

Исходные данные для проектирования

Номинальный режим работы - продолжительный (S1).

Номинальная отдаваемая мощность P_2 , Вт: $P_2 = 19000$

Номинальное напряжение U , В: $U = 220$

Номинальная частота вращения n , об/мин: $n = 1000$

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

$$n_{\max} = 2000$$

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

$$n_{\min} = 350$$

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: $h = 200$

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:

$$D_{\text{корп}} = 2 \cdot (h - h_1) \quad D_{\text{корп}} = 386$$

Максимально допустимый наружный диаметр сердечника статора $D_{\text{Н1}}$, мм:

$$D_{\text{Н1}} = D_{\text{корп}} \quad D_{\text{Н1}} = 386$$

Максимально допустимый внутренний диаметр сердечника статора $D_{\text{Н2}}$, мм:

$$D_{\text{Н2}} = 202$$

Коэффициенты $k_{\text{Н}}$ и $k_{\text{Т}}$ для определения расчётной мощности: $k_{\text{Н}} = 0.915$

$$k_{\text{Т}} = 0.978$$

Коэффициент полезного действия η , о. е.:

$$\eta = 0.835$$

Расчётная мощность $P_{\text{расч}}$, Вт: $P_{\text{расч}} = \frac{k_{\text{Н}} \cdot k_{\text{Т}} \cdot P_2}{\eta} \quad P_{\text{расч}} = 2.036 \times 10^4$

Изоляция класса нагревостойкости F

Предварительные значения электромагнитных нагрузок $A_{\text{э2}}$, А/см и $B_{\text{эδ}}$, Тл:

$$A_{\text{э2}} = 165$$

$$B_{\text{эδ}} = 0.615$$

Расчётный коэффициент полюсной дуги α :

$$\alpha = 0.62$$

Расчётная длина сердечника якоря $l_{\text{ря}}$, мм: $l_{\text{ря}} = \frac{6.1 \cdot 10^7 \cdot P_{\text{расч}}}{D_{\text{Н2}}^2 \cdot n \cdot A_{\text{э2}} \cdot B_{\text{эδ}} \cdot \alpha}$

$$l_{\text{ря}} = 483.842$$

Определяем отношение $\lambda = l_{\text{ря}}/D_{\text{н2}}$: $\lambda = \frac{l_{\text{ря}}}{D_{\text{н2}}} \quad \lambda = 2.395$

Допустимое значение λ_{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 : $p = 2$

Воздушные зазоры у оси δ_1 и у края δ_2 полюса соответственно, мм: $\delta' = 1.07$

$$\delta'' = 3 \cdot \delta' \quad \delta'' = 3.21$$

Эквивалентный воздушный зазор δ , мм: $\delta_{\text{вв}} = 0.75 \cdot \delta' + 0.25 \cdot \delta'' \quad \delta = 1.605$

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

Полюсное деление τ , мм: $\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{н2}}}{2 \cdot p} \quad \tau = 158.65$

Расчётная ширина полюсной дуги $b_{\text{нп}}$, мм: $b_{\text{нп}} = \alpha \cdot \tau \quad b_{\text{нп}} = 98.363$

Предварительная магнитная индукция в сердечнике полюса B_{Π} , Тл: $B_{\Pi} = 1.45$

Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре Φ , Вб:

$$\Phi = B_{\delta} \cdot b_{\Pi} \cdot l_2 \cdot 10^{-6} \quad \Phi = 9.195 \times 10^{-3}$$

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

Коэффициент магнитного рассеяния σ : $\sigma = 1.2$

Ширина сердечника полюса $b_{\text{сп}}$, мм: $b_{\text{сп}} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{l_{\text{эфп}} \cdot B_{\Pi}} \quad b_{\text{сп}} = 51.085$

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

$$b_{\text{уп}} = 0.1 \cdot b_{\text{сп}} \quad b_{\text{уп}} = 5.109$$

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

$$h_{\text{уп}} = 12.007$$

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: $l_d = l_{\text{нд}} - 2 \cdot 5 \quad l_d = 142$

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

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

Станина

Принимаем монолитную станину из стали марки Ст3.

Длина станины $l_{1\text{ст}}$, мм: $l_{1\text{ст}} = l_2 + 0.5 \cdot \tau$ $l_{1\text{ст}} = 231.325$

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

Высота станины $h_{1\text{ст}}$, мм: $k_{\text{ст}} = 1$ $h_{1\text{ст}} = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot k_{\text{ст}} \cdot l_{1\text{ст}} \cdot B_{1\text{ст}}} \cdot 10^6$ $h_{1\text{ст}} = 20.739$

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

$$B_{\text{сп}} = \frac{\sigma \cdot \Phi}{2 \cdot (l_{\text{п}} + b_{\text{сп}}) \cdot h_{1\text{ст}}} \cdot 10^6 \quad B_{\text{сп}} = 1.31$$

Внутренний диаметр станины $D_{1\text{ст}}$, мм: $D_{1\text{ст}} = D_{\text{н1}} - 2 \cdot h_{1\text{ст}}$ $D_{1\text{ст}} = 344.523$

Высота главного полюса $h_{\text{п}}$, мм: $h_{\text{п}} = \frac{D_{1\text{ст}} - 4 \cdot \delta - D_{\text{н2}}}{2}$ $h_{\text{п}} = 68.051$

Высота добавочного полюса $h_{\text{д}}$, мм: $h_{\text{д}} = \frac{D_{1\text{ст}} - 4 \cdot \delta_{\text{д}} - D_{\text{н2}}}{2}$ $h_{\text{д}} = 64.661$

2. Обмотка якоря.

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

Ток якоря двигателя I_2 , А: $I_2 = \frac{k_{\text{т}} \cdot P_2}{\eta \cdot U}$ $I_2 = 101.154$

Принимаем волновую обмотку из провода ПЭТ - 155.

Количество параллельных ветвей a : $a = 4$

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

$w_2 = 656.77$ $w_2 = 657$

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

Предварительное количество витков в секции w_{c2} : $w_{c2} = \frac{1.8 \cdot w_2}{D_{H2}}$ $w_{c2} = 5.854$
 $w_{c2} = 6$

Предварительное количество пазов якоря Z_2 : $Z_2 = \frac{w_2}{N_{ш} \cdot w_{c2}}$ $Z_2 = 36.5$
 $Z_2 = 36$

Количество коллекторных пластин K : $K = N_{ш} \cdot Z_2$ $K = 108$

Зубцовое деление по наружному диаметру якоря t_2 , мм: $t_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{Z_2}$ $t_2 = 17.628$

Наружный диаметр коллектора D_K , мм: $D_K = 0.77 \cdot D_{H2}$ $D_K = 155.54$

Коллекторное деление t_K , мм: $t_K = \frac{\pi \cdot D_K}{K}$ $t_K = 4.524$

Максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами U_{kmax} при коэффициенте искажения поля $k_{и}$, В:

$k_{и} = 1.7$ $U_{kmax} = \frac{2 \cdot p \cdot U \cdot k_{и}}{\alpha \cdot K}$ $U_{kmax} = 22.342$ $U_{kmax} = 22.5$

Уточняем число витков обмотки якоря w_{y2} : $w_{y2} = N_{ш} \cdot K$ $w_{y2} = 324$

Количество эффективных проводников в пазу $N_{пэф}$: $N_{пэф} = 2 \cdot N_{ш} \cdot w_{c2}$
 $N_{пэф} = 36$ $N_{пэф} = 18$

Ток в пазу $I_{п2\Sigma}$, А: $I_{п2\Sigma} = \frac{N_{пэф} \cdot I_2}{a}$ $I_{п2\Sigma} = 455.193$

Уточнённая линейная нагрузка A_{2y} , А/см: $A_{2y} = \frac{20 \cdot w_{y2} \cdot I_2}{\pi \cdot D_{H2} \cdot a}$ $A_{2y} = 258.224$

Примечание. Полученное значение A_{2y} не должно отличаться от принятого при определении главных размеров A_{32} более чем на 10 %; в ином случае следует применять обмотку якоря с изменённым количеством витков.

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

Реальные пазы Z_p : $Z_p = \frac{Z_2}{2 \cdot p} + \varepsilon$ $Z_p = 9.25$ $Z_p = 10$

Элементарные пазы Z_3 : $Z_3 = \frac{K - 1}{p}$ $Z_3 = 53.5$ $Z_3 = 54$

$$\text{Шаг по реальным пазам } y_{\Pi}: \quad y_{\Pi} = Z_p \quad y_{\Pi} = 10$$

$$\text{Первый частичный шаг } y_1: \quad y_1 = N_{\text{ш}} \cdot y_{\Pi} \quad y_1 = 30$$

$$\text{Второй частичный шаг } y_2: \quad y_2 = Z_9 - y_1 \quad y_2 = 24$$

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

$$\text{Высота спинки якоря } h_{c2}, \text{ мм:} \quad h_{c2} = \frac{D_{H2} - U_{\text{кmax}}}{2} - h_{\Pi 2} \quad h_{c2} = 64.75$$

Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами

Предварительная магнитная индукция в спинке якоря B_{c2} , Тл:

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot l_{\text{эф}} \cdot h_{c2}} \quad B_{c2} = 0.477 \quad B_{c2\text{табл}} = 1.15$$

Предварительная магнитная индукция в зубцах статора $B_{32\text{табл}}$, Тл: $B_{32\text{табл}} = 1.65$

$$\text{Ширина зубца } b_{32}, \text{ мм:} \quad b_{32} = \frac{t_2 \cdot B_{\text{э}\delta}}{k_c \cdot B_{32\text{табл}}} \quad b_{32} = 6.704$$

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

$$\text{Радиус паза больший } r_1, \text{ мм:} \quad r_1 = \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2 \cdot h_{\text{ш}2}) - Z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (Z_2 + \pi)} \quad r_1 = 4.959$$

$$\text{Радиус паза меньший } r_2, \text{ мм:} \quad r_2 = \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2 \cdot h_{\Pi 2}) - Z_2 \cdot b_{32}}{2 \cdot (Z_2 - \pi)} \quad r_2 = 3.594$$

Проверка ширины зубцов b_{31} и b_{32} , мм:

$$b_{31} = \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2 \cdot h_{\text{ш}2} - 2 \cdot r_1)}{Z_2 - 2 \cdot r_1} \quad b_{31} = 22.944$$

$$b_{32} = \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2 \cdot h_{\Pi 2} + 2 \cdot r_2)}{Z_2 - 2 \cdot r_2} \quad b_{32} = 17.357$$

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

$$h_{1\text{ц}} = 15.647$$

Площадь поперечного сечения паза в штампе $S_{п2ш}$, мм²:

$$S_{п2ш} = \frac{\pi}{2} \cdot (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) \cdot h_{1ц} \quad S_{п2ш} = 192.743$$

Площадь поперечного сечения паза в свету $S_{п2с}$, мм²:

$$S_{п2с} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[\left(r_1 - \frac{b_c}{2} \right)^2 + \left(r_2 - \frac{b_c}{2} \right)^2 \right] + (r_1 + r_2) \cdot h_{1ц} \quad S_{п2с} = 190.087$$

Односторонняя толщина корпусной изоляции $b_{ик}$ при $h = 200$ мм, мм: $b_{ик} = 0.5$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции $S_{ик}$, мм²:

$$S_{ик} = b_{ик} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_1 + \pi \cdot r_2 + 2 \cdot h_{1ц}) \quad S_{ик} = 36.872$$

Площадь поперечного сечения клина и прокладок $S_{кп}$, мм²: $S_{кп} = 5 \cdot r_1$
 $S_{кп} = 24.796$

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой $S_{п2о}$, мм²:

$$S_{п2о} = S_{п2с} - S_{ик} - S_{кп} \quad S_{п2о} = 128.42$$

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

Предварительный диаметр провода с изоляцией $d_{и}$, мм: $d_{и} = \sqrt{\frac{0.75 \cdot S_{п2о}}{c \cdot N_{пэф}}}$
 $d_{и} = 1.636 \quad d_{и} = 1.585$

Диаметр провода без изоляцией $d_{ни}$, мм: $d_{ни} = 1.5$

Коэффициент заполнения паза $k_{п}$: $k_{п} = \frac{N_{пэф} \cdot c \cdot d_{и}^2}{S_{п2о}} \quad k_{п} = 0.704$

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 $S_{\text{нпр}}$, мм²: $S_{\text{нпр}} = 1.767$

Плотность тока в обмотке J_2 , А/мм²: $J_2 = \frac{I_2}{a \cdot c \cdot S_{\text{нпр}}}$ $J_2 = 7.156$

Удельная тепловая нагрузка якоря от потерь в обмотке $A_{2y}J_2$, А²/(см*мм²):

$$A_{2y} \cdot J_2 = 1.848 \times 10^3$$

Среднее зубцовое деление якоря $t_{\text{ср}}$, мм: $t_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{н2}} - h_{\text{п2}})}{Z_2}$ $t_{\text{ср}} = 15.446$

Средняя ширина секции обмотки $b_{\text{ср}}$, мм: $b_{\text{ср}} = t_{\text{ср}} \cdot y_{\text{п}}$ $b_{\text{ср}} = 154.462$

Средняя длина одной лобовой части секции $l_{\text{л2}}$, мм: $l_{\text{л2}} = (0.7 + 0.4 \cdot p) \cdot b_{\text{ср}} + 15$
 $l_{\text{л2}} = 246.692$

Средняя длина витка обмотки $l_{\text{ср2}}$, мм: $l_{\text{ср2}} = 2 \cdot (l_2 + l_{\text{л2}})$ $l_{\text{ср2}} = 797.385$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С r_{20} , Ом: $r_{20} = \frac{w_{y2} \cdot l_{\text{ср2}}}{57 \cdot a^2 \cdot c \cdot S_{\text{нпр}} \cdot 10^3}$
 $r_{20} = 0.08$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С $r_{20\text{ое}}$, о.е.: $r_{20\text{ое}} = \frac{r_{20} \cdot I_2}{U}$
 $r_{20\text{ое}} = 0.037$

Длина вылета лобовой части обмотки $l_{\text{в2}}$, мм: $l_{\text{в2}} = (0.12 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{\text{ср}} + 7.5$
 $l_{\text{в2}} = 69.285$

Ширина шлица паза $b_{\text{ш2}}$, мм: $b_{\text{ш2}} = d_{\text{и}} + 2 \cdot b_{\text{ик}} + 0.3$ $b_{\text{ш2}} = 2.885$

3. Обмотка добавочных полюсов.

Поперечная МДС якоря F_2 , А: $F_2 = \frac{w_{y2} \cdot I_2}{2 \cdot p \cdot a}$ $F_2 = 2.048 \times 10^3$

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

$$k_{дн} = 1.25 \quad a_{д} = 1 \quad w_{д} = \frac{k_{дн} \cdot F_2 \cdot a_{д}}{I_2} \quad w_{д} = 25.313 \quad w_{д} = 25$$

$$\text{Уточнённая МДС катушки } F_{д}, \text{ А:} \quad F_{д} = \frac{w_{д} \cdot I_2}{a_{д}} \quad F_{д} = 2.529 \times 10^3$$

$$\text{Уточнённое отношение МДС некомпенсированной машины:} \quad k_{дн} = \frac{F_{д}}{F_2} \\ k_{дн} = 1.235$$

$$\text{Принимаем предварительно плотность тока в обмотке } J_{д}, \text{ А/мм}^2: \quad J_{д} = 3.3$$

$$\text{Предварительная площадь поперечного сечения проводника } S_{д}, \text{ мм}^2: \quad S_{д} = \frac{I_2}{a_{д} \cdot J_{д}} \\ S_{д} = 30.653$$

Принимаем провод ПЭТП - 155.

$$\text{Предварительно больший размер меди (по ширине катушки) } b_{дк}, \text{ мм:} \quad b_{дк} = 4$$

$$\text{Предварительно меньший размер меди (по высоте катушки) } a_{дк}, \text{ мм:} \quad a_{дк} = 2.36$$

$$\text{Площадь поперечного сечения проводника } S_{дк}, \text{ мм}^2: \quad S_{дк} = 8.891$$

$$\text{Уточнённая плотность тока в обмотке } J_{уд}, \text{ А/мм}^2: \quad J_{уд} = \frac{I_2}{a_{дк} \cdot S_{дк}} \quad J_{уд} = 4.821$$

$$\text{Предварительная ширина катушки } b_{кд}, \text{ мм:} \quad b_{кд} = 0.12 \cdot D_{н2} \quad b_{кд} = 24.24$$

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

$$l_{срд} = 2 \cdot (l_{д} + b_{д}) + \pi \cdot (b_{кд} + 5) \quad l_{срд} = 413.86$$

$$\text{Сопротивление обмотки при температуре } 20^{\circ} \text{ С } r_{д}, \text{ Ом:} \quad r_{д} = \frac{2 \cdot \rho_{д} \cdot w_{д} \cdot l_{срд}}{57 \cdot a_{дк} \cdot S_{дк} \cdot 10^3} \\ r_{д} = 0.035$$

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: $F_{\text{пос}} = 0.15 \cdot F_2$

$$F_{\text{пос}} = 307.255$$

Количество витков в катушке $w_{\text{пос}}$: $a_{\text{пос}} = 1$ $w_{\text{пос}} = \frac{F_{\text{пос}} \cdot a_{\text{пос}}}{I_2}$ $w_{\text{пос}} = 3.037$

Уточнённая количество витков в катушке $w_{\text{пос}}$: $w_{\text{пос}} = 3$

Уточнённое значение МДС обмотки $F_{\text{пос}}$, А: $F_{\text{пос}} = \frac{w_{\text{пос}} \cdot I_2}{a_{\text{пос}}}$ $F_{\text{пос}} = 303.462$

Ширина катушки $b_{\text{кпос}}$, мм: $b_{\text{кпос}} = 0.1 \cdot D_{\text{н2}}$ $b_{\text{кпос}} = 20.2$

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

$$l_{\text{кпос}} = 2 \cdot (l_{\text{п}} + b_{\text{сп}}) + \pi \cdot (b_{\text{кпос}} + 5) \quad l_{\text{кпос}} = 485.339$$

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

$$r_{\text{пос}} = 0.011$$

5. Характеристика намагничивания машины.

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

$$m_T = 1.38 \quad r_{2\Sigma} = m_T \cdot (r_{20} + r_{\text{д}} + r_{\text{пос}}) \quad r_{2\Sigma} = 0.174$$

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

$$E_2 = U - I_2 \cdot m_T \cdot r_{2\Sigma} - \Delta U_{\text{щ}} \quad E_2 = 193.679$$

Уточнённый магнитный поток Φ_y , Вб: $\Phi_y = \frac{30 \cdot E_2}{\left(\frac{2 \cdot \rho}{a}\right) \cdot n \cdot w_{y2}}$ $\Phi_y = 0.018$

Площадь поперечного сечения в воздушном зазоре S_{δ} , мм²: $S_{\delta} = b_{\text{нп}} \cdot l_{\text{нд}}$
 $S_{\delta} = 1.495 \times 10^4$

Уточнённая магнитная индукция в воздушном зазоре $B_{y\delta}$, Тл: $B_{y\delta} = \frac{\Phi_y \cdot 10^6}{S_{\delta}}$
 $B_{y\delta} = 1.199$

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

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш}2}}{t_2 - b_{\text{ш}2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{\text{ш}2}}} \quad k_{\delta 2} = 1.045 \quad k_{\delta} = k_{\delta 2} \quad k_{\delta} = 1.045$$

МДС воздушного зазора F_{δ} , А: $F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{y\delta} \cdot 10^3$ $F_{\delta} = 1.61 \times 10^3$

Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов S_{32} , мм²: $S_{32} = \frac{Z_2}{2 \cdot p} \cdot \alpha \cdot b_{32} \cdot l_{\text{эф}}$
 $S_{32} = 1.443 \times 10^4$

Утонённая магнитная индукция в зубцах B_{32} , Тл: $B_{32} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{32}}$ $B_{32} = 0.637$

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

Средняя длина пути магнитного потока l_{32} , мм: $l_{32} = h_{\text{п}2} - 0.2 \cdot r_2$ $l_{32} = 24.281$

МДС для зубцов F_{32} , А: $F_{32} = 0.1 \cdot H_{32} \cdot l_{32}$ $F_{32} = 1.918$

Площадь поперечного сечения спинки якоря S_{c2} , мм²: $S_{c2} = h_{c2} \cdot l_{\text{эф}}$
 $S_{c2} = 9.645 \times 10^3$

Уточнённая магнитная индукция в спинке якоря B_{c2} , Тл: $B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{c2}}$
 $B_{c2} = 0.477$

Напряжённость магнитного поля в спинке якоря H_{c2} , А/см: $H_{c2} = 0.89$

Средняя длина пути магнитного потока l_{c2} , мм:
$$l_{c2} = \frac{\pi \cdot (D_2 + h_{c2})}{4 \cdot p} + \frac{h_{c2}}{2}$$
$$l_{c2} = 77.437$$

МДС для спинки якоря F_{c2} , А:
$$F_{c2} = 0.1 \cdot H_{c2} \cdot l_{c2} \quad F_{c2} = 6.892$$

Площадь поперечного сечения сердечника полюса S_{Π} , мм²:
$$S_{\Pi} = b_{c\Pi} \cdot l_{\text{эф}\Pi}$$
$$S_{\Pi} = 7.61 \times 10^3$$

Уточнённая магнитная индукция в сердечнике полюса B_{Π} , Тл:
$$B_{\Pi} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{S_{\Pi}}$$
$$B_{\Pi} = 1.45$$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике полюса H_{Π} , А/см:
$$H_{\Pi} = 6$$

Средняя длина пути магнитного потока машины $l_{c\Pi}$, мм:
$$l_{c\Pi} = l_{\Pi} \quad l_{c\Pi} = 152$$

МДС для сердечника полюса $F_{c\Pi}$, А:
$$F_{c\Pi} = 0.1 \cdot H_{\Pi} \cdot l_{c\Pi} \quad F_{c\Pi} = 91.2$$

Эквивалентный зазор в стыке между главным полюсом и станиной $\delta_{\Pi 1}$, мм:

$$\delta_{\Pi 1} = 2 \cdot l_{\Pi} \cdot 10^{-4} + 0.1 \quad \delta_{\Pi 1} = 0.13$$

МДС для зазора $F_{\Pi 1}$, А:
$$F_{\Pi 1} = 0.8 \cdot \delta_{\Pi 1} \cdot B_{\Pi} \cdot 10^3 \quad F_{\Pi 1} = 151.264$$

Площадь поперечного сечения станины S_{c1} , мм²:
$$S_{c1} = h_{1c1} \cdot l_{1c1} \quad S_{c1} = 4.797 \times 10^3$$

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

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

Средняя длина пути магнитного потока l_{c1} , мм:
$$l_{c1} = \frac{\pi \cdot (D_{1c1} + h_{1c1})}{4 \cdot p} + \frac{h_{1c1}}{2}$$
$$l_{c1} = 153.807$$

МДС для станины F_{c1} , А:
$$F_{c1} = 0.1 \cdot H_{c1} \cdot l_{c1} \quad F_{c1} = 183.03$$

Суммарная МДС магнитной цепи F_{Σ} , А: $F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{32} + F_{\text{сп}} + F_{\text{п1}} + F_{\text{с1}}$

$$F_{\Sigma} = 2.037 \times 10^3$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи $k_{\text{нас}}$: $k_{\text{нас}} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta} + F_{\text{п1}}} \quad k_{\text{нас}} = 1.157$

6. Параллельная обмотка главных полюсов.

Коэффициент $k_{\text{р2}} = f(F_2/F_{\Sigma})$ при $F_2/F_{\Sigma} = 0,868$ выбирается из графика:

$$\frac{F_2}{F_{\Sigma}} = 1.005 \quad k_{\text{р2}} = 0.16$$

Размагничивающее действие $F_{\text{р2}}$, А: $F_{\text{р2}} = k_{\text{р2}} \cdot F_2 \quad F_{\text{р2}} = 327.739$

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

$$F_{\text{п}} = F_{\Sigma} + F_{\text{р2}} - F_{\text{пос}} \quad F_{\text{п}} = 2.061 \times 10^3$$

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

$$b_{\text{кп}} = 0.12 \cdot D_{\text{н2}} \quad b_{\text{кп}} = 24.24$$

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

$$l_{\text{срп}} = 2 \cdot (l_{\text{п}} + b_{\text{сп}}) + \pi \cdot (b_{\text{кп}} + 2 \cdot b_3 + 2 \cdot b_{\text{и}}) \quad l_{\text{срп}} = 498.031$$

Предварительное поперечное сечение провода S , мм²: $m = 1.38$

$$S = \frac{1.15 \cdot m \cdot 2 \cdot p \cdot F_{\text{п}} \cdot l_{\text{срп}}}{57 \cdot U \cdot 10^3} \quad S = 0.52 \quad S = 0.273$$

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

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

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

Предварительное значение плотности тока в обмотке $J_{\text{п}}$, А/мм²: $J_{\text{п}} = 3.45$

Предварительное количество витков одной катушки w_{Π} : $w_{\Pi} = \frac{k_{\text{зап}} \cdot F_{\Pi}}{J_{\Pi} \cdot S}$

$$w_{\Pi} = 2.428 \times 10^3$$

Принимаем круглый провод марки ПЭТ - 155

Уточнённое (округлённое) количество витков одной катушки w_{Π} : $w_{\Pi} = 1400$

Уточнённое значение плотности тока в обмотке J_{Π} , А/мм²: $J_{\Pi} = \frac{k_{\text{зап}} \cdot F_{\Pi}}{w_{\Pi} \cdot S}$

$$J_{\Pi} = 5.984$$

Сопротивление обмотки при $t = 20^{\circ} \text{C}$ r_{Π} , Ом: $r_{\Pi} = \frac{2 \cdot \rho \cdot w_{\Pi} \cdot l_{\text{ср}\Pi}}{57 \cdot S \cdot 10^3}$ $r_{\Pi} = 179.228$

Максимальный ток обмотки $I_{\Pi\text{max}}$, А: $I_{\Pi\text{max}} = \frac{U}{m \cdot r_{\Pi}}$ $I_{\Pi\text{max}} = 0.889$

Максимальная МДС $F_{\Pi\text{max}}$, А: $F_{\Pi\text{max}} = I_{\Pi\text{max}} \cdot w_{\Pi}$ $F_{\Pi\text{max}} = 1.245 \times 10^3$

7. Размещение обмоток главных и добавочных полюсов.

Параллельная обмотка главных полюсов.

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

Ширина катушки $b_{\text{кг}}$, мм: $N_{\text{шк}} = 34$ $b_{\text{кг}} = 1.05 \cdot N_{\text{шк}} \cdot d_{\text{из}}$ $b_{\text{кг}} = 23.027$

$$b_{\text{кг}} = 23$$

Высота катушки $h_{\text{кг}}$, мм: $N_{\text{вк}} = 42$ $h_{\text{кг}} = 1.05 \cdot N_{\text{вк}} \cdot d_{\text{из}}$ $h_{\text{кг}} = 28.445$

$$h_{\text{кг}} = 29$$

Стабилизирующая последовательная обмотка.

Ширина катушки $b_{\text{кс}}$, мм: $b_{\text{кс}} = 1.05 \cdot b_{\text{кд}}$ $b_{\text{кс}} = 25.452$ $b_{\text{кс}} = 20$

Высота катушки $h_{\text{кс}}$, мм: $h_{\text{кс}} = 1.05 \cdot a_{\text{дк}}$ $h_{\text{кс}} = 2.478$ $h_{\text{кс}} = 3$

Обмотка добавочных полюсов.

Ширина катушки $b_{\text{дп}}$, мм: $b_{\text{дп}} = 1.05 \cdot b_{\text{кд}}$ $b_{\text{дп}} = 25.452$ $b_{\text{дп}} = 20$

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

8. Щётки и коллектор.

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

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

Число перекрытых щёткой коллекторных делений γ : $\gamma = \frac{t_{\text{щ}}}{t_{\text{к}}}$ $\gamma = 2.21$

Укорочение шага по коллектору $\varepsilon_{\text{к}}$: $\varepsilon_{\text{к}} = \frac{K}{2 \cdot p} - y_1$ $\varepsilon = -3$

Ширина зоны коммутации $b_{\text{зк}}$, мм: $b_{\text{зк}} = \frac{\left(\gamma + N_{\text{щ}} - \frac{a}{p} + \varepsilon \right) \cdot t_{\text{к}} \cdot D_{\text{н2}}}{D_{\text{к}}}$
 $b_{\text{зк}} = 1.235$

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

$k_{\text{зк}} = \frac{b_{\text{зк}}}{\tau - b_{\text{сп}}}$ $k_{\text{зк}} = 0.011$

Контактная плотность одной щётки $S_{\text{щ}}$, мм²: $S_{\text{щ}} = t_{\text{щ}} \cdot a_{\text{щ}}$ $S_{\text{щ}} = 125$

Необходимая контактная площадь всех щёток $S_{\text{щ}\Sigma}$, мм²: $J = 8$ $S_{\text{щ}\Sigma} = \frac{2 \cdot I_2 \cdot 10^2}{J}$
 $S_{\text{щ}\Sigma} = 2.529 \times 10^3$

Количество щёток на одном якоре $N_{\text{щб}}$: $N_{\text{щб}} = \frac{S_{\text{щ}\Sigma}}{2 \cdot p \cdot S_{\text{щ}}}$ $N_{\text{щб}} = 5.058$
 $N_{\text{щб}} = 2$

Уточнённая контактная площадь всех щёток $S_{\text{уш}\Sigma}$, мм²: $S_{\text{уш}\Sigma} = N_{\text{щб}} \cdot 2 \cdot p \cdot S_{\text{щ}\Sigma}$
 $S_{\text{уш}\Sigma} = 2.023 \times 10^4$

Уточнённая плотность тока под щётками $J_{щ}$, А/см²: $J_{щ} = \frac{2 \cdot I_2 \cdot 10^2}{S_{yщ\Sigma}} \quad J_{щ} = 1$

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

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

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60000} \quad v_k = 8.144$$

9. Коммутационные параметры.

Проводимость рассеяния овального полузакрытого паза $\lambda_{п2}$: $v_2 = \frac{\pi \cdot D_{н2} \cdot n}{60000}$

$$v_2 = 10.577 \quad \lambda_{п2} = 0.6 \cdot \frac{h_{п2}}{2 \cdot r_2} + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + \frac{l_{п2}}{l_2} + \frac{2.5 \cdot 10^6}{w_{с2} \cdot l_2 \cdot A_{2y} \cdot v_2} \cdot \frac{a}{2 \cdot p} \quad \lambda_{п2} = 4.991$$

Максимальная окружная скорость якоря v_{2max} , м/с: $v_{2max} = \frac{\pi \cdot D_{н2} \cdot n_{max}}{60000}$

$$v_{2max} = 21.153$$

Реактивная ЭДС коммутирующих секций E_p , В:

$$E_p = 2 \cdot w_{с2} \cdot l_2 \cdot A_{2y} \cdot v_{2max} \cdot \lambda_{п2} \cdot 10^{-7} \quad E_p = 4.973$$

Среднее значение магнитной индукции в зазоре под добавочным полюсом B_{δ_d} , Тл:

$$B_{\delta_d} = \lambda_{п2} \cdot A_{2y} \cdot 10^{-4} \quad B_{\delta_d} = 0.129$$

Коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения якоря $k_{\delta_{д2}}$:

$$k_{\delta_{д2}} = 1 + \frac{b_{ш2}}{t_2 - b_{ш2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{ш2}}} \quad k_{\delta_{д2}} = 1.045$$

Общий коэффициент воздушного зазора k_{δ_d} :

$$k_{\delta_d} = k_{\delta_{д2}} \quad k_{\delta_d} = 1.045$$

Необходимый зазор под добавочным полюсом δ_d , мм: $F_2 = 1848$

$$\delta_d = \frac{F_\Sigma - F_2}{0.08 \cdot B_{\delta d} \cdot k_{\delta d}} \cdot 10^{-4} \quad \delta_d = 1.755$$

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

$$\Phi_{\delta d} = b_{zk} \cdot l_{нд} \cdot B_{\delta d} \cdot 10^{-6} \quad \Phi_{\delta d} = 2.42 \times 10^{-5}$$

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

$$I_{2max} = 1.5 \cdot I_2 \quad I_{2max} = 151.731 \quad \Phi_{\delta dp} = \Phi_{\delta d} \cdot \frac{I_{2max}}{I_2} \quad \Phi_{\delta dp} = 3.629 \times 10^{-5}$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при номинальной нагрузке Φ_d , Вб:

$$\Phi_d = \sigma \cdot \Phi_{\delta d} \quad \Phi_d = 2.903 \times 10^{-5}$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса при перегрузке Φ_{dp} , Вб:

$$\Phi_{dp} = \Phi_d \cdot \frac{I_{2max}}{I_2} \quad \Phi_{dp} = 4.355 \times 10^{-5}$$

Площадь сечения сердечника добавочного полюса S_{dp} , мм²: $S_{dp} = b_d \cdot l_d \cdot k_{сdp}$

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

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

$$B_{dp} = \frac{\Phi_{dp}}{S_{dp}} \cdot 10^6 \quad B_{dp} = 0.016$$

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

$$B_{c1} = \frac{\sigma \cdot \Phi_y + \Phi_{dp}}{2 \cdot S_{c1}} \cdot 10^6 \quad B_{c1} = 2.247$$

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

$$B_{c2} = \frac{\Phi_y + \Phi_{дп}}{2 \cdot S_{c2}} \cdot 10^6 \quad B_{c2} = 0.932$$

10. Номинальный режим.

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

$$m_{32} = 7.8 \cdot Z_2 \cdot b_{32} \cdot \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot l_{\text{эф}} \cdot 10^{-6} \quad m_{32} = 8.187$$

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

$$p_{32} = 30.002$$

Масса стали спинки якоря m_{c2} , кг:

$$m_{c2} = 7.8 \cdot \left[\frac{\pi \cdot \left[(D_{H2} - 2 \cdot h_{п2})^2 - D_2^2 \right]}{4} - 0.785 \cdot v_k \cdot D_k \right] \cdot l_{\text{эф}} \cdot 10^{-6}$$

$$m_{c2} = 17.647$$

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

$$p_{c2} = 23.055$$

Суммарные магнитные потери в стали $p_{c\Sigma}$, Вт: $p_{c\Sigma} = p_{32} + p_{c2} \quad p_{c\Sigma} = 53.057$

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

$$p_{тщ} = 823.804$$

Потери на трение подшипников, трение о воздух и на вентиляцию машины со степенью защиты IP22 и способом охлаждения ICO1 $p_{пв}$, Вт:

$$p_{пв} = 2200 \cdot D_{H2}^{3.6} \cdot 10^{-9} \quad p_{пв} = 438.215$$

Суммарные механические потери $p_{мх\Sigma}$, Вт: $p_{мх\Sigma} = p_{тщ} + p_{пв} \quad p_{мх\Sigma} = 1.262 \times 10^3$

Добавочные потери $p_{доб}$, Вт: $p_{доб} = 0.01 \cdot \frac{P_2}{\eta}$ $p_{доб} = 227.545$

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

$$P_{эм} = 2.054 \times 10^4$$

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

$$E_H = 192.317$$

Ток якоря двигателя I_{2H} , А: $I_{2H} = \frac{P_{эм}}{E_H}$ $I_{2H} = 106.816$

Уточнённый ток двигателя I_{yH} , А: $I_{yH} = I_{2H} + I_{пmax}$ $I_{yH} = 107.706$

Подводимая мощность двигателя P_1 , Вт: $P_1 = U \cdot I_{yH}$ $P_1 = 2.37 \times 10^4$

Суммарные потери в двигателе p_{Σ} , Вт: $p_{\Sigma} = P_1 - P_2$ $p_{\Sigma} = 4.695 \times 10^3$

Уточнённый КПД двигателя η_y , о.е.: $\eta_y = \frac{P_1 - p_{\Sigma}}{P_1}$ $\eta_y = 0.802$

Уточнённый магнитный поток $\Phi_{уд}$, Вб: $\Phi_{уд} = \frac{30 \cdot E_H}{\frac{2 \cdot p}{a} \cdot n \cdot w_2}$ $\Phi_{уд} = 8.782 \times 10^{-3}$

Суммарная МДС магнитной цепи F_{Σ} , А: $F_{\Sigma} = 2.037 \times 10^3$

Размагничивающее действие МДС якоря двигателя F_{p2} , А: $F_{p2} = 327.739$

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

$$F_{пос} = 303.462$$

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

$$F_{нп} = F_{\Sigma} + F_{p2} - F_{пос} \quad F_{нп} = 2.061 \times 10^3$$

Момент вращения на валу двигателя M_2 , Нм: $M_2 = 9.55 \cdot \frac{P_2}{n}$ $M_2 = 181.45$

11. Регулирование частоты вращения.

Регулирование частоты вращения вверх.

Магнитный поток при наибольшей частоте вращения Φ_{\min} , Вб:
$$\Phi_{\min} = \frac{\Phi_{\text{уд}} \cdot n}{n_{\max}}$$
$$\Phi_{\min} = 4.391 \times 10^{-3}$$

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

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

Минимальный ток возбуждения $I_{\text{в min}}$, А:
$$I_{\text{в min}} = \frac{F_{\Sigma \min}}{w_{\Pi}} \quad I_{\text{в min}} = 0.409$$

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

$$r_{\text{р}} = 1.3 \left(\frac{U}{I_{\text{в min}}} - r_{\Pi} \right) \quad r_{\text{р}} = 465.782$$

Частота вращения при холостом ходе $n_{0 \max}$, об/мин:
$$n_{0 \max} = 30 \cdot \frac{(U - \Delta U_{\text{ш}})}{\left(\frac{2 \cdot p}{a} \right) \cdot \Phi_{\min} \cdot w_2}$$
$$n_{0 \max} = 2.267 \times 10^3$$

Регулирование частоты вращения вниз.

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

$$M_{2\text{д}} = 0.81 \cdot M_2 \quad M_{2\text{д}} = 146.975$$

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

$$\Phi_{2\text{д}} = \sqrt{\frac{M_{2\text{д}}}{M_2}} \cdot \Phi_{\text{уд}} \quad \Phi_{2\text{д}} = 7.903 \times 10^{-3}$$

Ток якоря при n_{\min} у двигателя с самовентиляцией $I_{2\text{д}}$, А:
$$I_{2\text{д}} = \sqrt{\frac{M_{2\text{д}}}{M_2}} \cdot I_{\text{уH}}$$
$$I_{2\text{д}} = 96.935$$

$$\text{ЭДС при } n_{\min} E_{2 \min}, \text{ В: } E_{2\min} = \frac{\Phi_{2д} \cdot \frac{2 \cdot p}{a} \cdot n_{\min} \cdot w_2}{30} \quad E_{2\min} = 60.58$$

$$\text{Напряжение на якоре при } n_{\min} U_{\min}, \text{ В: } U_{\min} = E_{2\min} + I_{2д} \cdot m_T \cdot r_{2\Sigma} + \Delta U_{\text{щ}} \\ U_{\min} = 85.887$$

$$\text{Размагничивающа МДС реакции якоря } F_{\text{ря}}, \text{ А: } F_{\text{ря}} = \frac{I_{2д}}{I_{\text{ун}}} \cdot F_{\text{р2}} \quad F_{\text{ря}} = 294.965$$

$$\text{МДС стабилизирующей обмотки } F_{\text{со}}, \text{ А: } F_{\text{со}} = \frac{I_{2д}}{I_{\text{ун}}} \cdot F_{\text{пос}} \quad F_{\text{со}} = 273.116$$

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

$$F_{\text{ппmin}} = F_{\Sigma\min} + F_{\text{ря}} - F_{\text{со}} \quad F_{\text{ппmin}} = 594.849$$

$$\text{Ток обмотки возбуждения } I_{\text{п min}}, \text{ А: } I_{\text{ппmin}} = \frac{F_{\text{ппmin}}}{w_{\text{п}}} \quad I_{\text{ппmin}} = 0.425$$

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

$$r_{\text{рmax}} = 1.3 \cdot \left(\frac{U}{I_{\text{ппmin}}} - r_{\text{п}} \right) \quad r_{\text{рmax}} = 440.115$$

12. Тепловой и вентиляционный расчёты.

Тепловой расчёт.

Потери в обмотках и контактах щёток.

$$\text{Потери в обмотке якоря } p_{\text{м2}}, \text{ Вт: } p_{\text{м2}} = I_{2н}^2 \cdot m_T \cdot r_{20} \quad p_{\text{м2}} = 1.262 \times 10^3$$

$$\text{Потери в обмотке добавочных полюсов } p_{\text{мд}}, \text{ Вт: } p_{\text{мд}} = I_{2н}^2 \cdot m_T \cdot r_{\text{д}} \quad p_{\text{мд}} = 544.842$$

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

$$p_{\text{мпос}} = I_{2н}^2 \cdot m_T \cdot r_{\text{пос}} \quad p_{\text{мпос}} = 180.948$$

$$\text{Потери в обмотке главных полюсов } p_{\text{мп}}, \text{ Вт: } p_{\text{мп}} = U \cdot I_{\text{ппmax}} \quad p_{\text{мп}} = 195.686$$

$$\text{Потери в контактах щёток } p_{\text{к щ}}, \text{ Вт: } p_{\text{кщ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{ун}} \quad p_{\text{кщ}} = 215.412$$

Обмотка якоря.

Условная поверхность охлаждения активной части якоря $S_{п2}$, мм²:

$$S_{п2} = \pi \cdot D_{H2} \cdot l_2 \quad S_{п2} = 9.646 \times 10^4$$

Условный периметр поперечного сечения овального полузакрытого паза Π_2 , мм:

$$\Pi_2 = \pi \cdot (r_1 + r_2) + 2 \cdot h_{1ц} \quad \Pi_2 = 58.164$$

Условная поверхность охлаждения пазов $S_{уп2}$, мм²:

$$S_{уп2} = Z_2 \cdot \Pi_2 \cdot l_2$$
$$S_{уп2} = 3.183 \times 10^5$$

Условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов в якоре $S_{л2}$, мм²:

$$S_{л2} = 2 \cdot \pi \cdot D_{H2} \cdot l_{в2} \quad S_{л2} = 8.794 \times 10^4$$

Условная поверхность охлаждения машины $S_{маш}$, мм²:

$$S_{маш} = \pi \cdot D_{H1} \cdot (l_2 + 2 \cdot l_{в2})$$
$$S_{маш} = 3.524 \times 10^5$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и потерь в стали, отнесённых к поверхности охлаждения активной части якоря $p_{уп2}$, Вт/мм²:

$$p_{уп2} = \frac{\left(\frac{p_{M2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{ср2}} + p_{с\Sigma} \right)}{S_{п2}} \quad p_{уп2} = 5.539 \times 10^{-3}$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки, отнесённых к поверхности охлаждения пазов $p_{упп2}$, Вт/мм²:

$$p_{упп2} = \frac{\frac{p_{M2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{ср2}}}{S_{уп2}} \quad p_{упп2} = 1.512 \times 10^{-3}$$

Удельный тепловой поток от потерь в лобовых частях обмотки, отнесённых к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки $p_{ул2}$, Вт/мм²:

$$p_{ул2} = \frac{p_{м2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{ср2} S_{л2}} \quad p_{ул2} = 5.472 \times 10^{-3}$$

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

$$v_{2н} = \frac{\pi \cdot D_{н2} \cdot n}{60000} \quad v_{2н} = 10.577$$

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

$$\alpha_2 = 8.6 \cdot 10^{-4} \quad \Delta t_{п2} = \frac{p_{уп2}}{\alpha_2} \quad \Delta t_{п2} = 6.44$$

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

$$\lambda_{1экв} = 12 \cdot 10^{-4} \quad \Delta t_{ип2} = p_{упп2} \cdot \left(\frac{b_{ик}}{\lambda_{экв}} + \frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda_{1экв}} \right) \quad \Delta t_{ип2} = 6.072$$

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

$$\Delta t_{л2} = \frac{p_{ул2}}{\alpha_2} \quad \Delta t_{л2} = 6.363$$

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

$$\Delta t_{ил2} = p_{ул2} \cdot \left(\frac{b_{ик}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{п2}}{8 \cdot \lambda_{1экв}} \right) \quad \Delta t_{ил2} = 31.35$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины $\Delta t_{о2}$, °C:

$$\Delta t_{о2} = (\Delta t_{п2} + \Delta t_{ип2}) \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{ср2}} + (\Delta t_{л2} + \Delta t_{ил2}) \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{ср2}} \quad \Delta t_{о2} = 19.148$$

Сумма потерь, передаваемая воздуху внутри машины, p_{Σ} Вт:

$$p_{\Sigma} = p_{\Sigma 2} + k_{\Pi} \cdot (p_{\text{мд}} + p_{\text{мпос}} + p_{\text{мп}}) + p_{\text{кщ}} + p_{\text{тщ}} + 0.1 \cdot p_{\text{пв}} + p_{\Sigma} + p_{\text{доб}}$$

$$p_{\Sigma} = 3.275 \times 10^3$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха $\Delta t_{\text{в}}$, °С:

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{p_{\Sigma}}{\alpha_2 \cdot S_{\text{маш}}} \quad \Delta t_{\text{в}} = 10.807$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой наружного охлаждающего воздуха Δt_2 , °С:

$$\Delta t_2 = \Delta t_{02} + \Delta t_{\text{в}} \quad \Delta t_2 = 29.954$$

Обмотка добавочных полюсов.

Условная поверхность охлаждения многослойных катушек из изолированных проводов $S_{\text{ипд}}$, мм²:

$$\Pi_{\text{д}} = 12 + 0.33 \cdot D_{\text{н2}} \quad \Pi_{\text{д}} = 78.66 \quad S_{\text{ипд}} = 2 \cdot p_{\text{д}} \cdot l_{\text{срд}} \cdot \Pi_{\text{д}} \quad S_{\text{ипд}} = 1.302 \times 10^5$$

Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесённых к поверхности охлаждения обмотки $p_{\text{уд}}$, Вт/мм²:

$$k = 0.7 \quad p_{\text{уд}} = \frac{k \cdot p_{\text{мд}}}{S_{\text{ипд}}} \quad p_{\text{уд}} = 2.929 \times 10^{-3}$$

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

$$\alpha_1 = 4.55 \cdot 10^{-4} \quad \Delta t_{\text{нд}} = \frac{p_{\text{уд}}}{\alpha_1} \quad \Delta t_{\text{нд}} = 6.437$$

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

$$b_{\text{нд}} = 0.2 \quad \Delta t_{\text{ид}} = p_{\text{уд}} \cdot \left(\frac{b_{\text{нд}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_{\text{кд}}}{8 \cdot \lambda_{1\text{эКВ}}} \right) \quad \Delta t_{\text{ид}} = 11.057$$

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

$$\Delta t_{вд} = \Delta t_{нд} + \Delta t_{ид} \quad \Delta t_{вд} = 17.494$$

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

$$\Delta t_{д} = \Delta t_{вд} + \Delta t_{в} \quad \Delta t_{д} = 28.3$$

Параллельная и независимая обмотка главных полюсов.

Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки $\Pi_{н}$, мм:

$$\Pi_{н} = 37 + 0.14 \cdot D_{н2} \quad \Pi_{н} = 65.28$$

Условная поверхность охлаждения всех катушек $S_{н}$, мм²:

$$S_{н} = 2 \cdot p \cdot l_{срп} \cdot \Pi_{н}$$

$$S_{н} = 1.3 \times 10^5$$

Удельный тепловой поток от потерь в обмотке, отнесённых к поверхности охлаждения обмотки $p_{ун}$, Вт/мм²:

$$p_{ун} = \frac{k \cdot p_{мп}}{S_{н}} \quad p_{ун} = 1.053 \times 10^{-3}$$

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

$$\Delta t_{нп} = \frac{p_{ун}}{\alpha_1} \quad \Delta t_{нп} = 2.315$$

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

$$\Delta t_{ип} = p_{ун} \cdot \left(\frac{b_c}{\lambda_{экв}} + \frac{b_{кг}}{8 \cdot \lambda_{лэкв}} \right) \quad \Delta t_{ип} = 3.84$$

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

$$\Delta t_{\text{ОВВ}} = \Delta t_{\text{НП}} + \Delta t_{\text{ИП}} \quad \Delta t_{\text{ОВВ}} = 6.155$$

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

$$\Delta t_{\text{ОВН}} = \Delta t_{\text{ОВВ}} + \Delta t_{\text{ВД}} \quad \Delta t_{\text{ОВН}} = 23.649$$

Коллектор.

Условная поверхность охлаждения коллектора S_K , мм²: $S_K = \pi \cdot D_K \cdot l_K$
 $S_K = 2.492 \times 10^4$

Удельный тепловой поток от потерь на коллекторе, отнесённых к поверхности охлаждения обмотки p_K , Вт/мм²:

$$p_K = \frac{P_{\text{КЩ}} + P_{\text{ТЩ}}}{S_K} \quad p_K = 0.042$$

Превышение температуры коллектора над температурой воздуха внутри машины $\Delta t_{\text{КВ}}$, °C:

$$\alpha_K = 18 \cdot 10^{-3} \quad \Delta t_{\text{КВ}} = \frac{p_K}{\alpha_K} \quad \Delta t_{\text{КВ}} = 2.317$$

Превышение температуры коллектора над температурой наружного охлаждающего воздуха у машины со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01 $\Delta t_{\text{КН}}$, °C:

$$\Delta t_{\text{КН}} = \Delta t_{\text{КВ}} + \Delta t_{\text{В}} \quad \Delta t_{\text{КН}} = 13.123$$

Вентиляционный расчёт.

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

$$k_2 = 2.2 \cdot \sqrt{\left(\frac{n}{1000}\right)^3} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{корп}}}{100}} \quad k_2 = 4.322$$

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

Необходимый расход воздуха у машин со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01 V_B , м³/с:

$$V_B = \frac{k_2 \cdot p_{\Sigma}}{c_B \cdot \Delta t_{\text{ВД}}} \quad V_B = 1.055$$

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

$$V_{\text{вент}} = 1.25 \cdot \frac{n}{1000} \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2} \quad V_{\text{вент}} = 0.719$$

Напор воздуха H , Па: $H = 12.3 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{\text{корп}}}{100}\right)^2 \quad H = 183.265$

13. Масса и динамические показатели.

Масса проводов обмотки якоря m_{M2} , кг: $m_{M2} = 8.9 \cdot w_{y2} \cdot l_{\text{ср}2} \cdot c \cdot S_{\text{нпр}} \cdot 10^{-6}$
 $m_{M2} = 8.126$

Масса проводов обмотки добавочных полюсов $m_{\text{мд}}$, кг:

$$m_{\text{мд}} = 8.9 \cdot 2 \cdot p_{\text{д}} \cdot w_{\text{д}} \cdot l_{\text{ср}д} \cdot S_{\text{дк}} \cdot 10^{-6} \quad m_{\text{мд}} = 3.275$$

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

$$m_{\text{мпос}} = 8.9 \cdot 2 \cdot p \cdot w_{\text{пос}} \cdot l_{\text{кпос}} \cdot S_{\text{дк}} \cdot 10^{-6} \quad m_{\text{мпос}} = 0.461$$

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

$$m_{\text{мп}} = 8.9 \cdot 2 \cdot p \cdot w_{\text{п}} \cdot l_{\text{срп}} \cdot S \cdot 10^{-6} \quad m_{\text{мп}} = 6.776$$

Масса меди коллектора $m_{МК}$, кг: $m_{МК} = 5.25 \cdot D_K^{1.5} \cdot l_K \cdot 10^{-5}$ $m_{МК} = 5.194$

Суммарная масса проводов обмоток и меди коллектора $m_{М\Sigma}$, кг:

$$m_{М\Sigma} = m_{М2} + m_{МД} + m_{МПос} + m_{МП} + m_{МК} \quad m_{М\Sigma} = 23.832$$

Масса стали зубцов сердечника якоря $m_{з2}$, кг: $m_{з2} = 8.187$

Масса стали спинки сердечника якоря $m_{с2}$, кг: $m_{с2} = 17.647$

Масса стали сердечников главных полюсов некомпенсированной машины $m_{сп}$, кг:

$$m_{сп} = 8.5 \cdot 2 \cdot p \cdot l_{эфп} \cdot b_{сп} \cdot h_{п} \cdot 10^{-6} \quad m_{сп} = 17.607$$

Масса стали сердечников добавочных полюсов $m_{сд}$, кг:

$$m_{сд} = 7.8 \cdot 2 \cdot p_d \cdot k_{сдп} \cdot l_d \cdot b_d \cdot h_d \cdot 10^{-6} \quad m_{сд} = 5.334$$

Масса стали станины $m_{сст}$, кг: $m_{сст} = 6.05 \cdot l_{1ст} \cdot (D_{н1}^2 - D_{1ст}^2) \cdot 10^{-6}$

$$m_{сст} = 42.406$$

Суммарная масса активной стали $m_{с\Sigma}$, кг:

$$m_{с\Sigma} = m_{з2} + m_{с2} + m_{сп} + m_{сд} + m_{сст} \quad m_{с\Sigma} = 91.18$$

Масса изоляции машины $m_{и}$, кг: $m_{и} = (3.8 \cdot D_{н1}^{1.5} + 0.2 \cdot D_{н1} \cdot l_2) \cdot 10^{-4}$

$$m_{и} = 4.055$$

Масса конструкционных материалов m_K , кг: $A = 0.7$ $B = 1.1$

$$m_K = (A \cdot D_{н1}^2 + B \cdot D_{н1}^3) \cdot 10^{-6} \quad m_K = 63.368$$

Масса машины $m_{маш}$, кг: $m_{маш} = m_{М\Sigma} + m_{с\Sigma} + m_{и} + m_K$ $m_{маш} = 182.435$

Динамический момент инерции якоря $J_{ид}$, кг*м²:

$$J_{ид} = 0.6 \cdot D_{н2}^4 \cdot (l_2 + 0.3 \cdot D_{н2} + 0.75 \cdot P_2) \cdot 10^{-12} \quad J_{ид} = 14.448$$

Электромеханическая постоянная времени якоря T_M , с:

$$T_M = \frac{J_{ид} \cdot m_T \cdot r_2 \Sigma}{91 \cdot \frac{E_2}{n}}$$

$$T_M = 0.197$$