

С о д е р ж а н и е

п	Стр.
Введение.....	11
1 Электромагнитный расчет.....	13
1.1 Обоснование и выбор главных размеров.....	13
1.2 Расчет зубцовой зоны и обмотки статора.....	15
1.3 Расчет зубцовой зоны и воздушного зазора.....	17
1.4 Расчет ротора.....	21
1.5 Расчет магнитной цепи.....	26
1.6 Параметры рабочего режима.....	30
1.7 Расчет потерь.....	36
1.8 Расчет рабочих характеристик.....	39
1.9 Расчет пусковых характеристик.....	42
2 Механический расчет.....	53
2.1 Расчет вала на жесткость.....	54
2.2 Расчет вала на прочность.....	56
2.3 Выбор подшипников.....	57
3 Тепловой и вентиляционный расчет.....	60
4 Технологическая часть.....	64
4.1 Постановка задачи.....	65
4.2 Служебное назначение и описание конструкции двигателя...	65
4.3 Анализ технологичности конструкции.....	67
4.4 Размерный анализ конструкции двигателя.....	69
4.5 Составление схемы сборки.....	74
4.6 Разработка маршрутной технологии	76
4.7 Выбор оборудования и оснастка	76
4.8 Расчёт норм времени и количества оборудования	78
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	86
5.1 Планирование научно исследовательских работ	86
5.2 Смета затрат на проектирование	88
5.3 Оценка технического уровня	92
6 Социальная ответственность.....	95
6.1 Анализ опасных и вредных факторов.....	95
6.2 Техника безопасности.....	97
6.3 Расчёт искусственного освещения.....	99
6.4 Производственная санитария	103
6.5 Чрезвычайная ситуация.....	107
6.6 Охрана окружающей среды	110

7	Специальная часть «Совместная работа вентилятор - асинхронный двигатель».....	112
	Заключение.....	116
	Список использованных источников.....	118

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Графический материал:

ФЮРА.526.700.009 СБ Двигатель асинхронный

ФЮРА.711.300.009 Щит подшипниковый

ФЮРА.648.200.009 СБ Ротор без вала

ФЮРА.520.200.009 Двухслойная петлевая обмотка статора

Введение

Асинхронные машины – наиболее распространённые электрические машины. Особенно широко они применяются как электродвигатели и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую. Применение асинхронных двигателей в качестве электропривода подавляющего большинства механизмов объясняется простотой конструкции и надёжностью.

В условиях развития современной энергетики существует ряд актуальных проблем, которыми необходимо задаваться проектировщикам электрических машин. Главными задачами, которые ставятся перед инженерами и разработчиками являются:

- 1.Сбережение электроэнергии потребляемой электроприводами либо системами, в которых работает двигатель.
- 2.Достижение максимальных параметров качества и надежности.

Основные тенденции развития энергетической отрасли говорят, о том, что исторически сложилось так, что для улучшения параметров электрических машин проектировщики делают акцент на изменение параметров и варьирование энергетических показателей проектируемых машин.

На сегодняшний день можно утверждать, что Россия, как и весь мир, переходит на новые методы проектирования, включаются в работу системы автоматизированного проектирования, берутся в учет экономические показатели, учитываются технологические размеры при производстве.

Асинхронные двигатели предназначены для привода вентиляторов типа ВГПМ – 20 главного проветривания метрополитена, питающихся от сети переменного тока напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Данные двигатели должны удовлетворять следующим требованиям:

- Наличие хорошей вентиляции.
- Способность к перегрузочным режимам работы.
- Максимальная надежность в условиях работы.

Особенности проектируемого двигателя – предполагается сварная конструкция станины, короткозамкнутая обмотка ротора, выполненная из меди с припаянными к ней короткозамыкающими кольцами.

Конструкция сварной станины значительно облегчает вес всего двигателя, дает возможность ремонта станины при её механических повреждениях либо отколе одной или нескольких частей.

Короткозамкнутая обмотки ротора из меди позволит уменьшить номинальное скольжение двигателя и тем самым улучшить его энергетические показатели.

1. Электромагнитный расчёт

Техническое задание:

Спроектировать трёхфазный асинхронный двигатель для привода вентилятора с короткозамкнутым ротором:

- номинальная мощность $P_2 = 55000 \text{ Вт}$;
- номинальное напряжение $U_{ном} = 380 \text{ В}$;
- частота напряжения сети $f = 50 \text{ Гц}$;
- число фаз $m = 3$;
- высота оси вращения $h = 315 \text{ мм}$;
- число полюсов $2p = 8$;

Конструктивное исполнение IM1002; исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды IP54, система охлаждения IC0141.

1.1 Обоснование и выбор основных размеров

Данный расчёт производится по методике, приведенной в [1].

1.1.1 Выбираем наружный диаметр статора [1 с.344 таблица 9.8].

При $h = 315 \text{ мм}$, $D_a = 0,529 \text{ м}$.

1.1.2 Внутренний диаметр статора [1 с.344]:

$$D = D_a \cdot K_d ,$$

где K_d – коэффициент, характеризующий отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей при различных числах полюсов [1, с.344, таблица 9.9]: ($K_d = 0,69$).

$$D = 0,529 \cdot 0,69 = 0,365 \text{ м.}$$

Принимаем $D = 0,365 \text{ м.}$

1.1.3 Поллюсное деление τ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,365}{8} = 0,143 \text{ м.}$$

1.1.4 Расчётная мощность [1 с. 344 формула 9.4]:

$$P_1 = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \phi},$$

где k_E – коэффициент отношения ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению.

Выбираем $k_E = 0,96$ [1 с.345 рис. 9.20],

η – КПД двигателя, принимаем $\eta = 0,94$ [1 с.345, рис. 9.21],

$\cos \phi$ – коэффициент мощности, принимаем $\cos \phi = 0,86$.

$$P_1 = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \phi} = \frac{55000 \cdot 0,96}{0,94 \cdot 0,86} = 65314 \text{ Вт.}$$

1.1.5 Предварительный выбор электромагнитных нагрузок на основании опытных данных нагревостойких двигателей:

Линейная нагрузка: $A = 40000 \text{ А/м.}$

Индукция в зазоре: $B_\delta = 0,75 \text{ Тл.} = 0,6 \text{ Тл}$

1.1.6 Выбираем обмоточный коэффициент для двухслойной обмотки (при $2p=8$):

$$K_{об1} = 0,92 .$$

1.1.7 Расчетная длина магнитопровода [1 с.348]:

$$l_{\delta} = \frac{P_1}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{об} \cdot A \cdot B_{\delta}} ,$$

где k_B – коэффициент формы поля,

$$k_B = \pi / 2\sqrt{2} = 3,14 / 2\sqrt{2} = 1,11,$$

Ω – синхронная угловая частота вращения вала,

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{50}{4} = 78,5 \text{ рад/с. (0,6 Тл)}$$

$$l_{\delta} = \frac{P_1}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{об} \cdot A \cdot B_{\delta}} = \frac{55000}{1,11 \cdot 0,365^2 \cdot 78,5 \cdot 0,92 \cdot 40000 \cdot 0,75} = 0,265 \text{ м.}$$

Принимаем $l_{\delta} = 0,28 \text{ м.}$

Критерием правильности выбора главных размеров служит отношение λ , определяемое по формуле:

$$\lambda = l_{\delta} / \tau = 0,28 / 0,143 = 1,95.$$

На этом выбор основных размеров заканчивается. Для дальнейшего расчета необходимо определить полностью конструктивную длину и длину стали сердечников статора и ротора.

1.2 Расчет зубцовой зоны и обмотки статора

1.2.1 Выберем предельные значения зубцового деления t_{Z1} [1 с.351]:

При полуоткрытых прямоугольных пазах статора и $U_H = 380 \text{ В.}$

$$t_{Z1min} = 0,0145 \text{ м}; \quad t_{Z1max} = 0,0165 \text{ м}.$$

1.2.2 Возможное число пазов статора Z_1 [1 с.351]:

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1max}} = \frac{3,14 \cdot 0,365}{0,0165} = 69,49.$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1min}} = \frac{3,14 \cdot 0,365}{0,0145} = 79,1.$$

Выбираем окончательно число пазов статора $Z_1 = 72$. Выбор

обосновывается тем, что число пазов статора в большинстве асинхронных двигателей должно быть кратно числу фаз, а число пазов на полюс и фазу (q) – целым. Обмотки с дробным числом q при сравнительно небольших числах пазов и полюсов, характерных для большинства асинхронных двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Большее количество пазов приводит к улучшению рабочих характеристик, но и одновременно к увеличению расхода меди, т.е. стоимость машины при этом повышается.

Проверим величину q :

$$q = Z_1 / 2p \cdot m = 72 / 8 \cdot 3 = 3.$$

1.2.3 Окончательное значение зубцового деления статора [1 с.238]:

$$t_{Z1} = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{3,14 \cdot 0,365}{8 \cdot 3 \cdot 3} = 0,0159 \text{ м}.$$

Номинальный фазный ток обмотки статора [1 с.284]:

$$I_{ном} = \frac{P_2}{m \cdot U_{ном} \cdot \cos \phi \cdot \eta} = \frac{55000}{3 \cdot 380 \cdot 0,86 \cdot 0,94} = 59,68 \text{ А}.$$

Число проводников в пазу:

$$U_{II} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{ном} \cdot Z_1} = \frac{3,14 \cdot 0,365 \cdot 40000}{59,68 \cdot 72} = 10,67.$$

Принимаем $a=2$ тогда окончательное значение числа проводников в пазу, [1 с.352]: $U_{II} = a \cdot U_{II1}$.

Окончательно принимаем $U_{II} = 20$.

1.2.4 Число витков в фазе обмотки статора [1 с.352]:

$$w_1 = \frac{U_{II} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{20 \cdot 72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 120.$$

1.2.5 Найдём окончательное значение линейной нагрузки [1 с.353]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{ном} \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 59,68 \cdot 120 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,365} = 37473 \text{ А/м}.$$

Полученное значение сопоставляем с рекомендуемым $A = 40000 \text{ А/м}$, с.7. Различия не превышают 6,5 %. Принимаем $A = 37473 \text{ А/м}$.

Рассчитаем значение потока [1 с.352]:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{ном}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot K_{об1} \cdot f_1} = \frac{0,96 \cdot 380}{4 \cdot 1,11 \cdot 120 \cdot 0,92 \cdot 50} = 0,0152 \text{ Вб}.$$

Определим значение индукции в воздушном зазоре [1 с.353]:

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p}{D \cdot l_\delta} = \frac{0,0152 \cdot 4}{0,365 \cdot 0,28} = 0,594 \text{ Тл}.$$

Значения A и B_δ находятся в допустимых пределах к рекомендуемым.

1.2.6 Определение плотности тока

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во-первых, на повышении температуры обмотки и, во-вторых, на КПД двигателя.

Определим допустимую плотность тока в обмотке статора с учётом линейной нагрузки двигателя [1 с.354]:

$$J_1 = \frac{AJ}{A}$$

где AJ – среднее значение тепловой нагрузки [1 с.354] зависящее от D_a ,

$$AJ = 211 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3.$$

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{211 \cdot 10^9}{37473} = 5,63 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

1.2.7 Площадь поперечного сечения эффективного проводника предварительно [1с.353]:

$$q_{эф} = \frac{I_{ном}}{a \cdot J_1} = \frac{59,68}{2 \cdot 5,63 \cdot 10^6} = 5,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Принимаем число элементарных проводников $n_{эл} = 1$ [1 с. 354], тогда

$$q_{эл} = \frac{q_{эф}}{n_{эл}} = \frac{5,29 \cdot 10^{-6}}{1} = 5,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

1.2.8 Уточнённое значение плотности тока в обмотке статора [1 с.354]:

$$J_1 = \frac{I_{ном}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} = \frac{59,68}{2 \cdot 5,29 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 5,63 \cdot 10^6 \text{ А /м}^2.$$

Плотность тока в обмотке статора попадает с достаточной степенью точности в полученное предварительно значение, что является критерием правильности произведенных расчетов.

1.3 Расчёт зубцовой зоны статора и воздушного зазора

1.3.1 Выбор формы паза статора.

Выбираем полуоткрытый прямоугольный паз статора (Рисунок 1.1).

1.3.2 Расчёт зубцовой зоны статора.

Выбираем допустимые значения индукции: в ярме статора – $B_a = 0,643$ Тл; в зубцах статора при постоянном сечении – $B_{Z1} = 1,6$ Тл. Выбираем способ изолирования листов – лакирование, тогда коэффициент заполнения сердечника сталью для статора $k_c = 0,95$ [1 с.358].

1.3.3 Определим ширину зубцов статора [1 с.362]:

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta \cdot l_\delta \cdot t_{Z1}}{B_{Z1} \cdot l_{cm} \cdot k_c} = \frac{0,59 \cdot 0,28 \cdot 0,0159}{1,6 \cdot 0,28 \cdot 0,95} = 6,23 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Найдём высоту ярма статора [1 с.362]:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0,0152}{2 \cdot 0,643 \cdot 0,28 \cdot 0,95} = 0,0444 \text{ м.}$$

Высота шлица $h_a = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м для двигателей с $h = 315$ мм.

Ширина шлица $b_\emptyset = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м [1 с.363] табл.9.16.

Определим размеры паза в штампе [1 с.362]:

Высота паза статора:

$$h_{II} = \frac{D_a - 2h_a - D}{2} = \frac{0,529 - 2 \cdot 0,0444 - 0,365}{2} = 0,0376 \text{ м.}$$

Ширина полуоткрытого паза:

$$b_n = t_{Z1} - b_{Z1} = 0,0159 - 0,0062 = 0,0097 \text{ м.}$$

Высота клина: $h_{кл} = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

1.3.4 Размеры паза в свету с учётом припуска на шихтовку сердечника [1 с.360 363]:

$$\Delta b = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м; } \Delta h = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$b'_{n1} = b_n - \Delta b = (9,7 - 0,3) \cdot 10^{-3} = 9,67 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$h'_n = h_n - \Delta h = (37,6 - 0,3) \cdot 10^{-3} = 37,57 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Односторонняя толщина изоляции в пазу [1 с.77] $b_{из} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Толщина межслойной прокладки $\Delta_{np} = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Площадь поперечного сечения прокладки:

$$S_{np} = b_n \cdot \Delta_{np} = 9,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 5,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Высота паза статора, занятая обмоткой:

$$h_{nm} = h_n - h_{кл} - h_{и} - 4b_{из} - \Delta_{np} = 0,0414 - 0,003 - 0,001 - 4 \cdot 0,0032 - 0,0004 = 0,024 \text{ м.}$$

Ширина паза статора, занятая обмоткой:

$$b_{nm} = b'_{n1} - b_{из} = (9,67 - 1,8) \cdot 10^{-3} = 6,47 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Размеры проводника обмотки статора (первое приближение):

$$\text{Ширина проводника: } b_{m1} = \frac{b_{n1} - \Delta_s}{n_{kt}} = \left(\frac{9,7 - 4,1}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 2,79 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота проводника:

$$a_{m1} = \frac{n_{kt} \cdot h_{mn}}{U_n} - (\Delta_{ipz} + \Delta_{из.вн}) = \frac{2 \cdot 28,8 \cdot 10^{-3}}{20} - (0,68 + 0,31) = 1,89 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Сечение проводника:

$$S_{m1} = a_{m1} \cdot b_{m1} = 1,89 \cdot 10^{-3} \cdot 2,79 \cdot 10^{-3} = 5,27 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Размеры проводника обмотки статора (1, табл.ПЗ.2):

$$\text{Ширина проводника: } b_{m1} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$\text{Высота проводника: } a_{m1} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$\text{Сечение проводника: } S_{m1} = 4,903 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Сечение паза статора:

$$b_{n1} = b_{n1} \cdot h_{n1} = 9,7 \cdot 10^{-3} \cdot 37,6 \cdot 10^{-3} = 3,647 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Сечение меди в пазах статора:

$$q_{m1} = S_{m1} \cdot U_n = 4,958 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 9,92 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

1.3.5 Коэффициент заполнения паза медью:

$$k_3 = \frac{q_{m1}}{S_{n1}} = \frac{9,92 \cdot 10^{-5}}{3,65 \cdot 10^{-4}} = 0,272.$$

Свободная площадь паза:

$$\begin{aligned} s_{cv} &= (b_{n1} - \Delta_s + \Delta_{ipz}) \cdot (h_{n1} - \Delta_{hn}) = (9,7 - 4,1 + 0,68) \cdot 10^{-3} \cdot (37,6 - 8,85) \cdot 10^{-3} = \\ &= 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Коэффициент заполнения паза:

$$k_3 = \frac{(a_{m1} + \Delta_{ipz}) \cdot (b_{n1} + \Delta_{ipz}) \cdot U_n}{s_{cv}} = \frac{(1,9 + 0,68) \cdot (2,8 + 0,68) \cdot 20}{1,81 \cdot 10^{-4}} = 0,995$$

Полученное значение соответствует коэффициенту заполнения обмоткой полуоткрытых и открытых пазов статора (0,93...0,99).

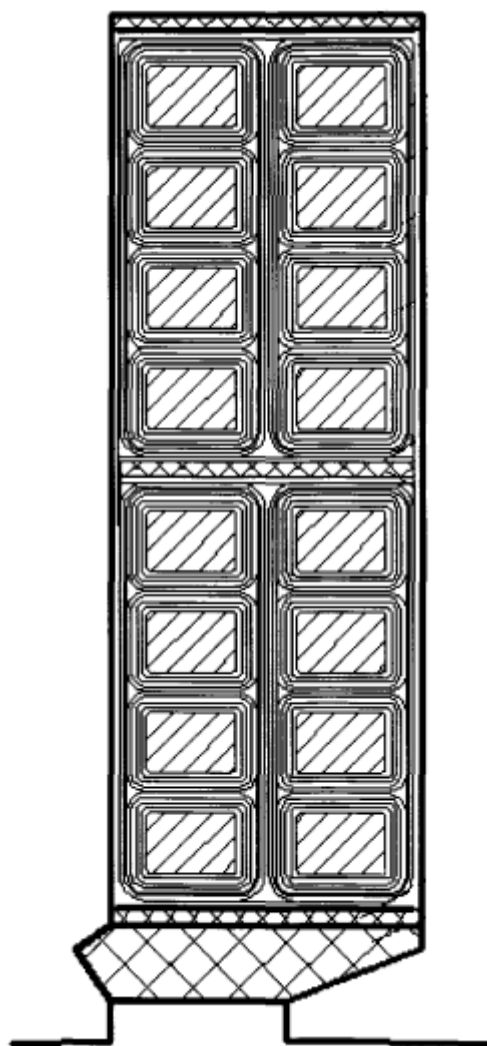


Рисунок 1.1 Эскиз паза статора с заполнением

1.4 Расчет ротора

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает $\cos\varphi$, и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение δ приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и как следствие этого к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше. Необходимо также учесть условие механической прочности так чтобы прогиб вала не привёл к касанию сердечников ротора и статора.

Для двигателей мощностью 55 кВт и числом полюсов $2p=8$, воздушный зазор определяется по рис. 9.31 [1 с.367], $\delta = 0,75$ мм.

Выбор числа пазов ротора особо важен, так как в поле воздушного зазора машины кроме основной гармоники, присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора. Поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В зависимости от соотношения Z_1 и Z_2 в той или иной степени проявляются синхронные или асинхронные моменты от высших гармоник. Их влияние на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента. В поле зазора присутствуют также высшие гармоники, порядок которых определенным образом связан с числами пазов и полюсов машины. Эти зубцовые гармоники вызывают шум и вибрацию при работе двигателя в номинальном режиме. Их влияние особо заметно при малых воздушных зазорах. Наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 сведены

в таблицу [9-18 1 с. 373]. В двигателях малой мощности обычно выполняют $Z_1 > Z_2$. Это связано с технологией изготовления, а также тем, что с увеличением Z_2 ток в стержнях ротора уменьшается и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малыми.

Число пазов ротора [1 с.374] зависит от числа пазов статора Z_1 и числа пар полюсов двигателя $2p$. Согласно рекомендациям выбираем число пазов ротора $Z_2 = 86$.

1.4.1 Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,365 - 2 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} = 0,3635 \text{ м.}$$

1.4.2 Расчетная длина магнитопровода ротора:

$$l_2 = l_\delta + 0,005 = 0,28 + 0,005 = 0,285 \text{ м.}$$

1.4.3 Зубцовое деление ротора:

$$t_{Z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 0,3635}{86} = 0,013 \text{ м.}$$

1.4.4 Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал [1 с.385]:

$$D_J = D_B = k_B \cdot D_a = 0,22 \cdot 0,529 = 0,116 \text{ м.}$$

где $k_B = 0,22$ – эмпирический коэффициент [1 с.385] зависит от высоты оси вращения h и числа полюсов $2p$.

Принимаем $D_J = 0,12 \text{ м.}$

1.4.5 Ток в стержне ротора [1 с.370]:

$$I_2 = k_i \cdot I_{1ном} \cdot v_i$$

где k_i – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение I_1/I_2 : [1 с.370]:

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,86 = 0,888.$$

v_i – коэффициент приведения токов [1 с.374]:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0,902}{86} = 7,551.$$

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 0,888 \cdot 59,68 \cdot 7,551 = 400,17 \text{ А.}$$

1.4.6 Площадь поперечного сечения стержня предварительно [1 с.375]:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}$$

где $J_2 \text{ А /м}^2$ – плотность тока в стержнях ротора, $J_2 = 2,05 \cdot 10^6$ [1 с.374];

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{400,17}{2,05 \cdot 10^6} = 195,21 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

1.4.7 Выбираем пазы ротора прямоугольной формы. Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым характеристикам двигателя и его мощностью. В проектируемом асинхронном двигателе мощностью 55 кВт ротор выполняется с прямоугольными закрытыми пазами. КЗ обмотка ротора сварная из меди. Выбираем допустимую индукцию в узком сечении зубца ротора [1,с.357]
 $B_{Z2} = 1,57 \text{ Тл.}$

Допустимая ширина зубца [1с.362]:

$$b_{Z2ДОП} = \frac{B_\delta \cdot l_\delta \cdot t_{Z2}}{B_{Z2} \cdot l_{cm} \cdot k_c} = \frac{0,594 \cdot 0,28 \cdot 0,0133}{1,57 \cdot 0,285 \cdot 0,97} = 0,0051 \text{ м.}$$

Высота перемычки закрытого паза:

$$h_{pz} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Размеры шлица:

Ширина $b_{\varnothing 2} = 0$ м.

Высота $h_{\varnothing 2} = 0$ м.

Минимальная ширина паза ротора

$$b_{n2} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота паза ротора

$$h_{n2} = \frac{\pi \cdot D_2 - Z_2 \cdot (b_{Z2 \text{ ДОП}} + b_{n2})}{2\pi} = \frac{3,14 \cdot 0,3635 - 86 \cdot (0,0051 + 0,0055)}{2 \cdot 3,14} = 0,0368 \text{ м.}$$

Высота стержня: $h_c = h_{n2} - h_{u2} - h_{p2} = 0,0368 - 0 - 0,0013 = 0,035$ м.

Размеры стержня:

Ширина стержня $b_c = b_{n2} - \Delta_{st2} = 0,0055 - 0,0005 = 0,005$ м.

Высота стержня $h_c = 0,035$ м.

Сечение стержня $q_c = h_c \cdot b_c = 0,035 \cdot 0,005 = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Плотность тока в стержне: $J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{400,17}{1,75 \cdot 10^{-4}} = 2,29 \cdot 10^6 \text{ А /м}^2$.

Уточняем размеры паза ротора.

Высота паза ротора:

$$h_{n2} = h_c + h_{u2} + h_{p2} + \Delta h = 0,035 + 0 + 0,0013 + 0,0005 = 0,0368 \text{ м.}$$

Принимаем $h_{n2} = 0,0368$ м.

Ширина паза ротора $b_{n2} = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м.

1.4.8 Уточняем ширину зубцов ротора

Ширина максимальная

$$b_{Z2\max} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2(h_{u2} + h_{p2})}{Z_2} = \pi \cdot \frac{0,3635 - 2(0 + 0,0013)}{86} = 0,0077 \text{ м.}$$

Ширина минимальная

$$b_{Z2\max} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2h_{n2}}{Z_2} - b_{n2} = \pi \cdot \frac{0,3635 - 2 \cdot 0,0368}{86} - 0,01 = 0,0051 \text{ м.}$$

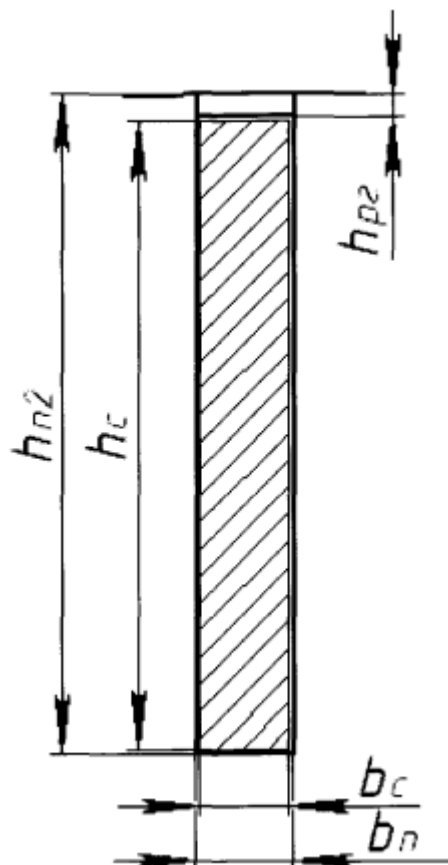


Рисунок 1.2 Эскиз паза ротора

Таблица 1.1 – Размеры паза ротора

h_{n2}	b_{n2}	b_c	h_{pr}	h_c	b_{m2}	h_{m2}
----------	----------	-------	----------	-------	----------	----------

мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
36,8	5,5	5	1,3	35	0	0

1.4.9 Короткозамыкающие кольца:

Ток в короткозамкнутом кольце [1 с.376]:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta},$$

где Δ – коэффициент [1 с.376]:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3,14 \cdot 4}{86} = 0,2912.$$

тогда:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{400,17}{0,2912} = 1374,2 \text{ А.}$$

Размеры замыкающих колец [1 с.377]:

$$h_{кл} = 1,2 \cdot h_{II2} = 1,2 \cdot 0,0368 = 0,0442 \text{ м;}$$

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{7,53 \cdot 10^{-4}}{0,0442} = 0,017 \text{ м;}$$

Принимаем

$$h_{кл} = 0,0616 \text{ м.}$$

$$b_{кл} = 0,015 \text{ м.}$$

Площадь поперечного сечения кольца [1 с.376]:

$$q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл} = 0,0616 \cdot 0,015 = 9,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$J_{кл} = \frac{I_{кл}}{q_{кл}} = \frac{1374,2}{9,24 \cdot 10^{-4}} \text{ А/м}^2.$$

1.5 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводят для режима холостого хода двигателей, при котором характерно относительно сильное насыщения стали зубцов статора и ротора, что приводит к уплощению кривой поля в воздушном зазоре.

Магнитопровод выбирается из стали марки 2211 при высоте оси вращения 315 мм; толщина листов 0,5 мм.

1.5.1 Магнитное напряжение воздушного зазора [1 с.386]:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta}$$

где k_{δ} – коэффициент воздушного зазора [1 с.386]:

$$k_{\delta} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma_1 \cdot \delta}$$

μ_0 – магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

$$\text{где } \gamma_1 = \frac{(b_{u1}/\delta)^2}{5 + (b_{u1}/\delta)} = \frac{(5,5 \cdot 10^{-3}/0,75 \cdot 10^{-3})^2}{5 + (5,5 \cdot 10^{-3}/0,75 \cdot 10^{-3})} = 4,3.$$

тогда:

$$k_{\delta} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0,0159}{0,0159 - 4,36 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}} = 1,258.$$

тогда:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,594 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,258 = 892,6 \text{ А.}$$

Ширина зубца на 1/3 высоты паза статора

$$b_{Z1\backslash 3} = \frac{\pi \left(D + \frac{2}{3} \cdot h_{n1} \right)}{Z1} - b_{n1} = \frac{\pi \left(0,529 + \frac{2}{3} \cdot 0,0376 \right)}{72} - 0,0097 = 0,0073 \text{ м.}$$

Коэффициент ответвления магнитного потока в паз статора

$$k_{px1} = \frac{b_{n1}}{b_{Z1\backslash 3} \cdot k_{c1}} = \frac{0,0097}{0,0093 \cdot 0,95} = 1,4.$$

1.5.2 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны статора прежде найдём индукцию в них [1 с.387]:

$$B_{Z1\backslash 3} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z1}}{b_{Z1\backslash 3} \cdot k_{c1}} = \frac{0,594 \cdot 0,0159}{0,0097 \cdot 0,95} = 1,361 \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора [1 с.387]:

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{Z1} \cdot H_{Z1},$$

где h_{Z1} - высота зубца, $h_{Z1} = h_n = 0,0376$ м;

H_{Z1} – напряжение зубцовой зоны статора [1 с.708];

$$H_{Z1} = 824,37 \text{ А /м} \quad \text{для } B_{Z1} = 1,361 \text{ Тл.}$$

тогда:

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{Z1} \cdot H_{Z1} = 2 \cdot 0,0376 \cdot 824,37 = 62 \text{ А.}$$

1.5.3 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны ротора прежде найдём индукцию в них [1 с.387]:

Расчетная индукция максимальная:

$$B_{Z2\max} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{Z2}}{b_{Z2\min} \cdot l_{cm} \cdot k_{c2}} = \frac{0,594 \cdot 0,28 \cdot 0,0133}{0,0051 \cdot 0,28 \cdot 0,97} = 1,598 \text{ Тл.}$$

Расчетная индукция минимальная:

$$B_{Z2\min} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{Z2}}{b_{Z2\max} \cdot l_{cm} \cdot k_{c2}} = \frac{0,594 \cdot 0,28 \cdot 0,0133}{0,0077 \cdot 0,28 \cdot 0,97} = 1,059 \text{ Тл.}$$

Ширина зубца ротора на высоте $1\backslash 3$ от основания паза:

$$b_{Z2cp} = \frac{\pi \left(D_2 + \frac{4}{3} \cdot h_{n2} \right)}{Z_2} - b_{n2} = \frac{\pi \left(0,3635 + \frac{2}{3} \cdot 0,0368 \right)}{86} - 0,0055 = 0,006 \text{ м.}$$

Индукция в зубцах ротора на высоте $1\backslash 3$ от основания паза ротора:

$$B_{Z2\max} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{Z2}}{b_{Z2cp} \cdot l_{cm} \cdot k_{c2}} = \frac{0,594 \cdot 0,28 \cdot 0,0133}{0,006 \cdot 0,28 \cdot 0,97} = 1,36 \text{ Тл.}$$

Расчетная индукция в зубцах ротора

$$B_{Z2} = 0,25 \cdot (B_{Z2\max} + 2 \cdot B_{Z2cp} + B_{Z2\min}) = 0,25 \cdot (1,598 + 2 \cdot 1,36 + 1,059) = 1,34 \text{ Тл.}$$

Коэффициент ответвления магнитного потока в паз ротора:

$$k_{px2} = \frac{b_{n2}}{b_{Zcp2} \cdot k_{c2}} = \frac{0,0055}{0,006 \cdot 0,97} = 0,947.$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора [1 с.387]:

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2},$$

высота зубца;

$$h_{Z2} = h_{n2} = 0,0368 \text{ м,}$$

H_{Z2} – напряжение зубцовой зоны ротора [1 с.698];

$$H_{Z2} = 793,76 \text{ А /м для } B_{Z2} = 1,34 \text{ Тл.}$$

тогда:

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2} = 2 \cdot 0,0368 \cdot 793,76 = 58,4 \text{ А.}$$

1.5.4 Коэффициент насыщения зубцовой зоны [1 с.391]:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{62 + 58,4}{892,6} = 1,135.$$

Если $k_Z > 1,5 - 1,6$ имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если $k_Z < 1,2$, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В данном расчёте коэффициент насыщения зубцовой

зоны не входит в диапазон рекомендуемых значений, свидетельствуя о малом использовании зубцовой зоны.

1.5.5 Магнитное напряжение ярма статора:

Предварительно найдём длину средней магнитной силовой линии в ярме [1 с.394]:

$$L_a = \pi \cdot \frac{(D_a - h_a)}{2p} = 3,14 \cdot \frac{(0,529 - 0,0444)}{8} = 0,19 \text{ м.}$$

где высота ярма статора:

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{m1} = \frac{0,529 - 0,365}{2} - 0,0376 = 0,0444 \text{ м.}$$

Индукция в ярме статора [1 с.394]:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0,0152}{2 \cdot 0,0444 \cdot 0,28 \cdot 0,95} = 0,64 \text{ Тл.}$$

Напряжённость поля ярма статора при индукции [1 с.697]

$$B_a = 0,64 \text{ Тл, } H_a = 142,12 \text{ А /м.}$$

тогда магнитное напряжение:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,19 \cdot 142,12 = 27 \text{ А.}$$

1.5.6 Расчётная высота ярма ротора

$$h_{j2} = \left(\frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} \right) - \left(\frac{2}{3} \cdot d_{K2} \right) = \left(\frac{0,3635 - 0,12}{2} - 0,0368 \right) - \left(\frac{2}{3} \cdot 0,032 \right) = 0,0636 \text{ м}$$

$$d_{K2} = 0,032, m_{K2} = 12.$$

Предварительно определим длину средней магнитной силовой линии в ярме ротора [1 с.395]:

$$L_j = \pi \cdot \frac{(D_j + h_j)}{2p} = 3,14 \cdot \frac{(120 + 85) \cdot 10^{-3}}{8} = 0,081 \text{ м.}$$

Индукция в ярме ротора [1 с.395]:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0,0152}{2 \cdot 0,085 \cdot 0,82 \cdot 0,97} = 0,44 \text{ Тл.}$$

Напряжённость поля ярма ротора при индукции $B_j = 0,44 \text{ Тл}$ [1 с.697].

$H_j = 96 \text{ А/м}$, тогда магнитное напряжение:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0,081 \cdot 96 = 7,73 \text{ А.}$$

1.5.7 Магнитное напряжение на пару полюсов [1 с.396]:

$$F_{\mu} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 892,6 + 62 + 58,4 + 27 + 7,73 = 1047,8 \text{ А.}$$

1.5.8 Коэффициент насыщения магнитной цепи [1 с.396]:

$$k_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{F_{\delta}} = \frac{1047,8}{892,6} = 1,17.$$

1.5.9 Намагничивающий ток [1 с.396]:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\mu}}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{об1}} = \frac{4 \cdot 1047,8}{0,9 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0,9} = 14,34 \text{ А.}$$

Выразим намагничивающий ток в долях номинального тока двигателя

[1 с.396]:

$$I_{\mu^*} = \frac{I_{\mu}}{I_{ном}} = \frac{14,34}{59,68} = 0,24.$$

Относительное значение I_{μ^*} служит определенным критерием

правильности произведенного выбора и расчета размеров и обмотки

двигателя. В данном расчёте относительное значение I_{μ^*} входит в диапазон рекомендуемых значений.

1.6 Параметры рабочего режима

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора r_1 и x_1 ротора или приведенные к числу витков обмотки статора, сопротивления ротора r_2' и x_2' , и сопротивление взаимной индуктивности x_{12} , и расчетное сопротивление r_{12} , введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

1.6.1 Определим среднюю ширину катушки [1 с.399]:

$$b_{km} = \pi \cdot \frac{(D + h_{II1})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = 3,14 \cdot \frac{(0,365 + 0,0376)}{8} \cdot 0,778 = 0,123 \text{ м.}$$

где β_1 – коэффициент укорочения шага обмотки, принимаем $\beta_1 = 0,778$.

Для катушек из прямоугольного провода рассчитываем:

Допустимое расстояние между медью проводников соседних катушек

$$S = 0,0035 \text{ м.}$$

$$m_1 = \frac{n_{kt}(b_{m1} + S)}{t_{Z1}} = \frac{2 \cdot (0,0028 + 0,0035)}{0,0159} = 0,657.$$

Коэффициент для неизолированных лентой лобовых частей:

$$K_{\ddot{E}} = \frac{1}{\sqrt{1 - m_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,533^2}} = 1,18.$$

Коэффициент вылета, зависящий от числа полюсов [1 с.399]

$$K_{\text{выл}} = \frac{1}{2} \cdot K_{\text{Л}} \cdot m_1 = \frac{1}{2} \cdot 1,326 \cdot 0,657 = 0,436.$$

Длина вылета лобовой части катушки [1 с.399]:

$$l_{\text{выл}} = k_{\text{выл}} \cdot b_{km} + B + 0,5 \cdot h_{n1}$$

где: B – длина вылета прямолинейной части катушек из паза [1 с.399]:

$B = 0,025$ – для катушек из прямоугольного провода

тогда:

$$l_{\text{выл}} = 0,436 \cdot 0,123 + 0,025 + 0,5 \cdot 0,0376 = 0,097 \text{ м.}$$

Длина пазовой части равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_{\text{П1}} = l_{\delta} = 0,28 \text{ м.}$$

Длина лобовой части обмотки из прямоугольного провода [1 с.398]:

$$l_{\text{л1}} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{км}} + 2 \cdot B + h_{\text{н1}} = 1,326 \cdot 0,123 + 2 \cdot 0,025 + 0,0376 = 0,25 \text{ м,}$$

где $K_{\text{л}}$ – коэффициент зависит от числа полюсов [1 с.399] для не изолированных лентой лобовых частей, $K_{\text{л}} = 1,326$.

Присвоим: $l_{\text{л1}} = 0,29 \text{ м.}$

Средняя длина витка [1 с.398]:

$$l_{\text{ср1}} = 2 \cdot (l_{\text{П1}} + l_{\text{л1}}) = 2 \cdot (0,28 + 0,29) = 1,14 \text{ м.}$$

Общая длина проводников фазы обмотки [1 с.398]:

$$L_{\text{1ср}} = l_{\text{ср1}} \cdot w_1 = 1,14 \cdot 120 = 136,8 \text{ м.}$$

Активное сопротивление обмотки статора [1 с.397]:

$$r_1 = k_R \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_{\text{1ср}}}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 1 \cdot \frac{2,46 \cdot 10^{-8} \cdot 136,8}{4,958 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,34 \text{ Ом,}$$

где $\rho_{115} = 2,46 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди при температуре плюс 115 °С; коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока $k_R = 1$ [1 с.398].

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,34 \cdot \frac{59,68}{380} = 0,0534.$$

1.6.2 Сопротивление стержня обмотки ротора [1 с.406]:

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_2}{q_c} = 24,64 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{0,285}{1,75 \cdot 10^{-4}} = 40,14 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

$$\rho_{115} = \rho_{20} \cdot k_{to} = \frac{10^{-6}}{56} \cdot 1,38 = 24,64 \cdot 10^{-9} \text{ Ом/м}.$$

где $\rho_{20} = 10^{-6} / 56 \text{ Ом/м}$;

$$k_{to} = 1,38.$$

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключённого между двумя соседними стержнями [1 с.406]:

$$r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = 24,64 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,3}{86 \cdot 9,24 \cdot 10^{-4}} = 5,825 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}.$$

1.6.3 Активное сопротивление фазы обмотки ротора [1 с.406]:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 40,14 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 5,825 \cdot 10^{-7}}{0,29^2} = 5,39 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Коэффициент приведения тока кольца к току стержня:

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{2}{86}\right) = 0,29.$$

Для дальнейших расчётов полученное сопротивление фазы обмотки ротора к числу витков обмотки статора [1 с.406]:

$$r'_{2} = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m}{Z_2} \cdot \left(\frac{w_1 \cdot K_{об1}}{k_{ск}}\right)^2 = 5,39 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3}{86} \cdot \left(\frac{120 \cdot 0,9}{1}\right)^2 = 0,088 \text{ Ом},$$

где $k_{ск} = 1$.

Относительное значение [1 с.411]:

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,088 \cdot \frac{59,68}{380} = 0,014.$$

1.6.4 Коэффициенты магнитной проводимости

k_{β} – коэффициент, зависящий от укорочения шага обмотки, т.к.

укорочение отсутствует то выбираем $k_{\beta} = 1$ [1 с.403]:

$h_1 = 0$ (т.к. проводники закреплены пазовой крышкой);

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния [1 с.403]:

$$\begin{aligned} \lambda_{II1} &= \frac{(h_2 - \Delta_{мсл}) k_{\beta}}{3 \cdot b_{n1}} + \left(\frac{3h_{к1} + h_{s1}}{b_{n1} + b_{u1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \right) \cdot k'_{\beta} + \frac{\Delta_{мсл}}{4 \cdot b_{n1}} = \\ &= \frac{(0,0343 - 0,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,875}{3 \cdot 9,7 \cdot 10^{-3}} + \left(\frac{3 \cdot 3 + 1,25}{9,7 + 5,5} \cdot 10^{-3} + \frac{1,25}{5,5} \cdot 10^{-3} \right) \cdot 0,833 + \\ &+ \frac{0,8}{4 \cdot 9,7} \cdot 10^{-3} = 1,78, \end{aligned}$$

где $h_2 = h_{n1} - h_{к1} - (h_{s1} - \Delta_{мк}) = (37,6 - 3 - (1,25 - 1)) \cdot 10^{-3} = 0,0343 \text{ м},$

$$k'_{\beta} = 0,25 + 0,75 \cdot \beta_1 = 0,25 + 0,75 \cdot 0,778 = 0,83,$$

$$k_{\beta} = 0,25 + 0,75 \cdot k'_{\beta} = 0,25 + 0,75 \cdot 0,83 = 0,875.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1 с.403]:

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}} \cdot (l_{л} - 0,64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{3}{0,28} \cdot (0,29 - 0,64 \cdot 0,778 \cdot 0,143) = 0,8.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1 с.407]:

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_{Z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi,$$

где ξ – коэффициент [1 с.407]:

$$\begin{aligned} \xi &= \left(2 \cdot \frac{t_{Z2}}{t_{Z1}} - \frac{t_{Z1}}{t_{Z2}} \cdot \Delta z \right) \cdot k_{\beta} - K_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{Z2}}{t_{Z1}} \right)^2 = \\ &= \left(2 \cdot \frac{0,0133}{0,016} - \frac{0,016}{0,0133} \cdot 0,1 \right) \cdot 0,875 - 0,9^2 \cdot \left(\frac{0,0133}{0,016} \right)^2 = 0,92. \end{aligned}$$

тогда:

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_{Z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{0,016}{12 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,26} \cdot 0,92 = 1,3.$$

1.6.5 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора [1 с.402]:

$$\begin{aligned} X_1 &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{П1} + \lambda_{л1} + \lambda_{Д1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{120}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,28}{4 \cdot 3} \cdot (1,78 + 0,8 + 1,3) = 1,03 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки статора [с.205]:

$$x_{1*} = X_1 \cdot \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 1,03 \cdot \frac{59,68}{380} = 0,162.$$

1.6.6 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора [1 с.407]:

$$\lambda_{П2x} = \left(\frac{h_c}{3b_{n2}} + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \right) \cdot k_D = \left(\frac{0,035}{3 \cdot 0,0055} \right) \cdot 1 = 2,12.$$

$$\lambda_{П2} = \lambda_{П2x} + \left(0,3 + \frac{1,12 \cdot h_{p2} \cdot 10^6}{I_2} \right) \cdot k_D = 2,12 + \left(0,3 + \frac{1,12 \cdot 1,3 \cdot 10^6}{400,17} \right) \cdot 1 = 6,1$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1 с.409]:

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \left[\frac{4,7 \cdot D_{кл.ср}}{2 \cdot h_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} \right] = \frac{2,3 \cdot 0,3}{86 \cdot 0,28 \cdot 0,29^2} \cdot \lg \left[\frac{4,7 \cdot 0,3}{2 \cdot 0,0616 + 2 \cdot 0,015} \right] = 0,324.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1 с.409]: $\lambda_{Д2} = \frac{t_{Z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi,$

$$\text{где } \xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta z}{1 - \left[\frac{p}{Z_2} \right]^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 4}{86} \right)^2 - \frac{0,1}{1 - \left[\frac{4}{86} \right]^2} = 1.$$

$$\lambda_{Д2} = \frac{0,0133}{12 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,26} \cdot 1 = 1,178.$$

1.6.7 Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора [1 с.407]:

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{П2} + \lambda_{л2} + \lambda_{Д2}) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,28 \cdot (6,1 + 0,324 + 1,178) \cdot 10^{-6} = 836,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Приводим X_2 к числу витков статора [1 с.409]:

$$x'_2 = X_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2} = 836,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (120 \cdot 0,9)^2}{86} = 1,367 \text{ Ом.}$$

Относительное значение [1 с.411]:

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{ном}}{U_{ном}} = 1,367 \cdot \frac{59,68}{380} = 0,215.$$

Для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчёта характеристик параметры асинхронных машин выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток.

1.7 Расчет потерь

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные) электрические вентиляционные механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в стали рассчитываются только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны. Добавочные потери в стали подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах). Добавочные потери при нагрузке возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций и индукции в воздушном зазоре ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т.е. токов между стержнями замыкающихся через листы сердечника ротора.

1.7.1 Основные потери в стали статора асинхронной машины [1 с.412]:

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot \left(k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{Zcp}^2 \cdot m_{z1} \right),$$

где $p_{1,0/50}$ – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц. [1 с.412]: сталь 2212 толщиной 0,5 мм,

$$p_{1,0/50} = 2,6 \text{ Вт/кг},$$

β – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания, для большинства сталей $\beta = 1,5$,

$k_{\partial a}$ и $k_{\partial z}$ – коэффициенты учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов.

$$k_{\partial a} = 1,6, \quad k_{\partial z} = 1,8.$$

m_a, m_{Z1} – масса стали ярма и зубцов статора [1 с.412]:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c,$$

$$m_{Z1} = h_{Z1} \cdot b_{Z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c,$$

где γ_c – удельная масса стали; $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$ [1 с.412]

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = 3,14 \cdot (0,529 - 0,0444) \cdot 0,0444 \cdot 0,28 \cdot 0,95 \cdot$$

$$x 7,8 \cdot 10^3 = 140,25 \text{ кг}.$$

$$m_{Z1} = h_{Z1} \cdot b_{Z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = 0,0376 \cdot 6,23 \cdot 10^{-3} \cdot 72 \cdot 0,28 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 =$$

$$= 35 \text{ кг}.$$

тогда:

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{Z1}^2 \cdot m_{z1}) =$$

$$= 2,6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 0,643^2 \cdot 140,25 + 1,8 \cdot 1,6^2 \cdot 35) = 660 \text{ Вт.}$$

Для нахождения поверхностных потерь определяют амплитуду пульсаций индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta \quad [1 \text{ с.413}],$$

где: $b_\delta / \delta = 7,3$ – по данному значению коэффициент $\beta_{02} = 0,357$ [1 с.413],

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0,357 \cdot 1,26 \cdot 0,594 = 0,267 \text{ Тл на } 1 \text{ м}^2 \text{ поверхности.}$$

Поверхностные потери в роторе [1 с.412]:

$$P_{пов2} = p_{пов2} \cdot (t_{Z2} - b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta,$$

где $p_{пов2}$ – удельные поверхностные потери, т.е. потери в поверхностном слое коронок зубцов ротора [1 с.413]:

$$p_{пов2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{Z1} \cdot 10^3)^2,$$

где k_{02} – коэффициент учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери [1 с.413], $k_{02} = 1,7$;

$$p_{пов2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{Z1} \cdot 10^3)^2 = 0,5 \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{10000}\right)^{1,5} \cdot$$

$$\cdot (0,267 \cdot 0,016 \cdot 10^3)^2 = 193,2 \text{ Вт/м}^2.$$

тогда:

$$P_{пов2} = p_{пов2} \cdot (t_{Z2} - b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta = 193,2 \cdot (0,0133 - 0) \cdot 86 \cdot 0,28 = 61,76 \text{ Вт.}$$

1.7.2 Для определения пульсационных потерь необходимо определить массу зубцов ротора [1 с.414]:

$$m_{Z2} = Z_2 \cdot h_{Z2} \cdot b_{Z2cp} \cdot l_{\delta} \cdot k_{c2} \cdot \gamma_c = 86 \cdot 0,0368 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,28 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 40,13$$

кг.

А также амплитуду пульсаций индукции в среднем сечении зубцов [1 с.414]:

$$B_{нул2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{Z2}} \cdot B_{Z2} = \frac{4,36 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0133} \cdot 1,34 = 0,165 \text{ Тл.}$$

Тогда пульсационные потери в зубцах ротора [1 с.414]:

$$P_{нул2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{нул2} \right)^2 \cdot m_{Z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{1000} \cdot 0,165 \right)^2 \cdot 40,13 = 352,4 \text{ Вт}$$

1.7.3 Сумма добавочных потерь в стали [1 с.415]:

$$P_{ст.доб} = P_{пов2} + P_{нул2} = 61,76 + 352,37 = 414,14 \text{ Вт.}$$

1.7.4 Полные потери в стали [1 с.414]:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 660 + 414,14 = 1074,18 \text{ Вт.}$$

1.7.5 Механические потери [1 с.414]:

$$P_{мех} = K_T \cdot (10 \cdot D_a)^3 = 0,35 \cdot (10 \cdot 0,529)^3 = 51,8 \text{ Вт.}$$

где K_T – коэффициент, для двигателей с $2p=8$,

$$K_T = 1,3(1 - D_{\alpha}) = 1,3(1 - 0,529) = 0,35 [1 \text{ с.416}].$$

1.7.6 Для определения тока холостого хода двигателя принимают, что потери на трение и вентиляцию, и потери в стали при холостом ходе такие же как и при номинальном режиме. При этом условии активная составляющая тока холостого хода [1 с.417]:

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{элх.х}}{m \cdot U_{1ном}},$$

где $P_{элх.х}$ – электрические потери в статоре при холостом ходе [1 с.417]:

$$P_{элх.х} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 14,34^2 \cdot 0,34 = 209,8 \text{ Вт.}$$

$$\text{тогда: } I_{x.x.a} = \frac{P_{cm} + P_{mex} + P_{\text{эл}x.x}}{m \cdot U_{ном}} = \frac{1074,2 + 51,8 + 209,8}{3 \cdot 380} = 1,17 \text{ А.}$$

тогда ток холостого хода двигателя [1 с.417]:

$$I_{x.x} \approx \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{1,17^2 + 14,34^2} = 14,39 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе [1 с.417]:

$$\cos \varphi_{x.x} = \frac{I_{x.x.a}}{I_{x.x}} = \frac{1,17}{14,39} = 0,081.$$

Принимаем, что потери на трение и вентиляцию, и потери в стали при х.х. двигателя такие же, как и при номинальном режиме.

Потери холостого хода (постоянные потери):

$$P_{x.x} = P_{cm} + P_{mex} = 1074,2 + 51,8 = 1126 \text{ Вт.}$$

1.8 Расчёт рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости $P_1, I_1, \cos \varphi, \eta, s_1 = f(P_2)$. Рабочие характеристики можно рассчитать по круговой диаграмме или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s = (0,2 \dots 0,5) \cdot s_{ном}$. Номинальное скольжение можно предварительно определить из равенства $s_{ном} = r'_{2*}$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти-шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы.

1.8.1 Сопротивление схемы замещения [1 с.410]:

$$r_{12} = \frac{P_{cm.осн}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{660}{3 \cdot 14,34^2} = 1,07 \text{ Ом.}$$

1.8.2 Сопротивление взаимной индукции обмоток статора [1 с.410]:

$$x_{12} = \frac{U_{1ном}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{380}{14,34} - 1,03 = 25,47 \text{ Ом.}$$

Полное значение коэффициента c_1 [1 с.419]:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{1,03}{25,47} = 1,04.$$

1.8.3 Активная составляющая тока синхронного холостого хода [1 с.420]:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{660 + 3 \cdot 14,34^2 \cdot 0,341,7}{3 \cdot 380} = 0,76 \text{ А.}$$

1.8.4 Коэффициенты для расчёта пусковых характеристик [1 с.420]:

$$a' = c_1^2 = 1,04^2 = 1,083;$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1,04 \cdot 0,34 = 0,35 \text{ Ом;}$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2) \cdot r_1 = 1,04 \cdot (1,03 + 1,04 \cdot 1,37) \cdot 0,34 = 2,55 \text{ Ом.}$$

Потери, неизменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{ст} + P_{мех} = 1074,2 + 51,8 = 1126 \text{ Вт.}$$

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений указанных в таблице №1.2.

Таблица 1.2 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Расчётные формулы	Размерность	Скольжение s					
		0,001	0,005	0,01	0,013	0,0171	0,019
$a' \cdot r'_2 / s'$	Ом	95,3	19	9,5	7,3	5,7	5
$R = a + a' \cdot r'_2 / s$	Ом	41,7	19,4	9,9	7,7	6	5,37
$X = b + b' \cdot r'_2 / s$	Ом	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	41,8	19,6	10,2	8,1	6,5	5,9
$I''_2 = U_{1ном} / Z$	А	9,1	19,4	37,2	46,9	58,1	63,9

$\cos \phi'_2 = R/Z$	-	0,998	0,992	0,968	0,951	0,921	0,9
$\sin \phi'_2 = X/Z$	-	0,061	0,13	0,25	0,31	0,39	0,43
$I_{1a} = I_{0a} + I''_2 \cdot \cos \phi'_2$	A	0,76	20	36,8	45,3	54,2	58,5
$I_{1p} = I_{0p} + I''_2 \cdot \sin \phi'_2$	A	14,3	16,9	23,6	29,1	37	41,8
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	A	14,36	26,16	43,74	53,85	65,63	71,87
$I'_2 = c_1 \cdot I''_2$	A	9,46	20,19	38,72	48,82	60,41	66,5
$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	1,13	22,8	41,95	51,64	61,83	66,7
$P_{\text{э1}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,21	0,7	1,95	2,96	4,4	5,27
$P_{\text{э2}} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,024	0,11	0,4	0,63	0,96	1,17
$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \cdot (I_1/I_{1h})^2 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,006	0,114	0,21	0,26	0,31	0,33
$\sum P = (P_{\text{см}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{доб}}) \cdot 10^{-3}$	кВт	1,13	2,05	3,68	4,98	6,79	8,53
$P_2 = (P_1 - \sum P) \cdot 10^{-3}$	кВт	0	20,75	38,3	46,7	55	58,16
$\eta = 1 - \sum P/P_1$	-	0	0,91	0,912	0,904	0,89	0,87
$\cos \phi = I_{1a}/I_1$	-	0,053	0,76	0,84	0,84	0,826	0,81

Выразим в относительных единицах:

Ток статора $I_{1i} = \frac{I_{1i}}{I_{1ном}}$, о.е.

Подводимая активная мощность $P_{1i} = \frac{P_{1i}}{P_{2ном}}$, о.е.

Частота вращения $n_{2i} = 1 - s_i$, о.е.

Полезная мощность на валу двигателя $P_{2i} = \frac{P_{2i}}{P_{2ном}}$, о.е.

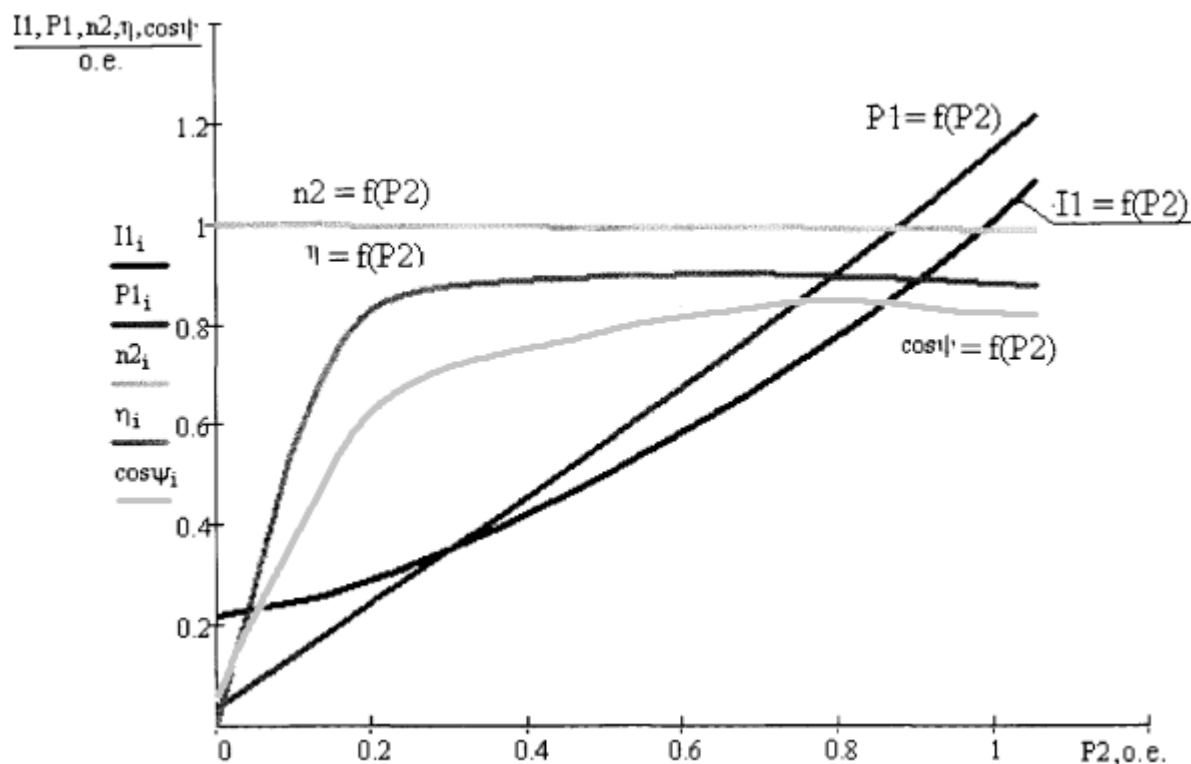


Рисунок 1.3 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

$$I_{1ном} = 65,63 \text{ А};$$

$$P_1 = 61,83 \text{ Вт};$$

$$n_2 = 737 \text{ об/мин};$$

$$P_{2ном} = 55 \text{ А}.$$

1.9 Расчёт пусковых характеристик

Пусковыми характеристиками асинхронного двигателя являются зависимости $I^* = f(s)$ и $M^* = f(s)$. Отношение начального пускового момента к номинальному M^* с короткозамкнутым ротором должно быть не ниже, а отношение начального пускового тока к номинальному – не выше значений оговоренных в ГОСТе. В пусковых режимах пусковой ток может значительно превышать номинальный. Это приводит к насыщению магнитопровода потоками рассеяния, вследствие чего уменьшаются индуктивные рассеяния обмоток двигателя. Кроме того в стержнях КЗ обмотки ротора необходимо учитывать эффект вытеснения тока. Если насыщение приводит к увеличению

как пускового тока, так и пускового момента, то эффект вытеснения тока в стержнях КЗ обмотки ротора приводит к увеличению активного сопротивления обмотки ротора и к снижению кратности пускового тока.

Определим ряд величин для нахождения активного сопротивления обмотки ротора.

Проведём расчёт для момента пуска $s = 1$.

1.9.1 Параметры с учетом вытеснения тока [1 с.427] для медной обмотки при температуре плюс 115°C :

$$\xi = 2\pi \cdot h_c \cdot \sqrt{f \cdot \frac{s \cdot 10^{-7}}{\rho_{115}}} = 2\pi \cdot 0,0368 \cdot \sqrt{50 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-7}}{2,46 \cdot 10^{-8}}} = 3,29,$$

где h_c – высота стержня в пазу,

$$h_c = h_{II2} - (h_{u2}) = 0,0368 - 0 = 0,0368 \text{ м.}$$

В случае прямоугольных стержней короткозамкнутой обмотки ротора коэффициент демпфирования k_d и коэффициент увеличения активного сопротивления стержня k_r рассчитываются по формулам:

$$k_r = \xi \cdot \frac{\text{sh}x + \sin(2 \cdot \xi)}{\text{ch}x - \cos(2 \cdot \xi)} = 3,29 \cdot \frac{362,51 + \sin(2 \cdot 3,29)}{362,51 - \cos(2 \cdot 3,29)} = 3,3.$$

$$\text{где } \text{sh}x = \frac{\varepsilon^{2 \cdot \xi} - \varepsilon^{-2 \cdot \xi}}{2} = \frac{\varepsilon^{2 \cdot 3,29} - \varepsilon^{-2 \cdot 3,29}}{2} = 362,51;$$

$$\text{ch}x = \frac{\varepsilon^{2 \cdot \xi} + \varepsilon^{-2 \cdot \xi}}{2} = \frac{\varepsilon^{2 \cdot 3,29} + \varepsilon^{-2 \cdot 3,29}}{2} = 362,51$$

$$k_d = \frac{3}{2 \cdot \xi} \cdot \frac{\text{sh}x - \sin(2 \cdot \xi)}{\text{ch}x - \cos(2 \cdot \xi)} = \frac{3}{2 \cdot 3,29} \cdot \frac{362,51 - \sin(2 \cdot 3,29)}{362,51 - \cos(2 \cdot 3,29)} = 0,46.$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока [1 с.429]:

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1 + \frac{4 \cdot 10^{-5}}{5,39 \cdot 10^{-5}} \cdot (3,3 - 1) = 2,72.$$

Приведённое активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом вытеснения тока:

$$r'_{2\xi} = r'_2 \cdot K_R = 0,088 \cdot 2,72 = 0,24 \text{ Ом.}$$

1.9.2 Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока.

Для определения коэффициента, характеризующего изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока, найдём коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учётом этого эффекта:

$$\begin{aligned} \lambda_{П2\xi} &= \lambda_{П2x} \cdot k_D + \left(0,3 + \frac{1,12 \cdot h_{p2} \cdot 10^6}{I_{2c} \cdot k_{pi2}} \right) \cdot k_D = \\ &= 2,12 \cdot 0,46 + \left(0,3 + \frac{1,12 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{456,12 \cdot 3,94} \right) \cdot 0,46 = 1,47 \end{aligned}$$

где $K_D = \varphi' = 0,46$.

Тогда коэффициент, характеризующий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока

[1 с.431]:

$$K_x = \frac{\lambda_{П2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{Д2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{л2} + \lambda_{Д2}} = \frac{1,47 + 0,32 + 1,18}{6 + 0,32 + 1,18} = 0,4.$$

Приведенное индуктивное сопротивление с учетом эффекта вытеснения тока находится по [1 с.431]:

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x = 1,37 \cdot 0,4 = 0,54 \text{ Ом.}$$

Пусковые параметры определяются по [1 с.437]:

$$x_{12П} = k_\mu \cdot x_{12} = 1,17 \cdot 25,47 = 30 \text{ Ом.}$$

При этих допущениях коэффициент $c_{1П}$ [1 с.437]:

$$c_{1П} = 1 + \frac{x_1}{x_{12П}} = 1 + \frac{1,03}{30} = 1,034.$$

Для расчёта токов с учётом влияния эффекта вытеснения тока прежде найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1 с.437]:

$$R_{II} = r_1 + c_{1II} \frac{r'_2 \xi}{s} = 0,34 + 1,034 \cdot 1,24 = 0,59 \text{ Ом.}$$

$$X_{II} = x_1 + c_{1II} \cdot x'_2 \xi = 1,03 + 1,034 \cdot 0,54 = 1,59 \text{ Ом.}$$

Тогда ток в обмотке ротора [1 с.437]:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{II}^2 + X_{II}^2}} = \frac{380}{\sqrt{0,59^2 + 1,59^2}} = 224,7 \text{ А.}$$

Ток в обмотке статора [1 с.437]:

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{II}^2 + (X_{II} + x_{12II})^2}}{c_{1II} \cdot x_{12II}} = 224,7 \cdot \frac{\sqrt{0,59^2 + (1,59 + 30)^2}}{1,034 \cdot 30} = 228,8 \text{ А.}$$

Таблица 1.3 – Расчет токов в пусковом режиме АД с КЗ ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока

Расчётные формулы	Скольжение s	Скольжение s					
		1	0,64	0,44	0,2	0,05	0,001
$\xi = 2\pi \cdot h_c \cdot \sqrt{f \cdot \frac{s \cdot 10^{-7}}{\rho_{75}}}$	-	2,82	2,25	1,88	1,26	0,63	0,09
$k_r = \xi \cdot \frac{\text{sh}(2 \cdot \xi) + \sin(2 \cdot \xi)}{\text{ch}(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}$	-	2,81	2,17	1,72	1,18	1,04	1,02
$k_{\bar{A}} = \frac{3}{2 \cdot \xi} \cdot \frac{\text{sh}(2 \cdot \xi) - \sin(2 \cdot \xi)}{\text{ch}(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}$	мм	0,54	0,67	0,78	0,92	0,97	0,99
$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1)$	-	1,83	1,53	1,33	1,08	1,02	1

$r'_{2\xi} = r'_{2} \cdot K_R$	ОМ	1,27	1,06	0,92	0,75	0,706	0,699
$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2x} +$ $+ \left(0.3 + \frac{1.12 \cdot h_{p2} \cdot 10^6}{I_{2c} \cdot k_{pi2}} \right) \cdot k_{\mu}$	-	1	1,03	1,06	1,1	1,12	1,13
$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\mu 2} + \lambda_{\mu 2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\mu 2} + \lambda_{\mu 2}}$	-	0,582	0,57	0,57	0,58	0,58	0,58
$x'_{2\xi} = x'_{2} \cdot K_x$	ОМ	4,53	4,44	4,49	4,55	4,58	4,59
$R_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi} \frac{r'_{2\xi}}{s}$	ОМ	3,02	3,42	3,84	5,57	16,2	718
$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} x'_{2\xi}$	ОМ	13,03	12,93	12,98	13,04	13,07	13,08
$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}}$	A	259,2	259	256	244,2	166,4	4,82
$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}}$	A	262,7	262,4	259,3	247,6	168,8	11,17

Для непосредственного расчёта пусковых характеристик с учётом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния необходимо задаться предполагаемой кратностью увеличения тока $k_{нас}$ обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны. Ориентировочно для расчёта пусковых режимов принимают $k_{нас} = 1,25 \div 1,4$ [1 с.432].

Произведем подробный расчёт для $s = 1$. Примем $k_{нас} = 1,071$.

1.9.3 Определим среднюю МДС обмотки отнесенную к одному пазу обмотки статора [1 с.432]:

$$F_{П.ср} = 0,7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot U_{II}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right),$$

где $k_{y1} = 1$ – коэффициент укорочения.

тогда:

$$\begin{aligned} F_{П.ср} &= 0,7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot U_{II}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = \\ &= 0,7 \cdot \frac{228,8 \cdot 1,071 \cdot 2}{2} \cdot \left(0,83 + 0,94 \cdot \frac{72}{86} \right) = 2647 \text{ А.} \end{aligned}$$

Для расчёта фиктивной индукции потока рассеяния в воздушном зазоре определим следующий коэффициент [1 с.433]:

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,75 \cdot 10^{-3}}{0,016 + 0,0133}} = 1,04.$$

тогда фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре [1 с.433]:

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{П.ср} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{2647 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1,04} = 2,12 \text{ Тл.}$$

По полученному значению индукции определяем отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины характеризуемое коэффициентом k_{δ} значение, которого находят по кривой [1 с.432]: $k_{\delta} = 0,82$.

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{Z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0,016 - 1,25 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0,82) = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния для полукрытого паза [с.220 формула 6-258]:

$$h_{k1} = 3 \cdot 10^{-3}.$$

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{П1нас} &= \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{b_{u1} + c_{\varepsilon 1}} + \frac{h_{k1}}{b_{u1} + b_{n1}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{b_{u1} + b_{n1} + c_{\varepsilon 1}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-3}} \times \\ &\times \frac{1,84 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-3} + 1,84 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-3} + 9,7 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1,84 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-3} + 9,7 \cdot 10^{-3} + 1,84 \cdot 10^{-3}} \\ &= 0,078 \end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора [1 с.434]:

$$\lambda_{П1нас} = \lambda_{П1} - \Delta \lambda_{П1нас} = 3,38 - 7,25 \cdot 10^{-3} = 3,37.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1 с.434]:

$$\lambda_{Д1нас} = \lambda_{Д1} \cdot k_{\delta} = 1,3 \cdot 0,82 = 1,7.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учётом влияния насыщения [1 с.434]:

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{П1нас} + \lambda_{Д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{П1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{л1}} = 1,03 \cdot \frac{1,7 + 1,07 + 0,8}{1,78 + 1,3 + 0,8} = 0,95 \text{ Ом.}$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов ротора магнитное напряжение, которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов [1 с.433]:

$$c_{э2} = (t_{Z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0,0133 - 0) \cdot (1 - 0,82) = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения [1 с.434]:

$$\Delta \lambda_{П2нас} = 0.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для ротора [1 с.434]:

$$\lambda_{П2\xi нас} = \lambda_{П2\xi} = 1.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1 с.434]:

$$\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2} \cdot k_{\delta} = 1,78 \cdot 0,82 = 0,97.$$

Приведённое индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1 с.434]:

$$x'_{2\xi нас} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{П2\xi нас} + \lambda_{Д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{Д2} + \lambda_{П2} + \lambda_{л2}} = 7,8 \cdot \frac{1,47 + 0,97 + 0,32}{1,78 + 6 + 0,32} = 0,5 \text{ Ом.}$$

Уточним коэффициент $c_{1П}$ [1 с.437]:

$$c_{1Пнас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12П}} = 1 + \frac{0,95}{30} = 1,03.$$

1.9.4 Расчёт токов и моментов с учётом влияния вытеснения тока и насыщения.

Найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1 с.437]:

$$R_{Пнас} = r_1 + c_{1Пнас} \cdot r'_{2\xi} / s = 0,34 + 1,03 \cdot 0,24 = 0,59 \text{ Ом.}$$

$$X_{Пнас} = x_{1нас} + c_{1Пнас} \cdot x'_{2\xi нас} = 0,95 + 1,03 \cdot 0,5 = 1,46 \text{ Ом.}$$

Ток в обмотке ротора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1 с.437]:

$$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{Пнас}^2 + X_{Пнас}^2}} = \frac{380}{\sqrt{0,59^2 + 1,46^2}} = 241,1 \text{ А.}$$

Ток в обмотке статора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1с.437]:

$$I_1 = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{Пнас}^2 + (X_{Пнас} + x_{12П})^2}}{c_{1Пнас} \cdot x_{12П}} = 241,1 \cdot \frac{\sqrt{0,59^2 + (1,46 + 30)^2}}{1,03 \cdot 30} = 245,1 \text{ А.}$$

Определим кратность тока и момента при заданном скольжении $s = 1$ [1с.437]:

$$I_{1*} = I_1 / I_{1ном} = \frac{245,1}{65,63} = 3,74 \text{ А.}$$

$$M_{n*} = \left(\frac{I'_{2нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left(\frac{241,1}{60,4} \right)^2 \cdot 2,72 \cdot \frac{0,0168}{1} = 0,73.$$

Данные расчёта сведены в таблицу 1.4, а пусковые характеристики представлены на рисунке 1.4.

Таблица 1.4 – Пусковые характеристики двигателя

Расчётные формулы	Пусковая характеристика	Скольжение, s					
		1	0,8	0,6	0,4	0,0168	0,001
$k_{\text{нас}}$	-	1,071	1,07	1,06	1,051	1,049	1,042
$F_{\text{п.ср}} = 0.7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{\text{нас}} \cdot U_{\text{п.}}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	A	2648	2593	2480	2328	739	146
$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	ТЛ	2,12	2,08	1,99	1,86	0,59	0,12
$k_{\delta} = f(B_{\Phi\delta})$	-	0,824	0,829	0,84	0,855	1	1
$c_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_{\delta})$	ММ	1,83	1,78	1,67	1,51	0	0
$\lambda_{\text{П1нас}} = \lambda_{\text{П1}} - \Delta\lambda_{\text{П1нас}}$	-	1,703	1,704	1,708	1,714	1,781	1,781
$\lambda_{\text{Д1нас}} = \lambda_{\text{Д1}} \cdot k_{\delta}$	-	1,07	1,08	1,09	1,11	1,3	1,3
$x_{1\text{нас}} = x_1 \cdot \sum \lambda_{1\text{нас}} / \sum \lambda_1$	ОМ	0,948	0,95	0,955	0,961	1,03	1,03
$c_{1\text{Пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{П}}}$	-	1,0317	1,0318	1,0319	1,0322	1,0344	1,0344
$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{u2}) \cdot (1 - k_{\delta})$	ММ	5,3	4,9	4,4	3,5	1,7	0,08
$\lambda_{\text{П2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{П2}\xi} - \Delta\lambda_{\text{П2нас}}$	-	1,47	1,61	1,89	2,34	3,26	3,3
$\lambda_{\text{Д2нас}} = \lambda_{\text{Д2}} \cdot k_{\delta}$	-	0,97	0,98	0,99	1,01	1,18	1,18
$x'_{2\xi\text{нас}} = x'_{2'} \cdot \sum \lambda_{2\xi\text{нас}} / \sum \lambda_2$	ОМ	0,5	0,53	0,58	0,66	0,86	0,87
$R_{\text{Пнас}} = r_1 + c_{1\text{Пнас}} \cdot r'_{2\xi} / s$	ОМ	0,59	0,62	0,66	0,74	5,77	91,4

$X_{Пнас} = x_{1нас} + c_{1П.нас} \cdot x'_{2\varphi_{нас}}$	Ом	1,46	1,49	1,55	1,65	1,92	1,93
$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{Пнас}^2 + X_{Пнас}^2}}$	А	241,1	235,3	225,1	210,7	62,5	4,2
$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{Пнас}^2 + (X_{Пнас} + x_{12П})^2}}{c_{1Пнас} \cdot x_{12П}}$	А	245,1	239,5	229,5	215,5	65,3	13
$k'_{нас} = I_{1нас} / I_1$	-	1,071	1,067	1,06	1,051	1	1
$I_{1*} = I_1 / I_{1ном}$	-	3,73	3,65	3,5	3,28	1	0,2
$M_{эм*} = \left(\frac{I'_{2П.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s}$	-	0,73	0,78	0,83	0,89	1,07	0,08

1.9.5 Критическое скольжение определяем после расчёта всех точек пусковых характеристик.

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{x_1 / c_{1П} + x'_2} = \frac{0,088}{1,03 / 1,034 + 1,37} = 0,0373.$$

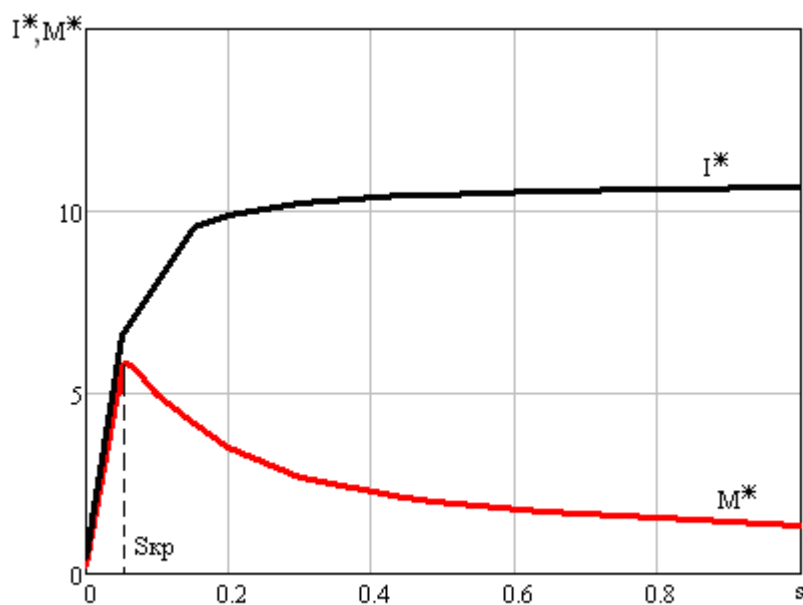


Рисунок 1.4 – Пусковые характеристики асинхронного двигателя.

2. Механический расчёт

Электрические машины общего назначения в большинстве случаев выполняют с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несёт на себе всю массу вращающихся частей, через него передаётся вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом через ремённую и зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал также должен иметь достаточную жёсткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины.

Валы изготавливают из углеродистых сталей, преимущественно сталь 45. Для повышения механических свойств материала его подвергают термической обработке.

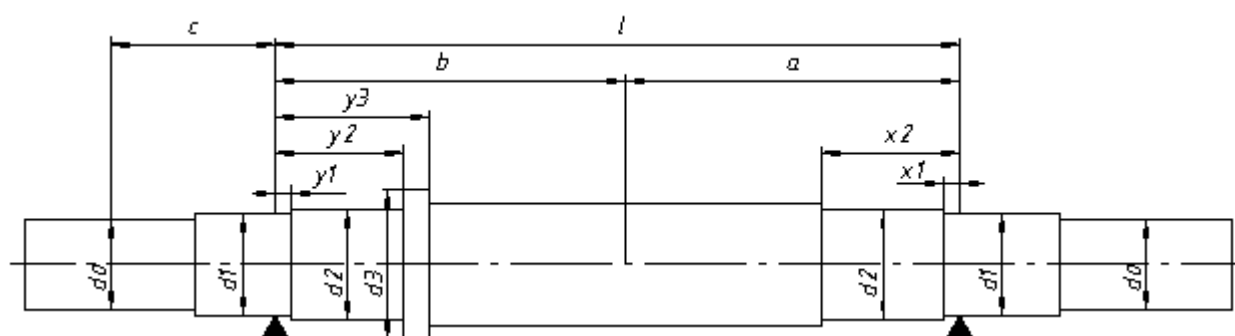


Рисунок 2.1 – Эскиз вала.

Таблица 2.1 – Размеры участков вала

a	b	c	l	y1	y2	y3	x1	x2	d1	d2	d3
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
398	365	163	763	17	126	153	17	137	100	110	150

2.1 Расчет вала на жесткость

Рассчитаем вал на жёсткость. Для этого определим массу ротора [1,стр.244]:

$$m_p = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0,3635^2 \cdot 0,28 = 240,5 \text{ кг}$$

Определим момент инерции участка вала [1,стр.246]:

$$J_1 = \pi \cdot d_1^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,10^4 / 64 = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$J_2 = \pi \cdot d_2^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,11^4 / 64 = 7,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$J_3 = \pi \cdot d_3^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,15^4 / 64 = 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

Тогда приближённое значение силы тяжести:

$$G_p = 9,81 \cdot m_p = 9,81 \cdot 240,5 = 2359 \text{ Н}$$

Определим прогиб вала в середине сердечника ротора под действие силы тяжести.

Для асинхронного двигателя с $h = 315$ мм с достаточным приближением можно принять коэффициенты [1,стр.246]:

$$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} = \frac{(x_2^3 - x_1^3)}{J_2} = \frac{(0,137^3 - 0,017^3)}{7,18 \cdot 10^{-6}} = 357,4 \text{ м}^{-1}$$

$$S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = \frac{(y_3^3 - y_2^3)}{J_3} + \frac{(y_2^3 - y_1^3)}{J_2} = \frac{(0,153^3 - 0,126^3)}{2,48 \cdot 10^{-5}} + \frac{(0,126^3 - 0,017^3)}{7,18 \cdot 10^{-6}} = 341,7 \text{ м}^{-1}$$

$$S_0 = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = \frac{(y_3^2 - y_2^2)}{J_3} + \frac{(y_2^2 - y_1^2)}{J_2} = \frac{(0,153^2 - 0,126^2)}{2,48 \cdot 10^{-5}} + \frac{(0,126^2 - 0,017^2)}{7,18 \cdot 10^{-6}} = 2475 \text{ м}^{-1}$$

Прогиб вала под действием силы тяжести [с 1, стр.245]:

$$f_G = \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) = \frac{2359}{3 \cdot (0,763)^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} \times \\ \times (0,398^2 \cdot 341,7 + 0,365^2 \cdot 357,4) = 6,67 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

где: $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости материала вала (для стали)

Определим номинальный вращающий момент [1, стр.246]:

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{2ном}}{n_c \cdot (1 - s_n)} = 9,55 \cdot \frac{55000}{750 \cdot (1 - 0,017)} = 712,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Реакция передачи равна [1, стр.246]:

$$F_{II} = \frac{k_n}{r} \cdot M_{ном} = \frac{0,3}{0,05} \cdot 712,4 = 4274 \text{ Н}$$

где $k_n = 0,3$ – коэффициент при передаче упругой кулачковой муфтой [1, стр.246].

Прогиб вала посредине сердечника ротора от реакции передачи составит [1, стр.246]:

$$f_{II} = \frac{F_{II} \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot \left((1,5 \cdot l \cdot S_0 - S_b) \cdot a + b \cdot S_a \right),$$

$$f_{II} = \frac{4274 \cdot 0,163}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,763^2} \cdot ((1,5 \cdot 0,763 \cdot 2475 - 341,7) \cdot 0,398 + 0,365 \cdot 341,7) = 2,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Начальный эксцентриситет ротора составит [1, стр.247]:

$$e_0 = 0,1 \cdot \delta + f_G + f_{II} = 0,1 \cdot 0,75 \cdot 10^{-3} + 6,67 \cdot 10^{-7} + 2,16 \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения [1, стр.247]:

$$T_0 = 2,94 \cdot D_2 \cdot l_\delta \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = 2,94 \cdot 0,3635 \cdot 0,280 \cdot \frac{7,8 \cdot 10^{-5}}{0,75 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^5 = 3112 \text{ Н}$$

Прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения [1, стр.247]:

$$f_T = f_G \cdot \frac{T_0}{G_p} = 6,67 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{3112}{2359} = 8,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Установившийся прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения [1, стр.248]:

$$f_M = \frac{f_T}{1 - f_T/e_0} = \frac{8,8 \cdot 10^{-7}}{1 - 8,8 \cdot 10^{-7}/7,8 \cdot 10^{-5}} = 8,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Результирующий прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения, реакции передачи и магнитного притяжения [1, стр.247]:

$$f = f_G + f_{II} + f_M = 6,67 \cdot 10^{-7} + 2,16 \cdot 10^{-6} + 8,9 \cdot 10^{-7} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Результирующий прогиб вала не должен превышать 12% воздушного зазора.

$$x = \frac{f}{\delta} \cdot 100\% = \frac{3,7 \cdot 10^{-6}}{0,75 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 0,49\%$$

Первая критическая частота вращения вала с учётом влияния магнитного притяжения [1, стр.248]:

$$n_{кр} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - f_T / e_0}{f_G}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - 8,8 \cdot 10^{-6} / 7,8 \cdot 10^{-5}}{6,67 \cdot 10^{-7}}} = 34600 \text{ об/мин}$$

Полученное значение должно удовлетворять неравенству:

$$n_{кр} > 1,3 \cdot n_c (1 - s_H)$$

Проверим это условие $1,3 \cdot n_c (1 - s_H) = 1,3 \cdot 750 \cdot (1 - 0,017) = 958 \text{ об /мин}$

$34600 > 958$, условие выполняется.

2.2 Расчет вала на прочность

$$T = \frac{T_o}{1 - f_T / e_o} = \frac{3112}{1 - 8,8 \cdot 10^{-7} / 7,8 \cdot 10^{-5}} = 3148$$

Изгибающий момент в сечении «а»:

$$M_{IA} = \left(k \cdot F_{II} \cdot c + (G_P + T) \cdot b \right) \cdot \frac{x_i}{l} = (2 \cdot 4274 \cdot 0,163 + (2359 + 3148) \cdot 0,365) \cdot \frac{0,017}{0,763} = 75,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

где: К-коэффициент перегрузки, $K = 2 \div 2.5$.

Принимаем $K=2$ [1 с.249].

Момент сопротивления при изгибе [1 с.249]:

$$W_A = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,1^3 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

Напряжение изгиба [1 с.249]:

$$\sigma_{npA} = \frac{\sqrt{M_{IA}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_2)^2}}{W} = \frac{\sqrt{75,8^2 + (2 \cdot 0,398 \cdot 712,4)^2}}{1 \cdot 10^{-4}} = 5,7 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Изгибающий момент в сечении «b»:

$$M_{IB} = k \cdot F_{II} \cdot c \cdot \left(1 + \frac{y_i}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{a \cdot y_i}{l} = \\ = 2 \cdot 4274 \cdot 0,163 \cdot \left(1 + \frac{0,017}{0,763}\right) + (2359 + 3148) \cdot \frac{0,398 \cdot 0,017}{0,763} = 1473 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления при изгибе:

$$W_B = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,1^3 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{npB} = \frac{\sqrt{M_{IB}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_2)^2}}{W_B} = \frac{\sqrt{1473^2 + (2 \cdot 0,398 \cdot 712,4)^2}}{1 \cdot 10^{-4}} = 1,57 \cdot 10^7 \text{ Па};$$

Изгибающий момент в сечении “C”:

$$M_{IC} = k \cdot F_{II} \cdot c = 2 \cdot 4274 \cdot 0,163 = 1393$$

Момент сопротивления при изгибе:

$$W_C = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,095^3 = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{npC} = \frac{\sqrt{M_{IC}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_2)^2}}{W_C} = \frac{\sqrt{1393^2 + (2 \cdot 0,398 \cdot 712,4)^2}}{8,6 \cdot 10^{-5}} = 1,75 \cdot 10^7$$

Сопоставляя полученные данные видим что наиболее нагруженным сечением является сечение C для которого $\sigma_{npC} = 1,75 \cdot 10^7 \leq 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5$ (Па), где предел текучести для стали $45 \cdot 3600 \cdot 10^5$ (Па).

Условие прочности выполняется.

2.3 Выбор подшипников

В электрических машинах с горизонтальным расположением валов подшипники применяются в качестве поддерживающих опор. Они воспринимают действие силы тяжести ротора, силы одностороннего притяжения, сил продольных нагрузок от приводных механизмов.

В электрических машинах с горизонтальным расположением вала, в основном применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Радиальные шарикоподшипники могут кроме радиальной нагрузки воспринимать еще и некоторую осевую нагрузку. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник приобретает свойства радиально-упорного подшипника и хорошо работает на восприятие осевых нагрузок. При выборе подшипников определяют приведенную нагрузку Q , а также учитывают частоту вращения n подшипника и требуемый срок службы L_d , находят динамическую грузоподъемность C (Н), которая и является основной характеристикой подшипника. [1 с.257]

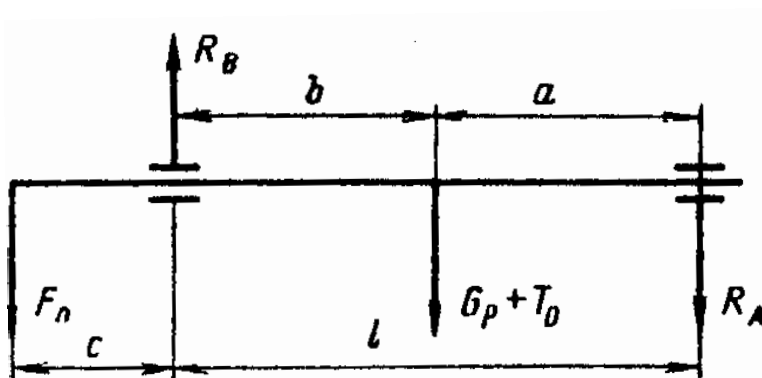


Рисунок 2.2 – К определению радиальных нагрузок.

Радиальная нагрузка на подшипник [1 с.257]:

$$R_b = F_{II} \cdot \frac{(l+c)}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{a}{l} = 4274 \cdot \frac{(0,763+0,163)}{0,763} + (2359+3112) \cdot \frac{0,398}{0,763} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Приведенная динамическая нагрузка для однорядных радиальных шарикоподшипников [1 с.256].

Принимаем нагрузку с умеренными толчками ($k_H = 1,5$ – коэффициент учитывающий характер нагрузки двигателя).

$$Q_b = k_H \cdot R_b = 1,5 \cdot 1,16 \cdot 10^4 = 1,74 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Динамическая грузоподъемность для шарикоподшипников [1 с.257]. Так как в задании не оговорено конкретных сроков службы двигателя (подшипника) принимаем его равным 20000 часов. Тогда

$$C_b = \frac{Q_b}{25,6} \cdot \sqrt[3]{L_D \cdot n_c} = \frac{1,74 \cdot 10^4}{25,6} \cdot \sqrt[3]{20000 \cdot 750} = 1,68 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Аналогично радиальная нагрузка на подшипник [1 с.257]

$$R_a = F_{II} \cdot \frac{c}{l} + (G_P + T_0) \cdot \frac{b}{l} = 4274 \cdot \frac{0,163}{0,763} + (2359 + 3112) \cdot \frac{0,365}{0,763} = 3530 \text{ Н}$$

Приведенная динамическая нагрузка для однорядных радиальных шарикоподшипников [1 с.256]: $Q_a = k_H \cdot R_a = 1,5 \cdot 3530 = 5295 \text{ Н}$

Динамическая грузоподъемность для шарикоподшипников [1 с.257]

$$C_a = \frac{Q_a}{25,6} \cdot \sqrt[3]{L_D \cdot n_c} = \frac{5295}{25,6} \cdot \sqrt[3]{20000 \cdot 750} = 5,1 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

Выбираем шарикоподшипник 6320 (1 с.734).

3. Тепловой и вентиляционный расчёты

Расчёт нагрева проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима, но потери в изолированных обмотках статора несколько увеличивают по сравнению с расчётными. Предполагая, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры при классе нагревостойкости изоляции Н – до 180⁰С. При этом коэффициент увеличения потерь k_{ρ} по сравнению с полученными значениями для расчётной температуры составит $k_{\rho} = 1,45$.

3.1 Тепловой расчет

3.1.1 Электрические потери в лобовых частях катушек [1 с.449]:

$$P'_{\text{эл.1}} = k_{\rho} \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{\text{ср1}}} = 1,45 \cdot 4393 \cdot \frac{2 \cdot 0,28}{1,14} = 3192 \text{ Вт}$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя [1 с.450]:

$$\Delta v_{\text{нов1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{эл.1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1}$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности, зависящий от D_a [1 с.450]

$$\alpha_1 = 95 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

K – коэффициент учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передаётся через станину непосредственно в окружающую среду [1 с.450] зависит от 2р $K = 0,18$.

тогда:

$$\Delta v_{нов1} = K \cdot \frac{P'_{\text{эл.1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1} = 0,2 \cdot \frac{3192 + 660}{3,14 \cdot 0,365 \cdot 0,28 \cdot 95} = 22,4^{\circ}\text{C}$$

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полуоткрытых трапецеидальных пазов [1 с.451]:

$$\Pi_1 = 2 \cdot (h_{n1} + b_{n1}) = 2 \cdot (0,0376 + 0,0097) = 0,095 \text{ м}$$

3.1.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора

[1 с.452]:

$$\Delta v_{из.н1} = \frac{P'_{\text{эл.1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{b_{из.н1}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{2 \cdot b_1}{16 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right)$$

где: $\lambda_{\text{экв}}$ – средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции;

для классов нагревостойкости В F и H $\lambda_{\text{экв}} = 0,16 \text{ Вт / (м} \cdot ^{\circ}\text{C)}$;

$$\frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} = 0 \text{ – для обмоток из прямоугольного провода [1 с.452]}$$

тогда:

$$\Delta v_{из.н1} = \frac{P'_{\text{эл.1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{b_{из.н1}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{2 \cdot b_1}{16 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right) = \frac{3192}{72 \cdot 0,095 \cdot 0,28} \cdot \left(\frac{2,05 \cdot 10^{-3}}{0,16} + 0 \right) = 21^{\circ}\text{C}.$$

3.1.3 Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей [1 с.452]:

$$P'_{\text{эл.1}} = k_{\rho} \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}}} = 1,45 \cdot 4393 \cdot \frac{2 \cdot 0,29}{1,14} = 3241 \text{ Вт}$$

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{P'_{э.л.1}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda'_{экв}} + \frac{h_{II}}{12 \cdot \lambda'_{экв}} \right) = \frac{3241}{2 \cdot 72 \cdot 0,095 \cdot 0,28} \cdot \left(\frac{2,05 \cdot 10^{-3}}{0,16} \right) = 10,5^{\circ}C$$

$$\frac{h_{II}}{12 \cdot \lambda'_{экв}} = 0 \text{ — для обмоток из прямоугольного провода [1 с.452]:}$$

3.1.4 Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя [1 с.452]:

$$\Delta v_{нов.л1} = \frac{K \cdot P'_{э.л1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{обл1} \cdot \alpha_1} = \frac{0,18 \cdot 3241}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,28 \cdot 0,097 \cdot 95} = 27,5^{\circ}C$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя [с.238 формула 6-321]:

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{нов.1} + \Delta v_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_{\delta} + (\Delta v_{из.л1} + \Delta v_{нов.л1}) \cdot 2 \cdot l_{л}}{l_{cp1}} = \frac{(22,3 + 21) \cdot 2 \cdot 0,28 + (10,5 + 27,5) \cdot 2 \cdot 0,28}{1,14} = 40^{\circ}C$$

3.1.5 Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется в предположении, что температура корпуса равна температуре воздуха внутри машины. [1 с.452]:

$$\Delta v_B = \frac{\sum P'_B}{s_{кор} \cdot \alpha_B}$$

где: $\sum P'_B$ — сумма потерь отводимых в воздух внутри двигателя [1 с.453]

$$\sum P'_B = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{э.л.1} + P_{ст.осн}) - 0,9 \cdot P_{мех}$$

$$\sum P' = \sum P + (k_{\rho} - 1) \cdot (P_{э1} + P_{э2}) = 6792 + (1,45 - 1) \cdot (4393 + 964) = 9203 \text{ Вт}$$

тогда:

$$\Sigma P'_B = 9203 - (1 - 0,18) \cdot (3129 + 660) - 0,9 \cdot 51,8 = 6049,3 \text{ Вт}$$

$s_{кор}$ – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса [1 с.453]:

$$s_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_{\delta} + 2 \cdot l_{выл}) = (3,14 \cdot 0,529 + 8 \cdot 0,1,26) \cdot$$

$$x(0,28 + 2 \cdot 0,097) = 5,57 \text{ м}^2$$

где Π_p – условный периметр поперечного сечения рёбер корпуса двигателя [1 с.453]

$\Pi_p = 1,26 \text{ м}$ зависит от h ;

α_B – коэффициент подогрева воздуха, учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины [1 с.455] $\alpha_B = 23 \text{ Вт / (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ зависит от D_a .

тогда:

$$\Delta \nu_B = \frac{\Sigma P'_B}{s_{кор} \cdot \alpha_B} = \frac{6049,3}{5,57 \cdot 23} = 47,2^\circ \text{ C}$$

3.1.6 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды [1 с.453]:

$$\Delta \nu_1 = \Delta \nu'_1 + \Delta \nu_B = 40 + 47,2 = 87,2^\circ \text{ C}$$

При температуре окружающей среды $+40^\circ\text{C}$ над уровнем не более 1000 м предельно допустимая температура составит 130°C . Для класса нагревостойкости Н данное условие выполняется.

3.2 Вентиляционный расчет

Вентиляционный расчёт асинхронных двигателей, так же как и тепловой, на первоначальном этапе проектирования может быть выполнен приближённым методом, который заключается в сопоставлении расхода воздуха необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

3.2.1 Требуемый для охлаждения расход воздуха [1 с.456]:

$$\theta_B = \frac{k_m \cdot \Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta \nu_B}$$

где k_m – коэффициент учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса обдуваемого наружным вентилятором [1 с.456]:

$$k_m = m' \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_a} = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{750}{100} \cdot 0,529} = 4,98$$

где $m' = 2,5$ для двигателей с $2p = 8$ при $h = 315$ мм

тогда:

$$\theta_B = \frac{k_m \cdot \Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta \nu_B} = \frac{4,98 \cdot 6049}{1100 \cdot 47,2} = 0,58 \text{ м}^3/\text{с}$$

3.2.2 Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором [1 с.456]:

$$\theta_B' = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot (0,529)^3 \cdot \frac{750}{100} = 0,67 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход воздуха θ_B' должен быть больше требуемого для охлаждения машины θ_B значения соответствуют требованиям.

4 Технологическая часть

Технология общей сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для привода вентилятора

Электротехническая промышленность является материальной основой электрификации страны, автоматизации и механизации производственных процессов. Машиностроение, которая поставляет новую технику всем отраслям народного хозяйства, определяет технический прогресс страны. Повышение качества, технического уровня, надёжности, долговечности технических изделий – важный фактор роста интенсивности производства. Эффективность производства, его технический прогресс, качество выпускаемой продукции во многом зависят от опережающего развития нового оборудования, машин, станков и аппаратов, от всемерного внедрения методов технико-экономического анализа, обеспечивающего решение технических вопросов и экономическую эффективность технологических и конструкторских разработок.

Производство электрических машин в последние годы характеризуется значительным повышением механизации и автоматизации технологических процессов. Основные промышленные серии машин производятся на специализированных предприятиях с широким использованием автоматических установок и линий. Различными проектно-технологическими институтами были разработаны типовые технологические процессы и специальное технологическое оборудование, что позволяет резко сократить время технологической подготовки производства и трудоемкость выпускаемых изделий. Освоен ряд новых материалов, позволяющих механизировать технологические процессы. В настоящее время перед технологами стоят задачи не только улучшения технологии и технологического оборудования, позволяющих совершенствовать конструкцию машин, а также повышение эффективности производства и получения наиболее экономичных изделий.

4.1 Постановка задачи

Задачей технологической части выпускной квалификационной работы является проектирование технологического процесса сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для привода вентилятора главного проветривания метрополитенов.

В данном разделе необходимо рассмотреть следующие задачи:

- служебное назначение и описание конструкции двигателя;
- анализ технологичности конструкции;
- размерный анализ
- схема сборки двигателя
- разработка маршрутной технологии.
- выбор и обоснование оборудования и оснастки;
- определение норм времени и расчет количества оборудования, необходимого для выпуска $N=4000$ шт./год;
- проанализировать полученные результаты, оценить загрузку оборудования.

4.2 Служебное назначение и описание конструкции двигателя

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором предназначен для привода вентиляторов главного проветривания метрополитена типа ВГПМ-20. Двигатель работает от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В. Номинальный режим работы двигателя – S1 по ГОСТ 183 - 74.

Разрешается работа двигателя от вторичной частотно - регулируемой сети электропитания в диапазоне частоты регулирования 20 - 75 Гц.

Предусматривается эксплуатация двигателя на высоте над уровнем моря не более 1000 м в условиях умеренного климата (У) категории размещения 3, при температуре окружающей среды от +45°C до -45°C и относительной влажности воздуха 80% при температуре +20°C. Возможна работа двигателя на высоте до 2000 м над уровнем моря при сниженном значении мощности $P=P_n \cdot K_n$, где $K_n=0,96$ для высоты 1500 м; $K_n=0,92$ для высоты 2000 м.

Конструкция двигателя обеспечивает работу двигателя в аварийном режиме в течение 2-х часов при температуре окружающей среды +400°C. Двигатели должны быть работоспособны при снижении напряжения сети на 10процентов по сравнению с номинальным.

Станина представляет собой стальную сварную конструкцию, состоящая из трубы с при варенными к ней фланцами, рёбрами и трубами охлаждения, проушинами, выводным патрубком, а также пластинами для крепления корпуса для РЭА и таблички.

Пакет статора шихтованный, выполнен из листов электротехнической стали, где в пазах уложена обмотка. Изоляция статорной обмотки обеспечивает работу двигателя при температуре +400°C в течение двух часов. Обмотка статора соединена по схеме «треугольник», которая обеспечивает работу двигателя при напряжении сети питания 380 Вольт. Двигатель имеет три выводных конца, проходят через патрубок переходной, крепятся с помощью шпилек к проходным изоляторам, и расположены в коробке выводов.

Подшипниковые щиты представляют собой сварную стальную конструкцию. Щиты крепятся к фланцам станины болтами. На подшипниковых щитах двигателя установлены датчики виброскорости, подключенные к системе управления СУВ - 55.

Двигатель имеет два выступающих цилиндрических конца вала со шпонками. Обмотка ротора короткозамкнутая. Пакет ротора набран из листов электротехнической стали.

На вал двигателя насаживаются подшипники типа-6320/СЗ, крыльчатка и сердечник ротора с обмоткой.

Подшипники двигателя с внутренней стороны закрыты крышками, которые фиксируют наружную обойму подшипника, внутренняя обойма подшипника фиксируется на валу стопорным кольцом.

Снаружи подшипники закрыты распределительными кольцами и крышками.

Внутренняя полость подшипника заполняется пластичной смазкой. Пополнение смазки осуществляется через масленки, которые выведены на корпус вентилятора с помощью трубок.

Температурная защита состоит из трёх датчиков температуры РТС С011 - 170, встроенных в три фазы обмотки двигателя и соединены между собой последовательно, а также из двух термо-преобразователей типа ТС-1388/1 ТУ 4211-012-13282997-04, установленных на подшипниковых щитах.

Коробка выводов имеет три силовых зажима для подключения двигателя к сети и два контрольных зажима для подключения датчиков температуры и цепи управления. Также она имеет два ввода:

- силовой ввод, который рассчитан на ввод гибкого жаростойкого 4-х жильного кабеля с медными жилами;
- ввод для подвода кабеля к цепям датчиков температуры.

Внутри коробки выводов имеется два заземляющих зажима для подсоединения заземляющей жилы кабеля. На корпусе коробки выводов расположен внешний заземляющий зажим.

4.3 Анализ технологичности конструкции

Технологичность конструкции изделия можно объяснить как совокупность свойств конструкции, которая определяет ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве и эксплуатации, а также

ремонте для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

Технологический процесс сборки - это часть производственного процесса, участок производственной площади, непосредственно связанного с последовательным соединением, взаимной ориентировкой и фиксацией деталей и узлов, с целью получения готовой продукции (изделия), удовлетворяющего установленным требованиям.

К исходным данным для проектирования технологического процесса сборки относят:

- сборочный чертеж изделия, чертежи его составных частей и спецификации;
- программу выпуска изделия и условия осуществления технологического процесса;
- техусловия сборки и испытаний изделия;
- срок выполнения задания, каталоги и справочники по сборочному оборудованию и технологической оснастки.

Асинхронный двигатель состоит из сборочных единиц, которые собираются отдельно, поступая затем на общую сборку. К ним относятся статор, ротор, крышки подшипниковые, щиты подшипниковые, коробка выводов и термо - преобразователи. Общее число сборочных единиц, равное девяти, удовлетворяет условию технологичности.

В данном двигателе применяется большое количество крепежных деталей. Это объясняется большими габаритными размерами двигателя 1280x660 мм, а также разными размерами сборочных единиц, для крепления которых используются различные типоразмеры от 4 до 20. Большое количество крепежных деталей увеличивает номенклатуру инструментов и приспособлений для сборки и не обеспечивает полную взаимозаменяемость

деталей. Но если сократить число сборочных единиц, то можно ухудшить механическую прочность двигателя.

Крепление деталей и узлов осуществляется болтами, но также присутствует сварочные соединения. Сердечники статора и ротора крепятся к станине и валу, соответственно, при помощи сварки.

Общая сборка асинхронного двигателя осуществляется из ранее собранных узлов: вал поставляется с приваренным к нему сердечником ротора, станина с запрессованным статором, крышки подшипниковые с манжетами, что позволяет существенно сократить общее время сборки, повысить производительность труда.

Размеры сборочных единиц и деталей обеспечивают собираемость и не требуют дополнительной подгонки.

В целом двигатель технологичен для серийного выпуска.

4.4 Размерный анализ конструкции двигателя

При конструировании электрических машин и проектировании технологических процессов их изготовления производят размерный анализ, с помощью которого достигают правильного соотношения взаимосвязанных размеров и определяют допустимые отклонения (допуски). Изыскание наиболее рационального метода достижения требуемой точности машины или ее составных частей, изучение взаимосвязи ее сборочных единиц, разработка последовательности их комплектации - таковы основные задачи размерного анализа, базирующегося на теории и практике решения размерных цепей.

Под размерной цепью понимают совокупность взаимосвязанных размеров, образующих замкнутый контур и определяющих взаимное положение поверхностей (или осей) одной или нескольких деталей. Каждый из размеров, образует размерную цепь, и называют звеном. Любая размерная цепь

состоит из одного замыкающего звена и одного или несколько составляющих звеньев. Замыкающее звено размерной цепи это звено исходное при постановке задачи расчёта размерной цепи или полученное в результате её решения. Составляющие звенья могут быть увеличивающими (при увеличении их замыкающее звено увеличивается), или уменьшающими (если при увеличении их замыкающее звено уменьшается). Размерные цепи используются для решения прямой и обратной задач. При решении прямой задачи по заданному номинальному размеру и допуску исходного звена определяют номинальные размеры, допуски и предельные отклонения всех составляющих звеньев размерной цепи. При решении обратной задачи по установленным номинальным размерам, допускам и предельным отклонениям составляющих звеньев, определяют номинальный размер, допуск и предельные отклонения замыкающего звена.

Решение той или иной задачи расчета размерных цепей при разработке технологического процесса сборки выполняется: с целью определения базовых размеров на деталях; выявления не указанных на чертежах зазоров в многозвенных цепях; проверки возможности сборки и отсутствия задеваний вращающихся и неподвижных элементов; снижения точности задания размеров составных частей; определения размеров компенсирующего звена и пр.

В выпускной квалификационной работе произведём расчёт размерной цепи методом полной взаимозаменяемости для замыкающего звена ΔA -зазор между лобовой частью статора и подшипниковым щитом. Зазор этот необходимо соблюдать при изготовлении двигателя, так как он исключает пробой обмотки на корпус при возникновении волновых перенапряжений в сети и в обмотке.

Прямая задача, то есть установить допуски и предельные отклонения всех составляющих звеньев по параметрам замыкающего звена.

Обеспечим $\Delta A = 40 \pm 2 \text{ мм}$ – зазор между лобовой частью статора и подшипниковым щитом (рисунок 4.1)

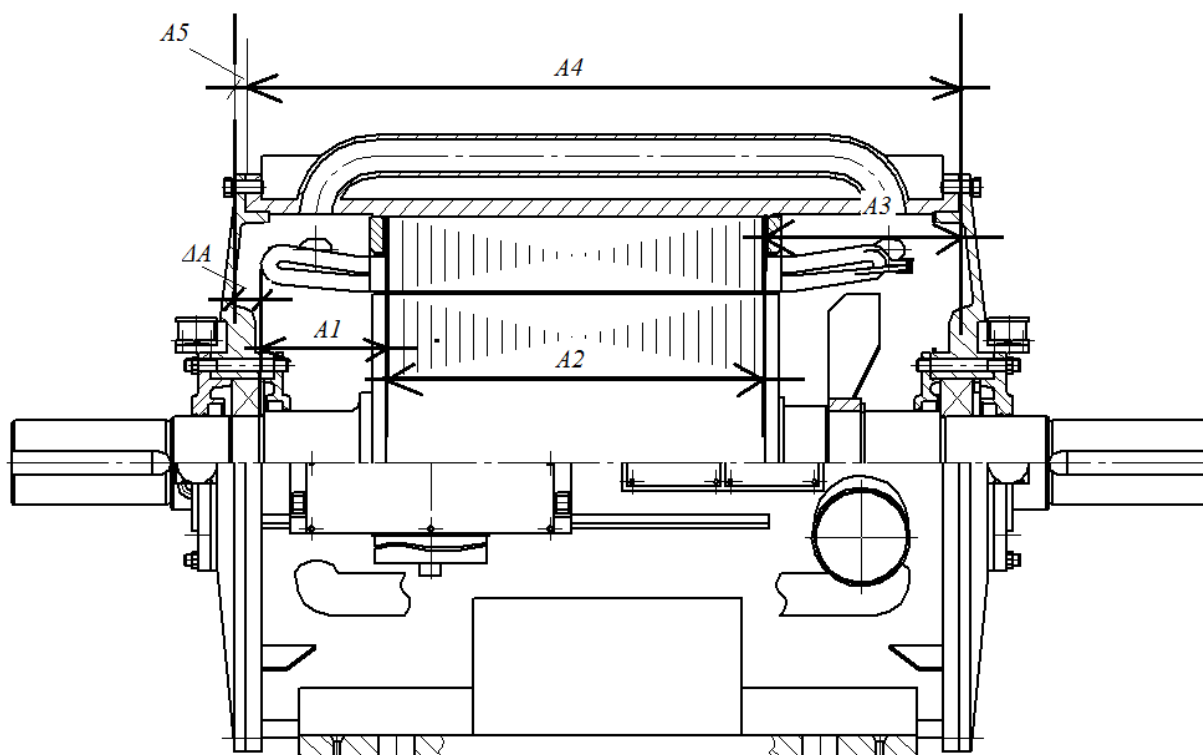


Рисунок 4.1 - Размерная цепь для замыкающего звена ΔA .

ΔA – замыкающее звено. Остальные составляющие звенья.

Размеры их возьмём из сборочного чертежа с учётом масштаба изображения.

$A1 = 140 \text{ мм}$; $A2 = 400 \text{ мм}$; $A3 = 210 \text{ мм}$; $A4 = 770 \text{ мм}$; $A5 = 20 \text{ мм}$;

Для замыкающего звена ΔA начертим схему размерных цепей (рисунок 4.2).

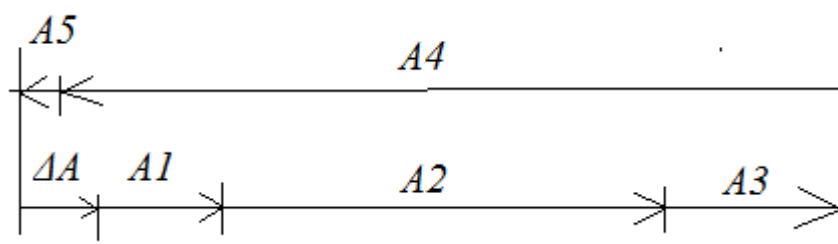


Рисунок 4.2 – Схема размерной цепи ΔA

A_4, A_5 – увеличивающие звенья.

A_1, A_2, A_3 – уменьшающие звенья

Уравнение размерной цепи

$$\Delta A = \sum_{i=1}^m A_{i\text{УВ}} - \sum_{k=1}^n A_{k\text{УМ}},$$

$$\Delta A = (770 + 20) - (140 + 400 + 210) = 40.$$

4.4.1.2. Для определения допуска на каждое из составляющего звеньев, найдём средний размер составляющего звена:

$$A_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^{m+n} A_i}{m+n},$$

$$A_{CP} = \frac{140 + 400 + 210 + 770 + 20}{5} = 308 \text{ мм}.$$

4.4.1.3 Определим средний допуск

$$T_{CP} = \frac{T_x}{m-n},$$

где m – количество звеньев,

n – количество замыкающих звеньев,

T_x – допуск замыкающего звена $T_x = 2 - (-2) = 4 \text{ мм}.$

$$T_{CP} = \frac{4}{6-1} = 0,8 \text{ мм}.$$

По среднему размеру и среднему значению допуска определяем квалитет по [1. стр. 44].

- принимаем 13 квалитет;

Согласно допуску и системе (вал, отверстие, ступень) определим отклонения для каждого из составляющих звеньев и составим таблицу 4.1. в которой отразим результаты расчётов, допусков и отклонений для данной размерной цепи.

Таблица 4.1 – Размеры, допуски и отклонения размерной цепи

Звено	Пред. размер	Допуск	Среднее откл.	Средний размер
ΔA	40±2	0,4	-0,2	139,8
A1	140 _{-0,4}	0,4	-0,2	139,8
A2	400±0,45	0,9	0	400
A3	210 _{-0,72}	0,72	-0,36	209,64
A4	769 ^{+1,1} _{-0,55}	1,65	0,275	769,275
A5	20	0,33	0,165	20,165

Звено A4 назначим регулирующим звеном.

Допуск на регулирующее звено A4 равен:

$$\begin{aligned} IT_{A4} &= IT_{\Delta A} - (IT_{A1} + IT_{A2} + IT_{A3} + IT_{A5}) = \\ &= 4 - (0,4 + 0,9 + 0,72 + 0,33) = 1,65 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Среднее отклонение равно:

$$\Delta A_4 = A_1 + A_2 + A_3 - A_5 + \Delta A = -0,2 + 0 - 0,36 - 0,165 = -0,795 \text{ мм.}$$

4.4.1.11 Определим верхнее и нижнее отклонение

$$\begin{cases} ES_{A4} = A4 + \Delta A4 + \frac{ITA4}{2} = 770 - 0,725 + \frac{1,65}{2} = 770,1 \\ EI_{A4} = A4 + \Delta A4 - \frac{ITA4}{2} = 770 - 0,725 - \frac{1,65}{2} = 768,45 \end{cases};$$

Предельный размер составляющего звена $A_{10} = 769^{+1,1}_{-0,55} \text{ мм}$.

Произведём проверку:

$$\begin{aligned} \Delta A^{\max} &= (A4^{\max} + A5^{\max}) - (A1^{\min} + A2^{\min} + B3^{\min}) = \\ &= (770,1 + 20,33) - (139,6 + 399,55 + 209,28) = 42 \text{ мм}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta B^{\min} &= (A4^{\min} + A5^{\min}) - (A1^{\max} + A2^{\max} + A3^{\max}) = \\ &= (768,45 + 20) - (140 + 400,45 + 210) = 38 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Расчёт соответствует исходному значению $\Delta A = 40 \pm 2 \text{ мм}$.

4.5 Составление схемы сборки

Схема сборки, является первым этапом разработки технологического процесса, и в наглядной форме отражает маршрут сборки изделия и его составных частей.

А также позволяет: отразить маршрут сборки изделия; выделить составные части изделия, которые можно собрать отдельно (организовать параллельную сборку составных частей); оценить предварительно трудоёмкость сборки двигателя отдельных составных частей; иногда выявить конструктивные неувязки; выявить и сравнить варианты технологического процесса. Схема сборки представлена на рисунке 4.3.

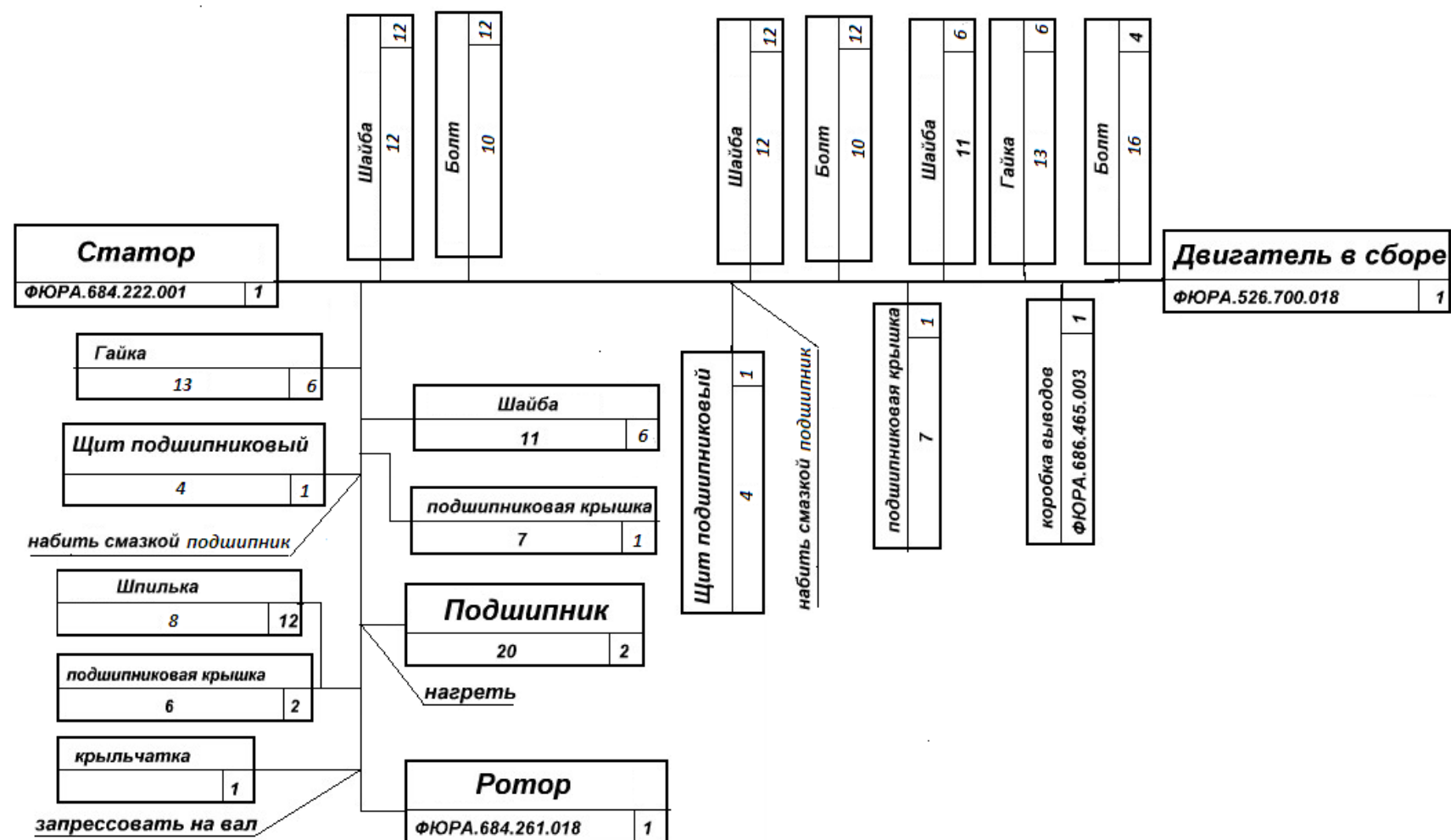


Рисунок 4.3 — Схема сборки двигателя

4.6 Разработка маршрутной технологии

На базе схемы сборки разрабатывается маршрутная технология. Маршрутная технология расписывается в маршрутных картах, где указывается последовательность и содержание операций, а также штучное время на выполнение операции. Технологические карты приведены в ПРИЛОЖЕНИИ В.

4.7 Выбор оборудования и оснастки

Для нагрева подшипника до температуры 95°C - 100°C используем нагреватель SKF TИH 100M. Нагреватель предназначен для индукционного нагрева подшипников весом до 120 килограмм с температурой нагрева от 0 до 250°C менее чем за 60 минут. Запрессовку подшипника до упора осуществляем приспособлением СЛП.

Транспортировка статора, установка его вертикально, а так же завод ротора в статор проводим с помощью кран – балки, массой 1600 килограмм, грузоподъемностью 3 тонны, скоростью передвижения 20 метров в минуту и скоростью подъема тали 8 метров в минуту.

Испытания собранного двигателя асинхронного совершаем на комплексно - механизированной испытательной станции консольного типа марки СКП-1.

Для повышения производительности серийного производства применяем следующий механизированный инструмент:

1. Шпильковерт ИП7201 – для заворачивания шпилек;

Технические характеристики:

Диаметр резьбы (10, 12 мм);

Крутящий момент (48 Н/м);

Частота вращения шпинделя, с^{-1} :

При левом вращении 17;

При правом вращении 8;

Пневмодвигатель:

Номинальная мощность (550 Вт);

Расход воздуха (1,2 м³/мин);

Давление сжатого воздуха (0,5 МПа);

Габаритные размеры:

Длина 303 мм;

Диаметр 59 мм;

Масса, 21 кг.

2. Тампон цехового изготовления – для протирки посадочных мест под подшипники, манжеты;
3. Отвертка 7810-0386;
4. Ключ динамометрический – для контроля усилия затяжки;
5. Строп М - 495 – для закрепления при перемещении двигателя, его частей;
6. Гибкий шланг – для продувки статора и ротора;
7. Набор слесарного инструмента ПИМ ТУ2-035-744-80;
8. Молоток латунный – для установки подшипниковых щитов;
9. Индикатор ИЧ-2 ГОСТ 577-68 – для контроля параметров биения;
10. Маркер – для записи параметров биения на щит;
11. Бородок цеховой ГОСТ 7214-72 – для расклепывания заклёпок;
Длина бородка 160 мм;
12. Молоток 7805-0103 ГОСТ 2310-77 – для расклепывания заклёпок;
Масса молотка (без рукоятки) 0,5 кг;
Номинальная длина рукоятки 320 мм.

13. Деревянная лопатка – для заполнения камер подшипников смазкой;
14. Штангенциркуль ШЦ-3-250-0.05, шаблоны ТИ-10057 и ТИ-10017-02 – для контроля размеров;

4.8 Расчёт норм времени и количества оборудования

4.8.1 Расчёт операционного времени

0107, Обдувка

$$T = 0,0022 \cdot D^{0,24} \cdot L^{0,41} = 0,0022 \cdot 545^{0,24} \cdot 770^{0,41} = 0,152 \text{ мин.}$$

8803, Слесарно - сборочная

1. Завернуть шпильки в отверстия крышек подшипниковых

а) взять шпильку

б) ввернуть шпильку на 2-3 нитки вручную

$$T = 0,04 \cdot D^{0,17} \cdot 6 = 0,04 \cdot 10^{0,17} \cdot 6 = 0,35 \text{ мин.};$$

в) завернуть шпильку окончательно гайковертом и насадить на вал.

$$T = 0,0068 \cdot D^{0,65} \cdot n^{0,54} = 0,0068 \cdot 10^{0,65} \cdot 6^{0,54} = 0,08 \text{ мин.};$$

$$T = 0,35 + 0,08 = 0,43 \text{ мин.}$$

0103, Нагревание

1. Греть подшипники до 95° С .. 100° С.

$$T = 15 \text{ мин.}$$

8864, Слесарно-сборочная

1. Установить на вал крыльчатку

а) взять изделие;

б) установить на вал с продвижением до упора.

$$T = 0,0225 \cdot L^{0,12} \cdot M^{0,18} = 0,0225 \cdot 25^{0,12} \cdot 0,25^{0,18} = 0,25 \text{ мин};$$

2. Насадить на вал крышки подшипников.

а) установить изделие на вал с продвижением до упора.

$$T = 0,0376 \cdot L^{0,12} \cdot M^{0,18} = 0,0376 \cdot 27^{0,12} \cdot 0,18^{0,18} = 0,07 \text{ мин};$$

3. Насадить нагретые подшипники на посадочные поверхности ротора до упора.

а) взять деталь и установить

б) включить пресс, запрессовать

в) выключить пресс, отложить деталь

$$T = 0,035 \cdot M^{0,2} \cdot L^{0,24} \cdot 2 = 0,035 \cdot 1,2^{0,2} \cdot 95^{0,24} \cdot 2 = 0,22 \text{ мин};$$

4. Навесить щит подшипниковый на подшипник.

а) взять изделие;

б) установить на вал или отверстие с продвижением до упора.

$$T = 0,0225 \cdot L^{0,12} \cdot M^{0,18} = 0,0225 \cdot 44^{0,12} \cdot 32^{0,18} = 0,13 \text{ мин.}$$

5. Установить крышку подшипника, затянуть гайки М10.

а) установить изделие на вал с продвижением до упора

$$T = 0,0376 \cdot L^{0,12} \cdot M^{0,18} = 0,0376 \cdot 27^{0,12} \cdot 0,19^{0,18} = 0,08 \text{ мин};$$

8864, Слесарно-сборочная

1. Установить ротор в статор.

а) взять изделие;

б) установить на вал или отверстие с продвижением до упора.

$$T = 0,0225 \cdot L^{0,12} \cdot M^{0,18} = 0,0225 \cdot 1280^{0,12} \cdot 348,4^{0,18} = 0,45 \text{ мин.}$$

2. Установить щит подшипниковый в статор, совмещая отверстия щита с отверстиями станины.

а) взять изделие;

б) установить на вал или отверстие с продвижением до упора.

$$T = 0,0225 \cdot L^{0,12} \cdot M^{0,18} = 0,0225 \cdot 19^{0,12} \cdot 12^{0,18} = 0,05 \text{ мин.}$$

3. Установить крышку подшипниковую

а) установить изделие на вал с продвижением до упора

$$T = 0,0376 \cdot L^{0,12} \cdot M^{0,18} = 0,0376 \cdot 27^{0,12} \cdot 0,19^{0,18} = 0,08 \text{ мин.};$$

0200, Контроль

1. Контролировать качество согласно приемо-сдаточных испытаний.

$$T = 25 \text{ мин.}$$

4.8.2 Расчет штучного времени по операциям

0107, Обдувка

$$T_{оп} = 0,31 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 0,31 \cdot 0,06 = 0,019 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 0,152 \cdot 0,05 = 0,016 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 0,31 + 0,019 + 0,016 = 0,34 \text{ мин.}$$

8803, Слесарно - сборочная

$$T_{оп} = 0,75 \text{ мин.}$$

$$T_{OB} = T_{OP} \cdot 0,06 = 0,75 \cdot 0,06 = 0,045 \text{ мин.}$$

$$T_{II} = T_{OP} \cdot 0,05 = 0,75 \cdot 0,05 = 0,0375 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{OP} + T_{OB} + T_{II} = 0,75 + 0,045 + 0,0375 = 0,833 \text{ мин.}$$

8864, Слесарно-сборочная

$$T_{OP} = 0,34 \text{ мин.}$$

$$T_{OB} = T_{OP} \cdot 0,06 = 0,34 \cdot 0,06 = 0,02 \text{ мин.}$$

$$T_{II} = T_{OP} \cdot 0,05 = 0,34 \cdot 0,05 = 0,017 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{OP} + T_{OB} + T_{II} = 0,34 + 0,02 + 0,017 = 0,377 \text{ мин.}$$

8864, Слесарно-сборочная

$$T_{OP} = 0,43 \text{ мин.}$$

$$T_{OB} = T_{OP} \cdot 0,06 = 0,43 \cdot 0,06 = 0,0258 \text{ мин.}$$

$$T_{II} = T_{OP} \cdot 0,05 = 0,43 \cdot 0,05 = 0,0215 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{OP} + T_{OB} + T_{II} = 0,43 + 0,258 + 0,0215 = 0,477 \text{ мин.}$$

0103, Нагревание

$$T_{OP} = 15 \text{ мин.}$$

$$T_{OB} = T_{OP} \cdot 0,06 = 15 \cdot 0,06 = 0,9 \text{ мин.}$$

$$T_{II} = T_{OP} \cdot 0,05 = 15 \cdot 0,05 = 0,75 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{OP} + T_{OB} + T_{II} = 15 + 0,9 + 0,75 = 16,65 \text{ мин.}$$

Кран – балка

$$T_{оп} = 3,24 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 3,24 \cdot 0,06 = 0,194 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 3,24 \cdot 0,05 = 0,162 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 3,24 + 0,194 + 0,162 = 3,6 \text{ мин.}$$

Верстак

$$T_{оп} = 1,5 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 1,5 \cdot 0,06 = 0,09 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 1,5 \cdot 0,05 = 0,075 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 1,5 + 0,09 + 0,075 = 1,665 \text{ мин.}$$

8864, Слесарно-сборочная

$$T_{оп} = 3,27 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 3,27 \cdot 0,06 = 0,196 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 3,27 \cdot 0,05 = 0,164 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 3,27 + 0,196 + 0,164 = 3,63 \text{ мин.}$$

Верстак

$$T_{оп} = 1,17 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 1,17 \cdot 0,06 = 0,07 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 1,17 \cdot 0,05 = 0,059 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 1,17 + 0,07 + 0,059 = 1,3 \text{ мин.}$$

070 8864, Слесарно-сборочная

$$T_{оп} = 1,74 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 1,74 \cdot 0,06 = 0,1 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 1,74 \cdot 0,05 = 0,087 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 1,74 + 0,1 + 0,087 = 1,93 \text{ мин.}$$

Верстак

$$T_{оп} = 1,17 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 1,17 \cdot 0,06 = 0,07 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 1,17 \cdot 0,05 = 0,059 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 1,17 + 0,07 + 0,059 = 1,3 \text{ мин.}$$

8864, Слесарно-сборочная

$$T_{оп} = 0,72 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 0,72 \cdot 0,06 = 0,043 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 0,72 \cdot 0,05 = 0,036 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 0,72 + 0,043 + 0,036 = 0,8 \text{ мин.}$$

8864, Слесарно-сборочная

$$T_{оп} = 0,86 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 0,86 \cdot 0,06 = 0,052 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 0,86 \cdot 0,05 = 0,043 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 0,86 + 0,052 + 0,043 = 0,95 \text{ мин.}$$

8864, Слесарно-сборочная

$$T_{оп} = 2,93 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 2,93 \cdot 0,06 = 0,176 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 2,93 \cdot 0,05 = 0,147 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 2,93 + 0,176 + 0,147 = 3,25 \text{ мин.}$$

0200, Контроль

Кран – балка

$$T_{оп} = 3,24 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 3,24 \cdot 0,06 = 0,194 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 3,24 \cdot 0,05 = 0,162 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 3,24 + 0,194 + 0,162 = 3,6 \text{ мин.}$$

Испытательный стенд СКП-1

$$T_{оп} = 25 \text{ мин.}$$

$$T_{об} = T_{оп} \cdot 0,06 = 25 \cdot 0,06 = 1,5 \text{ мин.}$$

$$T_{п} = T_{оп} \cdot 0,05 = 25 \cdot 0,05 = 1,25 \text{ мин.}$$

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{п} = 25 + 1,5 + 1,25 = 27,75 \text{ мин.}$$

4.8.4 Расчет штучного времени на оборудование

1. Верстак

$$T_{шт} = 0,833 + 0,377 + 0,477 + 1,665 + 1,3 + 1,3 + 0,8 + 0,95 + 3,25 = 10,95 \text{ мин.}$$

3. Испытательный стенд СКП – 1

$$T_{шт} = 27,75 \text{ мин.}$$

5. Кран – балка

$$T_{II} = 3,6 + 3,63 + 1,93 + 3,6 = 12,76 \text{ мин.}$$

7. Устройство для продувки деталей

$$T_{II} = 0,34 \text{ мин.}$$

9. Нагреватель SKFTIH100M

$$T_{II} = 16,65 \text{ мин.}$$

4.8.5 Расчет количества оборудования для выполнения годовой программы.

Определяем эффективный годовой фонд производственного времени оборудования:

$$F_p = (365 - B_d - П_d) \cdot 8 - П_{пд},$$

где B_d – количество выходных дней в году,

$П_d$ – количество праздничных дней в году.

$$B_d + П_d = 117 \text{ дней.}$$

$П_{пд}$ – количество предпраздничных дней в году,

$$П_{пд} = 3 \text{ дней.}$$

$$F_p = (365 - 117) \cdot 8 - 3 = 1984 - 3 = 1981 \text{ часов.}$$

Расчётное число каждого из видов сборочного оборудования находим по формуле:

$$C_p = \frac{T_{шт} \cdot N}{60 \cdot F_p \cdot B},$$

где N – годовая программа,

B – число рабочих обслуживающих рабочее место,

F_p – фонд рабочего времени,

T_{шт} – штучное время.

1. Верстак

$$C_p = \frac{10,95 \cdot 4000}{60 \cdot 1981 \cdot 2} = 0,184, \text{ принимаем: } C_{пр} = 1;$$

2. Испытательный стенд СКП – 1

$$C_p = \frac{27,75 \cdot 4000}{60 \cdot 1981 \cdot 1} = 0,467, \text{ принимаем: } C_{пр} = 1;$$

3. Кран – балка

$$C_p = \frac{12,76 \cdot 4000}{60 \cdot 1981 \cdot 2} = 0,215, \text{ принимаем: } C_{пр} = 1;$$

4. Устройство для продувки деталей

$$C_p = \frac{0,34 \cdot 4000}{60 \cdot 1981 \cdot 1} = 0,06, \text{ принимаем: } C_{пр} = 1;$$

5. Нагреватель SKFTIH100M

$$C_p = \frac{16,65 \cdot 4000}{60 \cdot 1981 \cdot 2} = 28,0, \text{ принимаем: } C_{пр} = 1;$$

Таким образом коэффициент загрузки для каждого вида оборудования составит:

$$K_3 = \left(\frac{C_p}{C_{пп}} \right) \cdot 100\%,$$

1. Верстак

$$K_3 = \left(\frac{0,184}{1} \right) \cdot 100\% = 18,4\%;$$

2. Испытательный стенд СКП – 1

$$K_3 = \left(\frac{0,467}{1} \right) \cdot 100\% = 46,7\%;$$

3. Кран – балка

$$K_3 = \left(\frac{0,215}{1} \right) \cdot 100\% = 21,5\%;$$

4. Устройство для продувки деталей

$$K_3 = \left(\frac{0,006}{1} \right) \cdot 100\% = 0,6\%;$$

5. Нагреватель SKFTIH100M

$$K_3 = \left(\frac{0,28}{1} \right) \cdot 100\% = 28\%.$$

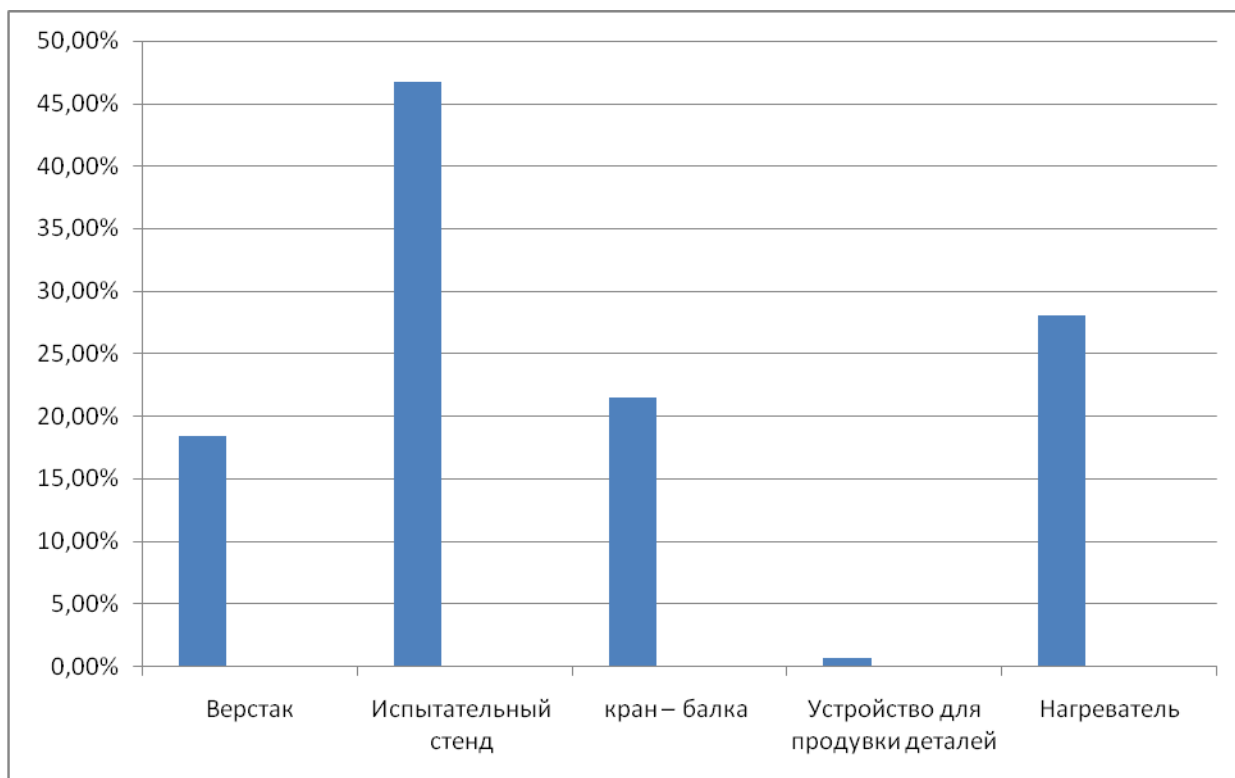


Рисунок 4.4 – График загрузки оборудования

В данном случае самым загруженным оборудованием считается испытательный стенд в количестве одной единицы.

Для проверки сравним, соответствует ли расчёт программе выпуска 4000 штук в год.

Для этого из формулы $C_p = (T_{штк} \times N) / (60 + F_g)$ выразим N , подставив C_p вместо C_p для самого загруженного оборудования (в нашем случае испытательный стенд).

$$N = (60 \times F_d \times C_p) / T_{штк} = (60 \times 3629 \times 1) / 27,75 = 7846 \text{ (шт/год)}$$

Так как $7846 > 4000$, то программа выпуска выполняется.

7. Специальная часть

Совместная работа системы вентилятор – асинхронный двигатель.

Воздуходувные машины служат для перемещения и сжатия воздуха и других газов. По степени сжатия воздуходувные машины подразделяются на вентиляторы, воздуходувки и компрессоры. Вентиляторы обеспечивают подачу воздуха при сравнительно низком давлении до 1000 мм вод. ст. (10^4 Па), при этом сжатия и нагрева воздуха практически не происходит.

Вентиляторы широко используются в системах вентиляции и кондиционирования воздуха жилых, общественных и производственных зданий, в рудниках, тоннелях и других подземных сооружениях.

Диапазон работы вентилятора обозначается графически посредством соответствующих характеристик. Такая характеристика дает информацию о том, при каком объеме воздуха развивается соответствующий напор или, наоборот, при каком сопротивлении развивается следующий объем воздуха.

На практике рабочая точка вентилятора должна находиться в стабильной зоне характеристики (рисунок 7.1). Выше этой зоны большинство характеристик падает мгновенно, а аэродинамические условия сильно ухудшаются. Динамическое давление должно располагаться ниже этой стабильной зоны, чтобы вентилятор достигал определенной минимальной производительности.

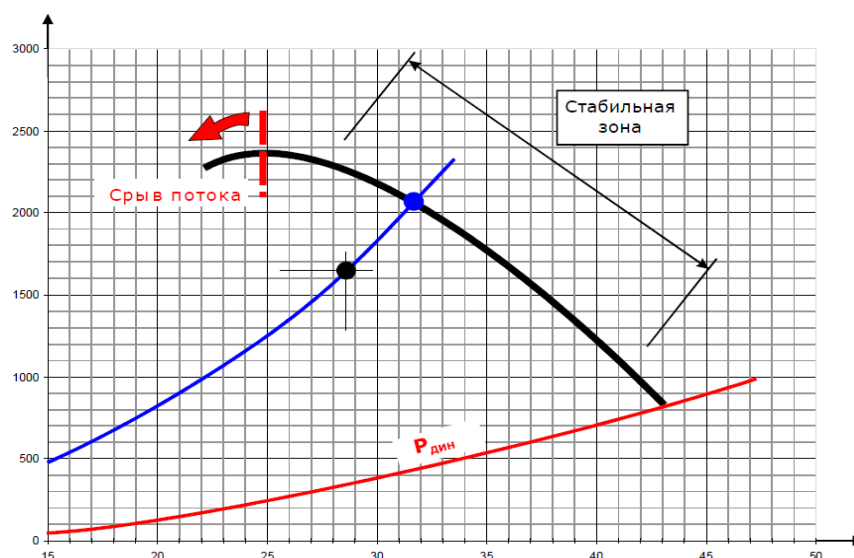


Рисунок 7.1. Диапазон работы вентилятора

При регулировании производительности снижением частоты вращения асинхронного двигателя характеристики вентилятора смещаются вниз (рисунок 7.2), а характеристика системы остается неизменной. Множество характеристик вентилятора при изменении частоты вращения могут быть найдены с помощью формул приведения:

$$Q = Q_i(n_n/n_i); P_v = P_{vi}(n_n/n_i)^2; N = N_i(n_n/n_i)^3.,$$

где Q – расход воздуха $\text{м}^3/\text{с}$, P_v – давление Па, N – мощность вентилятора кВт, n – частота вращения вентилятора об/мин.

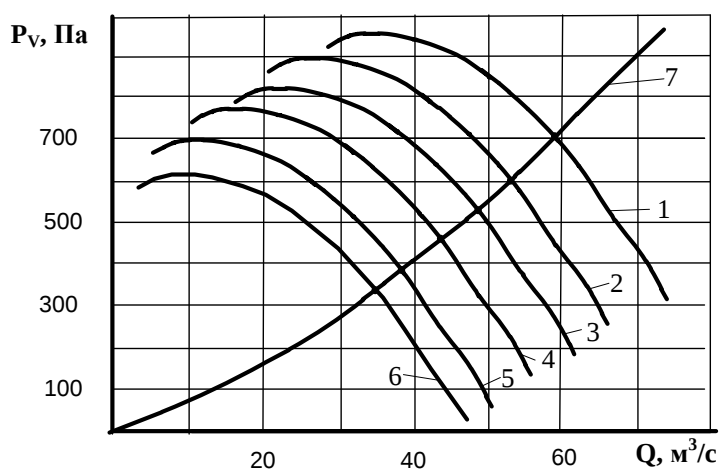


Рисунок 7.2. Характеристики вентилятора при регулировании производительности снижением частоты вращения АД, работающего совместно с системой.

На рисунке 7.2 характеристика 1 при номинальной частоте вращения, характеристики 2÷6 при уменьшении частоты вращения, 7 – характеристика системы.

Для получения механической характеристики вентилятора воспользуемся формулами подобия и характеристиками вентилятора рис. 1, 2, согласно зависимости:

$$M = 9,55 \frac{N}{n}$$

На рисунке 7.3 представлены характеристики мощности вентилятора при изменении расхода воздуха, полученные при частотном регулировании и соответствующее изменение расхода воздуха (характеристика 1 номинальная, а 2÷6 соответственно при уменьшении частоты вращения вентилятора от номинального).

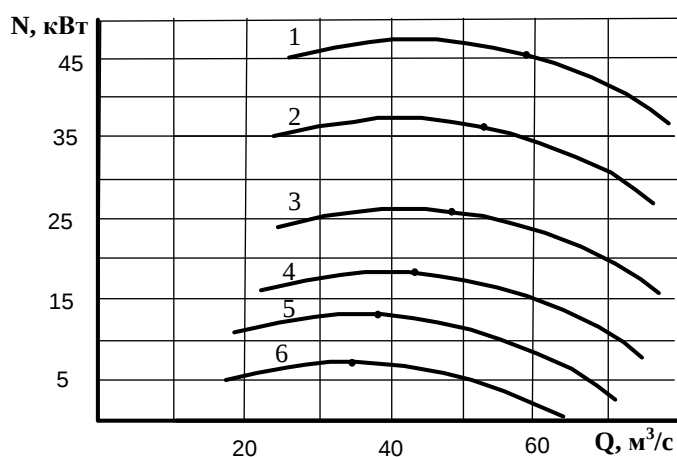


Рисунок 7.3 Характеристики мощности вентилятора при изменении расхода воздуха

Скорость вращения электромагнитного поля статора трехфазных электродвигателей переменного тока пропорциональна частоте питающей сети, что позволяет регулировать их скорость плавным изменением частоты напряжения статора. Для вентиляторов, чья механическая характеристика описывается уравнением квадратичной параболы, должно соблюдаться соотношение:

$$U/f = \text{const.}$$

Для расчета используем вентилятор главного проветривания метрополитена (ВГПМ 20), для двигателя мощностью $P_2=55$ кВт, $n=750$ об/мин. Были произведены расчеты совместной работы АД и данного вентилятора при частотном регулировании.

Максимальный момент асинхронного двигателя, а следовательно, и жесткость его характеристик можно регулировать, изменяя по величине напряжение, подводимое к статору, причем момент двигателя изменяется пропорционально напряжению. На рисунке 7.3 показаны скоростные характеристики асинхронного двигателя и механическая характеристика вентилятора.

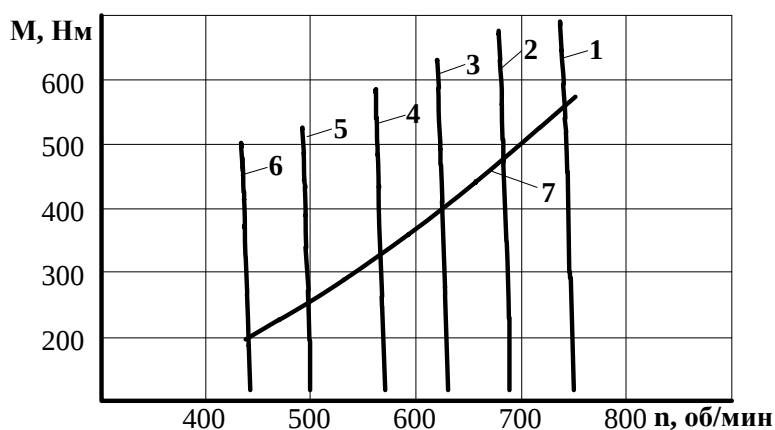


Рисунок 7.4 Совместная работа системы асинхронный двигатель и вентилятора при частотном регулировании: 1-2-3-4-5-6 – механические

характеристики вентилятора при $U/f = \text{const}$; 7 - механическая характеристика вентилятора

Из рисунка 7.4 видно, что при уменьшении частоты напряжения f меняется положение механической характеристики асинхронного двигателя при этом механическая характеристика вентилятора остается не изменой. Частотное управление двигателем переменного тока является экономичным, поскольку оно позволяет сохранить высокий КПД двигателя, обеспечивает как двигательные, так и тормозные режимы работы, хорошую жесткость характеристик и, позволяет использовать в качестве приводного асинхронный короткозамкнутый двигатель.

Рассмотрена совместная работа системы вентилятор – асинхронный двигатель на примере вентилятора типа ВГПМ 20 и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. На основе напорных характеристик вентилятора были получены его механическая характеристика. Для анализа совместной работы системы рассчитаны механические характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты вращения, для обеспечения требуемого диапазона изменения давления (P_v) и расхода воздуха (Q) вентилятора.

Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был спроектирован трехфазный асинхронный двигатель для привода вентилятора мощностью $P_{2H} = 55$ кВт, частотой вращения $n = 750$ об/мин, числом полюсов $2p = 8$, напряжением $U_n = 380$ В.

В электромагнитном расчёте были выбраны главные размеры, определены параметры двигателя, масса активных материалов, потери и КПД, а также рассчитаны рабочие и пусковые характеристики. Кратность пускового тока и максимального момента удовлетворяют требованиям, предъявляемым к двигателю.

Обмотка статора выбрана двухслойной, катушечной из жестких секций. Для обмотки статора применена изоляция класса Н, которая допускает длительный нагрев обмотки статора до 180° С. Короткозамкнутая обмотка ротора – сварная из меди.

Механический расчет вала показал, что жёсткость, прочность и критическая частота вращения вала удовлетворяют требуемым условиям.

Тепловой расчёт показал, что у двигателя имеется температурный запас при нагреве обмотки статора, а вентилятор обеспечивает расход воздуха почти с двукратным запасом.

При выполнении технологической части выпускной квалификационной работы была разработана общая сборка асинхронного двигателя. Посчитаны припуски на отверстие под подшипник, режимы резания для той же поверхности. Выбрано оборудование и оснастка. Определены нормы времени и необходимое количество оборудования для выполнения требуемой программы выпуска.

В разделе «Безопасность и экологичность проекта» проведен анализ опасных и вредных факторов. Освещены вопросы чрезвычайной ситуации,

производственной санитарии, охраны окружающей среды. Проведен расчёт освещения.

В экономической части определена цена сборочной единицы двигателя. Произведен расчёт получаемой прибыли для годовой программы выпуска, определены точка безубыточности и диапазон безопасности.

В специальной части была рассмотрена совместная работа системы вентилятор – асинхронный двигатель на примере вентилятора типа ВГПМ 20 и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

В целом спроектированный трёхфазный асинхронный двигатель для привода вентилятора удовлетворяет требованиям, определенным заданием.