

ВВЕДЕНИЕ

Мировое научно-техническое сообщество уделяет вопросам энергосбережения и, следовательно, повышению энергоэффективности оборудования исключительное значение. Такое внимание обусловлено двумя критическими факторами:

1. Повышение энергоэффективности позволяет замедлить процесс невосполнимого уменьшения медленно возобновляемых энергетических ресурсов, запасов которых осталось всего на несколько поколений;
2. Повышение энергоэффективности напрямую ведет к улучшению экологической обстановки.

В связи с возросшими требованиями к эффективности за счет решения вопросов энергосбережения и повышения надежности функционирования электротехнических систем, приобретают особую актуальность задачи модернизации АД для улучшения их энергетических характеристик (КПД и коэффициента мощности). А также для получения новых потребительских качеств (совершенствование защиты от окружающей среды, в том числе герметизация), обеспечения надежности при проектировании, изготовления и эксплуатации АД.

Асинхронные двигатели - основные потребители энергии в промышленности, сельском хозяйстве, строительстве, ЖКХ. На их долю приходится около 60% всех энергозатрат в названных отраслях. Такая структура энергопотребления существует во всех промышленно-развитых странах, в связи с чем, они активно переходят на эксплуатацию электродвигателей повышенной энергоэффективности, использование таких двигателей становится обязательным.

Концерн "РУСЭЛПРОМ" создал первый в России энергоэффективный двигатель общепромышленного назначения в двух классах энергоэффективности, применяемых в Европе и Америке: IE1 и IE2 по ЕС 60034-30 с возможностью модификации в класс энергоэффективности "Premium" (IE3), внедряемый сегодня в США [8].

Серия 7AVE создана с применением российского стандарта ГОСТ Р 51689-2000, вариант I, и европейского стандарта CENELEC, IEC 60072-1, что позволит устанавливать новые энергосберегающие двигатели как на отечественное оборудование, так и на импортное, где в настоящее время используются двигатели иностранного производства. Серия 7AVE предусматривает повышение КПД от 1,1% (старшие габариты) до 5% (младшие габариты) и охватывает самый востребованный диапазон мощностей от 1,5 до 500 кВт.

Создание серии энергоэффективных двигателей гармонизируется и с таким важнейшим направлением в деле энергосбережения, как разработка двигателей для привода запорной и запорно – регулирующей арматуры в составе взрывозащищенных электроприводов в условиях эксплуатации во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок, а также в приводе вентилей нефтяных и газовых труб, поскольку энергоэффективный двигатель обладает лучшими регулировочными свойствами, в частности, большим запасом по максимальному моменту. Здесь действует простое правило: чем больше класс энергоэффективности общепромышленного двигателя, тем шире его зона применения в частотно-регулируемом приводе.

В данной выпускной квалификационной работе спроектирован асинхронный взрывозащищенный двигатель с короткозамкнутым ротором, а также рассмотрена возможность улучшения КПД. Взрывозащищенные асинхронные двигатели применяются в отраслях промышленности, в которых электродвигатель может взаимодействовать с взрывоопасными и пожароопасными веществами. Для обеспечения взрывобезопасности увеличивают экспериментальный воздушный зазор для гашения огня. Применение специальных щелевых уплотнений позволяет изолировать внутренность машины от окружающей среды. Взрывозащищенность электродвигателя обеспечивается заключением электрических частей во взрывонепроницаемую оболочку, состоящую из корпуса двигателя и корпуса

блока управления электропривода, выдерживающую давление взрыва внутри нее и исключаящую передачу взрыва в окружающую среду.

Спроектированный асинхронный двигатель предназначен для привода запорной и запорно – регулирующей арматуры в составе взрывозащищенных электроприводов в условиях эксплуатации во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок, а также в приводе вентилей нефтяных и газовых труб.

1 Электромагнитный расчет

1.1 Обоснование и выбор основных размеров

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

1.1.1 Выбираем наружный диаметр сердечника статора [1]:

$$h = 0,100 \text{ м}, D_a = 0,173, \text{ м.}$$

1.1.2 Внутренний диаметр сердечника статора:

$$D = D_a \cdot K_d,$$

где K_d – коэффициент, характеризующий отношение внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей при различных числах полюсов принимаем $K_d = 0.55$ [1] пределы (0.52 ÷ 0.6);

$$D = 0.173 \cdot 0.55 = 0,095, \text{ м.}$$

1.1.3 Полюсное деление τ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 0.095}{2 \cdot 1} = 0,15, \text{ м.}$$

1.1.4 Расчётная мощность:

$$P_1 = \frac{P_{2H} \cdot K_\epsilon}{\eta \cdot \cos \phi},$$

где K_ϵ – коэффициент отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, зависит от $2p, D_a$. Выбираем $K_\epsilon = 0.98$ [1];

η - КПД двигателя, зависит от P_{2H} , принимаем равным $\eta = 0,87$ [1];

$\cos \phi$ – коэффициент мощности, зависит от P_{2H} , принимаем $\cos \phi = 0,9$;

$$P_1 = \frac{5500 \cdot 0.98}{0.9 \cdot 0.87} = 6884, \text{ Вт.}$$

1.1.5 Предварительный выбор электромагнитных нагрузок.

Рекомендуемые пределы A ($22 \cdot 10^3 \div 24 \cdot 10^3$) А / м, зависит от $D_a, 2p$.

Принимаем $A = 23 \cdot 10^3$ А / м.

Рекомендуемые пределы B_δ (0.68 ÷ 0.74) Тл, зависит от D_a и $2p$, принимаем

$$B_\delta = 0.68 \text{ Тл [1].}$$

1.1.6 Выбираем обмоточный коэффициент для однослойной обмотки

(выбираем однослойную, так как $P_{2H} < 12 - 15$ кВт [1]) при $2p = 2$ он может быть взят: $K_{об1} = 0.958$, пределы $(0.95 \div 0.96)$.

1.1.7 Рассчитаем длину магнитопровода:

$$l_{\delta} = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{об1} \cdot A \cdot B_{\delta}},$$

где k_B – коэффициент формы поля рассчитывается по формуле:

$$k_B = \pi / 2\sqrt{2} = 3.14 / 2\sqrt{2} = 1.111;$$

Ω - синхронная угловая частота вала:

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{3000}{60} = 314 \text{ рад /с};$$

$$l_{\delta} = \frac{6884}{1.111 \cdot 0.095^2 \cdot 314 \cdot 0.958 \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 0.68} = 0.145, \text{ м.}$$

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

$$\lambda = l_{\delta} / \tau = 0.145 / 0.15 = 0.971.$$

Полученное значение входит в область рекомендуемых пределов [1], зависит от $2p$ и h , IP44 λ пределы $(0.3 \div 0.98)$.

В начале расчета двигателя были получены значения электромагнитных нагрузок $A = 23 \cdot 10^3$ А / м и $B_{\delta} = 0.68$ Тл, входящие в рекомендуемые пределы: $A (22 \cdot 10^3 \div 24 \cdot 10^3)$ А / м, $B_{\delta} (0.68 \div 0.74)$ Тл.

1.2 Расчет обмотки статора

1.2.1 Выберем предельные значения зубцового деления t_{Z1} , зависит от h и τ [1]:

$$t_{Z1\min} = 0,011 \text{ м}; t_{Z1\max} = 0,012 \text{ м.}$$

1.2.2 Возможное число пазов статора Z_1 :

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1\max}} = \frac{3.14 \cdot 0.095}{0.013} = 23;$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1\min}} = \frac{3.14 \cdot 0.095}{0.011} = 27.17;$$

Выбираем окончательно число пазов статора, $Z_1=24$. 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. Большое количество пазов приводит к улучшению рабочих характеристик, но и, одновременно, к увеличению расхода меди, т.е. стоимость машины при этом повышается.

Проверим величину q :

$$q = Z_1 / 2 \cdot p \cdot m = 24 / 2 \cdot 3 = 4.$$

1.2.3 Окончательное значение зубцового деления статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{3.14 \cdot 0.095}{2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 4} = 0.0125, \text{ м.}$$

Рассчитаем номинальный ток обмотки статора:

$$I_{1ном} = \frac{P_{2н}}{m \cdot U_{1ном} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{5500}{3 \cdot 220 \cdot 0.87 \cdot 0.9} = 10,64, \text{ А.}$$

Определим число эффективных проводников в пазу. Для этого предварительно, при условии, что число параллельных ветвей обмотки $a = 1$ рассчитаем:

$$U'_{II} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1ном} \cdot Z_1} = \frac{3.14 \cdot 0.095 \cdot 23 \cdot 10^3}{10,64 \cdot 24} = 26,92.$$

Принимаем, $a = 1$, тогда значение числа проводников в пазу:

$$U_{II} = a \cdot U' = 1 \cdot 26,92 = 26,92.$$

Окончательно принимаем $U_{II} = 27$.

1.2.4 Число витков в фазе обмотки статора:

$$w_1 = \frac{U_{II} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{27 \cdot 24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 108.$$

1.2.5 Найдём окончательное значение линейной нагрузки:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1ном} \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 10,6 \cdot 108 \cdot 3}{3.14 \cdot 0.095} = 23.071 \cdot 10^3, \text{ А / м.}$$

Окончательно принимаем значение обмоточного коэффициента для первой гармоники ЭДС $K_{об1} = 0,958$ [1].

Рассчитаем значение потока:

$$\Phi = \frac{K_{\varepsilon} \cdot U_{1ном}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot K_{об1} \cdot f_1} = \frac{0,98 \cdot 220}{4 \cdot 1,111 \cdot 108 \cdot 0,958 \cdot 50} = 0,0094, \text{ Вб.}$$

Определим значение индукции в воздушном зазоре:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot p}{D \cdot l_{\delta}} = \frac{1 \cdot 0,0094}{0,095 \cdot 0,143} = 0,697, \text{ Тл.}$$

Значения A и B_{δ} находятся в допустимых пределах (5%) и примерно совпадают с принятыми предварительно.

1.2.6 Определим допустимую плотность тока в обмотке статора, с учётом линейной нагрузки двигателя:

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

где AJ – среднее значение произведения [1], зависит от D_a и $2p$;

$AJ = 132 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3$ пределы ($127 \cdot 10^9 \div 132 \cdot 10^9$) $\text{А}^2/\text{м}^3$;

$$J_1 = \frac{132 \cdot 10^9}{23,07 \cdot 10^3} = 5,72 \cdot 10^6, \text{ А}/\text{м}^2.$$

1.2.7 Площадь поперечного сечения эффективного проводника предварительно:

$$q_{эф} = \frac{I_{1ном}}{a \cdot J_1} = \frac{10,6}{1,5,72 \cdot 10^6} = 1,86 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

Окончательно выберем сечение проводника следующим образом:

В обмотках из круглого провода число элементарных проводников может быть взято до 5-6, но при большом $n_{эл}$ возрастают технологические трудности намотки катушек, поэтому в современных машинах стремятся уменьшить число элементарных проводников в одном эффективном до 2-3, для чего увеличивают число параллельных ветвей. Примем число элементарных проводников $n_{эл} = 2$, тогда

$$q_{эл} = \frac{q_{эф}}{n_{эл}} = \frac{1,86 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,93 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

Принимаем обмоточный провод марки ПЭТВ (провода повышенной нагревостойкости), температурный индекс: 155, класс нагревостойкости: F, тип эмалированной изоляции: высокопрочная эмаль на полиэфироимидной основе [1]:

$d_{эл} = 1,12$ мм – диаметр неизолированного провода ;

$d_{из} = 1,2$ мм; $q_{эл} = 0,985$ мм², тогда

$$q_{ср.эф.} = q_{эл} \cdot n_{эл} = 0,985 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 1,97 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2.$$

1.2.8 Уточнённое значение плотности тока в обмотке статора:

$$J_1 = \frac{I_{ном}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} = \frac{10,6}{1 \cdot 0,985 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 5,402 \cdot 10^6, \frac{A}{\text{м}^2}.$$

Уточнённое значение плотности тока в обмотке статора отличается от заданного менее 10% .

Так как двигатель обладает небольшой мощностью, то для упрощения укладки обмотки в пазы принята трехфазная однослойная обмотка. Число пазов статора принято стандартному и равно $Z_1=24$, т.о., обмотка имеет целое число пазов на полюс и фазу ($q=4$).

Схема обмотки статора представлена в приложении А.

1.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора

1.3.1 Выбор формы паза статора. Круглые обмоточные провода насыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при насыпных обмотках выбирают таким образом, чтобы параллельные грани имели зубцы, а не пазы статора. Такие зубцы имеют постоянное, не изменяющееся с высотой зубца поперечное сечение, индукция в них также не изменяется, и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное напряжение трапециевидных зубцов, при том же среднем значении индукции в них. Это объясняется отсутствием в зубцах с параллельными гранями участков с высокой индукцией, напряжённость поля в которых резко возрастает из-за нелинейности магнитной характеристики стали, увеличивая суммарное магнитное напряжение зубцов. В большинстве современных двигателей

выполняют трапециевидальные пазы. Поэтому выбираем именно такие пазы (Рисунок 1.1).

1.3.2 Расчёт зубцовой зоны статора.

Выбираем сталь марки 2013. Выбираем допустимые значения индукции [1]: ярма статора – $B_a = 1.53$ Тл; рекомендуемые пределы (1.4 ÷ 1.6) зубцов статора при постоянном сечении – $B_{Z1} = 1.9$ Тл, рекомендуемые пределы (1.6 ÷ 1.9).

Выбираем способ изолирования листов – оксидирование, тогда коэффициент заполнения сердечника сталью $k_c = 0.97$ [1]. Зависимость от h , способа изолирования листов.

1.3.3 Определим ширину зубцов статора:

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta \cdot l_\delta \cdot t_{Z1}}{B_{Z1} \cdot k_c \cdot \ell_{cm1}} = \frac{0.068 \cdot 0.143 \cdot 0.0125}{1.9 \cdot 0.143 \cdot 0.97} = 4,6 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

Найдём высоту ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0.0094}{2 \cdot 1,53 \cdot 0.143 \cdot 0.97} = 0.0218, \text{ м.}$$

Высота шлица принимаем [1] $h_{ш} = 0,0005$ м, для двигателей с $h = 80$ мм.

Высота шлица полузакрытых пазов $b_{ш} = 0,0035$ м [1].

Определим размеры паза в штампе, размер b_1 определяют в зависимости от угла, при $h \leq 250 \mu\text{м}$, $\beta = 45^\circ$:

$$h_{\pi} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0.173 - 0.095}{2} - 0.0218 = 0.0171, \text{ м;}$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_{ш} - b_{ш}) - Z_1 \cdot b_{Z1}}{Z_1 - \pi},$$

$$b_1 = \frac{3.14(0,095 + 2 \cdot 0.0005 - 0,0035) - 24 \cdot 0.0046}{24 - 3.14} = 0.0087, \text{ м;}$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_{\pi})}{Z_1} - b_{Z1} = \frac{3.14(0.079 + 2 \cdot 0.0108)}{24} - 0.0046 = 0.0124, \text{ м.}$$

Клиновую часть паза найдём из выражения:

$$h_{n.к.} = h_n - \left(h_{uu} + \frac{b_1 - b_{uu}}{2} \right) = 0.0171 - \left(0.0005 + \frac{0.0087 - 0.0035}{2} \right) = 0.0122, \text{ м.}$$

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

$$\Delta b = 0.1 \text{ мм}; \Delta h = 0.1 \text{ мм};$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b = (0.0124 - 0.0001) = 0.0123, \text{ м};$$

$$b'_1 = b_1 - \Delta b = (0.0087 - 0.0001) = 0.0086, \text{ м};$$

$$h'_{нк} = h_{нк} - \Delta h = (0.0122 - 0.0001) = 0.0121, \text{ м.}$$

Корпусная изоляция: класс нагревостойкости F, температурный индекс 155, материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами. Материал пленкостеклопласт имидофлекс.

Односторонняя толщина изоляции в пазу:

$$b_{из} = 0,25 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу:

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot h_{II} + b_1 + b_2) = 0.25 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 0.0122 + 0.0087 + 0.0124) = 1,383 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки:

$$S_{II} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{н.к.} - S_{из} = \frac{(0.0086 + 0.0123)}{2} \cdot 0.0121 - 1,123 \cdot 10^{-5} = 1,123 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2.$$

1.3.5 Подсчитаем коэффициент заполнения паза:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot U_{II} \cdot n_{эл}}{S_{II}} = \frac{(0.00112)^2 \cdot 27 \cdot 2}{1,123 \cdot 10^{-4}} = 0.692.$$

Полученное значение k_3 входит в рекомендуемый промежуток (0,69 – 0,71) и подходит для механической укладки [1].

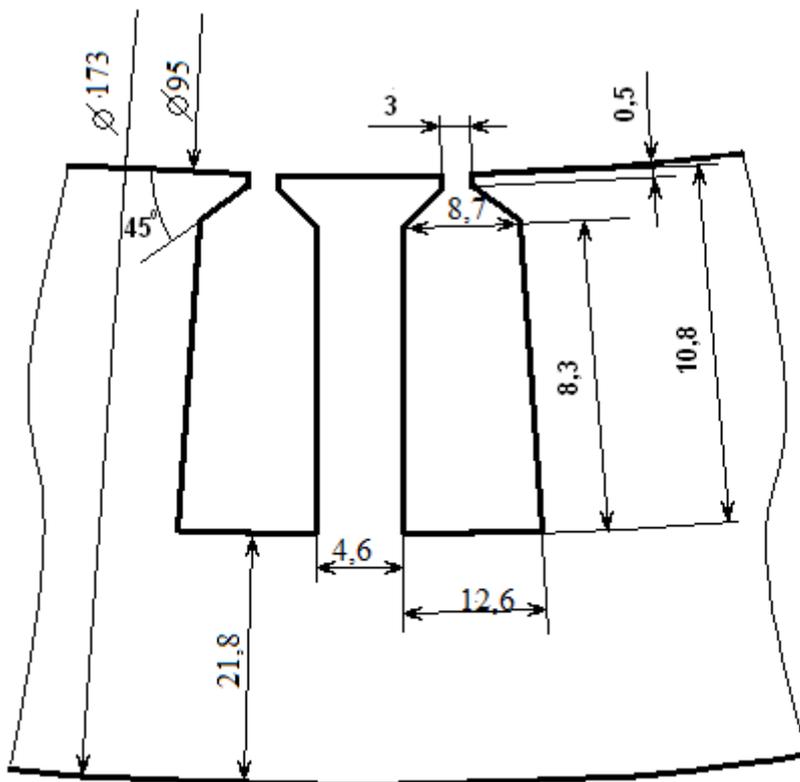


Рисунок 1.1 — Трапецеидальные пазы статора

В расчете зубцовой зоны статора была принята конфигурация пазов, при которой зубцы имеют не постоянное поперечное сечение по всей высоте, т.е. в зубцах будут участки с разной индукцией и суммарное магнитное напряжение будет меньше, чем у зубцов другой конфигурации.

Эскиз паза статора в штампе с заполнением представлен в приложении Б.

1.4 Расчет ротора

Воздушный зазор [1], зависит от D : $\delta = 0.3 \cdot 10^{-3}$ м. 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 его $\cos\varphi$ 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.

Число пазов ротора [1], зависит от $2p$: $Z_2 = 20$. Выбор пазов ротора особо важен, так как в поле воздушного зазора машины кроме основной, 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. 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. Однако для двигателей большой мощности принимают $Z_2 > Z_1$.

1.4.1 Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0.095 - 2 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} = 0.0946 \text{ , м.}$$

1.4.2 Длина магнитопровода ротора: $l_2 = l_\delta = 0,145 \text{ , м.}$

1.4.3 Зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3.14 \cdot 0.095}{19} = 0.0156, \text{ м.}$$

1.4.4 Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал:

$$D_J = D_B = k_B \cdot D_a = 0.23 \cdot 0.173 = 0.04, \text{ м};$$

где $k_B = 0,23$ - эмпирический коэффициент [1], зависит от h и $2p$. При $h=71-250$ мм.

1.4.5 Ток в стержне ротора:

$$I_2 = k_i \cdot I_{\text{люм}} \cdot v_i,$$

где k_i - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение I_1 / I_2 [1]:

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cos \varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.9 = 0.92,$$

v_i - коэффициент приведения токов:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot K_{\text{об1}}}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0.958}{19 \cdot 1} = 32,66;$$

$$I_2 = 0.92 \cdot 32,66 \cdot 10,6 = 319,8, \text{ А.}$$

1.4.6 Площадь поперечного сечения стержня предварительно:

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

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазовалюминием выбирается в пределах $J_2 = (2,8 \dots 3,8) \cdot 10^6 \text{ А / м}^2$. Принимаем значение $J_2 = 3,8 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$;

тогда:

$$q_c = \frac{319,8}{3,8 \cdot 10^6} = 8,42 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2$$

Выбираем пазы ротора грушевидной формы. Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым характеристикам двигателя и его мощностью. В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором с высотой оси вращения $h < 100$ мм обычно выполняют грушевидные пазы и литую обмотку из алюминия.

Размеры шлица: $b_{ш2} = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $h_{ш2} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м [1].

Рекомендуемые значения индукции для зубцов ротора при исполнении IP68 с числом полюсов $2p = 2$ выбираются в пределах $B_{z2} = (1.75 \dots 1.95)$ Тл. Принимаем допустимую индукцию для зубцов ротора $B_{z2} = 1.85$ Тл.

Ширина зубца ротора:

$$b_{z2don} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot \ell_{\delta}}{B_{z2} \cdot k_c \cdot \ell_{cm2}} = \frac{0.679 \cdot 0.0156 \cdot 0.145}{1.85 \cdot 0.145 \cdot 0.97} = 0.0059, \text{ м.}$$

Размеры паза:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш2}) - Z_2 \cdot b_{z2don}}{Z_2 + \pi},$$

$$b_1 = \frac{3.14(0.0946 - 2 \cdot 0.0005) - 19 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3}}{19 + 3.14} = 0.0082, \text{ м,}$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2 + \pi}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2 + \pi}{\pi} + \frac{\pi}{2}}},$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{(0.0082)^2 \cdot \left(\frac{19}{3.14} + \frac{3.14}{2}\right) - 4 \cdot 8,42 \cdot 10^{-5}}{\frac{20}{3.14} + \frac{3.14}{2}}} = 0.0063, \text{ м.}$$

При $h < 132$ мм меньшая ширина паза $b_2 > (1.5-2.0)$ мм;

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (0.0082 - 0.0063) \cdot \frac{19}{2 \cdot 3.14} = 0.0059, \text{ м.}$$

Площадь поперечного сечения стержня:

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) \cdot h_1,$$

$$q_c = \frac{3.14}{8} (0.0063^2 + 0.0082^2) + 0.5 (0.0063 + 0.0082) \cdot 0.0059 = 8,42 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^3.$$

Полная высота паза:

$$h_{п2} = h_{ш2} + h_1 + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} = \left(0.0005 + 0.0059 + \frac{0.0063}{2} + \frac{0.0082}{2} \right) = 0.0136, \text{ м.}$$

Плотность тока в стержне:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{319,8}{8,42 \cdot 10^{-5}} = 3,8 \cdot 10^6, \text{ А / м}^2.$$

1.4.7 Короткозамыкающие кольца:

Ток в короткозамкнутом кольце [1]:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta},$$

где Δ – коэффициент:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3 \cdot 14 \cdot 1}{19} = 0.329,$$

тогда:

$$I_{кл} = \frac{319,8}{0.329} = 971,48, \text{ А.}$$

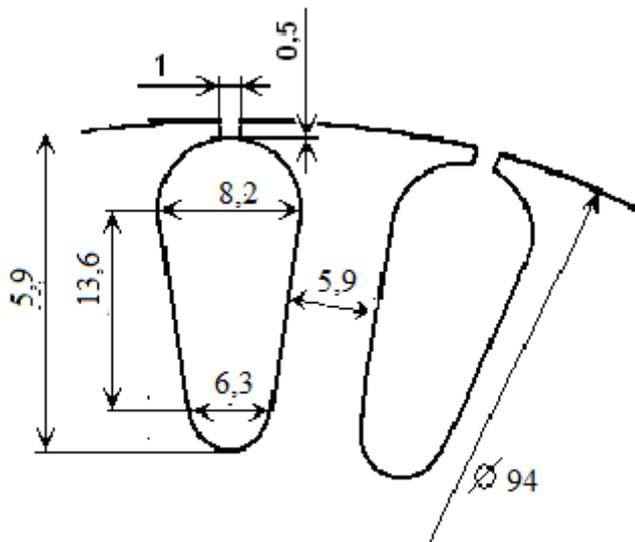


Рисунок 1.2 — Грушевидные пазы ротора

Плотность тока в замыкающих кольцах выбирают в среднем на 15 – 20% меньше, чем в стержнях из-за лучших условий охлаждения колец, а также потому, что в машинах, в которых для улучшения пусковых характеристик используют эффект вытеснения тока, большое сопротивление замыкающих колец снижает кратность увеличения общего сопротивления обмотки ротора при пуске.

$$J_{кл} = 0.85 \cdot J_2 = 0.85 \cdot 3,8 \cdot 10^6 = 3,23 \cdot 10^6, \text{ А / м}^2.$$

Площадь поперечного сечения кольца:

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{971,5}{3,23 \cdot 10^6} = 3 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2.$$

Размеры замыкающих колец:

$$b_{кл} = 1,25 \cdot h_{П2} = 1,25 \cdot 0,0136 = 0,017, \text{ м};$$

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{b_{кл}} = \frac{3 \cdot 10^{-4}}{0,017} = 0,018, \text{ м};$$

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} = 0,095 - 0,018 = 0,0775, \text{ м}.$$

Воздушный зазор был выбран достаточно малым, что приводит к уменьшению магнитодвижущей силы магнитной цепи и тока намагничивания. При этом будут уменьшаться суммарные потери.

Число пазов ротора выбрано по рекомендациям, основанным на изучении влияния соотношений числа зубцов статора и ротора на кривую момента, а также шумы и вибрации. Пазы ротора выполнены со скосом. Несмотря на уменьшение ЭДС обмотки, скос пазов уменьшает негативное влияние высших гармоник и значительно улучшает виброакустические характеристики двигателя.

Эскиз паза ротора в штампе представлен в приложении В.

1.5 Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2013; толщина листов 0,5 мм. Эта марка рекомендуется для АД с $h = (45 - 250)$ мм.

1.5.1 Магнитное напряжение воздушного зазора:

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

где k_{δ} – результирующий коэффициент воздушного зазора [1]:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2},$$

где $k_{\delta 1}$ - коэффициент воздушного зазора статора,

$k_{\delta 2}$ - коэффициент воздушного зазора ротора

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.0125}{0.0125 - 8,167 \cdot 0.0003} = 1.24,$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_2 \cdot \delta} = \frac{0.0156}{0.013 - 1.333 \cdot 0.0003} = 1.03,$$

μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

$$\gamma_1 = \frac{(b_{u1}/\delta)^2}{5 + (b_{u1}/\delta)} = \frac{(0.0035/0.0003)^2}{5 + (0.0035/0.0003)} = 8,17,$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{u2}/\delta)^2}{5 + (b_{u2}/\delta)} = \frac{(0.001/0.0003)^2}{5 + (0.001/0.0003)} = 1.333,$$

тогда: $k_{\delta 1} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1.24 \cdot 1.03 = 1.278,$

тогда: $F_{\delta} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.679 \cdot 0.0003 \cdot 1.278 = 414,1, \text{ А.}$

1.5.2 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны статора прежде найдём индукцию в них:

$$B'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot \ell_{\delta}}{b_{z1} \cdot k_{c1} \cdot \ell_{c1}} = \frac{0.679 \cdot 0.0125 \cdot 0.145}{0.0045 \cdot 0.145 \cdot 0.97} = 1.9, \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1},$$

h_{z1} - высота зубца, $h_{z1} = h_{\Pi} = 17,1$ мм;

H_{z1} – напряжение зубцовой зоны статора [1]

$H_{z1} = 2070 \text{ А /м, для } B_{z1} = 1,9 \text{ Тл,}$

тогда:

$$F_{z1} = 2 \cdot 0.0171 \cdot 2070 = 71, \text{ А.}$$

1.5.3 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны ротора прежде найдём индукцию в них:

$$B'_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot \ell_{\delta}}{b_{z2} \cdot k_{c1} \cdot \ell_{cm2}} = \frac{0.679 \cdot 0.0156 \cdot 0.145}{0.0059 \cdot 0.145 \cdot 0.97} = 1.85, \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2},$$

h_{z2} - высота зубца; $h_{z2} = h_{\Pi 2} - 0,1b_2 = 13,6 - 0,1 \cdot 6,2 = 13, \text{ мм,}$

H_{z2} – напряжение зубцовой зоны ротора [1]

$H_{Z2} = 1770 \text{ А /м}$, для $B_{Z2} = 1,85 \text{ Тл}$,

тогда:

$$F_{Z2} = 2 \cdot 0.0013 \cdot 1770 = 45,9, \text{ А.}$$

1.5.4 Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{71 + 46}{414} = 1.282 .$$

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 входит в диапазон рекомендуемых значений.

1.5.5 Магнитное напряжение ярма статора. Предварительно найдём длину средней магнитной силовой линии в ярме:

$$L_a = \pi \cdot \frac{(D_a - h_a)}{2 \cdot p} = 3.14 \cdot \frac{(0.173 - 0.0218)}{2 \cdot 1} = 0.238, \text{ м.}$$

Напряжённость поля ярма статора при индукции [1]:

$$B_a = 1.53 \text{ Тл}, H_a = 586 \text{ А /м},$$

тогда магнитное напряжение:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.238 \cdot 586 = 97,4, \text{ А.}$$

1.5.6 Магнитное напряжение ярма ротора. Предварительно определим длину средней магнитной силовой линии в ярме ротора:

$$L_j = \pi \cdot \frac{D_j + h_j}{2 \cdot p} = 3.14 \cdot \frac{0.04 + 0.0136}{2 \cdot 1} = 84 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

В двигателях с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал часть силовых магнитных линий замыкаются через вал, поэтому расчетную высоту ярма ротора, м, определяют:

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{0,0946 - 0,0398}{2} - 0,136 = 14 \cdot 10^{-3}, \text{ м};$$

$$B'_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot k_{c1} \cdot \ell_{cm2}} = \frac{0.0094}{2 \cdot 0.032 \cdot 0.145 \cdot 0.97} = 1.056, \text{ Тл.}$$

Напряжённость поля ярма ротора при индукции $B_j = 1,056 \text{ Тл}$ [1]

$H_j = 277 \text{ А /м}$, тогда магнитное напряжение:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 84 \cdot 10^{-3} \cdot 277 = 15,82, \text{ А.}$$

1.5.7 Магнитное напряжение на пару полюсов:

$$F_y = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 414 + 71 + 45,9 + 97,4 + 15,8 = 644,1, \quad \text{А.}$$

1.5.8 Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_\mu = \frac{F_y}{F_\delta} = \frac{644,1}{414} = 1,6.$$

1.5.9 Намагничивающий ток:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_y}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{об1}} = \frac{1 \cdot 644,2}{0,9 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0,958} = 2,31, \text{ А.}$$

Выразим намагничивающий ток в долях номинального тока двигателя:

$$I_{\mu^*} = \frac{I_\mu}{I_{ном}} = \frac{2,31}{10,6} = 0,217.$$

Относительное значение I_{μ^*} служит определенным критерием правильности произведенного выбора и расчета размеров и обмотки двигателя.

В нашем случае значение $I_{\mu^*} = 0,217$ не вошло в допустимые пределы: ($I_{\mu^*} < 0,20 \div 0,18$; $I_{\mu^*} > 0,30 \div 0,35$), но в машинах малой мощности значение данного коэффициента может превышать установленные значения из – за того, что F_δ велико.

В расчете магнитной цепи получился значительным коэффициент насыщения магнитной цепи, т.к. воздушный зазор был выбран достаточно малым.

1.6 Параметры рабочего режима

1.6.1 Определим среднюю ширину катушки:

$$b_{км} = \pi \cdot \frac{(D + h_{пл})}{2 \cdot p} = 3,14 \cdot \frac{(0,095 + 0,0171)}{2 \cdot 1} = 0,176, \text{ м.}$$

Длина лобовой части:

$$l_d = k_d \cdot b_{км} + 2B,$$

где $k_{л}$ - коэффициент, зависит от числа полюсов [1], для не изолированных лентой лобовых частей $k_{л} = 1,2$; $B = 0,01$ м;

$$l_{л} = 1,2 \cdot 0,176 + 0,01 \cdot 2 = 0,232, \text{ м.}$$

Вылет лобовых частей

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} \cdot b_{\text{кл}} + B = 0,5 \cdot 0,176 + 0,01 = 0,098, \text{ м.}$$

Средняя длина витка:

$$l_{\text{cp}} = 2 \cdot (l_{\text{л}} + l_{\text{л}}) = 2 \cdot (0,143 + 0,232) = 0,75, \text{ м.}$$

Общая длина проводников фазы обмотки:

$$L_{1\text{cp}} = l_{\text{cp}} \cdot w_1 = 0,75 \cdot 108 = 81,4, \text{ м.}$$

1.6.2 Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = k_R \cdot \rho_{75} \cdot \frac{L_{1\text{cp}}}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 1 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 81,39}{41 \cdot 1,97 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 1,008, \text{ Ом,}$$

где $\rho_{75} = 10^{-6} / 41$ Ом · м - удельное сопротивление меди при температуре плюс 75°C ;

k_R - коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока, $k_R = 1$.

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 1,008 \cdot \frac{10,6}{220} = 0,027.$$

Сопротивление стержня обмотки ротора:

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_2}{q_c} = 4,878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,145}{1,97 \cdot 10^{-6}} = 8,4 \cdot 10^{-5}, \text{ Ом,}$$

где $\rho_{115} = 10^{-6} / 20,5$ Ом · м - удельное сопротивление литой алюминиевой обмотки ротора при температуре плюс 115°C .

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключённого между двумя соседними стержнями:

$$r_{\text{кл}} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}}} = 4,878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{3,14 \cdot 77,5 \cdot 10^{-3}}{19 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}} = 2,08 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом.}$$

1.6.3 Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 8,4 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 2,08 \cdot 10^{-6}}{0,329^2} = 1,23 \cdot 10^{-4}, \text{ Ом.}$$

Для дальнейших расчётов полученное сопротивление фазы обмотки ротора к числу витков обмотки статора:

$$r'_{2} = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}} = 1,23 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (108 \cdot 0,958)^2}{19 \cdot 1} = 0,83, \text{ Ом.}$$

Относительное значение:

$$r'_{2*} = r'_{2} \cdot \frac{I_{ном}}{U_{ном}} = 0,83 \cdot \frac{10,6}{220} = 0,025.$$

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора должны иметь диапазон (0,02...0,03). В расчете $r_{1*} = 0,027$, $r'_{2*} = 0,025$ входят в пределы этих значений, поэтому можно сделать вывод, что расчет правильный.

1.6.4 Коэффициенты магнитной проводимости.

При диаметральном

шаге однослойной обмотки k_{β} и k'_{β} выбираем:

$$k_{\beta} = k'_{\beta} = 1.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния:

$$\lambda_{п1} = \frac{h_3}{3 \cdot b_1} + \left(\frac{3 \cdot h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{u1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \right), \text{ - для двухслойной обмотки,}$$

где $h_k = 0,5(b_1 - b_{ш}) = 0,5(0,0087 - 0,0035) = 0,0017, \text{ м;}$

$$h_2 = h_{пк} - 2b_{виз} = 0,008 - 2 \cdot 0,00025 = 0,0079, \text{ м.}$$

Проводники закрыты пазовой крышкой;

$$\lambda_{п1} = \frac{0,0044}{3 \cdot 0,007} + \left(\frac{3 \cdot 0,0017}{0,0087 + 2 \cdot 0,0035} + \frac{0,0005}{0,0035} \right) \cdot 1 = 1,16.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}} \cdot (l_{л} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{4}{0,145} \cdot (0,145 - 0,64 \cdot 1) = 1,27$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi,$$

где ξ – коэффициент:

$$\xi = 2 \cdot k'_{\text{ск}} \cdot k_{\beta} - K_{\text{об1}}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{\text{ск}}^2) = 2 \cdot 1,4 \cdot 1 - 0,9577^2 = 1,355,$$

где $k'_{\text{ск}} = 2[1]$, зависит от $t_{z2}/t_{z1}=1,2$

тогда:

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{0,0125}{12 \cdot 0,0003 \cdot 1,277} \cdot 1,36 = 3,67.$$

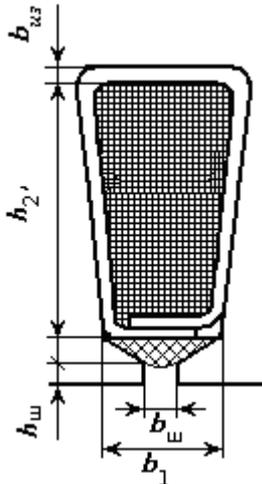


Рисунок 1.3 — Расположение обмотки и изоляции в пазу статора

1.6.5 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$X_l = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_l}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}),$$

$$X_l = 15,8 \cdot 50 \cdot 0,108^2 \cdot \frac{0,145}{1 \cdot 4} \cdot 6,1 \cdot 10^{-6} = 2,04, \text{ Ом}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки статора:

$$x_{l*} = X_l \cdot \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = 2,04 \cdot \frac{10,6}{220} = 0,099.$$

1.6.6 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора:

$$\lambda_{\text{п2}} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{ш}}}{2 \cdot b_1} \right] \cdot k_{\text{л}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}},$$

где $h_0 = h_1 + 0,4 \cdot b_2 = 0,006 \cdot 100 + 0,4 \cdot 0,0063 = 0,0089, \text{ м}$,

$$h_{\text{ш1}} = h_{\text{ш2}} = 0,5 \text{ мм};$$

$$\lambda_{\Pi 2} = \left[\frac{0.0089}{3 \cdot 0.0063} \cdot \left(1 - \frac{3.14 \cdot 0.0063^2}{8 \cdot 84,16 \cdot 10^{-4}} \right)^2 + 0.66 - \frac{0.001}{2 \cdot 0.0063} \right] \cdot 1 + \frac{0.0005}{0.001} = 1.27$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{\lambda 2} = \frac{2.3 \cdot D_{\text{кл.сп}}}{Z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \lg \left[\frac{4.7 \cdot D_{\text{кл.сп}}}{h_{\text{кл}} + 2 \cdot b_{\text{кл}}} \right],$$

$$\lambda_{\lambda 2} = \frac{2.3 \cdot (0.0775)}{20 \cdot 0.145 \cdot 0.329^2} \cdot \lg \left[\frac{4.7 \cdot (0.0775)}{0.017 + 2 \cdot 0.018} \right] = 0.5,$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{\Delta 2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi,$$

где ξ – коэффициент $\Delta_z = 0,03$ [1]:

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{3.14 \cdot 1}{19} \right)^2 - \frac{0.0329}{1 - \left(\frac{1}{19} \right)^2} = 0.98;$$

$$\lambda_{\Delta 2} = \frac{0.0156}{12 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} \cdot 1.28} = 3,3.$$

1.6.7 Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$X_2 = 7.9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{\Delta 2}) \cdot 10^{-6} = 7.9 \cdot 50 \cdot 0.145 \cdot 5,1 \cdot 10^{-6} = 2,9 \cdot 10^{-4}, \text{ Ом.}$$

Приводим X_2 к числу витков статора:

$$x'_2 = X_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot K_{\text{об1}})^2}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}} = 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (108 \cdot 0.958)^2}{19 \cdot 1^2} = 1,98, \text{ Ом.}$$

Относительное значение:

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = 1,98 \cdot \frac{10,6}{220} = 0,1.$$

Перевод относительных параметров асинхронного двигателя в относительные значения делается для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчёта характеристик.

Так, относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и приведённого сопротивления обмотки ротора большей частью находятся в пределах $x_1^* = 0.08 \div 0.14$ и $x_2^* = 0.1 \div 0.16$.

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведённого сопротивления обмотки ротора близки друг к другу и обычно составляют несколько сотых долей, лишь в машинах малой мощности их значения несколько увеличиваются, как в нашем случае.

Полученные значения параметров обмотки статора и ротора находятся в рекомендуемом пределе.

1.7 Расчет потерь

1.7.1 Основные потери в стали статора асинхронной машины:

$$P_{ст.осн} = P_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{Zcp}^2 \cdot m_{z1}),$$

где $p_{1.0/50}$ - удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц [1]: сталь 2013 толщиной 0,5 мм; $p_{1.0/50} = 2.5$ Вт / кг;

β - показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания, для данной стали $\beta = 1,5$;

$k_{\partial a}$ и $k_{\partial z}$ - коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов; $k_{\partial a} = 1.6$, $k_{\partial z} = 1.8$,

m_a , m_{z1} - масса стали ярма и зубцов статора:

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

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1,cp} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c,$$

где γ_c - удельная масса стали; в расчётах принимают $\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3$ кг / м³ [1],

$$m_a = 3.14 \cdot (0.173 - 0.095) \cdot 0.0218 \cdot 0.145 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 11,36, \text{ кг},$$

$$m_{z1} = 0.017 \cdot 0.0046 \cdot 24 \cdot 0.145 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 2,1, \text{ кг},$$

тогда:

$$P_{ст.осн} = 2.6 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} \cdot (1.53^2 \cdot 1.6^2 \cdot 11.36 + 1.8 \cdot 1.85^2 \cdot 2.1) = 140, \text{ Вт.}$$

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

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta},$$

где $\beta_{02} = f(b_{ш} / \delta)$;

$$\beta_{02} = 0.21 \text{ [1]},$$

$$B_{02} = 0.21 \cdot 1.278 \cdot 0,679 = 0.182, \text{ Тл.}$$

Поверхностные потери в роторе:

$$P_{пов2} = p_{пов2} \cdot (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot Z_2 \cdot l_{\delta},$$

где $p_{пов2}$ - удельные поверхностные потери, т.е. потери, в поверхностном слое коронок зубцов ротора:

$$p_{пов2} = 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000}\right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2,$$

где k_{02} - коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери находится в пределах $k_{02}=1,4-1,8$ [1],

$k_{02} = 1.5$;

$$p_{пов2} = 0.5 \cdot 1.6 \cdot \left(\frac{24 \cdot 3000}{10000}\right)^{1.5} \cdot (0.182 \cdot 0,0156 \cdot 10^3)^2 = 76,7, \text{ Вт / м}^2,$$

тогда:

$$P_{пов2} = 76,7 \cdot (0.056 - 0.0035) \cdot 19 \cdot 0.145 = 3,22, \text{ Вт.}$$

1.7.2 Для определения пульсационных потерь необходимо определить массу ротора:

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 19 \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0.077 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 1,603, \text{ кг,}$$

а также амплитуду пульсаций индукции в среднем сечении зубцов:

$$B_{пуль2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{8,17 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.0156} \cdot 1.85 = 0.145, \text{ Тл,}$$

тогда пульсационные потери в зубцах ротора:

$$P_{\text{пуль2}} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пуль2}} \right)^2 \cdot m_{Z2} = 0.11 \cdot \left(\frac{24 \cdot 3000}{1000} \cdot 0.145 \right)^2 \cdot 1.603 = 19,2, \text{ В.}$$

1.7.3 Сумма добавочных потерь в стали:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{нов1}} + P_{\text{пуль1}} + P_{\text{нов2}} + P_{\text{пуль2}} = 0+0+3,22+19,205 = 22,42, \text{ Вт};$$

$P_{\text{нов1}}$ и $P_{\text{пуль1}} \approx 0$ т.к. мало пульсаций индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора.

1.7.4 Полные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 140,09+22,42 = 162,5, \text{ Вт.}$$

1.7.5 Механические потери:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 1 \cdot \left(\frac{3000}{10} \right)^2 \cdot 0.173^4 = 87, \text{ Вт,}$$

где K_T - коэффициент, для двигателей с внешним обдувом $2p = 2$ равен $K_T = 1$

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 условия активная составляющая тока холостого хода:

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

где $P_{\text{элх.х}}$ – электрические потери в статоре при холостом ходе

$$P_{\text{элх.х}} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 2,3^2 \cdot 1,007 = 16,09, \text{ Вт,}$$

тогда:

$$I_{\text{х.х.а}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{элх.х}}}{m \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{162,5 + 86,7 + 16,08}{3 \cdot 220} = 0,4, \text{ А,}$$

тогда ток холостого хода двигателя:

$$I_{\text{х.х}} \approx \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,4^2 + 2,307^2} = 2,34, \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos \varphi_{\text{х.х}} = \frac{I_{\text{х.х.а}}}{I_{\text{х.х}}} = \frac{0,4}{2,34} = 0,17.$$

1.8 Расчет рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости P_1 , I_1 , $\cos\varphi$, η , $s = f(P_2)$. Методы расчёта характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует схема замещения (рис.1.4). Активные и индуктивные сопротивления схемы замещения являются параметрами машины.

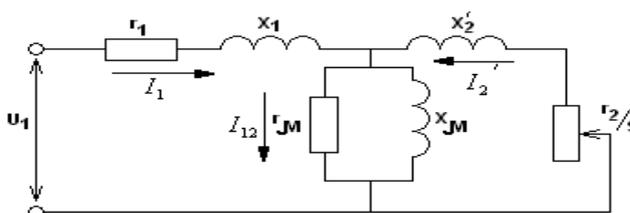


Рисунок 1.4 – Схема замещения фазы обмотки приведенного АД

1.8.1 Сопротивление схемы замещения:

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{140,09}{3 \cdot 2,306^2} = 8,77, \text{ Ом.}$$

1.8.2 Сопротивление взаимной индукции обмоток статора:

$$x_{12} = \frac{U_{ином}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{2,307} - 8,77 = 93,32, \text{ Ом,}$$

$$\gamma = \arctg \left[\frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})} \right] = \arctg [0,084] = 1,6868.$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2 - 3 кВт, как правило, $|\gamma| \leq 1^\circ$, поэтому реактивной составляющей коэффициента C_{p1} можно пренебречь, однако мы ее учитываем:

$$c_{1a} = \frac{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{8,77 \cdot (1,007 + 8,77) + 93,3 \cdot (2,04 + 93,3)}{8,77^2 + 93,3^2} = 1,023;$$

$$c_{1p} = \frac{x_1 \cdot r_{12} - r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{2,04 \cdot 87,7 - 1,007 \cdot 93,3}{8,77^2 + 93,3^2} = 0,087.$$

1.8.3 Активная составляющая тока синхронного холостого хода замыкания:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{140,09 + 3 \cdot 2,3^2 \cdot 1,007}{3 \cdot 220} = 0,237, \text{ А.}$$

1.8.4 Коэффициенты для расчёта рабочих характеристик:

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2 = 1.022^2 - (0.087^2) = 1,05,$$

$$a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' x'_2 = 1.02 \cdot 1,006 - (0.087) \cdot 2,04 - (0.018) \cdot 1,98 = 0,97, \text{ Ом},$$

$$b' = 2c_{1a} \cdot c_{1p} = 2 \cdot 1.022 \cdot 0.0087 = 0.018,$$

$$b = c_{1a} x_1 + c_{1p} \cdot r_1 + a' x'_2 = 1,02 \cdot 2,04 + (0.0087) \cdot 1,007 + 1.046 \cdot 1,98 = 4,17, \text{ Ом}.$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{ст} + P_{мех} = 162,52 + 86,7 = 249,2, \text{ Вт}.$$

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений указанных в таблице 1.1, принимая окончательно, что $s_{ном} = 0,04$.

Расчётные формулы	Размер- НОСТЬ	Скольжение s							
		0.001	0.005	0.010	0.02	0.025	0.035	0,040 1	0.041 8
$a' \cdot r'_2 / s'$	Ом	865,5	173,1	86,55	57,7	43,2	34,62	21,11	19,23
$R = a + a' \cdot r'_2 / s$	Ом	866,5	174,1	87,53	58,68	44,25	35,59	22,09	20,21
$X = b + b' \cdot r'_2 / s$	Ом	18,83	7,09	5,63	5,14	4,899	4,752	4,52	4,49
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	866,72	174,23	87,7	58,9	44,5	35,6	22,5	20,21
$I_2 = U_{ном} / Z$	А	0,253	1,26	2,51	3,73	4,94	6,13	9,56	10,63
$\cos \varphi'_2 = R / Z$	-	0,9998	0,9992	0,9979	0,9962	0,9939	0,9912	0,98	0,97
$\sin \varphi'_2 = X / Z$	-	0,0217	0,0407	0,064	0,087	0,11	0,13	0,20	0,22
$I_{1a} = I_{0a} + I'_2 \cdot \cos \varphi'_2$	А	0,49	1,49	2,73	3,95	5,14	6,3	9,6	10,6
$I_{1p} = I_{0p} + I'_2 \cdot \sin \varphi'_2$	А	2,31	2,36	2,47	2,63	2,85	3,11	4,19	4,61
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	2,36	2,79	3,68	4,75	5,88	7,04	10,64	11,6
$I'_2 = c_1 \cdot I'_2$	А	0,26	1,29	2,56	3,82	5,053	6,26	9,78	10,87
$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	323,7	988,9	1808	2611	3397	4163	6342	7001
$P_{3I} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	16,89	23,59	41,1	68,3	104,7	149,7	332,2	404,5
$P_{32} = 3 \cdot I_2^2 \cdot r'_2 \cdot 10^{-3}$	Вт	0,16	4,14	16,33	36,22	63,4	97,4	237,3	293,2

$P_{дооб} = P_{дооб.н} \cdot (I_1 / I_{1h})^2 \cdot 10^{-3}$	Вт	1,55	2,18	3,79	6,3	9,66	13,8	30,7	37,3
$\sum P = (P_{см} + P_{мех} + P_{эл} + P_{р2} + P_{дооб}) \cdot 10^{-3}$	кВт	257,81	279,1	310,4	360,01	425,2	510,13	849,39	984
$P_2 = (P_1 - \sum P) \cdot 10^{-3}$	кВт	55,87	71	150	2250	2970	3650	5500	6020
$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0,17	0,71	0,82	0,86	0,87	0,88	0,87	0,86
$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	-	0,2	0,53	0,74	0,83	0,87	0,91	0,916	0,918

Таблица 1.1 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

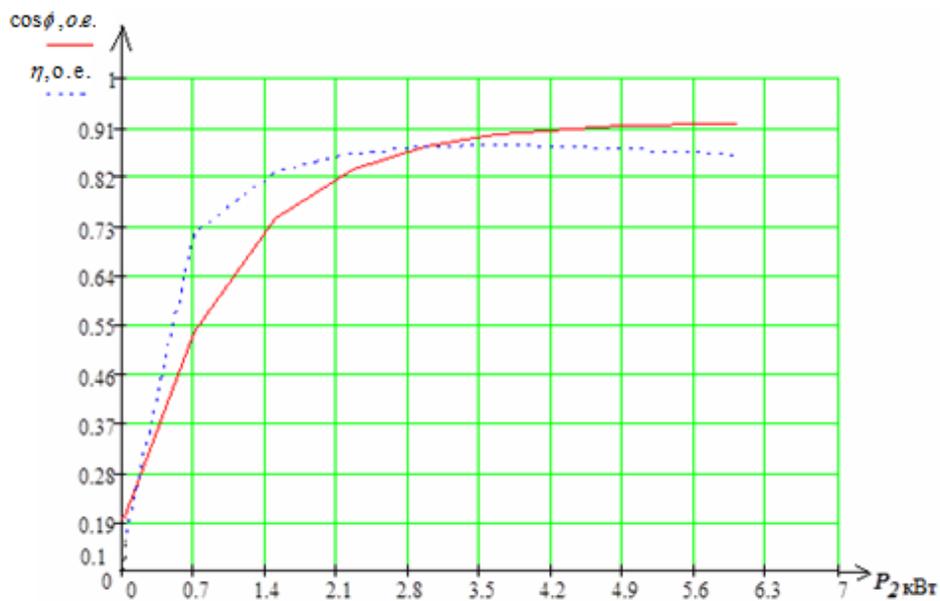


Рисунок 1.5 - График зависимости мощности полезной от КПД и коэффициента мощности

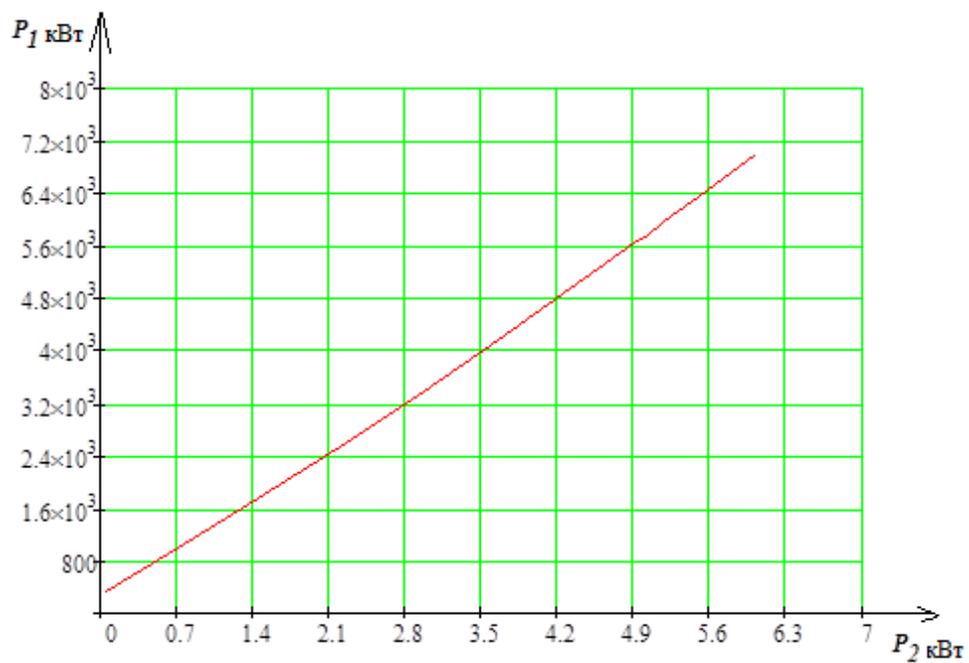


Рисунок 1.6 - График зависимости мощности полезной от мощности потребляемой

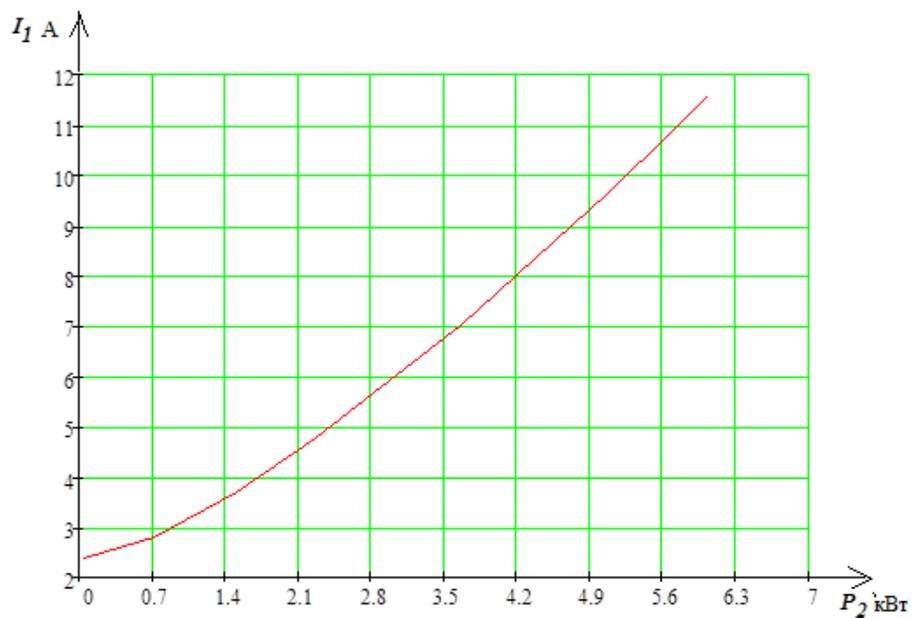


Рисунок 1.7 - График зависимости мощности полезной от тока статора

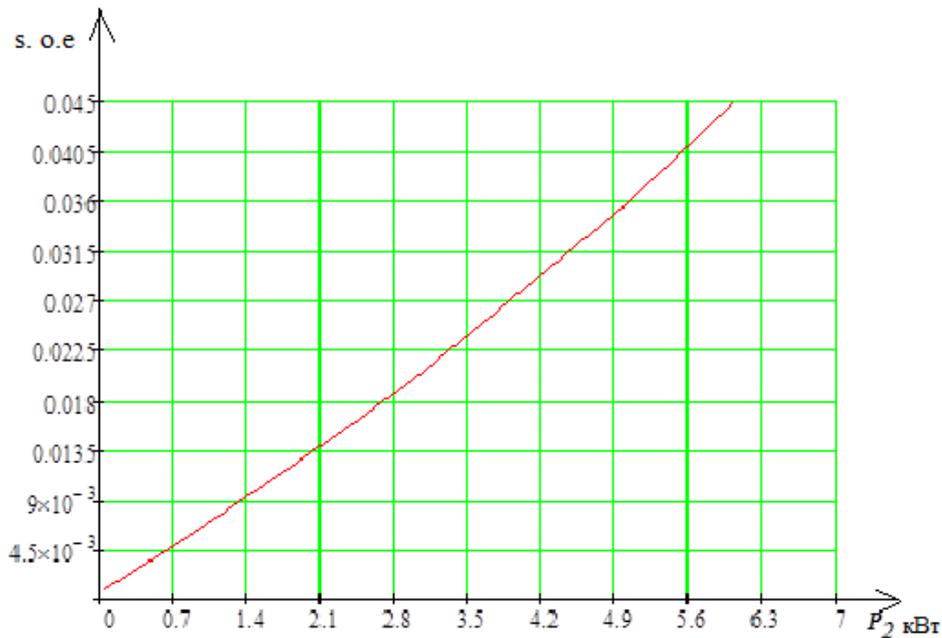


Рисунок 1.8 - График зависимости мощности полезной от скольжения

Полученные номинальные данные спроектированного двигателя при $s_{ном} = 0,04$; $P_{2н} = 5.5$ кВт; $\eta_n = 0.87$; $\cos\varphi_n = 0.9$; $P_{1н} = 6.3$ кВт; $I_{н1} = 10.64$ А.

Спроектированный двигатель выполнен без потери качества.

1.9 Энергосбережение асинхронных взрывозащищенных двигателей

Энергосбережение, в любых сферах хозяйствования человека, было и остается весомым энергетическим ресурсом. Извлечение этого ресурса может на треть закрыть энергетические потребности России. При этом не нужно строить новые шахты, бурить скважины.

Проблема снижения энергетических затрат, проблема энергосбережения становится все более актуальной в мировом аспекте. Особенно актуальна эта проблема для российской экономики, поскольку в России энергоемкость промышленного производства и социальных услуг оказывается во много раз выше общемировых показателей.

Актуальность проблемы в настоящее время обусловлена не эффективным расходованием природных и материальных ресурсов, значительным удорожанием производства тепловой и электрической энергии.

Россия располагает большим потенциалом энергосбережения. По оценкам специалистов он составляет 40-45 % современного энергопотребления в стране, причем треть этого потенциала экономии имеют отрасли топливно-энергетического комплекса, другая треть сосредоточена в энергоёмких отраслях промышленности и строительстве, свыше 25% - жилищно-коммунальном хозяйстве, 7% - на транспорте и 3% - в сельском хозяйстве. В настоящее время проводится реформа жилищно-коммунального хозяйства. В её основе лежит снижение потерь и повышения энергоэффективности всех систем жилищно-коммунального хозяйства [16].

Энергосбережение - это не экономия, а выбор между повышением производительности труда и повышением производительности энергоресурса. Это процесс, при котором сокращается потребность в энергоресурсах и энергоносителях в расчете на единицу конечного полезного эффекта. Энергосбережение в любой сфере сводится по существу к снижению бесполезных потерь энергии.

Изложенные соображения должны быть приняты во внимание на стадии проектирования машины. Рациональный выбор материалов позволяет не только повысить надежность машины, но и одновременно улучшить другие ее технико-экономические показатели: снизить потери, ток холостого хода, повысить КПД и коэффициент мощности.

Основными направлениями совершенствования АД являются:

- повышение энергоэффективности;
- снижение уровня шума;
- универсализация;
- повышение надежности и долговечности;
- совершенствование дизайна;
- повышение удобства монтажа и эксплуатации.

В Европейском сообществе и Российской Федерации были приняты нормы на КПД АД. Еuronормы СЕМЕР для двух-и четырёх полюсных АД мощностью от 1,1 до 90 кВт предусматривают три уровня КПД: нормальный-

EFF3; повышенный – EFF2 и высокий – EFF1. Нормы ГОСТ Р 51677-2000 охватывают двигатели всех полюсностей в диапазоне мощности от 1,1 до 400кВт [18].

Нормы EFF2 и EFF1 приведены в табл. 7.1. К уровню EFF3 относят значения КПД ниже уровня EFF2.

Таблица 7.1 - Нормы EFF1 и EFF2

Р,кВт		1,5	2,2	3	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22
КПД,	EFF2	78,5	81	82,6	84,2	85,7	87	88,4	89,4	90	90,5
%	EFF1	84,1	85,6	86,7	87,6	88,6	89,5	90,5	91,3	91,8	92,2

Для удовлетворения требований по энергосбережению требуется коренным образом изменить подход к проектированию по двум причинам:

- удорожание электрической энергии;
- дефицит электрической энергии.

В повышении эффективности общественного производства в условиях проведения экономических реформ и развития рыночных отношений одно из важнейших направлений ресурсо- и энергосбережению во всех отраслях экономики России, в том числе в строительном комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Экономия энергетических ресурсов в настоящее и в обозримом будущем является приоритетным направлением в различных областях человеческой деятельности, особенно в сфере создания среды жизнеобеспечения человека, поскольку её нормальное функционирование требует существенных энергетических затрат, связанных с эксплуатацией жилых и общественных зданий, производственных объектов и их инфраструктуры.

Разработка и внедрение регулируемого привода на основе АД является одним из самых перспективных экономически оправданных направлений из всех энергосберегающих технологий, ёмкость рынка преобразователей частоты для России составляет, по оценкам экспертов десятки млн. штук, в том числе и для высоковольтных взрывозащищённых двигателей, предназначенных для

привода вентиляторов. Сроки окупаемости при внедрении регулируемого асинхронного электропривода составляет менее одного года. Эффект будет более значительным в связи с тенденцией повышения цен на энергоносители. Но при использовании асинхронного регулируемого электропривода не стоит забывать об основной его части - асинхронном двигателе. АД является одним из основных источников потерь в электроприводе. При этом, экономить энергию можно не только за счет регулировки частоты и напряжения питающей сети при изменении нагрузки, но и за счет снижения потерь в самом АД. Поэтому спроектированный двигатель был модифицирован.

В данном разделе с целью повышения энергетических показателей двигателя увеличиваем длину магнитопровода на (5...20)%, а также уменьшаем число витков в фазе обмотки статора на (5...15)%, при сохранении геометрии поперечного сечения.

Данные представлены в таблице 7.2.

В результате исследования можно сделать вывод, что самые лучшие энергетические показатели для проектируемого двигателя оказались при базовой длине и уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 14%.

По данным результатов расчета был построен график зависимости КПД от числа витков в обмотке фазы статора, который показан на рисунке 7.1.

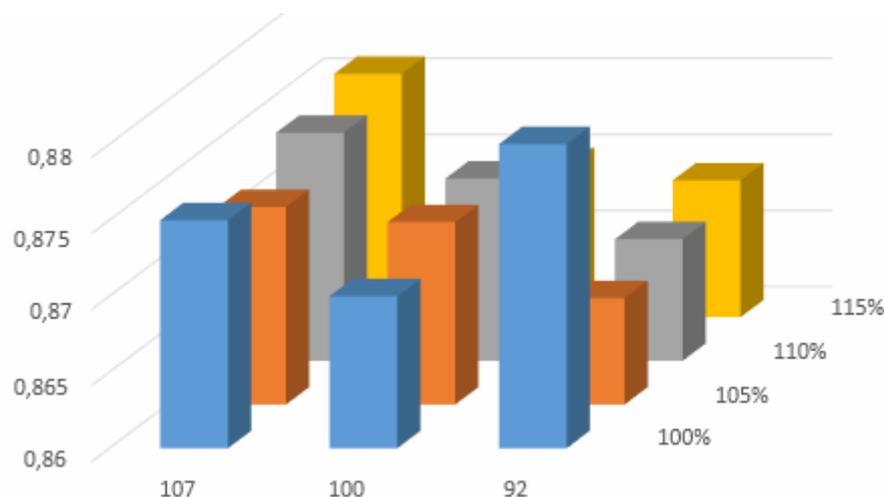


Рисунок 7.1 - Зависимость КПД от числа витков в обмотке фазы статора

Из рисунка 7.1 видно, что при уменьшении числа витков, КПД будет увеличиваться. При уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 10% КПД возросло до 0,88. Дальнейшее уменьшение длины статора нецелесообразно, т.к. КПД становится меньше.

Таким образом, был спроектирован энергосберегающий взрывозащищенный асинхронный двигатель, предназначенный для управления задвижками, у которого КПД увеличен на 1% выше по сравнению с базовым двигателем, за счет понижения числа витков в обмотке фазы статора и двигатель стал удовлетворять нормам EFF1.

Таблица 7.2 - Результаты расчета

$\ell_{\delta}, \%$	100%			105%			110%			115%		
w_1	107	100	92	107	100	92	107	100	92	107	100	92
Полные потери в стали, [Вт]	156,3	179,5	210,5	150,6	171,1	200,5	144,3	164	191,9	139,5	156	185
Механические потери, [Вт]	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81	81
Эл. потери в статоре, [Вт]	612	650	680	581	682	700	533	632	710	527	645	750
Ток х.х, [А]	2,955	3,33	3,83	2,88	3,22	3,7	2,8	3,13	3,58	2,73	3,05	3,49
Эл. потери в роторе, [Вт]	388	410	460	375	450	495	363	400	480	351	432	470
Добавочные потери, [Вт]	47	50	52	45	47	53	48	50	53	49	54	60
КПД, о.е.	0,875	0,87	0,88	0,873	0,872	0,867	0,875	0,872	0,868	0,876	0,87	0,869
Коэффициент мощности, о.е.	0,945	0,97	0,972	0,969	0,97	0,971	0,969	0,97	0,971	0,969	0,97	0,971

1.10 Расчет пусковых характеристик

Известно, что с увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается, при этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

Определим ряд величин для нахождения активного сопротивления обмотки ротора

Проведём расчёт для момента пуска $s = 1$.

1.9.1 Параметры с учетом вытеснения тока для литой алюминиевой обмотки при температуре плюс 115°C :

$$\xi = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 63.61 \cdot 0,0131 \cdot \sqrt{1} = 0.853,$$

где h_c - высота стержня в пазу.

При $\xi = 0,9 \leq 1$ показывает, что эффект вытеснения тока практически не влияет на сопротивление стержней. Поэтому эта часть расчета пусковых характеристик не производится. Необходимо учитывать только насыщение путем потоков рассеяния:

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0.0131}{1 + 0.021} = 0.0108.$$

Найдём площадь сечения обмотки ротора на глубине h_r , для этого предварительно определим следующую величину:

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right),$$

$$b_r = 0,0082 - \frac{0,0082 - 0,0062}{0,0064} \cdot \left(0,0108 - \frac{0,0082}{2} \right) = 0,0061, \text{ м.}$$

Тогда:

$$q_r = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right),$$

$$q_r = \frac{3.14 \cdot 0,0082^2}{8} + \frac{0,0082 + 0,0061}{2} \cdot \left(0,0108 - \frac{0,0082}{2} \right) = 7,46 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2.$$

Определим коэффициент:

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{8,42 \cdot 10^{-5}}{7,46 \cdot 10^{-5}} = 1,128.$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1 + \frac{8,412 \cdot 10^{-5}}{1,225 \cdot 10^{-4}} \cdot (1,128 - 1) = 1,088.$$

Приведённое активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом вытеснения тока:

$$r'_{2\xi} = r'_2 \cdot K_R = 0,8228 \cdot 1,088 = 0,9, \text{ Ом}.$$

1.9.2 Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока. По значению $\xi = 0,853$ определим коэффициент:

$$\varphi' = 0,87.$$

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:

$$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta\lambda_{\Pi 2\xi},$$

где $\Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda'_{\Pi 2} \cdot (1 - k_D)$; $k_D = \varphi' = 0,87$;

$$\Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_l} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_l^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_u}{2 \cdot b_l} \right] \cdot (1 - k_D),$$

$$\Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = \left[\frac{0,0064}{3 \cdot 0,0082} \left(1 - \frac{3,14 \cdot 0,0082^2}{8 \cdot 8,42 \cdot 10^{-5}} \right)^2 + 0,66 - \frac{0,001}{2 \cdot 0,00082} \right] \cdot (1 - 0,86) = 1,4.$$

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

$$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{r2} + \lambda_{D2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{r2} + \lambda_{D2}} = \frac{5,24}{5,11} = 1,02.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения
тока:

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x = 1,98 \cdot 1,02 = 2,03, \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции с уменьшением насыщения магнитопровода увеличивается, поэтому оно может быть найдено:

$$x_{12\Pi} = k_\mu \cdot x_{12} = 1,55 \cdot 93,3 = 144,6, \text{ Ом.}$$

При этих допущениях коэффициент $c_{1\Pi}$:

$$c_{1\Pi} = 1 + \frac{x_1}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{2,04}{144,6} = 1,014.$$

Для расчёта токов с учётом влияния эффекта вытеснения тока, прежде найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения:

$$R_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi} \cdot r'_{2\xi} / s = 1,007 + 1,014 \cdot 0,9 / 1 = 1,908 ;$$

$$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} \cdot x'_{2\xi} = 2,04 + 1,014 \cdot 2,03 = 4,07 .$$

Тогда ток в обмотке ротора:

$$I'_{2\Pi} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}} = \frac{220}{\sqrt{1,908^2 + 4,07^2}} = 48,6, \text{ А}$$

Ток в обмотке статора:

$$I_{1\Pi} = I'_{2\Pi} \cdot \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}} = 48,6 \cdot \frac{\sqrt{1,908^2 + (4,07 + 144,6)^2}}{1,014 \cdot 144,06} = 49,2, \text{ А}$$

Для непосредственного расчёта пусковых характеристик с учётом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния необходимо задаться предполагаемой кратностью увеличения тока $k_{\text{нас}}$, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны.

Ориентировочно для расчёта пусковых режимов принимают

$$k_{\text{нас}} = 1,25 - 1,4 [1].$$

Произведем подробный расчёт для $s = 1$, $k_{\text{нас}} = 1,4$.

1.9.3 Определим среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора:

$$F_{\Pi.ср} = 0.7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot U_{\Pi}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right),$$

где $k_{y1} = 1$ - коэффициент укорочения,

тогда:

$$F_{\Pi.ср} = 0.7 \cdot \frac{1.4 \cdot 49,2 \cdot 27}{1} \cdot \left(1 + 1 \cdot 0.958 \cdot \frac{24}{19} \right) = 1422,2, \text{ А.}$$

Для расчёта фиктивной индукции потока рассеяния в воздушном зазоре определим следующий коэффициент:

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.0003}{0,0125 + 0,0156}} = 0,898,$$

тогда фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\Pi.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{1462,2 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} \cdot 0.898} = 3,3 \text{ Тл.}$$

По полученному значению индукции определяем отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризуемое коэффициентом k_{δ} , значение которого находят по кривой:

$$k_{\delta} = 0,5.$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов:

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0,0125 - 0,0035) \cdot (1 - 0.5) = 0,0045.$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния для полузакрытого паза:

$$\Delta \lambda_{\Pi нас} = \frac{h_{u1} + 0.58 \cdot h_k}{b_{u1}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{c_{\varepsilon 1} + 1.5 \cdot b_{u1}},$$

$$\Delta \lambda_{\Pi нас} = \frac{0,0005 + 0.58 \cdot 0,00443}{0,0035} \cdot \frac{0,0045}{0,0045 + 1.5 \cdot 0,0035} = 0,403.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора:

$$\lambda_{\Pi 1 \text{нас}} = \lambda_{\Pi 1} - \Delta \lambda_{\Pi 1 \text{нас}} = 1,15 - 0,403 = 0,76.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения:

$$\lambda_{Д1 \text{нас}} = \lambda_{Д1} \cdot k_{\delta} = 3,66 \cdot 0,5 = 1,83.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учётом влияния насыщения:

$$x_{1 \text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\Pi 1 \text{нас}} + \lambda_{Д1 \text{нас}} + \lambda_{\sigma 1}}{\lambda_{\Pi 1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{\sigma 1}} = 2,04 \cdot \frac{3,86}{6,1} = 1,292, \text{ Ом}$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов ротора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов:

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{u2}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0,0156 - 0,001) \cdot (1 - 0,5) = 0,0073.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения:

$$\Delta \lambda_{\Pi 2 \text{нас}} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{c_{\varepsilon 2} + b_{u2}} = \frac{0,0005}{0,001} \cdot \frac{0,0073}{0,0073 + 0,001} = 0,44.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для ротора:

$$\lambda_{\Pi 2 \xi \text{нас}} = \lambda_{\Pi 2 \xi} - \Delta \lambda_{\Pi 2 \text{нас}} = 1,4 - 0,44 = 0,96.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения:

$$\lambda_{Д2 \text{нас}} = \lambda_{Д2} \cdot k_{\delta} = 3,34 \cdot 0,5 = 1,7.$$

Приведённое индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения:

$$x'_{2 \xi \text{нас}} = x'_{2'} \cdot \frac{\lambda_{\Pi 2 \xi \text{нас}} + \lambda_{Д2 \text{нас}} + \lambda_{\sigma 2}}{\lambda_{Д2} + \lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\Pi 2}} = 1,98 \cdot \frac{3,13}{5,11} = 1,21, \text{ Ом.}$$

Уточним коэффициент $c_{1\Pi}$:

$$c_{1\Pi \text{нас}} = 1 + \frac{x_{1 \text{нас}}}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{2,04}{145,2} = 1,014.$$

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

Найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения:

$$R_{Пнас} = r_1 + c_{1П.нас} \cdot r'_{2\xi} / s = 1,007 + 1,014 \cdot 2,786 / 1 = 1,214, \text{ Ом},$$

$$X_{Пнас} = x_{1нас} + c_{1П.нас} \cdot x'_{2\xi нас} = 1,292 + 1,014 \cdot 1,21 = 2,52, \text{ Ом}.$$

Ток в обмотке ротора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения:

$$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{Пнас}^2 + X_{Пнас}^2}} = \frac{220}{\sqrt{1,92^2 + 2,52^2}} = 48,59, \text{ А}.$$

Ток в обмотке статора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения:

$$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{Пнас}^2 + (X_{Пнас} + x_{12П})^2}}{c_{1Пнас} \cdot x_{12П}} = 48,59 \cdot \frac{\sqrt{1,92^2 + (2,52 + 145,2)^2}}{1,013 \cdot 145,2} = 69,61, \text{ А}.$$

Определим кратность тока и момента при заданном скольжении $s = 1$:

$$I^*_{П} = I_1 / I_{1ном} = 69,61 / 10,6 = 6,5;$$

$$M^*_{П} = \left(\frac{I'_{2нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left(\frac{48,59}{9,91} \right)^2 \cdot 1,088 \cdot \frac{0,04}{1} = 2.$$

Найденные величины кратности тока и момента сравним с соответствующими значениями для высоты оси вращения ≤ 132 мм, IP 68,

$$2p = 2 \quad M^*_{П} = 1,7 - 2, \quad I^*_{П} = 6,5 - 7,5.$$

Полученный в расчёте коэффициент насыщения:

$$k'_{нас} = I_{1нас} / I_1 = 69 / 49 = 1,4;$$

отклонение коэффициента насыщения от принятого для расчёта:

$$((1,25 - 1,4) / 1,25) 100\% = 12\%.$$

Полученный в расчёте коэффициент насыщения 12 % . Если расхождение превышает 10 – 15 % , то расчёт для значения s повторяют, внося соответствующую корректировку в первоначально принимаемый коэффициент $k_{нас}$. Здесь этого не потребовалось.

Для расчёта других точек характеристики задаёмся $k_{нас}$, уменьшенным в зависимости от тока I_1 .

Данные расчёта сведены в таблицу 1.2, а пусковые характеристики представлены на рис. 1.9.

1.9.5 Критическое скольжение определяем после расчёта всех точек пусковых характеристик.

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{x_{1нас}/c_{1Пнас} + x'_{2\xiнас}} = \frac{0,827}{1,27 + 1,21} = 0,3.$$

Полученное число незначительно отличается от табличного значения, являющимся первоначальным приближением к критической частоте.

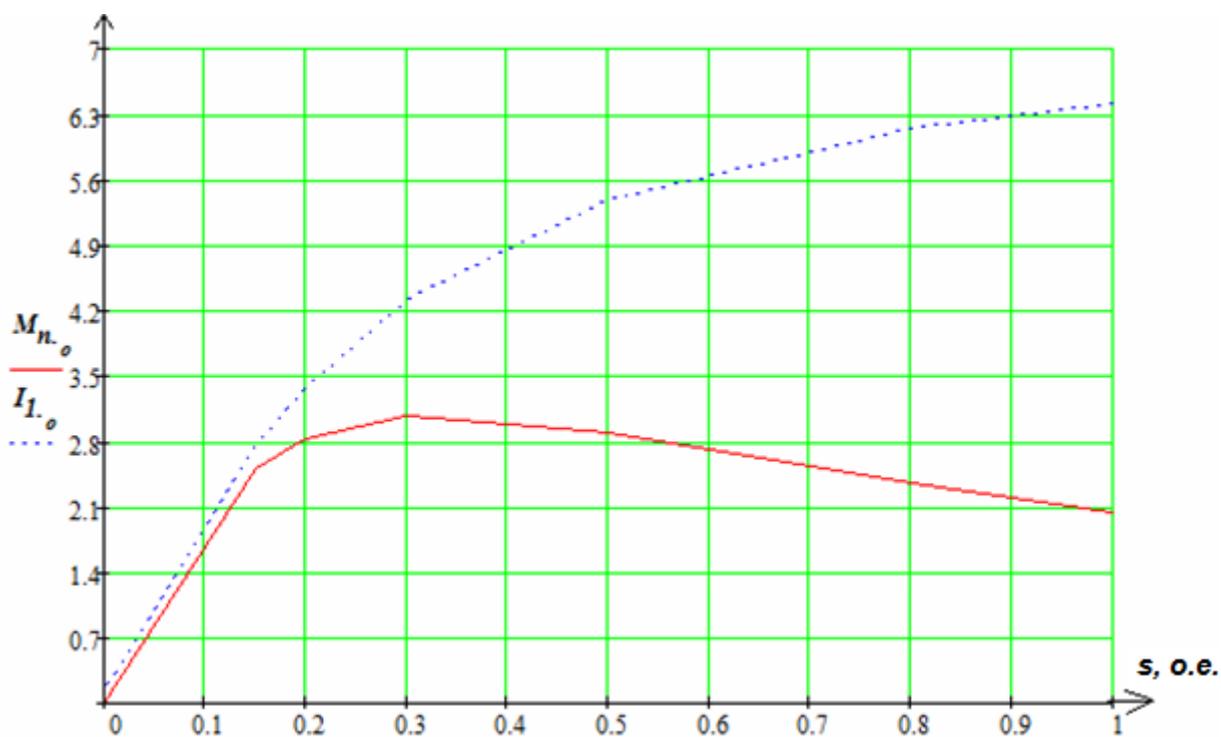


Рисунок 1.9 - Пусковые характеристики

В расчете пусковых характеристик видно, что кратности пускового тока и момента получились в допустимых пределах ($M^*_{П} = 1.7 - 2$, $I^*_{П} = 6,5 - 7.5$):

$I^*_{П} = 6,2$; $M^*_{П} = 2$ следовательно, спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям (ГОСТ 19523 - 74) как по энергетическим, так и по пусковым характеристикам [1].

Таблица 1.2 – Пусковые характеристики двигателя

Расчётные формулы	Размер- НОСТЬ	Скольжение s						
		1	0.8	0.5	0,3	0.2	0.15	0.0001
$k_{нас}$	-	1,4	1,35	1,3	1,25	1,2	1,12	1,1
$F_{П.ср} = 0.7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot U_{П.}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	1422	1391	1294	1121	936	792	0,71
$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{П.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	ТЛ	3,3	3,22	3,00	2,6	2,17	1,83	0,017
$k_{\delta} = f(B_{\Phi\delta})$	-	0,5	0,53	0,55	0,6	0,7	0,84	0,98
$c_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	0,0045	0,0042	0,004	0,0036	0,0027	0,0014	$1,8 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_{П1нас} = \lambda_{П1} - \Delta\lambda_{П1нас}$	-	0,76	0,768	0,778	0,8	0,862	0,97	1,12
$\lambda_{Д1нас} = \lambda_{Д1} \cdot k_{\delta}$	-	1,83	1,94	2,01	2,2	2,56	3,08	4
$x_{1нас} = x_1 \cdot \sum \lambda_{1нас} / \sum \lambda_1$	Ом	1,29	1,33	1,36	1,43	1,57	1,78	2
$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{u2}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	0,0073	0,0069	0,0067	0,0059	0,0044	0,0023	$2,9 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_{П2\xiнас} = \lambda_{П2\xi} - \Delta\lambda_{П2\xiнас}$	-	0,96	0,964	0,97	0,973	0,994	1,05	1,28
$\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2} \cdot k_{\delta}$	-	1,67	1,8	1,83	2	2,33	2,8	3,33
$x'_{2\xiнас} = x'_2 \cdot \sum \lambda_{2\xiнас} / \sum \lambda_2$	Ом	1,21	1,25	1,28	1,34	1,48	1,69	2
$R_{Пнас} = r_1 + c_{П.нас} \cdot r'_{2\xi} / s$	Ом	1,92	2,14	2,83	4,05	5,57	7,09	$1 \cdot 10^4$
$X_{Пнас} = x_{1нас} + c_{П.нас} \cdot x'_{2\xiнас}$	Ом	2,52	2,6	2,66	2,79	3,08	3,49	4,5
$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{Пнас}^2 + X_{Пнас}^2}}$	А	48,6	47,6	44,2	38,3	32,03	27,1	32,04
$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{Пнас}^2 + (X_{Пнас} + x_{12П})^2}}{c_{Пнас} \cdot x_{12П}}$	А	69,6	65,4	57,4	45,9	35,9	29,2	1,49
$I_{П*} = I_1 / I_{1ном}$	-	6,5	6,4	5,39	4,31	3,37	2,74	0,14
$M_{П*} = \left(\frac{I'_{2П.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_{ном}}{s}$	-	2	2,35	2,89	3,082	2,834	2,503	0,003

2 Тепловой расчет

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 F – до плюс 155°C . При этом коэффициент увеличения потерь k_{ρ} по сравнению с полученными для расчётной температуры составит $k_{\rho} = \rho_{140} / \rho_{115} = 1.15$.

2.1 Электрические потери в обмотке статора делятся на потери в пазовой части:

$$P'_{\text{эл.1}} = k_{\rho} \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{\text{сп1}}} = 1.15 \cdot 332 \cdot \frac{2 \cdot 0,145}{0,753} = 147,1, \text{ Вт},$$

и на электрические потери в лобовых частях катушек:

$$P'_{\text{эл.1}} = k_{\rho} \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}}} = 1.15 \cdot 332,19 \cdot \frac{2 \cdot 0,23}{0,75} = 322,2 \text{ Вт},$$

$$\Delta v_{\text{пов1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{эл.1}} + P_{\text{см.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1},$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи с поверхности [1], зависит от IP68 $2p = 2$
 $h D_a \alpha_1 = 155 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

K – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передаётся через станину непосредственно в окружающую среду, зависит от $2p$, $K = 0.22$

тогда:

$$\Delta v_{\text{пов1}} = 0.22 \cdot \frac{147,1 + 140}{3,14 \cdot 0,095 \cdot 0,145 \cdot 155} = 9,39^{\circ}\text{C}.$$

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полузакрытых трапециевидальных пазов:

$$P_1 = 2 \cdot h_{\text{н.к.}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0,0012 + 0,0082 + 0,012 = 0,054, \text{ м}.$$

2.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{P'_{э.л.1}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_\delta} \cdot \left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{эКВ}} \right),$$

где $\lambda_{эКВ}$ - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции; для классов нагревостойкости В, F и Н $\lambda_{эКВ} = 0.16$ Вт / (м · °С),

$\lambda'_{эКВ}$ – среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников,

$$\lambda'_{эКВ} = 1.1 \text{ Вт / (м · °С)}, \text{ зависит от } d/d_{из},$$

тогда:

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{147,14}{24 \cdot 0,054 \cdot 0,145} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-4}}{0.16} + \frac{(0,0083 + 0,012)}{16 \cdot 1,1} \right) = 2^0 \text{ С.}$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{P'_{э.л.1}}{Z_1 \cdot \Pi_{л1} \cdot l_{л1}} \cdot \left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{h_{л1}}{12 \cdot \lambda'_{эКВ}} \right),$$

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{234,9}{24 \cdot 0,057 \cdot 0,231} \cdot \left(\frac{0,013}{12 \cdot 1,1} \right) = 0.46^0 \text{ С.}$$

2.3 Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta v_{нов.л1} = \frac{K \cdot P'_{э.л1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{выл} \cdot \alpha_1} = \frac{0.22 \cdot 234,9}{2 \cdot 3,14 \cdot 0.095 \cdot 0.098 \cdot 155} = 5,67^0 \text{ С.}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{нов.л1} + \Delta v_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_\delta + (\Delta v_{из.л1} + \Delta v_{нов.л1}) \cdot 2 \cdot l_\delta}{l_{ср1}},$$

$$\Delta v'_1 = \frac{(9,39 + 2,02) \cdot 2 \cdot 0.145 + (0,46 + 5,68) \cdot 2 \cdot 0.145}{0.753} = 8,18^0 \text{ С.}$$

2.4 Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется в предположении, что температура корпуса равна температуре воздуха внутри машины.

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

где $\sum P'_B$ - сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя:

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

где

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1) \cdot (P_{э1} + P_{э2}) = 849,4 + (1,15 - 1) \cdot (332,2 + 237,3) = 934, \text{ Вт, тогда:}$$

$$\sum P'_B = 934 - (1 - 0,22) \cdot (147,1 + 140,1) = 710,8, \text{ Вт,}$$

$s_{кор}$ - эквивалентная поверхность охлаждения корпуса:

$$s_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_\delta + 2 \cdot l_{вкл}) = (3,14 \cdot 0,173 + 8 \cdot 0,54) \cdot (0,145 + 2 \cdot 0,093) = 0,92, \text{ м}^2$$

где Π_p - условный периметр поперечного сечения рёбер корпуса двигателя

$\Pi_p = 0,15$ м, зависит от h ,

α_B - коэффициент подогрева воздуха, учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины, $\alpha_B = 18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, зависит от D_a ,

тогда:

$$\Delta\gamma_B = \frac{710}{0,92 \cdot 25} = 30,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2.5 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta\gamma_1 = \Delta\gamma'_1 + \Delta\gamma_B = 8,18 + 30,8 = 38,98 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тепловое состояние рассчитанной ЭМ соответствует требованиям, так как превышение температуры обмотки статора над окружающей средой находится в пределах допустимого для класса изоляции $F = 155$.

3 Механический расчет вала

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 3. Для повышения механических свойств материала его подвергают термической обработке. Методика расчёта взята из [2].

Выбираем муфту МУВП1 – 22, радиус окружности муфты $r = 34$ мм.

Основные размеры вала выбираем приближённо равными размерам вала серийной модели. Конструкция вала приведена на рисунке 1.10.

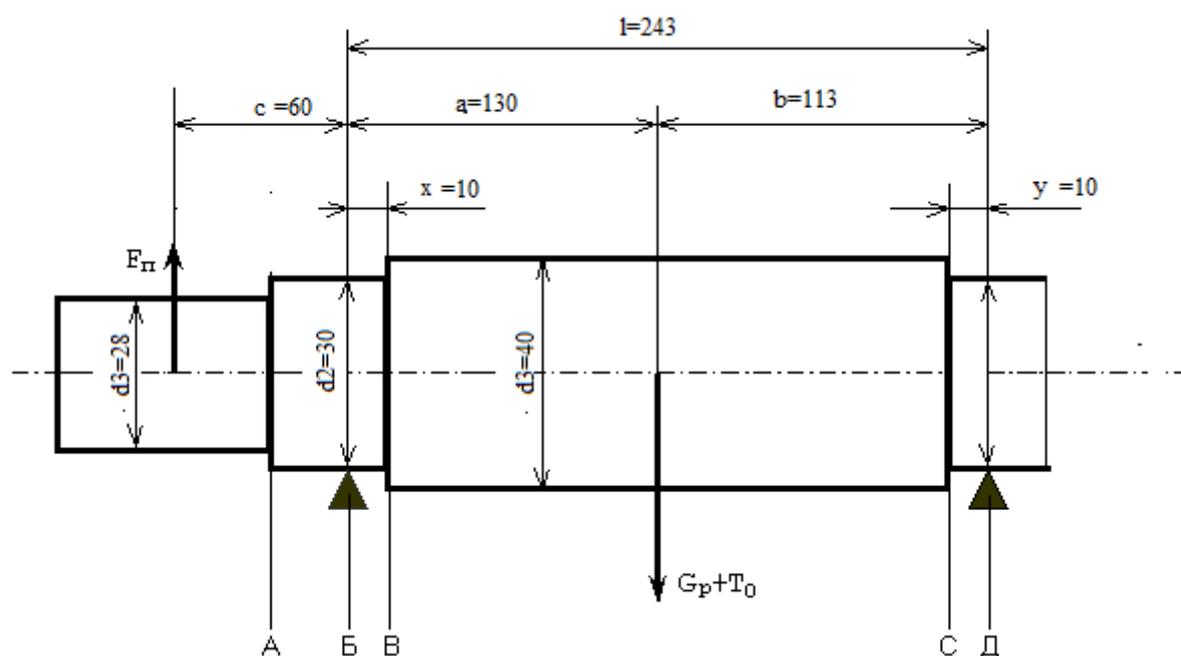


Рисунок 1.10 - Конструкция и основные размеры вала для механического расчёта.

3.1 Рассчитаем вал на жёсткость. Для этого определим массу ротора:

$$M_p = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0.094^2 \cdot 0.145 = 8,43, \text{ кг.}$$

Определим момент инерции участка вала:

$$J = \pi \cdot d_2^4 / 64 = 3.14 \cdot 30^4 / 64 = 3,97 \cdot 10^{-8}, \text{ м}^2.$$

Тогда приближённое значение силы тяжести:

$$G_p = 9.81 \cdot m_p = 9.81 \cdot 8,43 = 82,72, \text{ Н.}$$

3.2 Определим прогиб вала в середине сердечника ротора под действием силы тяжести.

Для асинхронного двигателя с $h = 100$ мм с достаточным приближением можно принять коэффициенты:

$$S_b = (a^3 - x^3) / J = (130^3 - 10^3) / 3,97 \cdot 10^{-8} = 5,523 \cdot 10^4 \text{ м}^2,$$

$$S_a = (b^3 - y^3) / J = (113^3 - 10^3) / 3,97 \cdot 10^{-8} = 3,63 \cdot 10^4 \text{ м}^2,$$

$$S_0 = (a^2 - x^2) / J = (130^2 - 10^2) / 3,97 \cdot 10^{-8} = 4,22 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Прогиб вала под действием силы тяжести:

$$f_T = \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) = \frac{82,73}{3 \cdot 0.243^2 \cdot 2.06 \cdot 10^{11}} \cdot (3,63^2 \cdot 0,13) + (0,113 \cdot 5,52) = 2,98 \cdot 10^{-6}, \text{ м,}$$

где $E = 2.06 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости материала вала (для стали).

3.3 Определим номинальный вращающий момент:

$$M_{ном} = 9550 \cdot \frac{P_2 \cdot 10^{-3}}{n} = 9550 \cdot \frac{5500}{3000} = 17,49, \text{ Н} \cdot \text{ м.}$$

Реакция передачи равна:

$$F_n = \frac{k_n}{r} \cdot M_{ном} = \frac{0.3}{0,06} \cdot 17,49 = 87,4, \text{ Н.}$$

где k_n - коэффициент при передаче упругой кулачковой муфтой; $k_n = 0.3$.

Прогиб вала посередине сердечника ротора от реакции передачи составит:

$$f_{II} = \frac{G_p \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot ((1.5 \cdot l \cdot S_0 - S_b) \cdot a + b \cdot S_a) \cdot 10^6,$$

$$f_{II} = \frac{87,4 \cdot 0,05}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,243} \cdot ((1,5 \cdot 0,243 \cdot 4,22 \cdot 10^5 - 3,62 \cdot 10^4) \cdot 0,130 + 5,52 \cdot 10^4 \cdot 0,113) = 3,098 \cdot 10^{-6}, \text{ м},$$

3.4 Начальный эксцентриситет ротора составит:

$$e_0 = 0,1 \cdot \delta + f_T + f_{II} = 0,1 \cdot 0,0003 + 2,98 \cdot 10^{-6} + 3,09 \cdot 10^{-6} = 3,6 \cdot 10^{-5}, \text{ м}.$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения:

$$T_0 = 2,94 \cdot D_2 \cdot l_\delta \cdot \frac{e_0}{\delta} = 0,15 \cdot 0,094 \cdot 0,145 \cdot \frac{3,6 \cdot 10^{-5}}{0,0005} = 0,0049, \text{ Н}.$$

Прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения:

$$f_0 = f_T \cdot \frac{T_0}{G_p} = 2,98 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,0049}{82,72} = 1,75 \cdot 10^{-10}, \text{ м}.$$

3.5 Установившийся прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения:

$$f_M = \frac{f_0}{1 - f_0/e_0} = \frac{7,987 \cdot 10^{-6}}{1 - 4,85 \cdot 10^{-6}} = 1,75 \cdot 10^{-10}, \text{ м}.$$

3.6 Результирующий прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения, реакции передачи и магнитного притяжения:

$$f = f_T + f_{II} + f_M = 2,99 \cdot 10^{-6} + 3,09 \cdot 10^{-6} + 1,75 \cdot 10^{-10} = 6,09 \cdot 10^{-6}, \text{ м}.$$

Результирующий прогиб вала не должен превышать 10% воздушного зазора. Проверим это условие.

$$x = \frac{f}{\delta} \cdot 100\% = \frac{6,9 \cdot 10^{-6}}{0,0003} \cdot 100\% = 0,02 \%,$$

Первая критическая частота вращения вала с учётом влияния магнитного притяжения:

$$n_{кр} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - f_0/e_0}{f_{II}}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - 4,85 \cdot 10^{-6}}{3,09 \cdot 10^{-6}}} = 17066, \text{ об /мин}.$$

Полученное значение должно удовлетворять неравенству: $n_{кр} > 1,3 \cdot n$;

Проверим это условие $17066 > 3900$ об /мин, Условие выполняется.

3.7 При расчете на прочность принимаем коэффициент перегрузки в пределах $2 - 2,5$ $K = 2$. Изгибающий момент в сечении вала:

$$M_{ua} = 2 \cdot F_n \cdot z = 2 \cdot 87 \cdot 0,0575 = 9,66, \text{ Н / м},$$

где z - это сумма длины полумуфты.

Момент сопротивления при изгибе:

$$W = 0.1 \cdot d_2^3 = 0.1 \cdot 0.03^3 = 2,7 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3.$$

Эквивалентное сопротивление при изгибе и кручении:

$$\sigma_{\text{эKB}} = \frac{\sqrt{M_u^2 + (K \cdot M_u)^2}}{W} = \frac{\sqrt{87^2 + (2 \cdot 87)^2}}{2,7 \cdot 10^{-6}} = 3,63 \cdot 10^7, \text{ Па.}$$

Значение $\sigma_{\text{эKB}}$ ни в одном сечении не должно превышать $0.7 \cdot \sigma_T$, где σ_T – предел текучести стали на растяжение. Для стали марки 2013 $\sigma_T = 3,6 \cdot 10^8$ Па. Проверим условие:

$$\sigma_{\text{эKB}} / \sigma_T = 3,63 \cdot 10^6 / 3,6 \cdot 10^8 = 0.01 - \text{условие выполняется.}$$

3.8 Рассчитаем подшипники качения.

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник расположенный ближе к выходному концу вала:

$$R_a = F_n \cdot \frac{c}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{b}{l} = 43.97 \cdot \frac{0.06}{0.243} + (0,049 + 82,72) \cdot \frac{0.113}{0.243} = 60,06, \text{ Н.}$$

Наибольшая радиальная нагрузка на другой подшипник:

$$R_b = F_n \cdot \frac{c+l}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{a}{l} = 43.97 \cdot \frac{0.06+0.243}{0.243} + (82,72 + 189.6140,0049) \cdot \frac{0.130}{0.243} = 153,27, \text{ Н.}$$

Принимаем нагрузку с умеренными толчками ($k_n = 1.5$ - коэффициент учитывающий характер нагрузки двигателя). Для однорядных радиальных подшипников динамическая приведённая нагрузка на один подшипник:

$$Q = k_n \cdot R_b = 1.5 \cdot 153.27 = 229.9, \text{ Н,}$$

Принимаем расчётный срок службы подшипников $L_d = 15000$ часов, наибольшая частота вращения 15000 об / мин.

Необходимая динамическая грузоподъёмность шарикоподшипника:

$$C = \frac{Q}{25.6} \cdot \sqrt[3]{L_d \cdot n} = \frac{229,9}{25.6} \cdot \sqrt[3]{15000 \cdot 15000} = 3194, \text{ Н.}$$

Выбираем шарикоподшипник легкой серии 180306 с динамической грузоподъёмностью $C = 12000$ Н.

В механическом расчете был определен результирующий прогиб вала от действия силы тяжести ротора и силы, обусловленной соединением

муфтой. Полученный прогиб вала не превышает 10% от воздушного зазора. По критической частоте вал имеет огромные запасы.

Из приведенного расчета следует, что шарикоподшипник легкой серии подходит для спроектированного двигателя по найденной динамической грузоподъемности наиболее нагруженной опоры.

Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был спроектирован асинхронный взрывозащищенный двигатель с короткозамкнутым ротором, предназначенный для привода запорной и запорно – регулирующей арматуры в составе взрывозащищенных электроприводов мощностью $P_{2H} = 5,5$ кВт, частотой вращения $n = 3000$ об/мин, числом полюсов $2p = 2$, напряжением $U_n = 380$ В.

В электромагнитном расчете 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, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к двигателю.

Обмотка статора выбрана однослойной. Для обмотки статора применена изоляция класса F, которая допускает длительный нагрев обмотки статора до 155° С. Короткозамкнутая обмотка ротора – литая алюминиевая.

В рамках задания был спроектирован энергосберегающий взрывозащищенный асинхронный двигатель, предназначенный для управления задвижками трубопроводов. У данного двигателя КПД увеличен на 1% по сравнению с базовым двигателем, за счет понижения на 7% числа витков в обмотке фазы статора.

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

Тепловой расчет показал, что у двигателя имеется температурный запас при нагреве обмотки статора.

При выполнении технологической части выпускной квалификационной работы был разработан технологический процесс сборки взрывозащищенного асинхронного двигателя. Выбрано оборудование и

оснастка. Определены нормы времени и необходимое количество оборудования для выполнения требуемой программы выпуска.

В экономической части работы рассчитана себестоимость изготовления спроектированного двигателя. Произведен расчет получаемой прибыли, определены точка безубыточности и диапазон безопасности.

В разделе «Социальная ответственность» проведен анализ опасных и вредных факторов, возникающих в процессе сборки двигателя. Освещены вопросы техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности. Проведен расчет искусственного освещения для участка сборки.

В целом спроектированный асинхронный взрывозащищенный двигатель с короткозамкнутым ротором удовлетворяет требованиям задания.

Список литературы

1 Проектирование электрических машин. / И. П. Копылов и др. М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.: с ил.

2 Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / Под ред. О. Д. Гольдберга. М.: Высш.шк., 2000.

3 Антонов М.В. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 592 с.

4 Допуски и посадки.:Справочник. В 2-х ч. Ч. 1 / В.Д.Мягков [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1982. – 543 с.

5 Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Мелкосерийное и единичное производство. – М.: Машиностроение, 1974.

6 Экономика предприятия: Учебник для вузов / Под ред. проф. В.Я. Горфинкеля. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 2006. – 742с.

7 Фатхудинов Р. А. Производственный менеджмент. 203 – 491с.:ил, 4-е издание.

8 <http://elektrodivigatel.net>.

9 Козловский В. А. Организация производства 2003-571 с.: ил.

10 СанПиН 2.2.4.548 – 96 г. Гигиенические требования к микроклимату производственного помещения.

11 СНиП 23-05-95 г. Естественное и искусственное освещение.

12 НПБ 105-03. Нормы пожарной безопасности. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

13 ГОСТ 124010 - 77 Спец. одежда.

14 Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «Знак», 2001–440 с.

15 ГОСТ 12.1.033 – 81 Пожарная безопасность.

16 Матросов Ю.А. Энергосбережение. Проблемы и пути ее решения. – М.: НИИСФ, 2008. – 495 с.

17 Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных установках.

18 Тютеева П.В. Энергоэффективные асинхронные двигатели для насосных агрегатов. <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/a/2010/51.pdf>.