

Исходные данные для проектирования

Номинальный режим работы - продолжительный (S1).

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

Номинальное напряжение U , В: $U = 110$

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

$$k_m = 0.978$$

Коэффициент полезного действия η , о. е.: $\eta = 0.825$

Расчётная мощность $P_{\text{расч}}$, Вт: $P_{\text{расч}} = \frac{k_H \cdot k_m \cdot P_2}{\eta} \quad P_{\text{расч}} = 2.061 \times 10^4$

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 α : $\alpha = 0.62$

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

$$l_{\text{ря}} = 489.707$$

Определяем отношение $\lambda = l_{\text{ря}}/D_{\text{H2}}$: $\lambda = \frac{l_{\text{ря}}}{D_{\text{H2}}} \quad \lambda = 2.424$

Допустимое значение λ_{max} : $\lambda_{\text{max}} = 2.45$

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: $\delta = 0.75 \cdot \delta' + 0.25 \cdot \delta'' \quad \delta = 1.605$

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

Полюсное деление τ , мм: $\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{H2}}}{2 \cdot p} \quad \tau = 158.65$

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_n , Тл: $B_n = 1.45$

Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре Φ , Вб:

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

Эффективная длина сердечника полюса $l_{\Sigma\Phi n}$, мм: $l_{\Sigma\Phi n} = k_c \cdot l_n \quad l_{\Sigma\Phi n} = 148.96$

Коэффициент магнитного рассеяния σ : $\sigma = 1.2$

Ширина сердечника полюса b_{cn} , мм: $b_{cn} = \frac{\sigma \cdot \Phi \cdot 10^6}{l_{\Sigma\Phi n} \cdot B_n} \quad b_{cn} = 51.085$

Ширина уступа полюса, предназначенная для упора обмотки возбуждения при её креплении b_{yn} , мм:

$$b_{yn} = 0.1 \cdot b_{cn} \quad b_{yn} = 5.109$$

Высота от уступа полюса до воздушного зазора h_{yn} , мм: $h_{yn} = \frac{(b_{Hn} - b_{cn}) \cdot B_{\Sigma\delta}}{1.67 \cdot B_n}$

$$h_{yn} = 12.007$$

Сердечники добавочных полюсов

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

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

$$k_{сдп} = 0.98$$

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Обмотка якоря.

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

$$\text{Ток якоря двигателя } I_2, \text{ А:} \quad I_2 = \frac{k_{\text{м}} \cdot P_2}{\eta \cdot U} \quad I_2 = 204.76$$

Принимаем волновую обмотку из провода ПЭТ - 155.

$$\text{Количество параллельных ветвей } a: \quad a = 2$$

$$\text{Предварительное количество витков обмотки якоря } w_2: \quad w_2 = \frac{30 \cdot k_{\text{н}} \cdot U}{\left(\frac{2 \cdot p}{a}\right) \cdot \pi \cdot \Phi}$$
$$w_2 = 164.193 \quad w_2 = 164$$

$$\text{Количество секций, расположенных по ширине паза } N_{\text{ш}}: \quad N_{\text{ш}} = 2$$

Предварительное количество витков в секции w_{c2} : $w_{c2} = \frac{1.8 \cdot w_2}{D_{H2}}$ $w_{c2} = 1.461$
 $w_{c2} = 2$

Предварительное количество пазов якоря Z_2 : $Z_2 = \frac{w_2}{N_{\psi} \cdot w_{c2}}$ $Z_2 = 41$
 $Z_2 = 27$

Количество коллекторных пластин K : $K = N_{\psi} \cdot Z_2$ $K = 54$

Зубцовое деление по наружному диаметру якоря t_2 , мм: $t_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{Z_2}$ $t_2 = 23.504$

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

Коллекторное деление t_K , мм: $t_K = \frac{\pi \cdot D_K}{K}$ $t_K = 9.049$

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

$$k_{\psi} = 1.7 \quad U_{\text{кmax}} = \frac{2 \cdot p \cdot U \cdot k_{\psi}}{\alpha \cdot K} \quad U_{\text{кmax}} = 22.342 \quad U_{\text{кmax}} = 22$$

Уточняем число витков обмотки якоря w_{y2} : $w_{y2} = N_{\psi} \cdot K$ $w_{y2} = 108$

Количество эффективных проводников в пазу $N_{\text{пэф}}$: $N_{\text{пэф}} = 2 \cdot N_{\psi} \cdot w_{c2}$
 $N_{\text{пэф}} = 8 \quad N_{\text{пэф}} = 6$

Ток в пазу $I_{\text{п}2\Sigma}$, А: $I_{\text{п}2\Sigma} = \frac{N_{\text{пэф}} \cdot I_2}{a}$ $I_{\text{п}2\Sigma} = 614.281$

Уточнённая линейная нагрузка A_{2y} , А/см: $A_{2y} = \frac{20 \cdot w_{y2} \cdot I_2}{\pi \cdot D_{H2} \cdot a}$ $A_{2y} = 348.472$

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 ε : $\varepsilon = \frac{1}{4}$

Реальные пазы Z_p : $Z_p = \frac{Z_2}{2 \cdot p} + \varepsilon$ $Z_p = 7$

Элементарные пазы Z_3 : $Z_3 = \frac{K - 1}{p}$ $Z_3 = 26.5$ $Z_3 = 26$

$$\text{Шаг по реальным пазам } y_n: \quad y_n = Z_p \quad y_n = 7$$

$$\text{Первый частичный шаг } y_1: \quad y_1 = N_{\text{ш}} \cdot y_n \quad y_1 = 14$$

$$\text{Второй частичный шаг } y_2: \quad y_2 = Z_3 - y_1 \quad y_2 = 12$$

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

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

Обмотка якоря с овальными полузакрытыми пазами

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

$$B_{\text{с}2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot l_{\text{эф}} \cdot h_{\text{с}2}} \quad B_{\text{с}2} = 0.475 \quad B_{\text{с}2\text{мадл}} = 1.15$$

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

$$\text{Ширина зубца } b_{\text{з}2}, \text{ мм:} \quad b_{\text{з}2} = \frac{t_2 \cdot B_{\text{з}} \delta}{k_{\text{с}} \cdot B_{\text{з}2\text{мадл}}} \quad b_{\text{з}2} = 8.939$$

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

$$\text{Радиус паза больший } r_1, \text{ мм:} \quad r_1 = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{ш}2}) - Z_2 \cdot b_{\text{з}2}}{2 \cdot (Z_2 + \pi)} \quad r_1 = 6.44$$

$$\text{Радиус паза меньший } r_2, \text{ мм:} \quad r_2 = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{п}2}) - Z_2 \cdot b_{\text{з}2}}{2 \cdot (Z_2 - \pi)} \quad r_2 = 4.949$$

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

$$b_{\text{з}1} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{ш}2} - 2 \cdot r_1)}{Z_2 - 2 \cdot r_1} \quad b_{\text{з}1} = 41.721$$

$$b_{\text{з}2} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{H}2} - 2 \cdot h_{\text{п}2} + 2 \cdot r_2)}{Z_2 - 2 \cdot r_2} \quad b_{\text{з}2} = 29.741$$

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

$$h_{1\text{ц}} = 12.811$$

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

$$S_{п2ш} = \frac{\pi}{2} \cdot (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) \cdot h_{1ц} \quad S_{п2ш} = 249.525$$

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

$$S_{п2с} = \frac{\pi}{2} \cdot \left[\left(r_1 - \frac{b_c}{2} \right)^2 + \left(r_2 - \frac{b_c}{2} \right)^2 \right] + (r_1 + r_2) \cdot h_{1ц} \quad S_{п2с} = 245.978$$

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

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

$$S_{ук} = b_{ук} \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_1 + \pi \cdot r_2 + 2 \cdot h_{1ц}) \quad S_{ук} = 40.817$$

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

$$S_{кп} = 32.199$$

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

$$S_{п2о} = S_{п2с} - S_{ук} - S_{кп} \quad S_{п2о} = 172.962$$

Количество элементарных проводов в эффективном c : $c = 5$

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

$$d_{и} = 2.079 \quad d_{и} = 2.045$$

Диаметр провода без изоляцией $d_{ни}$, мм: $d_{ни} = 1.95$

Коэффициент заполнения паза $k_{п}$: $k_{п} = \frac{N_{пзф} \cdot c \cdot d_{и}^2}{S_{п2о}} \quad k_{п} = 0.725$

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: $S_{\text{нпр}} = 2.99$

Плотность тока в обмотке J_2 , А/мм²: $J_2 = \frac{l_2}{a \cdot c \cdot S_{\text{нпр}}} \quad J_2 = 6.848$

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

$$A_{2y} \cdot J_2 = 2.386 \times 10^3$$

Среднее зубцовое деление якоря $t_{\text{ср}}$, мм: $t_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{н2}} - h_{\text{н2}})}{Z_2} \quad t_{\text{ср}} = 20.595$

Средняя ширина секции обмотки $b_{\text{ср}}$, мм: $b_{\text{ср}} = t_{\text{ср}} \cdot y_{\text{п}} \quad b_{\text{ср}} = 144.164$

Средняя длина одной лобовой части секции $l_{\text{л2}}$, мм: $l_{\text{л2}} = (0.7 + 0.4 \cdot p) \cdot b_{\text{ср}} + 15$
 $l_{\text{л2}} = 231.246$

Средняя длина витка обмотки $l_{\text{ср2}}$, мм: $l_{\text{ср2}} = 2 \cdot (l_2 + l_{\text{л2}}) \quad l_{\text{ср2}} = 766.493$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С r_{20} , Ом: $r_{20} = \frac{w_{y2} \cdot l_{\text{ср2}}}{57 \cdot a^2 \cdot c \cdot S_{\text{нпр}} \cdot 10^3}$
 $r_{20} = 0.024$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С $r_{20\text{ое}}$, о.е.: $r_{20\text{ое}} = \frac{r_{20} \cdot l_2}{U}$
 $r_{20\text{ое}} = 0.045$

Длина вылета лобовой части обмотки $l_{\text{в2}}$, мм: $l_{\text{в2}} = (0.12 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{\text{ср}} + 7.5$
 $l_{\text{в2}} = 65.166$

Ширина шлица паза $b_{\text{ш2}}$, мм: $b_{\text{ш2}} = d_{\text{ш}} + 2 \cdot b_{\text{шк}} + 0.3 \quad b_{\text{ш2}} = 3.345$

3. Обмотка добавочных полюсов.

Поперечная МДС якоря F_2 , А: $F_2 = \frac{w_{y2} \cdot l_2}{2 \cdot p \cdot a} \quad F_2 = 2.764 \times 10^3$

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

$$k_{\partial H} = 1.25 \quad a_{\partial} = 1 \quad w_{\partial} = \frac{k_{\partial H} \cdot F_2 \cdot a_{\partial}}{l_2} \quad w_{\partial} = 16.875 \quad w_{\partial} = 17$$

Уточнённая МДС катушки F_{∂} , А: $F_{\partial} = \frac{w_{\partial} \cdot l_2}{a_{\partial}} \quad F_{\partial} = 3.481 \times 10^3$

Уточнённое отношение МДС некомпенсированной машины: $k_{\partial H} = \frac{F_{\partial}}{F_2}$
 $k_{\partial H} = 1.259$

Принимаем предварительно плотность тока в обмотке J_{∂} , А/мм²: $J_{\partial} = 3.3$

Предварительная площадь поперечного сечения проводника S_{∂} , мм²: $S_{\partial} = \frac{l_2}{a_{\partial} \cdot J_{\partial}}$
 $S_{\partial} = 62.049$

Принимаем провод ПЭТП - 155.

Предварительно больший размер меди (по ширине катушки) $b_{\partial K}$, мм: $b_{\partial K} = 5$

Предварительно меньший размер меди (по высоте катушки) $a_{\partial K}$, мм: $a_{\partial K} = 2.5$

Площадь поперечного сечения проводника $S_{\partial K}$, мм²: $S_{\partial K} = 11.95$

Уточнённая плотность тока в обмотке J_{∂} , А/мм²: $J_{\partial} = \frac{l_2}{a_{\partial K} \cdot S_{\partial K}} \quad J_{\partial} = 6.854$

Предварительная ширина катушки b_{∂} , мм: $b_{\partial} = 0.12 \cdot D_{H2} \quad b_{\partial} = 24.24$

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

$$l_{\partial} = 2 \cdot (l_{\partial} + b_{\partial}) + \pi \cdot (b_{\partial K} + 5) \quad l_{\partial} = 413.86$$

Сопротивление обмотки при температуре 20° С r_{∂} , Ом: $r_{\partial} = \frac{2 \cdot \rho_{\partial} \cdot w_{\partial} \cdot l_{\partial}}{57 \cdot a_{\partial K} \cdot S_{\partial K} \cdot 10^3}$
 $r_{\partial} = 0.017$

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: $F_{\text{пос}} = 0.15 \cdot F_2$

$$F_{\text{пос}} = 414.64$$

Количество витков в катушке $w_{\text{пос}}$: $a_{\text{пос}} = 1$ $w_{\text{пос}} = \frac{F_{\text{пос}} \cdot a_{\text{пос}}}{I_2}$ $w_{\text{пос}} = 2.025$

Уточнённая количество витков в катушке $w_{\text{пос}}$: $w_{\text{пос}} = 2$

Уточнённое значение МДС обмотки $F_{\text{пос}}$, А: $F_{\text{пос}} = \frac{w_{\text{пос}} \cdot I_2}{a_{\text{пос}}}$ $F_{\text{пос}} = 409.521$

Ширина катушки $b_{\text{кпос}}$, мм: $b_{\text{кпос}} = 0.1 \cdot D_{H2}$ $b_{\text{кпос}} = 20.2$

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

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

Сопротивление обмотки при температуре 20° С $r_{\text{пос}}$, Ом: $r_{\text{пос}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot w_{\text{пос}} \cdot l_{\text{кпос}}}{57 \cdot a_{\text{пос}}^2 \cdot S_{\text{ок}} \cdot 10^3}$
 $r_{\text{пос}} = 5.7 \times 10^{-3}$

5. Характеристика намагничивания машины.

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

$$m_m = 1.38 \quad r_{2\Sigma} = m_m \cdot (r_{20} + r_{\partial} + r_{\text{пос}}) \quad r_{2\Sigma} = 0.064$$

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

$$E_2 = U - I_2 \cdot m_m \cdot r_{2\Sigma} - \Delta U_{\text{щ}} \quad E_2 = 89.863$$

Уточнённый магнитный поток Φ_y , Вб: $\Phi_y = \frac{30 \cdot E_2}{\left(\frac{2 \cdot \rho}{a}\right) \cdot n \cdot w_{y2}}$ $\Phi_y = 0.012$

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

Уточнённая магнитная индукция в воздушном зазоре $B_{y\delta}$, Тл: $B_{y\delta} = \frac{\Phi_{\text{y}} \cdot 10^6}{S_{\delta}}$
 $B_{y\delta} = 0.835$

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

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш}2}}{t_2 - b_{\text{ш}2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{\text{ш}2}}} \quad k_{\delta 2} = 1.044 \quad k_{\delta} = k_{\delta 2} \quad k_{\delta} = 1.044$$

МДС воздушного зазора F_{δ} , А: $F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{y\delta} \cdot 10^3$ $F_{\delta} = 1.119 \times 10^3$

Площадь равновеликого поперечного сечения зубцов S_{32} , мм²: $S_{32} = \frac{Z_2}{2 \cdot p} \cdot \alpha \cdot b_{32} \cdot l_{\text{эф}}$
 $S_{32} = 1.854 \times 10^4$

Утонённая магнитная индукция в зубцах B_{32} , Тл: $B_{32} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{S_{32}}$ $B_{32} = 0.496$

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

Средняя длина пути магнитного потока l_{32} , мм: $l_{32} = h_{\text{п}2} - 0.2 \cdot r_2$ $l_{32} = 24.01$

МДС для зубцов F_{32} , А: $F_{32} = 0.1 \cdot H_{32} \cdot l_{32}$ $F_{32} = 1.897$

Площадь поперечного сечения спинки якоря $S_{\text{с}2}$, мм²: $S_{\text{с}2} = h_{\text{с}2} \cdot l_{\text{эф}}$
 $S_{\text{с}2} = 9.682 \times 10^3$

Уточнённая магнитная индукция в спинке якоря $B_{\text{с}2}$, Тл: $B_{\text{с}2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot S_{\text{с}2}}$
 $B_{\text{с}2} = 0.475$

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: $l_{c2} = \frac{\pi \cdot (D_2 + h_{c2})}{4 \cdot p} + \frac{h_{c2}}{2}$
 $l_{c2} = 77.66$

МДС для спинки якоря F_{c2} , А: $F_{c2} = 0.1 \cdot H_{c2} \cdot l_{c2}$ $F_{c2} = 6.912$

Площадь поперечного сечения сердечника полюса S_n , мм²: $S_n = b_{cn} \cdot l_{эфn}$
 $S_n = 7.61 \times 10^3$

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 δ_{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} , мм²: $S_{c1} = h_{1cm} \cdot l_{1cm}$ $S_{c1} = 4.797 \times 10^3$

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

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

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

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

Суммарная МДС магнитной цепи F_{Σ} , А: $F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{32} + F_{сн} + F_{п1} + F_{с1}$
 $F_{\Sigma} = 1.546 \times 10^3$

Коэффициент насыщения магнитной цепи $k_{нас}$: $k_{нас} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta} + F_{п1}} \quad k_{нас} = 1.217$

6. Параллельная обмотка главных полюсов.

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

$$\frac{F_2}{F_{\Sigma}} = 1.788 \quad k_{p2} = 0.16$$

Размагничивающее действие F_{p2} , А: $F_{p2} = k_{p2} \cdot F_2 \quad F_{p2} = 442.282$

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

$$F_{п} = F_{\Sigma} + F_{p2} - F_{нос} \quad F_{п} = 1.579 \times 10^3$$

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

$$b_{кп} = 0.12 \cdot D_{H2} \quad b_{кп} = 24.24$$

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

$$l_{срп} = 2 \cdot (l_{п} + b_{сн}) + \pi \cdot (b_{кп} + 2 \cdot b_3 + 2 \cdot b_u) \quad l_{срп} = 498.031$$

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

$$S' = \frac{1.15 \cdot m \cdot 2 \cdot p \cdot F_{п} \cdot l_{срп}}{57 \cdot U \cdot 10^3} \quad S' = 0.796 \quad S = 0.273$$

Уточнённый коэффициент запаса $k_{зап}$: $k_{зап} = \frac{1.15 \cdot S}{S'} \quad k_{зап} = 0.394$

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/мм²: $J_{п} = 3.45$

Предварительное количество витков одной катушки w_n : $w_n = \frac{k_{зап} \cdot F_n}{J_n \cdot S}$

$$w_n = 661.079$$

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/мм²: $J_n = \frac{k_{зап} \cdot F_n}{w_n \cdot S}$

$$J_n = 1.629$$

Сопротивление обмотки при $t = 20^\circ \text{C}$ r_n , Ом: $r_n = \frac{2 \cdot \rho \cdot w_n \cdot l_{срн}}{57 \cdot S \cdot 10^3}$ $r_n = 179.228$

Максимальный ток обмотки $I_{n\max}$, А: $I_{n\max} = \frac{U}{m \cdot r_n}$ $I_{n\max} = 0.445$

Максимальная МДС $F_{n\max}$, А: $F_{n\max} = I_{n\max} \cdot w_n$ $F_{n\max} = 622.637$

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: $N_{шк} = 34$ $b_{к2} = 1.05 \cdot N_{шк} \cdot d_{у3}$ $b_{к2} = 23.027$

$$b_{к2} = 23$$

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

$$h_{к2} = 29$$

Стабилизирующая последовательная обмотка.

Ширина катушки $b_{кс}$, мм: $b_{кс} = 1.05 \cdot b_{к0}$ $b_{кс} = 25.452$ $b_{кс} = 20$

Высота катушки $h_{кс}$, мм: $h_{кс} = 1.05 \cdot a_{0к}$ $h_{кс} = 2.625$ $h_{кс} = 3$

Обмотка добавочных полюсов.

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

$$\text{Высота катушки } h_{\text{дп}}, \text{ мм:} \quad N_{\text{б}} = 8 \quad h_{\text{дп}} = 1.05 \cdot N_{\text{б}} \cdot a_{\text{дп}} \quad h_{\text{дп}} = 21$$

$$h_{\text{дп}} = 20$$

8. Щётки и коллектор.

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

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

$$\text{Число перекрытых щёткой коллекторных делений } \gamma: \quad \gamma = \frac{t_{\text{щ}}}{t_{\text{к}}} \quad \gamma = 1.105$$

$$\text{Укорочение шага по коллектору } \varepsilon_{\text{к}}: \quad \varepsilon = \frac{K}{2 \cdot p} - y_1 \quad \varepsilon = -0.5$$

$$\text{Ширина зоны коммутации } b_{\text{зк}}, \text{ мм:} \quad b_{\text{зк}} = \frac{\left(\gamma + N_{\text{щ}} - \frac{a}{p} + \varepsilon \right) \cdot t_{\text{к}} \cdot D_{\text{H2}}}{D_{\text{к}}}$$

$$b_{\text{зк}} = 18.863$$

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

$$k_{\text{зк}} = \frac{b_{\text{зк}}}{\tau - b_{\text{сп}}} \quad k_{\text{зк}} = 0.175$$

$$\text{Контактная плотность одной щётки } S_{\text{щ}}, \text{ мм}^2: \quad S_{\text{щ}} = t_{\text{щ}} \cdot a_{\text{щ}} \quad S_{\text{щ}} = 125$$

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

$$S_{\text{щ}\Sigma} = 5.119 \times 10^3$$

$$\text{Количество щёток на одном бражете } N_{\text{щб}}: \quad N_{\text{щб}} = \frac{S_{\text{щ}\Sigma}}{2 \cdot p \cdot S_{\text{щ}}} \quad N_{\text{щб}} = 10.238$$

$$N_{\text{щб}} = 10$$

$$\text{Уточнённая контактная площадь всех щёток } S_{\text{уш}\Sigma}, \text{ мм}^2: \quad S_{\text{уш}\Sigma} = N_{\text{щб}} \cdot 2 \cdot p \cdot S_{\text{щ}\Sigma}$$

$$S_{\text{уш}\Sigma} = 2.048 \times 10^5$$

Уточнённая плотность тока под щётками $J_{щ}$, А/см²: $J_{щ} = \frac{2 \cdot l_2 \cdot 10^2}{S_{yщ\Sigma}} \quad J_{щ} = 0.2$

Активная длина коллектора l_k , мм: $l_k = N_{щ\delta} \cdot (a_{щ} + 8) + 10 \quad l_k = 215$

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 $\lambda_{п2}$: $v_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000}$

$$v_2 = 10.577 \quad \lambda_{п2} = 0.6 \cdot \frac{h_{п2}}{2 \cdot r_2} + \frac{h_{щ2}}{b_{щ2}} + \frac{l_{п2}}{l_2} + \frac{2.5 \cdot 10^6}{w_{с2} \cdot l_2 \cdot A_{2y} \cdot v_2} \cdot \frac{a}{2 \cdot p} \quad \lambda_{п2} = 4.392$$

Максимальная окружная скорость якоря v_{2max} , м/с: $v_{2max} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n_{max}}{60000}$
 $v_{2max} = 21.153$

Реактивная ЭДС коммутирующих секций E_p , В:

$$E_p = 2 \cdot w_{с2} \cdot l_2 \cdot A_{2y} \cdot v_{2max} \cdot \lambda_{п2} \cdot 10^{-7} \quad E_p = 1.968$$

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

$$B_{\delta d} = \lambda_{п2} \cdot A_{2y} \cdot 10^{-4} \quad B_{\delta d} = 0.153$$

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

$$k_{\delta d2} = 1 + \frac{b_{щ2}}{t_2 - b_{щ2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{щ2}}} \quad k_{\delta d2} = 1.044$$

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

$$k_{\delta d} = k_{\delta d2} \quad k_{\delta d} = 1.044$$

Необходимый зазор под добавочным полюсом δ_d , мм: $F_2 = 55$

$$\delta_d = \frac{F_\Sigma - F_2}{0.08 \cdot B_{\delta d} \cdot k_{\delta d}} \cdot 10^{-4} \quad \delta_d = 11.669$$

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

$$\Phi_{\delta d} = b_{zk} \cdot l_{nd} \cdot B_{\delta d} \cdot 10^{-6} \quad \Phi_{\delta d} = 4.388 \times 10^{-4}$$

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

$$l_{2max} = 1.5 \cdot l_2 \quad l_{2max} = 307.14 \quad \Phi_{\delta dp} = \Phi_{\delta d} \cdot \frac{l_{2max}}{l_2} \quad \Phi_{\delta dp} = 6.582 \times 10^{-4}$$

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

$$\Phi_d = \sigma \cdot \Phi_{\delta d} \quad \Phi_d = 5.265 \times 10^{-4}$$

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

$$\Phi_{dp} = \Phi_d \cdot \frac{l_{2max}}{l_2} \quad \Phi_{dp} = 7.898 \times 10^{-4}$$

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

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

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

$$B_{dp} = \frac{\Phi_{dp}}{S_{dp}} \cdot 10^6 \quad B_{dp} = 0.299$$

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

$$B_{c1} = \frac{\sigma \cdot \Phi_y + \Phi_{dp}}{2 \cdot S_{c1}} \cdot 10^6 \quad B_{c1} = 1.643$$

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

$$B_{c2} = \frac{\Phi_y + \Phi_{\partial n}}{2 \cdot S_{c2}} \cdot 10^6 \quad B_{c2} = 0.685$$

10. Номинальный режим.

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

$$m_{32} = 7.8 \cdot Z_2 \cdot b_{32} \cdot \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot l_{\text{эф}} \cdot 10^{-6} \quad m_{32} = 11.844$$

Магнитные потери в зубцах p_{32} , Вт: $p_1 = 2.5 \quad p_{32} = 2.3 \cdot p_1 \cdot B_{32} \cdot m_{32}$
 $p_{32} = 33.775$

Масса стали спинки якоря m_{c2} , кг:

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

$$m_{c2} = 17.647$$

Магнитные потери в спинке якоря p_{c2} , Вт: $p_{c2} = 2.3 \cdot p_1 \cdot B_{c2}^2 \cdot m_{c2}$
 $p_{c2} = 22.878$

Суммарные магнитные потери в стали $p_{c\Sigma}$, Вт: $p_{c\Sigma} = p_{32} + p_{c2} \quad p_{c\Sigma} = 56.653$

Потери на трение щёток о коллектор $p_{\text{тщ}}$, Вт: $p_{\text{тщ}} = 5 \cdot S_{\text{ущ}\Sigma} \cdot v_k \cdot 10^{-3}$
 $p_{\text{тщ}} = 8.338 \times 10^3$

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

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

Суммарные механические потери $p_{\text{мх}\Sigma}$, Вт: $p_{\text{мх}\Sigma} = p_{\text{тщ}} + p_{\text{пв}} \quad p_{\text{мх}\Sigma} = 8.776 \times 10$

Добавочные потери $p_{доб}$, Вт: $p_{доб} = 0.01 \cdot \frac{P_2}{\eta}$ $p_{доб} = 230.303$

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

$$P_{эм} = 2.806 \times 10^4 \quad r_{2\Sigma} = 0.01$$

ЭДС якоря двигателя E_H , В: $E_H = \frac{U - \Delta U_{щ}}{2} + \sqrt{\left(\frac{U - \Delta U_{щ}}{2}\right)^2 - P_{эм} \cdot m_m \cdot r_{2\Sigma}}$
 $E_H = 104.286$

Ток якоря двигателя I_{2H} , А: $I_{2H} = \frac{P_{эм}}{E_H}$ $I_{2H} = 269.096$

Уточнённый ток двигателя I_{yH} , А: $I_{yH} = I_{2H} + I_{nmax}$ $I_{yH} = 269.541$

Подводимая мощность двигателя P_1 , Вт: $P_1 = U \cdot I_{yH}$ $P_1 = 2.965 \times 10^4$

Суммарные потери в двигателе p_{Σ} , Вт: $p_{\Sigma} = P_1 - P_2$ $p_{\Sigma} = 1.065 \times 10^4$

Уточнённый КПД двигателя η_y , о.е.: $\eta_y = \frac{P_1 - p_{\Sigma}}{P_1}$ $\eta_y = 0.641$

Уточнённый магнитный поток $\Phi_{y\partial}$, Вб: $\Phi_{y\partial} = \frac{30 \cdot E_H}{\frac{2 \cdot p}{n} \cdot n \cdot w_2}$ $\Phi_{y\partial} = 9.538 \times 10^{-3}$

Суммарная МДС магнитной цепи F_{Σ} , А: $F_{\Sigma} = 1.546 \times 10^3$

Размагничивающее действие МДС якоря двигателя F_{p2} , А: $F_{p2} = 442.282$

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

$$F_{пос} = 409.521$$

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

$$F_{HП} = F_{\Sigma} + F_{p2} - F_{пос} \quad F_{HП} = 1.579 \times 10^3$$

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:
$$\Phi_{\min} = \frac{\Phi_{y\partial} \cdot n}{n_{\max}}$$
$$\Phi_{\min} = 4.769 \times 10^{-3}$$

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: $r_p = 221.688$

$$r_p = 1.3 \left(\frac{U}{I_{b \min}} - r_n \right) \quad r_p = 61.195$$

Частота вращения при холостом ходе $n_{0 \max}$, об/мин:
$$n_{0 \max} = 30 \cdot \frac{(U - \Delta U_{\text{щ}})}{\left(\frac{2 \cdot p}{a} \right) \cdot \Phi_{\min} \cdot w_2}$$
$$n_{0 \max} = 2.071 \times 10^3$$

Регулирование частоты вращения вниз.

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

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

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

$$\Phi_{2\partial} = \sqrt{\frac{M_{2\partial}}{M_2}} \cdot \Phi_{y\partial} \quad \Phi_{2\partial} = 8.585 \times 10^{-3}$$

Ток якоря при n_{\min} у двигателя с самовентиляцией $I_{2д}$, А:
$$I_{2\partial} = \sqrt{\frac{M_{2\partial}}{M_2}} \cdot I_{yn}$$
$$I_{2\partial} = 242.587$$

$$\text{ЭДС при } n_{\min} E_{2 \min}, \text{ В: } E_{2 \min} = \frac{\Phi_{2\partial} \cdot \frac{2 \cdot p}{a} \cdot n_{\min} \cdot w_2}{30} \quad E_{2 \min} = 32.85$$

$$\text{Напряжение на якоре при } n_{\min} U_{\min}, \text{ В: } U_{\min} = E_{2 \min} + I_{2\partial} \cdot m_m \cdot r_{2\Sigma} + \Delta U_{\text{щ}} \\ U_{\min} = 38.198$$

$$\text{Размагничивающая МДС реакции якоря } F_{\text{ря}}, \text{ А: } F_{\text{ря}} = \frac{I_{2\partial}}{I_{yH}} \cdot F_{p2} \quad F_{\text{ря}} = 398.054$$

$$\text{МДС стабилизирующей обмотки } F_{\text{со}}, \text{ А: } F_{\text{со}} = \frac{I_{2\partial}}{I_{yH}} \cdot F_{\text{пос}} \quad F_{\text{со}} = 368.569$$

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

$$F_{\text{п min}} = F_{\Sigma \text{ min}} + F_{\text{ря}} - F_{\text{со}} \quad F_{\text{п min}} = 602.485$$

$$\text{Ток обмотки возбуждения } I_{\text{п min}}, \text{ А: } I_{\text{п min}} = \frac{F_{\text{п min}}}{w_{\text{п}}} \quad I_{\text{п min}} = 0.43$$

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

$$r_{\text{p max}} = 1.3 \cdot \left(\frac{U}{I_{\text{п min}}} - r_{\text{п}} \right) \quad r_{\text{p max}} = 44.096$$

12. Тепловой и вентиляционный расчёты.

Тепловой расчёт.

Потери в обмотках и контактах щёток.

$$\text{Потери в обмотке якоря } p_{\text{м2}}, \text{ Вт: } p_{\text{м2}} = I_{2\partial}^2 \cdot m_m \cdot r_{2\partial} \quad p_{\text{м2}} = 2.427 \times 10^3$$

$$\text{Потери в обмотке добавочных полюсов } p_{\text{мд}}, \text{ Вт: } p_{\text{мд}} = I_{2\partial}^2 \cdot m_m \cdot r_{\partial} \quad p_{\text{мд}} = 1.651 \times 10^3$$

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

$$p_{\text{м пос}} = I_{2\partial}^2 \cdot m_m \cdot r_{\text{пос}} \quad p_{\text{м пос}} = 569.62$$

$$\text{Потери в обмотке главных полюсов } p_{\text{мп}}, \text{ Вт: } p_{\text{мп}} = U \cdot I_{\text{п max}} \quad p_{\text{мп}} = 48.921$$

$$\text{Потери в контактах щёток } p_{\text{к щ}}, \text{ Вт: } p_{\text{к щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{yH} \quad p_{\text{к щ}} = 539.081$$

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:

$$\Pi_2 = \pi \cdot (r_1 + r_2) + 2 \cdot h_{1ц} \quad \Pi_2 = 61.402$$

Условная поверхность охлаждения пазов S_{yn2} , мм²:

$$S_{yn2} = Z_2 \cdot \Pi_2 \cdot l_2$$
$$S_{yn2} = 2.52 \times 10^5$$

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

$$S_{л2} = 2 \cdot \pi \cdot D_{H2} \cdot l_{б2} \quad S_{л2} = 8.271 \times 10^4$$

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

$$S_{маш} = \pi \cdot D_{H1} \cdot (l_2 + 2 \cdot l_{б2})$$
$$S_{маш} = 3.424 \times 10^5$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и потерь в стали, отнесённых к поверхности охлаждения активной части якоря p_{yn2} , Вт/мм²:

$$p_{yn2} = \frac{\left(\frac{p_{M2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{cp2}} + p_{c\Sigma} \right)}{S_{п2}} \quad p_{yn2} = 0.011$$

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки, отнесённых к поверхности охлаждения пазов p_{ynn2} , Вт/мм²:

$$p_{ynn2} = \frac{\frac{p_{M2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{cp2}}}{S_{yn2}} \quad p_{ynn2} = 3.82 \times 10^{-3}$$

Удельный тепловой поток от потерь в лобовых частях обмотки, отнесённых к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки p_{yl2} , Вт/мм²:

$$p_{yl2} = \frac{\frac{p_{m2} \cdot 2 \cdot l_2}{l_{cp2}}}{S_{л2}} \quad p_{yl2} = 0.012$$

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

$$v_{2H} = \frac{\pi \cdot D_{H2} \cdot n}{60000} \quad v_{2H} = 10.577$$

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

$$\alpha_2 = 1.6 \cdot 10^{-3} \quad \Delta t_{п2} = \frac{p_{yn2}}{\alpha_2} \quad \Delta t_{п2} = 6.604$$

Перепад температуры в изоляции паза и проводов $\Delta t_{ип2}$, °C: $\lambda_{зкб} = 13 \cdot 10^{-4}$

$$\lambda_{1зкб} = 12 \cdot 10^{-4} \quad \Delta t_{ун2} = p_{yn2} \cdot \left(\frac{b_{ук}}{\lambda_{зкб}} + \frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda_{1зкб}} \right) \quad \Delta t_{ун2} = 6.001$$

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

$$\Delta t_{л2} = \frac{p_{yl2}}{\alpha_2} \quad \Delta t_{л2} = 7.274$$

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

$$\Delta t_{ул2} = p_{yl2} \cdot \left(\frac{b_{ук}}{\lambda_{зкб}} + \frac{h_{п2}}{8 \cdot \lambda_{1зкб}} \right) \quad \Delta t_{ул2} = 34.782$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри машины Δt_{o2} , °C:

$$\Delta t_{o2} = \left(\Delta t_{п2} + \Delta t_{ун2} \right) \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}} + \left(\Delta t_{л2} + \Delta t_{ул2} \right) \cdot \frac{2 \cdot l_2}{l_{cp2}} \quad \Delta t_{o2} = 21.679$$

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

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

$$p_{\Sigma} = 1.328 \times 10^4$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха Δt_{Σ} , °C:

$$\Delta t_{\Sigma} = \frac{p_{\Sigma}}{\alpha_2 \cdot S_{\Sigma \text{маш}}} \quad \Delta t_{\Sigma} = 24.245$$

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

$$\Delta t_2 = \Delta t_{02} + \Delta t_{\Sigma} \quad \Delta t_2 = 45.924$$

Обмотка добавочных полюсов.

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

$$\Pi_{\partial} = 12 + 0.33 \cdot D_{\text{H2}} \quad \Pi_{\partial} = 78.66 \quad S_{\text{ипд}} = 2 \cdot p_{\partial} \cdot l_{\text{ср}\partial} \cdot \Pi_{\partial} \quad S_{\text{ипд}} = 1.302 \times 10^5$$

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

$$k = 0.7 \quad p_{\text{уд}} = \frac{k \cdot p_{\Sigma 0}}{S_{\text{ипд}}} \quad p_{\text{уд}} = 8.878 \times 10^{-3}$$

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

$$\alpha_1 = 4.55 \cdot 10^{-3} \quad \Delta t_{\text{нд}} = \frac{p_{\text{уд}}}{\alpha_1} \quad \Delta t_{\text{нд}} = 1.951$$

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

$$b_{\text{нд}} = 0.2 \quad \Delta t_{\text{ид}} = p_{\text{уд}} \cdot \left(\frac{b_{\text{нд}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_{\text{кд}}}{8 \cdot \lambda_{1\text{экв}}} \right) \quad \Delta t_{\text{ид}} = 23.782$$

Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри ма-

шины $\Delta t_{\text{вд}}, ^\circ\text{C}$:

$$\Delta t_{\text{бд}} = \Delta t_{\text{нд}} + \Delta t_{\text{уд}} \quad \Delta t_{\text{бд}} = 25.733$$

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

$$\Delta t_{\text{д}} = \Delta t_{\text{бд}} + \Delta t_{\text{б}} \quad \Delta t_{\text{д}} = 49.978$$

Параллельная и независимая обмотка главных полюсов.

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

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

Условная поверхность охлаждения всех катушек $S_{\text{н}}, \text{мм}^2$:

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

$$S_{\text{н}} = 1.3 \times 10^5$$

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

$$p_{\text{ун}} = \frac{k \cdot p_{\text{мп}}}{S_{\text{н}}} \quad p_{\text{ун}} = 2.633 \times 10^{-4}$$

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

$$\Delta t_{\text{нп}} = \frac{p_{\text{ун}}}{\alpha_1} \quad \Delta t_{\text{нп}} = 0.058$$

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

$$\Delta t_{\text{ун}} = p_{\text{ун}} \cdot \left(\frac{b_{\text{с}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_{\text{к2}}}{8 \cdot \lambda_{1\text{экв}}} \right) \quad \Delta t_{\text{ун}} = 0.671$$

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

$$\Delta t_{\text{овв}} = \Delta t_{\text{нп}} + \Delta t_{\text{уп}} \quad \Delta t_{\text{овв}} = 0.729$$

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

$$\Delta t_{\text{овн}} = \Delta t_{\text{овв}} + \Delta t_{\text{вд}} \quad \Delta t_{\text{овн}} = 26.463$$

Коллектор.

Условная поверхность охлаждения коллектора $S_K, \text{мм}^2$: $S_K = \pi \cdot D_K \cdot l_K$
 $S_K = 1.051 \times 10^5$

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

$$p_K = \frac{P_{\text{кщ}} + P_{\text{мщ}}}{S_K} \quad p_K = 0.084$$

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

$$\alpha_K = 18 \cdot 10^{-2} \quad \Delta t_{\text{кв}} = \frac{p_K}{\alpha_K} \quad \Delta t_{\text{кв}} = 4.694$$

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

$$\Delta t_{\text{кн}} = \Delta t_{\text{кв}} + \Delta t_{\text{в}} \quad \Delta t_{\text{кн}} = 28.939$$

Вентиляционный расчёт.

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

$$k_2 = 2.2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{n}{1000}\right)^3 \cdot \frac{D_{\text{корп}}}{100}} \quad k_2 = 4.322$$

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

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

$$V_B = \frac{k_2 \cdot p_{\Sigma}}{c_B \cdot \Delta t_{B\partial}} \quad V_B = 1.626$$

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

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

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: $m_{M2} = 8.9 \cdot w_{y2} \cdot l_{cp2} \cdot c \cdot S_{нпр} \cdot 10^{-6}$
 $m_{M2} = 11.014$

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

$$m_{M\partial} = 8.9 \cdot 2 \cdot p_{\partial} \cdot w_{\partial} \cdot l_{cp\partial} \cdot S_{\partial k} \cdot 10^{-6} \quad m_{M\partial} = 2.993$$

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

$$m_{M\text{пос}} = 8.9 \cdot 2 \cdot p \cdot w_{\text{пос}} \cdot l_{k\text{пос}} \cdot S_{\partial k} \cdot 10^{-6} \quad m_{M\text{пос}} = 0.413$$

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

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

Масса меди коллектора m_{MK} , кг: $m_{MK} = 5.25 \cdot D_K^{1.5} \cdot l_K \cdot 10^{-5}$ $m_{MK} = 21.896$

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

$$m_{M\Sigma} = m_{M2} + m_{M\partial} + m_{M\text{пос}} + m_{M\text{п}} + m_{MK} \quad m_{M\Sigma} = 43.093$$

Масса стали зубцов сердечника якоря m_{32} , кг: $m_{32} = 11.844$

Масса стали спинки сердечника якоря m_{c2} , кг: $m_{c2} = 17.647$

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

$$m_{cп} = 8.5 \cdot 2 \cdot p \cdot l_{3\phi п} \cdot b_{cп} \cdot h_{п} \cdot 10^{-6} \quad m_{cп} = 17.607$$

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

$$m_{cд} = 7.8 \cdot 2 \cdot p_{\partial} \cdot k_{cдп} \cdot l_{\partial} \cdot b_{\partial} \cdot h_{\partial} \cdot 10^{-6} \quad m_{cд} = 5.334$$

Масса стали станины $m_{cст}$, кг: $m_{cст} = 6.05 \cdot l_{1cm} \cdot (D_{H1}^2 - D_{1cm}^2) \cdot 10^{-6}$
 $m_{cст} = 42.406$

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

$$m_{c\Sigma} = m_{32} + m_{c2} + m_{cп} + m_{cд} + m_{cст} \quad m_{c\Sigma} = 94.837$$

Масса изоляции машины $m_{и}$, кг: $m_{и} = (3.8 \cdot D_{H1}^{1.5} + 0.2 \cdot D_{H1} \cdot l_2) \cdot 10^{-4}$
 $m_{и} = 4.055$

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

$$m_K = (A \cdot D_{H1}^2 + B \cdot D_{H1}^3) \cdot 10^{-6} \quad m_K = 63.368$$

Масса машины $m_{маш}$, кг: $m_{маш} = m_{M\Sigma} + m_{c\Sigma} + m_{и} + m_K$ $m_{маш} = 205.353$

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

$$J_{ид} = 0.6 \cdot D_{H2}^4 \cdot (l_2 + 0.3 \cdot D_{H2} + 0.75 \cdot p_2) \cdot 10^{-12} \quad J_{ид} = 14.448$$

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

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

$$T_{\text{м}} = 0.024$$