми пазами  $m_{32}$ , кг:

$$m_{32} = 7.8 \cdot Z_2 \cdot b_{32} \cdot \left( h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot l_{\text{эф}} \cdot 10^{-6} \quad m_{32} = 13.464$$

Магнитные потери в зубцах  $p_{32}$ , Вт:  $p_1 = 2.5 \quad p_{32} = 2.3 \cdot p_1 \cdot B_{32} \cdot m_{32}$

$$p_{32} = 38.929$$

Масса стали спинки якоря  $m_{c2}$ , кг:

$$m_{c2} = 7.8 \cdot \left[ \frac{\pi \cdot \left[ (D_{H2} - 2 \cdot h_{n2})^2 - D_2^2 \right]}{4} - 0.785 \cdot v_k \cdot D_k \right] \cdot l_{\text{эф}} \cdot 10^{-6}$$

$$m_{c2} = 26.162$$

Магнитные потери в спинке якоря  $p_{c2}$ , Вт:  $p_{c2} = 2.3 \cdot p_1 \cdot B_{c2}^2 \cdot m_{c2}$

$$p_{c2} = 10.993$$

Суммарные магнитные потери в стали  $p_{c\Sigma}$ , Вт:  $p_{c\Sigma} = p_{32} + p_{c2} \quad p_{c\Sigma} = 49.922$

Потери на трение щёток о коллектор  $p_{\text{тщ}}$ , Вт:  $p_{\text{тщ}} = 5 \cdot S_{\text{ущ}\Sigma} \cdot v_k \cdot 10^{-3}$

$$p_{\text{тщ}} = 1.075 \times 10^3$$

Потери на трение подшипников, трение о воздух и на вентиляцию машины со степенью защиты IP44 и способом охлаждения ICO141  $p_{\text{пв}}$ , Вт:

$$p_{\text{пв}} = 2200 \cdot D_{H2}^{3.6} \cdot 10^{-9} \quad p_{\text{пв}} = 699.267$$

Суммарные механические потери  $p_{\text{мх}\Sigma}$ , Вт:  $p_{\text{мх}\Sigma} = p_{\text{тщ}} + p_{\text{пв}} \quad p_{\text{мх}\Sigma} = 1.775 \times 10$

Добавочные потери  $p_{доб}$ , Вт:  $p_{доб} = 0.01 \cdot \frac{P_2}{\eta}$   $p_{доб} = 173.913$

Электромагнитная мощность двигателя  $P_{эм}$ , Вт:  $P_{эм} = P_2 + p_{с\Sigma} + p_{мх\Sigma} + p_{доб}$

$$P_{эм} = 1.6 \times 10^4$$

ЭДС якоря двигателя  $E_H$ , В:  $E_H = \frac{U - \Delta U_{щ}}{2} + \sqrt{\left(\frac{U - \Delta U_{щ}}{2}\right)^2 - P_{эм} \cdot m_m \cdot r_{2\Sigma}}$

$$E_H = 117.673$$

Ток якоря двигателя  $I_{2H}$ , А:  $I_{2H} = \frac{P_{эм}}{E_H}$   $I_{2H} = 135.957$

Уточнённый ток двигателя  $I_{yH}$ , А:  $I_{yH} = I_{2H} + I_{nmax}$   $I_{yH} = 136.433$

Подводимая мощность двигателя  $P_1$ , Вт:  $P_1 = U \cdot I_{yH}$   $P_1 = 3.002 \times 10^4$

Суммарные потери в двигателе  $p_{\Sigma}$ , Вт:  $p_{\Sigma} = P_1 - P_2$   $p_{\Sigma} = 1.602 \times 10^4$

Уточнённый КПД двигателя  $\eta_y$ , о.е.:  $\eta_y = \frac{P_1 - p_{\Sigma}}{P_1}$   $\eta_y = 0.466$

Уточнённый магнитный поток  $\Phi_{y\partial}$ , Вб:  $\Phi_{y\partial} = \frac{30 \cdot E_H}{\frac{2 \cdot p}{n} \cdot n \cdot w_2}$   $\Phi_{y\partial} = 3.06 \times 10^{-3}$

Суммарная МДС магнитной цепи  $F_{\Sigma}$ , А:  $F_{\Sigma} = 1.248 \times 10^3$

Размагничивающее действие МДС якоря двигателя  $F_{p2}$ , А:  $F_{p2} = 215.701$

МДС последовательной стабилизирующей обмотки двигателя  $F_{пос}$ , А:

$$F_{пос} = 386.561$$

Необходимая МДС параллельной обмотки главных полюсов двигателя  $F_{Hп}$ , А:

$$F_{Hп} = F_{\Sigma} + F_{p2} - F_{пос} \quad F_{Hп} = 1.077 \times 10^3$$

Момент вращения на валу двигателя  $M_2$ , Нм:  $M_2 = 9.55 \cdot \frac{P_2}{n}$   $M_2 = 178.267$

## 11. Регулирование частоты вращения.

### Регулирование частоты вращения вверх.

Магнитный поток при наибольшей частоте вращения  $\Phi_{\min}$ , Вб: 
$$\Phi_{\min} = \frac{\Phi_{y\partial} \cdot n}{n_{\max}}$$
$$\Phi_{\min} = 1.53 \times 10^{-3}$$

МДС при минимальном магнитном потоке  $F_{\Sigma \min}$ , Вб, (по характеристике намагничивания):

$$F_{\Sigma \min} = 573$$

Минимальный ток возбуждения  $I_{b \min}$ , А: 
$$I_{b \min} = \frac{F_{\Sigma \min}}{w_n} \quad I_{b \min} = 0.409$$

Максимальная величина регулирующего сопротивления  $r_p$ , Ом:

$$r_p = 1.3 \left( \frac{U}{I_{b \min}} - r_n \right) \quad r_p = 264.082$$

Частота вращения при холостом ходе  $n_{0 \max}$ , об/мин: 
$$n_{0 \max} = 30 \cdot \frac{(U - \Delta U_{\text{щ}})}{\left( \frac{2 \cdot p}{a} \right) \cdot \Phi_{\min} \cdot w_2}$$
$$n_{0 \max} = 2.779 \times 10^3$$

### Регулирование частоты вращения вниз.

Допустимый момент вращения на валу при наименьшей частоте вращения двигателя с самовентиляцией  $M_{2д}$ , Нм:

$$M_{2\partial} = 0.81 \cdot M_2 \quad M_{2\partial} = 144.396$$

Магнитный поток при  $n_{\min}$  у двигателя с самовентиляцией  $\Phi_{2д}$ , Вб:

$$\Phi_{2\partial} = \sqrt{\frac{M_{2\partial}}{M_2}} \cdot \Phi_{y\partial} \quad \Phi_{2\partial} = 2.754 \times 10^{-3}$$

Ток якоря при  $n_{\min}$  у двигателя с самовентиляцией  $I_{2д}$ , А: 
$$I_{2\partial} = \sqrt{\frac{M_{2\partial}}{M_2}} \cdot I_{yn}$$
$$I_{2\partial} = 122.79$$

$$\text{ЭДС при } n_{\min} E_{2 \min}, \text{ В: } E_{2 \min} = \frac{\Phi_{2\partial} \cdot \frac{2 \cdot p}{a} \cdot n_{\min} \cdot w_2}{30} \quad E_{2 \min} = 35.302$$

$$\text{Напряжение на якоре при } n_{\min} U_{\min}, \text{ В: } U_{\min} = E_{2 \min} + I_{2\partial} \cdot m_m \cdot r_{2\Sigma} + \Delta U_{\text{щ}} \\ U_{\min} = 127.913$$

$$\text{Размагничивающая МДС реакции якоря } F_{\text{ря}}, \text{ А: } F_{\text{ря}} = \frac{I_{2\partial}}{I_{yH}} \cdot F_{p2} \quad F_{\text{ря}} = 194.131$$

$$\text{МДС стабилизирующей обмотки } F_{\text{со}}, \text{ А: } F_{\text{со}} = \frac{I_{2\partial}}{I_{yH}} \cdot F_{\text{пос}} \quad F_{\text{со}} = 347.905$$

МДС обмотки возбуждения главных полюсов  $F_{\text{п min}}, \text{ А:}$

$$F_{\text{п min}} = F_{\Sigma \text{ min}} + F_{\text{ря}} - F_{\text{со}} \quad F_{\text{п min}} = 419.226$$

$$\text{Ток обмотки возбуждения } I_{\text{п min}}, \text{ А: } I_{\text{п min}} = \frac{F_{\text{п min}}}{w_{\text{п}}} \quad I_{\text{п min}} = 0.299$$

Максимальная величина регулирующего сопротивления  $r_{\text{p max}}, \text{ Ом:}$

$$r_{\text{p max}} = 1.3 \cdot \left( \frac{U}{I_{\text{п min}}} - r_{\text{п}} \right) \quad r_{\text{p max}} = 520.397$$

## 12. Тепловой и вентиляционный расчёты.

### Тепловой расчёт.

#### Потери в обмотках и контактах щёток.

$$\text{Потери в обмотке якоря } p_{\text{м2}}, \text{ Вт: } p_{\text{м2}} = I_{2\partial}^2 \cdot m_m \cdot r_{2\partial} \quad p_{\text{м2}} = 7.385 \times 10^3$$

$$\text{Потери в обмотке добавочных полюсов } p_{\text{мд}}, \text{ Вт: } p_{\text{мд}} = I_{2\partial}^2 \cdot m_m \cdot r_{\partial} \quad p_{\text{мд}} = 1.593 \times 10^3$$

Потери в стабилизирующей последовательной обмотке  $p_{\text{м пос}}, \text{ Вт:}$

$$p_{\text{м пос}} = I_{2\partial}^2 \cdot m_m \cdot r_{\text{пос}} \quad p_{\text{м пос}} = 906.261$$

$$\text{Потери в обмотке главных полюсов } p_{\text{мп}}, \text{ Вт: } p_{\text{мп}} = U \cdot I_{\text{п max}} \quad p_{\text{мп}} = 104.887$$

$$\text{Потери в контактах щёток } p_{\text{к щ}}, \text{ Вт: } p_{\text{к щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{yH} \quad p_{\text{к щ}} = 272.867$$

### Обмотка якоря.

Условная поверхность охлаждения активной части якоря  $S_{п2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{п2} = \pi \cdot D_{H2} \cdot l_2 \qquad S_{п2} = 1.098 \times 10^5$$

Условный периметр поперечного сечения овального полузакрытого паза  $\Pi_2$ , мм:

$$\Pi_2 = \pi \cdot (r_1 + r_2) + 2 \cdot h_{1ц} \qquad \Pi_2 = 61.757$$

Условная поверхность охлаждения пазов  $S_{yn2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{yn2} = Z_2 \cdot \Pi_2 \cdot l_2$$
$$S_{yn2} = 2.91 \times 10^5$$

Условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в якоре  $S_{л2}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{л2} = 2 \cdot \pi \cdot D_{H2} \cdot l_{б2} \qquad S_{л2} = 9.505 \times 10^4$$

Условная поверхность охлаждения машины  $S_{маш}$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_{маш} = \pi \cdot D_{H1} \cdot (l_2 + 2 \cdot l_{б2})$$
$$S_{маш} = 3.884 \times 10^5$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и потерь в стали, отнесённых к поверхности охлаждения активной части якоря  $p_{yn2}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$p_{yn2} = \frac{\left( \frac{p_{м2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{ср2}} + p_{с\sigma} \right)}{S_{п2}} \qquad p_{yn2} = 0.029$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки, отнесённых к поверхности охлаждения пазов  $p_{ynп2}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$p_{ynп2} = \frac{\frac{p_{м2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{ср2}}}{S_{yn2}} \qquad p_{ynп2} = 0.011$$

Удельный тепловой поток от потерь в лобовых частях обмотки, отнесённых к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки  $p_{yl2}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$p_{yl2} = \frac{p_{m2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{cp2} S_{l2}} \quad p_{yl2} = 0.032$$

Окружная скорость якоря при номинальной частоте вращения  $v_{2H}$ , м/с:

$$v_{2H} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000} \quad v_{2H} = 9.032$$

Превышение температуры поверхности активной части якоря над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{п2}$ , °C:

$$\alpha_2 = 8.6 \cdot 10^{-5} \quad \Delta t_{п2} = \frac{p_{yn2}}{\alpha_2} \quad \Delta t_{п2} = 331.674$$

Перепад температуры в изоляции паза и проводов  $\Delta t_{ип2}$ , °C:  $\lambda_{зкб} = 16 \cdot 10^{-5}$

$$\lambda_{1зкб} = 12 \cdot 10^{-4} \quad \Delta t_{ун2} = p_{yn2} \cdot \left( \frac{b_{ук}}{\lambda_{зкб}} + \frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda_{1зкб}} \right) \quad \Delta t_{ун2} = 46.018$$

Превышение температуры поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{л2}$ , °C:

$$\Delta t_{л2} = \frac{p_{yl2}}{\alpha_2} \quad \Delta t_{л2} = 377.132$$

Перепад температуры в изоляции катушек и проводов лобовых частей обмотки  $\Delta t_{ил2}$ , °C:

$$\Delta t_{ул2} = p_{yl2} \cdot \left( \frac{b_{ук}}{\lambda_{зкб}} + \frac{h_{п2}}{8 \cdot \lambda_{1зкб}} \right) \quad \Delta t_{ул2} = 185.816$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{o2}$ , °C:

$$\Delta t_{o2} = (\Delta t_{п2} + \Delta t_{ун2}) \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}} + (\Delta t_{л2} + \Delta t_{ул2}) \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}} \quad \Delta t_{o2} = 392.684$$

Сумма потерь, передаваемая воздуху внутри машины,  $p_{\Sigma}$  Вт:

$$p_{\Sigma} = p_{\Sigma 2} + k_n \cdot (p_{\Sigma 0} + p_{\Sigma \text{пос}} + p_{\Sigma \text{мн}}) + p_{\Sigma \text{кш}} + p_{\Sigma \text{тщ}} + 0.1 \cdot p_{\Sigma 0} + p_{\Sigma \Sigma} + p_{\Sigma 00}$$

$$p_{\Sigma} = 1.019 \times 10^4$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_{\Sigma}$ , °C:

$$\Delta t_{\Sigma} = \frac{p_{\Sigma}}{\alpha_2 \cdot S_{\Sigma \text{маш}}} \quad \Delta t_{\Sigma} = 305.045$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_2$ , °C:

$$\Delta t_2 = \Delta t_{02} + \Delta t_{\Sigma} \quad \Delta t_2 = 697.728$$

### Обмотка добавочных полюсов.

Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированных проводов  $S_{\text{ипд}}$ , мм<sup>2</sup>:

$$\Pi_{\partial} = 12 + 0.33 \cdot D_{\text{H2}} \quad \Pi_{\partial} = 87.9 \quad S_{\text{ипд}} = 2 \cdot p_{\partial} \cdot l_{\text{ср}\partial} \cdot \Pi_{\partial} \quad S_{\text{ипд}} = 1.492 \times 10^5$$

Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесённых к поверхности охлаждения обмотки  $p_{\text{уд}}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$k = 0.7 \quad p_{\text{уд}} = \frac{k \cdot p_{\Sigma \partial}}{S_{\text{ипд}}} \quad p_{\text{уд}} = 7.473 \times 10^{-3}$$

Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки  $\Delta t_{\text{нд}}$ , °C:

$$\alpha_1 = 4.55 \cdot 10^{-5} \quad \Delta t_{\text{нд}} = \frac{p_{\text{уд}}}{\alpha_1} \quad \Delta t_{\text{нд}} = 164.245$$

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции многослойных катушек из изолированных проводов  $\Delta t_{\text{ид}}$ , °C:

$$b_{\text{нд}} = 0.2 \quad \Delta t_{\text{ид}} = p_{\text{уд}} \cdot \left( \frac{b_{\text{нд}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_{\text{кд}}}{8 \cdot \lambda_{1\text{экв}}} \right) \quad \Delta t_{\text{ид}} = 30.827$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри ма-

шины  $\Delta t_{вд}$ , °C:

$$\Delta t_{бд} = \Delta t_{нд} + \Delta t_{уд} \quad \Delta t_{бд} = 195.072$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_{д}$ , °C:

$$\Delta t_{д} = \Delta t_{бд} + \Delta t_{б} \quad \Delta t_{д} = 500.117$$

### **Параллельная и независимая обмотка главных полюсов.**

Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки  $\Pi_H$ , мм:

$$\Pi_H = 37 + 0.14 \cdot D_{H2} \quad \Pi_H = 69.2$$

Условная поверхность охлаждения всех катушек  $S_H$ , мм<sup>2</sup>:

$$S_H = 2 \cdot p \cdot l_{срп} \cdot \Pi_H$$

$$S_H = 2.572 \times 10^5$$

Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесённых к поверхности охлаждения обмотки  $p_{уH}$ , Вт/мм<sup>2</sup>:

$$p_{уH} = \frac{k \cdot p_{мп}}{S_H} \quad p_{уH} = 2.855 \times 10^{-4}$$

Превышение температуры наружной поверхности охлаждения обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{нп}$ , °C:

$$\Delta t_{нп} = \frac{p_{уH}}{\alpha_1} \quad \Delta t_{нп} = 6.274$$

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции обмотки  $\Delta t_{ин}$ , °C:

$$\Delta t_{ин} = p_{уH} \cdot \left( \frac{b_c}{\lambda_{экв}} + \frac{b_{к2}}{8 \cdot \lambda_{1экв}} \right) \quad \Delta t_{ин} = 1.041$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{\text{овв}}, ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_{\text{овв}} = \Delta t_{\text{нп}} + \Delta t_{\text{уп}} \quad \Delta t_{\text{овв}} = 7.315$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного охлаждающего воздуха  $\Delta t_{\text{овн}}, ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_{\text{овн}} = \Delta t_{\text{овв}} + \Delta t_{\text{вд}} \quad \Delta t_{\text{овн}} = 202.387$$

### Коллектор.

Условная поверхность охлаждения коллектора  $S_K, \text{мм}^2$ :  $S_K = \pi \cdot D_K \cdot l_K$   
 $S_K = 2.838 \times 10^4$

Удельный тепловой поток от потерь на коллекторе, отнесённых к поверхности охлаждения обмотки  $p_K, \text{Вт/мм}^2$ :

$$p_K = \frac{P_{\text{кщ}} + P_{\text{мщ}}}{S_K} \quad p_K = 0.048$$

Превышение температуры коллектора над температурой воздуха внутри машины  $\Delta t_{\text{кв}}, ^\circ\text{C}$ :

$$\alpha_K = 18 \cdot 10^{-5} \quad \Delta t_{\text{кв}} = \frac{p_K}{\alpha_K} \quad \Delta t_{\text{кв}} = 263.97$$

Превышение температуры коллектора над температурой наружного охлаждающего воздуха у машины со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141  $\Delta t_{\text{кн}}, ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_{\text{кн}} = \Delta t_{\text{кв}} + \Delta t_{\text{в}} \quad \Delta t_{\text{кн}} = 569.014$$

## Вентиляционный расчёт.

Коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса машины в зависимости от его диаметра и частоты вращения  $k_2$ :

$$k_2 = 2.2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n}{1000}\right)^3} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{корп}}}{100}} \quad k_2 = 3.702$$

Теплоёмкость воздуха  $c_B$ , Дж/(°С\*м³):  $c_B = 1100$

Необходимый расход воздуха у машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141  $V_B$ , м³/с:

$$V_B = \frac{k_2 \cdot p_{\Sigma}}{c_B \cdot \Delta t_{B\partial}} \quad V_B = 0.276$$

Расход воздуха наружного вентилятора  $V_{\text{вен}}$ , м³/с:

$$V_{\text{вен}} = 1.25 \cdot \frac{n}{1000} \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2} \quad V_{\text{вен}} = 0.777$$

Напор воздуха  $H$ , Па:  $H = 12.3 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100}\right)^2 \quad H = 131.523$

### 13. Масса и динамические показатели.

Масса проводов обмотки якоря  $m_{M2}$ , кг:  $m_{M2} = 8.9 \cdot w_{y2} \cdot l_{cp2} \cdot c \cdot S_{нпр} \cdot 10^{-6}$   
 $m_{M2} = 5.566$

Масса проводов обмотки добавочных полюсов  $m_{M\partial}$ , кг:

$$m_{M\partial} = 8.9 \cdot 2 \cdot p_{\partial} \cdot w_{\partial} \cdot l_{cp\partial} \cdot S_{\partial k} \cdot 10^{-6} \quad m_{M\partial} = 5.911$$

Масса проводов стабилизирующей последовательной обмотки  $m_{M\text{пос}}$ , кг:

$$m_{M\text{пос}} = 8.9 \cdot 2 \cdot p \cdot w_{\text{пос}} \cdot l_{k\text{пос}} \cdot S_{\partial k} \cdot 10^{-6} \quad m_{M\text{пос}} = 1.425$$

Масса проводов параллельной или независимой обмотки главных полюсов  $m_{M\text{п}}$ , кг:

$$m_{M\text{п}} = 8.9 \cdot 2 \cdot p \cdot w_{\text{п}} \cdot l_{cp\text{п}} \cdot S \cdot 10^{-6} \quad m_{M\text{п}} = 12.643$$

Масса меди коллектора  $m_{\text{МК}}$ , кг:  $m_{\text{МК}} = 5.25 \cdot D_K^{1.5} \cdot l_K \cdot 10^{-5}$   $m_{\text{МК}} = 6.31$

Суммарная масса проводов обмоток и меди коллектора  $m_{\text{МΣ}}$ , кг:

$$m_{\text{МΣ}} = m_{\text{М2}} + m_{\text{МД}} + m_{\text{МПОС}} + m_{\text{МП}} + m_{\text{МК}} \quad m_{\text{МΣ}} = 31.854$$

Масса стали зубцов сердечника якоря  $m_{\text{з2}}$ , кг:  $m_{\text{з2}} = 13.464$

Масса стали спинки сердечника якоря  $m_{\text{с2}}$ , кг:  $m_{\text{с2}} = 26.162$

Масса стали сердечников главных полюсов некомпенсированной машины  $m_{\text{СП}}$ , кг:

$$m_{\text{СП}} = 8.5 \cdot 2 \cdot \rho \cdot l_{\text{ЭФП}} \cdot b_{\text{СП}} \cdot h_{\text{П}} \cdot 10^{-6} \quad m_{\text{СП}} = 25.318$$

Масса стали сердечников добавочных полюсов  $m_{\text{сД}}$ , кг:

$$m_{\text{сД}} = 7.8 \cdot 2 \cdot \rho_{\text{Д}} \cdot k_{\text{сДП}} \cdot l_{\text{Д}} \cdot b_{\text{Д}} \cdot h_{\text{Д}} \cdot 10^{-6} \quad m_{\text{сД}} = 6.81$$

Масса стали станины  $m_{\text{сст}}$ , кг:  $m_{\text{сст}} = 6.05 \cdot l_{\text{1сст}} \cdot (D_{\text{H1}}^2 - D_{\text{1сст}}^2) \cdot 10^{-6}$   
 $m_{\text{сст}} = 27.902$

Суммарная масса активной стали  $m_{\text{сΣ}}$ , кг:

$$m_{\text{сΣ}} = m_{\text{з2}} + m_{\text{с2}} + m_{\text{СП}} + m_{\text{сД}} + m_{\text{сст}} \quad m_{\text{сΣ}} = 99.655$$

Масса изоляции машины  $m_{\text{и}}$ , кг:  $m_{\text{и}} = (3.8 \cdot D_{\text{H1}}^{1.5} + 0.2 \cdot D_{\text{H1}} \cdot l_2) \cdot 10^{-4}$   
 $m_{\text{и}} = 4.785$

Масса конструкционных материалов  $m_{\text{К}}$ , кг:  $A = 0.7$   $B = 1.1$

$$m_{\text{К}} = (A \cdot D_{\text{H1}}^2 + B \cdot D_{\text{H1}}^3) \cdot 10^{-6} \quad m_{\text{К}} = 91.303$$

Масса машины  $m_{\text{маш}}$ , кг:  $m_{\text{МОШ}} = m_{\text{МΣ}} + m_{\text{сΣ}} + m_{\text{и}} + m_{\text{К}}$   $m_{\text{МОШ}} = 227.597$

Динамический момент инерции якоря  $J_{\text{ид}}$ , кг\*м<sup>2</sup>:

$$J_{\text{уд}} = 0.6 \cdot D_{\text{H2}}^4 \cdot (l_2 + 0.3 \cdot D_{\text{H2}} + 0.75 \cdot P_2) \cdot 10^{-12} \quad J_{\text{уд}} = 18.001$$

Электромеханическая постоянная времени якоря  $T_{\text{м}}$ , с:

$$T_{\text{м}} = \frac{J_{\text{уд}} \cdot m_{\text{м}} \cdot r_{2\Sigma}}{91 \cdot \frac{E_2}{n}}$$

$$T_{\text{м}} = 0.68$$