

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 118с., 15 рис., 21табл., 20 источников, 7прил.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, ротор, статор, обмотка статора, индукция, частотное регулирование

Объектом исследования является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Целью работы являлось проектирование асинхронного двигателя, выбор тип обмотки, обмоточных проводов, изоляции, материалов активных и конструктивных частей машины. Конструирование и расчет отдельных частей машины. Проектирование технологического процесса сборки статора асинхронного двигателя. Расчет ресурсной, финансовой и экономической эффективности, анализ опасных и вредных факторов. В специальной части мы рассматриваем частотное регулирование на 10, 50, 100 Гц.

В процессе исследования проводились расчеты в программе MathCad 14, графическое проектирование в Компасс-3D v16.

В результате проектирования улучшены технические характеристики и экономичность по сравнению с базовым двигателем.

Основные конструктивные, технологические и техникоэксплуатационные характеристики: литая станина, кратность пускового тока, кратность пускового момента.

Степень внедрения: привод конвейерной линии транспортировки руды на объектах рудодобывающей отрасли Алмалыкского горно-металлургического комбината (АГМК).

Область применения: конвейерная линия.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к асинхронным двигателям (АД) для регулируемых электроприводов значительно вырос, поскольку в последние годы, как в нашей стране, так и за рубежом проводится широкий комплекс работ по созданию модификаций двигателей, предназначенных для работ в самых различных регулируемых системах, которые используются в промышленности, сельском хозяйстве, на транспортных, самоходных, строительных и дорожных машинах, буровых станках передвижных и подвижных устройствах различного назначения и т.д.

В качестве электромеханических преобразователей частотно-регулируемых электроприводов используются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. К таким электроприводам относятся основное оборудование компрессорных установок и в частности привода конвейерных линий.

К таким двигателям предъявляют требования высокого начального пускового момента и мягкой механической характеристики. Эти двигатели вследствие простоты и жесткости конструкции, высокой надежности, долговечности и несложного ухода применяются для привода роликов нереверсивных и реверсивных прокатных станков, как холодной, так и горячей прокатки металла и для транспортных рольгангов.

Для расчета асинхронного двигателя в данной дипломной работе применяется методика расчета асинхронного двигателя предложенная в учебнике «Проектирование электрических машин» под редакцией профессора И.П. Копылова. Целью данного дипломного проекта является проектирование асинхронного двигателя с КЗ ротором, применяемого для привода конвейерной линии. В специальной части дипломного проекта рассматривается частотное регулирование двигателя на 10,50,100 Гц. В экономической части дипломного проекта рассматривается определение конкурентно способности проекта, анализ рынка продукции. При выполнении технологической части работы необходимо разработать технологический процесс сборки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Необходимо разработать меры пожарной безопасности и меры защиты окружающей среды.

В специальной части рассмотрено частотное регулирование для этого двигателя при увеличении частоты с 10 до 100 Гц понижается критическое скольжения от 0,48 до 0,08 о.е. При этом номинальное скольжение также возрастает от 0,035 до 0,02 о.е. Резкий рост номинального скольжения при низких частотах приводит к резкому возрастанию электрических потерь в обмотке ротора, к резкому снижению КПД двигателя. Резкое возрастание номинального скольжения при низких частотах объясняется влиянием на механическую характеристику двигателя падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. С целью повышения перегрузочной способности, снижения номинального скольжения, повышения КПД двигателя рекомендуется компенсация напряжения, т.е. принять $U_{\text{ком}} > 0$.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором более экономичные с точки зрения потребления электроэнергии по сравнению с частотно регулируемые и другими системами, где необходимо регулирование частоты вращения в необходимых пределах.

Электромагнитный расчет и расчет частотного регулирования проведены в соответствии с методикой проектирования литературы «Проектирование электрических машин: Учеб.пособие для вузов/И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др.; Под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. – 496 с.».

1. Электромагнитный расчет

1.1 Исходные данные

Номинальная мощность $P_2 = 30000$ Вт;

Номинальное напряжение $U_{1н} = 220$ В;

Номинальная частота $f_1 = 50$ Гц;

Число фаз $m_1 = 3$;

Число пар полюсов $2p = 2$;

Высота оси вращения $h = 180$ мм;

Степень защиты IP44;

Система охлаждения IC0041.

1.2 Выбор главных размеров

2.1.1 Выбираем предварительно по табл.6.6, [1] для $h = 180$ мм внешний диаметр статора

$$D_a = 313 \text{ мм.}$$

2.1.2 Определяем внутренний диаметр статора

$$D = K_D \cdot D_a,$$

где K_D – коэффициент, характеризующий отношение внутренних и внешних диаметров сердечников статора. Из табл.6.7, [1] выбираем $K_D = 0,57$

$$D = 0,57 \cdot 313 = 178,41 \text{ мм.}$$

2.1.3 Находим полюсное деление по формуле

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 178,41}{2} = 280,2 \text{ мм.}$$

2.1.4 Расчетная мощность

$$P' = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi},$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, Вт; k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению по рис. 6.8, [1], $k_E = 0,98$; η и $\cos \varphi$ –

примерное значение КПД и коэффициент мощности по рис. 6.9, [1] $\eta=0,92$ и $\cos\varphi=0,90$

$$P' = 30000 \cdot \frac{0,98}{0,9 \cdot 0,92} = 35510 \text{ Вт}$$

2.1.5 Электромагнитные нагрузки (предварительно) по рис. 6.11, [1]

$$A = 39 \cdot 10^3 \text{ А/м} (37000 \dots 39000); \quad B_\delta = 0,73 \text{ Тл} (0,7 \dots 0,75)$$

Обмоточный коэффициент (предварительно)

$$k_{o\delta 1} = 0,91$$

2.1.6 Расчетная длина магнитопровода

$$l_\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{o\delta 1} A B_\delta}$$

где Ω – синхронная угловая скорость двигателя по формуле

$$\Omega = 2\pi \cdot \frac{f}{p} = 2\pi \cdot \frac{50}{1} = 314,1 \text{ рад/с},$$

$$l_\delta = \frac{35510}{1,11 \cdot 0,178^2 \cdot 314,1 \cdot 0,91 \cdot 39 \cdot 10^3 \cdot 0,73} = 0,123 \text{ м}$$

Критерием правильности выбора главных размеров D и l_δ служит отношение $\lambda = l_\delta / \tau$, которое должно находится в пределах показанных на рис.6.14, [1]

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0,123}{0,28} = 0,44$$

Полученное значение находится в допустимом пределе а именно (0,3...1,4)

Для расчёта магнитной цепи помимо длины воздушного зазора необходимо определить полную конструктивную длину и длину стали сердечников статора и ротора. Так как длина сердечника не превышает 250-300 мм, то радиальных вентиляционных каналов не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции конструктивная длина и длина стали сердечника статора равна .

$$\ell_1 = \ell_{cm1} = \ell_\delta = 0,123 \text{ м}$$

2.1.7 Конструктивную длину сердечника ротора берём равной длине сердечника статора

$$\ell_2 = \ell_1 = 0,123 \text{ м}$$

1.3 Расчёт обмотки статора

При расчёте обмотки статора определяется число пазов статора, число в витков в фазе обмотки и сечение проводника. При этом число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка двигателя и индукция в воздушном зазоре как можно более близко совпадали с их значениями принятыми предварительно при выборе главных размеров, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Число пазов статора выбираем с учётом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательно получения целого числа пазов на полюс и фазу. В то же время нужно учесть проведённые предварительные расчёты, из которых следует вывод, что мы не можем принять число пазов большим т.к. это приведёт к увеличению магнитной индукции в зубце статора и негативно отразится на энергетических показателях двигателя и на кратности пускового момента, что в нашем случае недопустимо.

$$t_{Z1min} = 0,014 \text{ м}; \quad t_{Z1max} = 0,018 \text{ м}.$$

2.1.2 Возможное число пазов статора Z_1 :

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1max}} = \frac{3,14 \cdot 0,178}{0,018} = 30,72 ;$$

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1min}} = \frac{3,14 \cdot 0,178}{0,014} = 40,04 ;$$

В проведённых предварительных расчетах мы варьировали числом пазов статора и пришли к выводу, что наиболее приемлемое число пазов статора равно 36.

Принимаем $Z_1 = 36$

2.2.2 Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6$$

2.2.3 Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot q \cdot m} = \frac{\pi \cdot 0,178}{2 \cdot 6 \cdot 3} = 0,0156 \text{ м}$$

2.2.4 Число эффективных проводников в пазу (при условии, что число параллельных ветвей $a=1$) по формуле

$$u_n' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{ном} \cdot Z_1},$$

где $I_{ном}$ – номинальный фазный ток по формуле 6.18 [1]

$$I_{ном} = \frac{P_2}{m \cdot U_{ном} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{30000}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,92} = 55 \text{ А},$$

отсюда

$$u_n' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{ном} \cdot Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,178 \cdot 37 \cdot 10^3}{54,9 \cdot 36} = 10,46 \approx 10$$

Принимаем число параллельных ветвей $a=1$, тогда число эффективных проводников в пазу будет равно

$$u_n = a \cdot u_n' = 1 \cdot 10 = 10$$

2.2.5 Окончательное число витков в фазе по формуле

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{10 \cdot 36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 60$$

2.2.6 Окончательное значение линейной нагрузки по формуле

$$A = \frac{2 \cdot I_{ном} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 55 \cdot 60 \cdot 3}{\pi \cdot 0,178} = 35,4 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

Значения A незначительно отличается от принятого ранее значения.

2.2.7 Магнитный поток по формуле

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_1}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot f_1} = \frac{0,98 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 66 \cdot 0,91 \cdot 50} = 0,016 \text{ Вб},$$

2.2.8 Индукцию в воздушном зазоре рассчитаем по формуле

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot \ell_\delta} = \frac{2 \cdot 0,016}{0,178 \cdot 0,123} = 0,734 \text{ Тл}$$

Сечение эффективного проводника определяется, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке. 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 повышение температуры обмотки, и во-вторых, на КПД двигателя. В асинхронных двигателях общего назначения при принятой в них системе косвенного охлаждения влияние плотности тока на нагрев обмотки более существенно, чем на КПД. Нагрев пазовой части обмотки зависит от произведения линейной нагрузки на плотность тока. Поэтому выбор допустимой плотности тока производят с учётом линейной нагрузки.

2.2.9 Плотность тока по формуле

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{300 \cdot 10^9}{38,8 \cdot 10^3} = 7,73 \cdot 10^6 \text{ A / м}^2$$

где $A \cdot J$ – произведение линейной нагрузки на плотность тока, рис.6.16,а [1];

$$A \cdot J = 300 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{м}^3$$

2.2.10 Сечение эффективного проводника (предварительно по формуле 6.24 [1])

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{ном}}}{a \cdot J_1} = \frac{55}{1,7,73 \cdot 10^6} = 7,097 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Для насыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1.8 мм, однако в современных двигателях для повышения надёжности обмотки и упрощения её укладки в пазы используют провода меньшего диаметра. При ручной укладке диаметр провода не должен превышать 1.7 мм. Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со насыпной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник разделяется на несколько элементарных $n_{\text{эл}}$.

По таблице П-28 [1] выбираем провод ПЭТВ:

$$d_{\text{эл}} = 1,6 \text{ мм}, d_{\text{из}} = 1,685 \text{ мм}, q_{\text{эл}} = 2,011 \text{ мм}^2, n_{\text{эл}} = 4.$$

2.2.11 Плотность тока (окончательно)

$$J_1 = \frac{I_{\text{лн}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = \frac{55}{1,2,011 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 6,82 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}$$

Схема трехфазной обмотки статора представлена на рисунке 1.

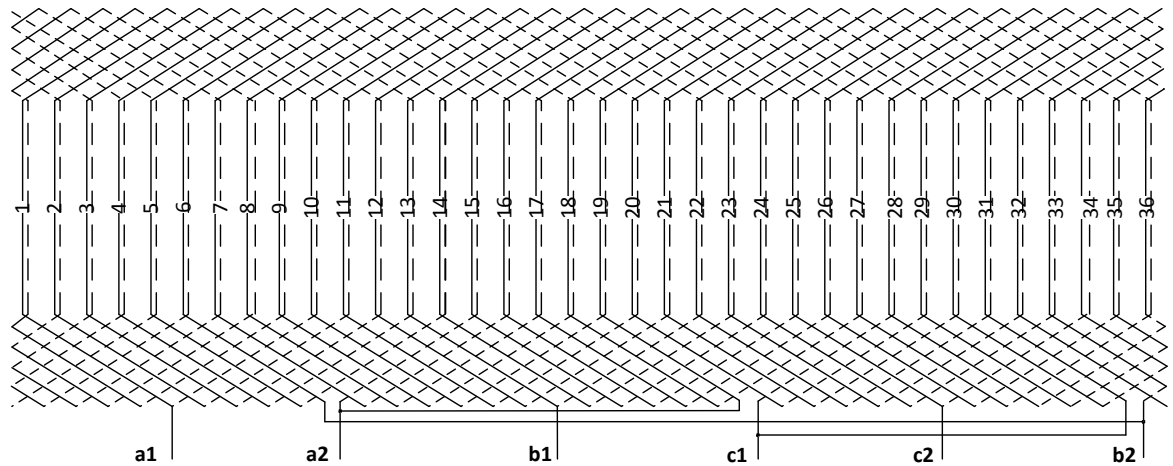


Рис.1 Развернутая схема обмотки

1.4 Расчёт размеров зубцовой зоны статора

Размеры пазов в электрических машинах должны быть выбраны таким образом, чтобы, во-первых, площадь паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нём проводников обмотки с учётом всей изоляции и во-вторых, чтобы значения индукции в зубцах и ярме статора находились в определённых пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника.

2.3.1 Ширина зубца

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot \ell_{\delta}}{B_{z1} \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,73 \cdot 0,0156 \cdot 0,123}{1,9 \cdot 0,123 \cdot 0,97} = 0,0062 \text{ м},$$

где B_{z1} – индукция в зубцах статора.

Индукцию в зубцах статора принимаем $B_{z1}=1,9 \text{ Тл}$

k_c – коэффициент заполнения пакета сталью по табл.6.11 [1]; $k_c=0.97$

4.2 Высота ярма статора [1, с.175]

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_{c1}} = \frac{0,016}{2 \cdot 1,52 \cdot 0,123 \cdot 0,97} = 0,044 \text{ м}$$

где B_a – индукция в ярме статора ; предварительно принимаем $B_a=1.52 \text{ Тл}$

2.3.2 Ширину шлица принимаем $b_{ш1}=3,7 \text{ мм}$ по табл.6.12 [1]; высоту шлица принимаем $h_{ш1}=1 \text{ мм}$ [1, стр.178]

2.3.3 Высота паза [1, стр.178, ф.6.40]

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0,313 - 0,178}{2} - 0,044 = 0,023 \text{ , м}$$

2.3.4 Максимальная ширина паза по формуле

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_{u1} - b_{u1}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (0,178 + 2 \cdot 1 - 3,7) - 36 \cdot 6,2}{36 - \pi} = 10,1 \text{ , мм}$$

2.3.5 Минимальная ширина паза по формуле

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_{n1})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,178 + 2 \cdot 0,023)}{36} - 6,2 = 13,4 \text{ , мм}$$

2.3.6 Высота паза, предназначенная для укладки обмотки по формуле

$$h_1 = h_n - \left(h_{u1} + \frac{b_2 - b_{u1}}{2} \right) = 23 - \left(1 + \frac{13,4 - 10,1}{2} \right) = 17,2 \text{ , мм}$$

2.3.7 Размеры паза в свету с учётом припуска на сборку по формуле

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_n = 10,1 - 0,2 = 9,9 \text{ , мм}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_n = 13,4 - 0,2 = 13,2 \text{ , мм}$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_n = 17 - 0,2 = 16,8 \text{ , мм}$$

2.3.8 Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу по формуле

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2h_n + b_1 + b_2) = 0,4 \cdot (2 \cdot 23 + 10,1 + 13,4) = 24,455 \text{ , мм}^2$$

где $b_{из}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу табл.3.8 [1]: $b_{из} = 0,4 \text{ мм}$

2.3.9 Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников формуле

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 - (S_{из} + S_{np}) = \frac{9,9 + 13,2}{2} \cdot 16,8 - 1,73 \cdot 10^{-4} = 1,785 \cdot 10^{-4} \text{ , мм}^2$$

2.3.10 Коэффициент заполнения паза [1, стр.180]

$$\kappa_z = \frac{d_{из}^2 \cdot U_n \cdot n_{эл}}{S'_n} = \frac{(1,65)^2 \cdot 11 \cdot 4}{1,785 \cdot 10^{-4}} = 0,7$$

Полученное значение коэффициента заполнения паза находится в рекомендуемом пределе (0,69—0,71).

Размеры паза статора представлены на рисунке 2

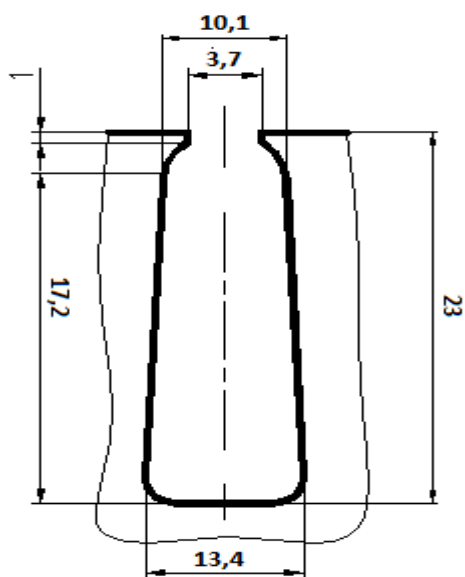


Рис.2 Паз статора

1.5 Расчёт ротора

2.4.1 Воздушный зазор следует выбирать, руководствуясь данными выпускаемых двигателей по рис.6.21 [1]

Правильный выбор воздушного зазора во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть суммарной МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает его коэффициент мощности и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение воздушного зазора приводит к возрастанию амплитуд 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. В современных асинхронных двигателях зазор выбирают, исходя из минимума суммарных потерь. Согласно рекомендациям выбираем $\delta=0,9 \text{ мм}$.

2.4.2 Число пазов ротора по табл.6.15 [1]

Число пазов ротора следует выбирать особенно тщательно. Это объясняется тем, что в поле воздушного зазора машины помимо основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты, которые при неблагоприятном соотношении Z_1 и Z_2 могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя, так как момент на валу машины является суммой моментов, обусловленных всеми взаимодействующими гармониками.

Исследования, проведённые для изучения влияния соотношений чисел зубцов на статоре и роторе на кривую момента, а также на шумы и вибрации, позволили определить наилучшие соотношения Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых двигателей с различными числами $2p$.

Согласно табл.6.15 [1]

при $2p=2$ и $Z_1=36$ принимаем $Z_2=29$.

2.4.3 Внешний диаметр ротора

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,178 - 2 \cdot 0,0009 = 0,177 \text{ , м}$$

2.4.4 Зубцовое деление ротора

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,177}{29} = 0,019 \text{ м}$$

2.4.5 Внутренний диаметр ротора по формуле

Так как сердечник непосредственно насаживается на гладкий вал при помощи горячей посадки, то внутренний диаметр ротора равен диаметру вала.

$$D_j = D_B = k_B \cdot D_a = 0,23 \cdot 0,313 = 0,072 \text{ м}$$

где k_B – коэффициент по табл.6.16 [1]; $k_B=0,23$

2.4.6 Ток в стержне ротора по формуле 6.60 [1]

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{о61}}{Z_2} = 0,92 \cdot 54 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 66 \cdot 0,91}{29} = 627,6 \text{ , А}$$

где k_i – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на соотношение I_1/I_2 , его приблизительное значение

может быть рассчитано в зависимости от номинального $\cos\phi$, которым задавались в начале расчета рис.6.22 [1]

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos\phi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,9 = 0,92$$

2.4.7 Площадь поперечного сечения стержня по формуле

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{627,6}{2,5 \cdot 10^6} = 251 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

где J_2 – плотность тока в стержне ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием [1, стр.186]; $J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$

2.4.8 Паз ротора

Для обеспечения высоких энергетических показателей в номинальном режиме работы, и достаточно высоким пусковым моментом принимаем пазы ротора с узкой нижней частью и немного большей верхней частью паза. Это выполняется для усиления эффекта вытеснения тока в пазу ротора. Паз выполняем грушевидной формы. Размеры паза ротора были определены из предварительных расчётов с учетом технического задания.

[1, стр.188]: ширина шлица $b_{ш2} = 1,5 \text{ мм}$, высота шлица $h_{ш2} = 0,7 \text{ мм}$.

2.4.9 Ширина зубца ротора

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot \ell_\delta}{B_{z2} \cdot \ell_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,73 \cdot 0,0191 \cdot 0,123}{1,8 \cdot 0,123 \cdot 0,97} = 0,008 \text{ , м}$$

где B_{z2} – индукция в зубцах ротора по табл.6.10 [1]; принимаем $B_{z2} = 1,85 \text{ Тл}$

2.4.10 Максимальная ширина паза

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш} - 2 \cdot h'_{ш}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} = \frac{\pi \cdot (1766 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 29 \cdot 8}{\pi + 29} = 9,9 \text{ , мм}$$

2.4.11 Минимальная ширина паза по формуле

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot (\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}) - q_c \cdot 4}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{9,9^2 \cdot (\frac{29}{\pi} + \frac{\pi}{2}) - 251 \cdot 4}{\frac{29}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 2,7 \text{ , мм}$$

2.4.12 Полная высота паза ротора

$$h_{n2} = h_{ш2} + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} + h_1 = 0,7 + \frac{9,9}{2} + \frac{2,7}{2} + 33,2 = 40 \text{ , мм}$$

где по формуле 6.76[1]

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (9,9 - 2,7) \cdot \frac{29}{2 \cdot \pi} = 33,2 \text{ , мм}$$

2.4.13 Площадь поперечного сечения стержня формуле

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 = \frac{\pi}{8} \cdot (9,9^2 + 2,7^2) + \frac{1}{2} \times \\ \times (9,9 + 2,7) \cdot 33 = 251 \text{ , мм}^2$$

Размер паза ротора рисунок 3.

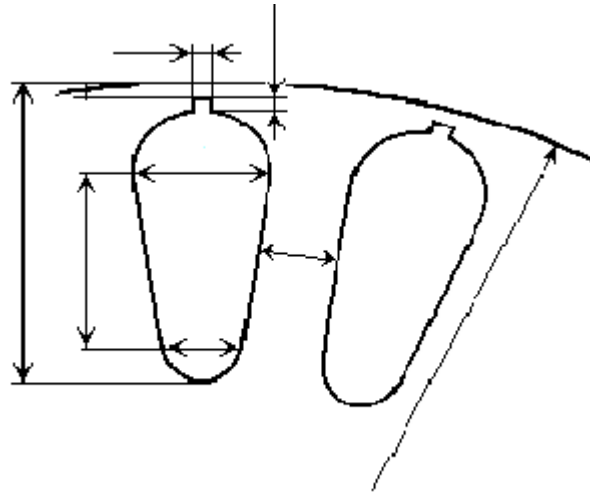


Рис.3 Грушевидный паз ротора.

2.4.14 Плотность тока в стержне (окончательно)

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{627,6}{251 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \cdot 10^6 \frac{A}{M^2}$$

2.4.15 Ток в кольце по формуле

$$I_{кл} = \frac{I_2}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2}} = \frac{627,6}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{29}} = 2902 \text{ A}$$

2.4.16 Плотность тока в кольце [1, стр.186]

Плотность тока в замыкающих кольцах выбираем на 15% меньше, чем в стержнях. Это объясняется следующим образом. Так как замыкающие кольца, имея лучшие условия охлаждения по сравнению со стержнями, являются своего рода радиаторами, которые отводят тепло стержней, усиливая их охлаждение.

$$J_{кл} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 3,5 \cdot 10^6 = 2,125 \cdot 10^6 \frac{A}{M^2}$$

2.4.17 Сечение короткозамкнутого кольца по формуле

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{2902}{2,125 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 1,366 \cdot 10^{-3} \text{ , A / M}^2$$

2.4.18 Высота короткозамкнутого кольца [1, стр.186]

$$h_{кл} = 1,25 \cdot h_{n2} = 1,25 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 0,05 \text{ , м}$$

2.4.19 Длина короткозамкнутого кольца [1, стр.244]

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{1366 \cdot 10^{-6}}{0,0501} = 0,027 \text{ , м}$$

2.4.20 Средний диаметр короткозамкнутого кольца [1, стр. 244]

$$D_{кл,ср} = D_2 - b_{кл} = 0,1766 - 0,05 = 0,127 \text{ м}$$

1.6 Расчёт магнитной цепи

Расчёт намагничивающего тока будем проводить для режима холостого хода двигателя, при котором для асинхронных машин характерно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора.

2.5.1 Индукция в зубцах статора (окончательно) по формуле

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot \ell_{\delta}}{b_{z1} \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,73 \cdot 0,016 \cdot 0,123}{0,0062 \cdot 0,123 \cdot 0,97} = 1,9 \text{ Тл}$$

2.5.2 Индукция в зубцах ротора:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \ell_{\delta}}{b_{z2} \cdot \ell_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,73 \cdot 0,019 \cdot 0,123}{0,008 \cdot 0,123 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ , Тл}$$

Значения индукции лежит в допустимых пределах 1,7-1,9 Тл

По табл.П.17 [1] стали марки 2013 определяем напряженность магнитного поля зубцов ротора АД:

$$H_{z2} = 2520 \text{ А/м ,}$$

2.5.3 Индукция в ярме статора (окончательно) по формуле

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,016}{2 \cdot 0,045 \cdot 0,123 \cdot 0,97} = 1,52 \text{ Тл}$$

2.5.4 Расчётная высота ярма ротора по формуле

$$h_j = \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) = \frac{2+1}{3,2 \cdot 2} \cdot \left(\frac{0,1777}{2} - 0,04 \right) = 0,045 \text{ , м}$$

2.5.5 Индукция в ярме ротора по формуле

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot \ell_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,016}{2 \cdot 0,045 \cdot 0,123 \cdot 0,97} = 1,492 \text{ Тл}$$

2.5.6 Коэффициент воздушного зазора [1, стр.106]

Поверхности статора и ротора ограничивающие воздушный зазор, не гладкие а имеют пазы. Магнитное сопротивление участков такого зазора в поперечном сечении машины различно, поэтому распределение индукции по площади воздушного зазора неравномерно. Наибольшая неравномерность возникает из-за наличия зубцов на статоре и роторе. Над коронками зубцов магнитные линии потока сгущаются, а над прорезями пазов плотность линии уменьшается. В кривой индукции в воздушном зазоре появляются провалы. Магнитное сопротивление и магнитное напряжение воздушного зазора при неравномерной индукции возрастают.

Увеличение магнитного напряжения учитывается введением коэффициента воздушного зазора. Этот коэффициент, полученный расчётом полей в зазорах с различным соотношением ширины зубцов и пазов, показывает насколько возрастает магнитное напряжение зазора при зубчатой поверхности статора или ротора по сравнению с магнитным напряжением зазора между гладкими поверхностями.

Коэффициент воздушного зазора по формуле 4.14,4.15[1]

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,0156}{0,0156 - 2,1 \cdot 0,0009} = 1,14$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{u1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{u1}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,0037}{0,0009}\right)^2}{5 + \frac{0,0037}{0,0009}} = 2,09$$

2.5.7 Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6 = 1,59 \cdot 0,73 \cdot 0,0009 \cdot 1,13 \cdot 10^6 = 1206 \text{ , A}$$

По табл.П.17 ,[1] , для стали марки 2013 определяем напряжённость магнитного поля для зубцов АД: $H_{z1}=2005 \text{ A/м.}$

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,023 \cdot 2005 = 91,8 \text{ , A}$$

2.5.7 Магнитное напряжение зубцов ротора :

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,0398 \cdot 2520 = 200,4 \text{ , A}$$

где H_{z2} – напряжённость магнитного поля для стали 2013 $H_{z2}=2520 \text{ A/м.}$

2.5.8 Коэффициент насыщения зубцовой зоны по формуле

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{91,8 + 200,4}{1206} = 1,242$$

Полученное значение коэффициента насыщения зубцовой зоны позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемого двигателя. Если $k_z > 1,5 \div 1,6$, имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если $k_z < 1,2$, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят большим. Длина магнитной линии ярма статора по формуле

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,313 - 0,044)}{2} = 0,42 \text{ , м}$$

2.5.9 Длина магнитной линии ярма ротора по формуле

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_e + h_j)}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,072 - 0,044)}{2} = 0,132 \text{ , м}$$

где h_j – высота спинки ротора

2.5.11 Магнитное напряжение ярма статора по формуле

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,42 \cdot 709 = 299 \text{ , А}$$

где H_a – напряжённость магнитного поля ярма статора по табл.П.16 [1]; для стали 2013 $H_a = 709 \text{ А/м}$.

2.5.12 Магнитное напряжение ярма статора по формуле

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0,132 \cdot 121 = 21,8 \text{ , А}$$

где H_j – напряжённость магнитного поля ярма ротора по табл.П.16 [1]; для стали 2013 $H_j = 165 \text{ А/м}$.

2.5.13 Магнитное напряжение на пару полюсов по формуле

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 1206 + 91,7 + 200,4 + 299,1 + 21,8 = 1819 \text{ , А}$$

2.5.14 Коэффициент насыщения магнитной цепи по формуле

$$k_\mu = \frac{F_u}{F_\delta} = \frac{1819}{1206,3} = 1,5$$

2.5.15 Намагничивающий ток по формуле

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_u}{0,9 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{об1}} = \frac{2 \cdot 1819}{0,9 \cdot 3 \cdot 66 \cdot 0,91} = 11,2 \text{ , А}$$

2.5.16 Относительное значение намагничивающего тока по формуле

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{ном}} = \frac{11,2}{55} = 0,204$$

Относительное значение намагничивающего тока служит определённым критерием правильности выбора и расчёта размеров и обмотки двигателя. Если $I_{\mu}^* < 0,2 \div 0,18$, то это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и $\cos\phi$, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большую массу и габариты. Если $I_{\mu}^* > 0,3 \div 0,35$, то это означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и $\cos\phi$.

В небольших двигателях мощностью менее 2 – 3 кВт I_{μ}^* может достигать значения 0,5–0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности.

1.7 Параметры рабочего режима

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора x_1, r_1 , ротора x_2, r_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчётное сопротивление r_{12} , введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Известные из общей теории электрических машин схемы замещения фазы асинхронной машины, основанные на приведении процессов во вращающейся машине к неподвижной (рис.4). Физические процессы в асинхронной машине более наглядно отражает схема, изображённая на рис.4а.

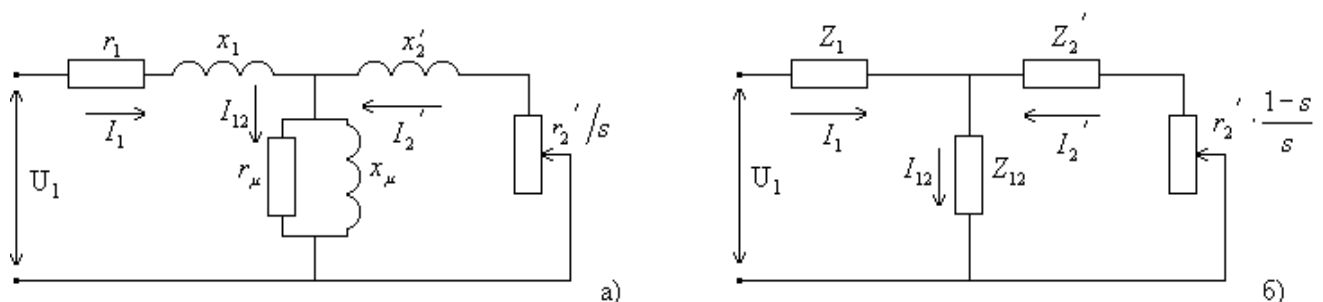


Рисунок 4. Схемы замещения фазы обмотки приведённой асинхронной машины

Но для расчёта оказалось удобнее преобразовать её в схему показанную на рисунке 4б.

Параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния, и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x_2 .

Увеличение скольжения в двигателях приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r_2 и x_2 . При расчёте рабочих режимов машины в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают.

2.6.1 Средняя ширина катушки по формуле

$$b_{кт} = \frac{\pi \cdot (D + h_{н1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,178 + 0,023)}{2} = 0,316 \text{ , м}$$

2.6.2 Длина лобовой части по формуле

Лобовая часть катушек имеет сложную конфигурацию. Точный расчёт её длины и длины вылета лобовой части требует предварительного определения всех размеров катушки и сопряжён со значительным объёмом расчётов, данные которых в дальнейшем электромагнитном расчёте обычно не используются. Для машин малой и средней мощности достаточно точные для практических расчётов результаты дают эмпирические формулы, учитывающие основные особенности конструктивных форм катушек.

$$\ell_{л} = K_{л} \cdot b_{кт} + 2B = 1,3 \cdot 0,316 + 2 \cdot 0,015 = 0,409 \text{ м}$$

где $K_{л}$ – коэффициент по табл.6.19 [1]; $K_{л}=1,2$

B – длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части [1, стр.197]; $B=0,015 \text{ м}$.

2.6.3 Вылет лобовых частей обмотки по формуле

$$\ell_{выл} = K_{выл} \cdot b_{кт} + B = 0,26 \cdot 0,316 + 0,01 = 0,097 \text{ , м}$$

где $K_{\text{бл}}$ – коэффициент по табл.6.19 [1]; $K_{\text{бл}}=0,26$

2.6.4 Средняя длина витка обмотки по формуле

$$\ell_{\text{ср1}} = 2 \cdot (\ell_n + \ell_\pi) = 2 \cdot (0,123 + 0,409) = 1,07 \text{ м}$$

где ℓ_n – длина пазовой части; $\ell_n = \ell_1 = 0,162 \text{ м}$

2.6.5 Длина проводников фазы обмотки по формуле

$$L_1 = \ell_{\text{ср1}} \cdot W_1 = 1,07 \cdot 66 = 70,33 \text{ м}$$

2.6.5 Активное сопротивление фазы обмотки статора по формуле

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} = \frac{10^{-6}}{47} \cdot \frac{70,3}{8,04 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,213 \text{ Ом}$$

где ρ_{75} – удельное сопротивление материала обмотки по табл.4-1 [1]; для данного класса нагревостойкости изоляции расчётная температура 115°C , для меди $\rho_{115} = 10^{-6}/41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

2.6.6 Относительное значение активного сопротивления фазы обмотки статора [1, с.245]

$$r_1^* = r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,213 \cdot \frac{55}{220} = 0,034$$

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора обычно составляют несколько сотых долей $r_1^* \approx 0,02 - 0,03$

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора определяется следующим образом. За фазу обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, принимают один стержень и два участка замыкающих колец. Токи в стержнях и замыкающих кольцах различны, поэтому их сопротивления при расчёте общего сопротивления фазы должны быть приведены к одному току. Таким образом, сопротивление фазы короткозамкнутого ротора является расчётным, полученным из условия равенства электрических потерь в сопротивлении r_2 от тока I_c и суммарных потерь в стержне и участках замыкающих колец реальной машины.

2.6.7 Сопротивление стержня определяется по формуле

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{\ell_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,123}{250 \cdot 10^{-6}} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

где ρ_{75} – удельное сопротивление материала обмотки по табл.4-1 [1]; для данного класса нагревостойкости изоляции расчётная температура 115°C , для алюминия $\rho_{115}=10^{-6}/20,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

2.6.8 Сопротивление участка замыкающего кольца, заключённого между двумя соседними стержнями [1, с.202 формула 6.166]

$$r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{к.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{\pi \cdot 0,127}{29 \cdot 14 \cdot 10^{-4}} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}$$

2.6.9 Активное сопротивление фазы обмотки ротора по формуле

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 2,4 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 4,9 \cdot 10^{-7}}{0,216^2} = 45 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

2.6.10 Приводим r_2 к числу витков обмотки статора по формуле

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (W_1 \cdot \kappa_{об1})^2}{Z_2 \cdot K_c} = 45 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (66 \cdot 0,91)^2}{29 \cdot 0,97} = 0,67 \text{ , Ом}$$

2.6.11 Относительное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора [1, с.245]

$$r_2^{*'} = r_2' \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,67 \cdot \frac{55}{220} = 0,017$$

2.6.12 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки

статора по табл.6-22 [1]

$$\lambda_{m1} = \frac{h_2}{3 \cdot b1} \cdot k_{\beta} + \left(\frac{h1}{b1} + \frac{3 \cdot h_{\kappa}}{b_1 + b_{у1}} + \frac{h_{у'1}}{b_{у'1}} \right) \cdot \kappa'_{\beta} = \frac{0,0172}{3 \cdot 0,0134} \cdot 1 + \left(\frac{3 \cdot 0,0172}{0,0134 + 2 \cdot 0,004} + \frac{0,0007}{0,0037} \right) \cdot 1 = 1,34$$

где k_{β} и κ'_{β} – коэффициенты учитывающие укорочение шага обмотки [1, с.199];

2.6.13 Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки статора по формуле 6.154 [1]

$$\lambda_1 = 0,34 \cdot \frac{q}{\ell_{\delta}} \cdot (\ell_{\delta} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{6}{0,123} \cdot (0,4 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,28) = 3,8$$

2.6.14 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора по формуле 6.170 [1]

$$\lambda_{d1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{0,0156}{12 \cdot 0,0009 \cdot 1,14} \cdot 1 = 2,20$$

где ξ – коэффициент по формуле 6.172 [1];

при полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов:

$$\xi = 2 \cdot \kappa'_{\text{ск}} \cdot \kappa_{\beta} - \kappa_{\text{об1}}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{\text{ск}}^2) = 2 \cdot 1,5 \cdot 1 - 1,22^2 \cdot (1,258)^2 = 1,749$$

где $\beta_{\text{ск}}$ – коэффициент скоса, выраженный в долях зубцового деления ротора; так как скос пазов на статоре отсутствует, то $\beta_{\text{ск}} = 0,01$

$\kappa'_{\text{ск}}$ – коэффициент по рис.6-39д [1]; при $t_2/t_1 = 1,258$ и $\beta_{\text{ск}} = 0,01$ $\kappa'_{\text{ск}} = 1,5$

2.6.15 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{W_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{\ell'_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{л11}} + \lambda_{\text{л11}}) = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{66}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,123}{1 \cdot 6} \cdot 7,34 = 0,519 \text{ , Ом}$$

2.6.16 Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки статора [1, с.205]

$$x_1^* = x_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,685 \cdot \frac{55}{220} = 0,13$$

см. вывод в конце параграфа

2.6.17 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора по табл.6-23 ,[1]

$$\lambda_{\text{л2}} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{ш2}}}{2 \cdot b_2} \right] \cdot k_{\text{л}} + 0,3 + 1,12 \frac{h_{\text{ш2}} \cdot 10^{-6}}{I_2} = \left(\frac{0,035}{3 \cdot 0,0099} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0,0099^2}{8 \cdot 251 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + 0,66 - \frac{0,0037}{2 \cdot 0,0099} \right) \cdot 1 + 0,3 + 1,12 \frac{0,7 \cdot 10^{-6}}{403,5} = 1,31$$

2.6.18 Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки ротора по формуле

$$\lambda_{\text{л2}} = \frac{2,3 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot \ell'_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{2 \cdot a_{\text{кл}} + b_{\text{кл}}} = \frac{2,3 \cdot 0,127}{38 \cdot 0,123 \cdot 0,216^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,127}{2 \cdot 0,027 + 0,0501} = 1,31$$

2.6.19 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора по формуле

$$\lambda_{\text{л2}} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{0,019}{12 \cdot 0,0009 \cdot 1,14} \cdot 1 = 1,5$$

где ξ – коэффициент по формуле

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - (p/Z_2)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{29} \right)^2 = 1,0003$$

где Δ_z находят по кривым по рис.6.39 а ,[1]; $\Delta_z = 0$

2.6.20 Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по формуле

$$x_2 = 7.9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{\pi 2} + \lambda_{л 2} \cdot \lambda_{д 2} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} = 7.9 \cdot 50 \cdot 0.123 \cdot 4.8 \cdot 10^{-6} = 3.1 \cdot 10^{-4} \text{ , Ом}$$

2.6.21 Приводим x_2 к числу витков обмотки статора по формуле

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2 \cdot K_{ск}} = 381 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (66 \cdot 0.91)^2}{29 \cdot 1} = 0.457 \text{ Ом}$$

2.6.22 Относительное значение x_2 [1, с.205]

$$x_2^* = x_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0.457 \cdot \frac{55}{220} = 0.114$$

Представление 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.

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

1.8 Расчёт потерь

При работе асинхронного двигателя часть подводимой мощности расходуется на нагрев проводников, перемагничивание сердечника, создание необходимого для охлаждения потока воздуха, трение вращающихся частей о воздух, трение в подшипниках и т.д. Эту часть мощности называют потерями, так как она как бы «теряется» при электромеханическом преобразовании энергии.

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

Основные потери в стали асинхронных двигателей рассчитываются только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = s \cdot f_1$ в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

2.7.1 Масса стали зубцов статора по формуле

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot \ell_{cm1} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c = 0.023 \cdot 0.0062 \cdot 36 \cdot 0.123 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 4,8 \text{ кг}$$

где γ_c – удельная масса стали [1, с.206]; $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$

2.7.2 Масса стали ярма статора по формуле

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot \ell_{cm1} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c = \pi \cdot (0.313 - 0.178) \cdot 0.044 \cdot 0.13 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 35 \text{ кг}$$

2.7.3 Основные потери в стали по формуле

$$P_{ст.осн} = p_{1.0\%} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (\kappa_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + \kappa_{дз} \cdot B_z^2 \cdot m_{z1}) = 2.5 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1.5} \cdot (1.6 \cdot 1,52^2 \cdot 35 + 1.8 \cdot 1.9^2 \cdot 4,8) = 400,8 \text{ Вт}$$

где $p_{1.0\%}$ – удельные потери в стали по табл.6-24 [1]; для стали 2013

$$p_{1.0\%} = 2.6 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$$

β – показатель степени по табл.6-24 [1]; для стали 2013 $\beta = 1.5$

$\kappa_{да}$ и $\kappa_{дз}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов [1, с.206]; $\kappa_{да} = 1.6$ и $\kappa_{дз} = 1.8$.

Добавочные потери в стали, возникающие при холостом ходе, подразделяются 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).

2.7.4 Амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора по формуле

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot \kappa_\delta \cdot B_\delta = 0.21 \cdot 1.15 \cdot 0.73 = 0,332 \text{ Тл}$$

где β_{02} – зависит от отношения ширины шлица пазов статора к воздушному

зазору $\beta_{02} = f(b_{шл1}/\delta)$ по рис.6-41 [1]; $\beta_{02} = 0.21$

2.7.5 Удельные поверхностные потери по формуле

$$p_{нов2} = 0.5 \cdot \kappa_{02} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 = 0.5 \cdot 1.6 \cdot \left(\frac{29 \cdot 3000}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.177 \cdot 0.0156 \cdot 10^3)^2 = 215,7 \frac{Вт}{м^2}$$

где κ_{02} – коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности ротора на удельные потери [1, с.207]; $\kappa_{02}=1.6$.

2.7.6 Полные поверхностные потери ротора по формуле

$$P_{нов2} = p_{нов2} \cdot (t_2 - b_{у2}) \cdot Z_2 \cdot \ell_{см2} = 205,5 (0.012 - 0,0037) \cdot 38 \cdot 0.162 = 14 \text{ Вт}$$

2.7.7 Масса зубцов стали ротора по формуле

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Z_2 \cdot \ell_{см2} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c = 0.0185 \cdot 0.0062 \cdot 38 \cdot 0.162 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 5,3 \text{ кг}$$

2.7.8 Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора по формуле

$$B_{пуль'2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{z2} = \frac{2,09 \cdot 0.0009}{2 \cdot 0.0191} \cdot 1.8 = 0.089 \text{ Тл}$$

2.7.9 Пульсационные потери в зубцах ротора по формуле

$$P_{пуль'2} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{пуль'2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0.11 \cdot \left(\frac{36 \cdot 3000}{1000} \cdot 0.089 \right)^2 \cdot 8,7 = 87,12 \text{ Вт}$$

Поверхностные и пульсационные потери в статоре двигателя с короткозамкнутым ротором обычно очень малы, так как в пазах таких роторов ширина шлица ротора небольшая и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. При закрытых пазах ротора расчёт этих потерь в статоре двигателя не производится.

2.7.10 Сумма добавочных потерь по формуле

$$P_{ст.доб} = P_{нов2} + P_{пуль2} = 14 + 87 = 101,2 \text{ Вт}$$

2.7.11 Полные потери в стали по формуле

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 400,8 + 101,1 = 502 \text{ Вт}$$

2.7.12 Механические потери по формуле

$$P_{мех} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 1,3 \cdot \left(\frac{3000}{10} \right)^2 \cdot 0.313^4 = 771 \text{ Вт}$$

где K_T – коэффициент [1, с.208]; при $2p=2$ $K_T=1,3$

2.7.13 Добавочные потери при номинальном режиме [1, с.209]

Добавочные потери возникают за счёт действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора. В короткозамкнутых роторах, кроме то-

го, возникают потери от поперечных токов, то есть токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. ГОСТ устанавливает средние расчётные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0.5% номинальной мощности.

$$P_{доб} = 0.005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0.005 \cdot \frac{30000}{0.9} = 163, \text{ Вт}$$

2.7.14 Электрические потери при холостом ходе в обмотке статора по формуле

$$P_{\text{эл},x} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 11,22^2 \cdot 0,213 = 80,5, \text{ Вт}$$

2.7.15 Активная составляющая тока холостого хода по формуле

$$I_{x,x,a} = \frac{P_{cm} + P_{мех} + P_{\text{эл},x}}{m \cdot U_{1H}} = \frac{1353}{3 \cdot 220} = 2,05, \text{ А}$$

2.7.16 Ток холостого хода двигателя по формуле

$$I_{x,x} = \sqrt{I_{x,x,a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{2,05^2 + 11,22^2} = 11,4, \text{ А}$$

2.7.17 Коэффициент мощности при холостом ходе по формуле

$$\cos \varphi_{x,x} = \frac{I_{x,x,a}}{I_{x,x}} = \frac{2,05}{11,4} = 0,18$$

1.9 Расчёт рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости $P_1, I_1, \cos \varphi, \eta, s = f(P_2)$. Методы расчёта характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения (рис.5). Активные и индуктивные сопротивления схемы замещения являются параметрами машины.

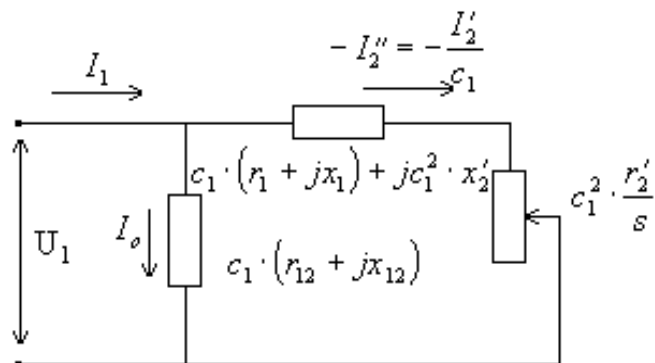


Рисунок 5. Преобразованная Г-образная схема замещения приведённой асинхронной машины.

Коэффициент c_1 представляет собой взятое с обратным знаком отношение вектора напряжения фазы U_1 к вектору ЭДС E_1 , при синхронном вращении машины с учётом сдвига фаз этих векторов.

2.8.1 Расчётное сопротивление r_{12} по формуле

$$r_{12} = \frac{P_{\text{см.осн}}}{m \cdot I_\mu^2} = \frac{400,8}{3 \cdot 11,2^2} = 1,06 \text{ , Ом}$$

2.8.2 Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора по формуле 6.180 [1]; $x_{12} = \frac{U_{1H}}{I_\mu} - x_1 = \frac{220}{11,2} - 0,52 = 19,1 \text{ , Ом}$

2.8.3 Коэффициент c_1 по формуле 6.218 [1];

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,519}{19} = 1,028$$

Была использована приближённая формула

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})} = \arctg \frac{3,51}{375,6} = 9,6 \cdot 10^{-3}$$

Расчёт рабочих характеристик можно проводить с помощью круговой диаграммы или аналитическим методом. Расчёт по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчёта. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях и может быть легко переведён на язык программ при использовании ЭВМ в расчётах.

Для расчёта рабочих характеристик выбираем аналитический метод. Расчёт характеристик проводим, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s=(0,011 \div 0,040)s_H$. Номинальное скольжение предварительно принимаем равным $s_H=r_2^{\ast}=0,0167$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти-шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы.

2.8.4 Активная составляющая тока синхронного холостого хода по формуле

$$I_{oa} = \frac{P_{\text{см.осн}} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{400,8 + 3 \cdot 11,2^2 \cdot 0,213}{3 \cdot 220} = 0,724 \text{ А}$$

2.8.5 Постоянные коэффициенты по формуле

$$a' = c_1^2 = 1.022^2 = 1.045; \quad a = c_1 \cdot r_1 = 1.022 \cdot 0.306 = 0.313$$

$$b' = 0; \quad b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2) = 1.022 \cdot (0,69 + 1.022 \cdot 0,918) = 1,66$$

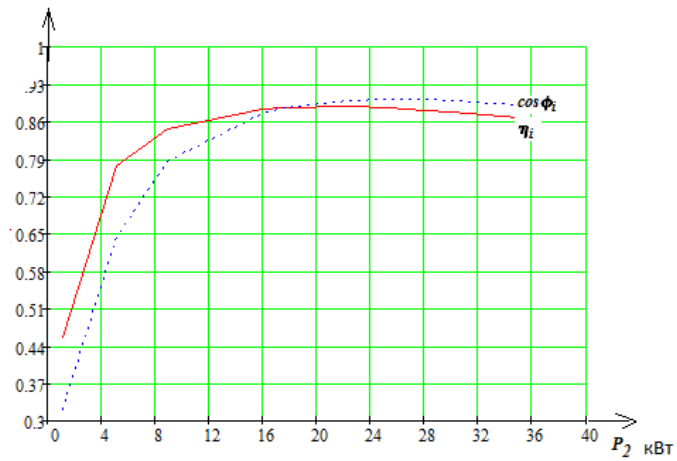
Результаты расчёта сведены в таблице1.

Таблица1.

N п/п	Расчётная формула	Ед- ница.	Скольжение						
			0,00 1	0,00 3	0,00 5	0,00 9	0,01	0,01 86	0,023
1	$b' \cdot r'_2 / s$	Ом	0	0	0	0	0	0	0
2	$R = a + a' \cdot r'_2 / s$	Ом	71	23,8	14,4	8,07	7,29	4,01	3,28
3	$X = b + b' \cdot r'_2 / s$	Ом	2,34	1,46	1,28	1,17	1,15	1,08	1,07
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	71,06	23,9	14,4	8,15	7,38	4,15	3,45
5	$I''_2 = U_{н1} / Z$	А	3,09	9,22	15,2	26,9 6	29,8	52,9	63,6
6	$\cos \varphi'_2 = R / Z$	—	0,99	0,99 8	0,99 6	0,98 9	0,98 7	0,96 5	0,95
7	$\sin \varphi'_2 = X / Z$	—	0,03 3	0,06 1	0,08 9	0,14	0,16	0,26	0,31
8	$I_{1a} = I_{oa} + I''_2 \cdot \cos \varphi'_2$	А	3,82	9,93	15,9	27,4	30,2	51,8	61,2
9	$I_{1p} = I_{op} + I''_2 \cdot \sin \varphi'_2$	А	11,3 2	11,8	12,6	15,0 7	15,9	25,0 8	31,0 4
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	11,9 5	15,4	20,3	31,3	54,1	57,5	68,6
11	$I'_2 = c_1 \cdot I''_2$	А	3,18	9,47	15,7	27,7	30,7	54,3	65,4
12	$P_1 = 3 \cdot U_{1н} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	2,52	6,55	10,5	18	20	34,2	40,4
13	$P_{\varphi 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	Вт	91,4	152	263	626	744	2118	3014
14	$P_{\varphi 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	Вт	2,03	18,0 7	49,4	154, 6	189	595	861
15	$P_{доб} = P_{доб.н} \cdot (I_1 / I_{1н})^2$	Вт	7,7	12,9	22,2	53	63	179	255
16	$\sum P = P_{см} + P_{мех} + P_{\varphi 1} + P_{\varphi 2} + P_{доб}$	Вт	1376	1456	1608	2108	2264	4166	5404
17	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	1,15	5,1	8,9	16	17,7	30	35
18	$\eta = 1 - \sum P / P_1$	—	0,45	0,78	0,84	0,88	0,89	0,87 8	0,87
19	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	—	0,32	0,64	0,78	0,87	0,88	0,9	0,89 2

По результатам расчётов строятся рабочие характеристики, которые представлены на рисунке 6.

Рабочие характеристики



Зависимость КПД от номинальной мощности.



Зависимость скольжения от номинальной мощности.



Зависимость тока от номинальной мощности

1.10 Расчёт пусковых характеристик

Расчёт токов с учётом влияния изменения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учёта влияния насыщения от полей рассеяния).

Расчёт для $S=1$.

2.9.1 Активное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока ($v_{\text{расч}}=115^\circ\text{C}$; $\rho_{115}=10^{-6}/20,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)

$$h_c = h_{\text{п}} - h_{\text{ш2}} = 0.0395 \text{ м};$$

$$\text{по формуле } \xi = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 63.61 \cdot 0.0395 = 2.52;$$

$$\text{по рис. 6.46 [1] для } \xi = 2.51 \quad \varphi = 1.2;$$

глубина проникновения тока по формуле

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0.0395}{1 + 1.2} = 0.0165 \text{ ,м};$$

площадь сечения q_r по формуле

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \frac{\pi 0.0099^2}{8} + \frac{0.0099 + 0.0068}{2} \left(0.0165 - \frac{0.0099}{2} \right) = 12.6 \cdot 10^{-4} \text{ ,м}^2$$

где по коэффициент k_r по по формуле

$$k_r = q_c / q_r = 2.51 / 1.262 = 1.989;$$

коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока по формуле

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1) = 1 + \frac{23.9 \cdot 10^{-6}}{44.9 \cdot 10^{-6}} (1.989 - 1) = 1.527;$$

приведённое активное сопротивление ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока [1, с.249]:

$$r'_{2\xi} = K_R r'_2 = 1.527 \cdot 0.067 = 0.102 \text{ Ом}.$$

2.10.2 Коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока по формуле

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{ск2}}}{\lambda_{n2} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{ск2}}} = \frac{3.9}{4.8} = 0.811;$$

где $\lambda_{n2\xi}$ – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учётом эффекта вытеснения тока, по табл.6.23 [1]:

$$\lambda_{n2\xi} = \left(\frac{h_l}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{u1}}{2b_1} \right) k_\delta + 0.3 + 1.12 \frac{h_{u2} \cdot 10^6}{I_2} =$$

$$= \left(\frac{0.033}{3 \cdot 0.009} \left(1 - \frac{\pi \cdot 0.009^2}{8 \cdot 251 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5}{2 \cdot 0.009} \right) 0.7 + \frac{0.0007 \cdot 10^6}{640} = 1.73;$$

индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом действия эффекта вытеснения тока по формуле 6.250 [1];

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 0.45 \cdot 0.956 = 0.44, \text{ Ом.}$$

2.9.3 Пусковые параметры

Подробный расчёт для S=1.

2.9.4 Индуктивные сопротивления обмоток. Принимаем [1, с.219]: $k_H=1.25$ средняя МДС обмотки, отнесённая к одному пазу обмотки статора

по формуле

$$F_{n.cp} = 0.7 \frac{I_1 k_{нас} u_{n1}}{a} \left(k'_\beta + k_y \cdot k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 0.7 \frac{301.5 \cdot 11}{1} \left(1 + 1 \cdot 0.92 \frac{36}{29} \right) = 4944 \text{ А,}$$

коэффициент C_N по формуле 6.254 [1]

$$C_N = 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \sqrt{\frac{0.0009}{0.0347}} = 1.043,$$

фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре по формуле

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{n.cp} \cdot 10^{-6}}{1.6 \delta \cdot C_N} = \frac{4944 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 0.0009 \cdot 1.043} = 4.2 \text{ Тл.}$$

По рис.6.50 [1] для $B_{\Phi\delta} = 4.2 \text{ Тл}$ находим $k_\delta=0.3$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения по формуле

$$c_{\beta 1} = (t_{z1} - b_{u1})(1 - k_\delta) = (0.0156 - 0.0037)(1 - 0.3) = 0.0104, \text{ м.}$$

Уменьшение коэффициента проводимости рассеяния паза статора по формуле

$$\Delta \lambda_{n1нас} = \frac{h_{u1} + 0.58 h_k}{b_{u1}} \frac{c_{\beta 1}}{c_{\beta 1} + 1.5 b_{u1}} = \frac{0.0007 + 0.58 \cdot 0.0003}{0.0037} \frac{0.0104}{0.0104 + 1.5 \cdot 0.0037} = 0.589$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния паза статора с учетом насыщения по формуле 6.261 [1]

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta \lambda_{n1нас} = 1.34 - 0.589 = 0.75.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора с учетом насыщения по формуле 6.263 [1]

$$\lambda_{\sigma 1 \text{нас}} = \lambda_{\sigma 1} k_{\delta} = 2,2 \cdot 0,3 = 0,22.$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения по формуле

$$x_{1 \text{нас}} = x_1 \frac{\Sigma \lambda_{1 \text{нас}}}{\Sigma \lambda_1} = 0,52 \frac{4,77}{7,34} = 0,34 \text{ Ом.}$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния паза ротора с учетом насыщения по формуле

$$\lambda_{n2\xi \text{нас}} = \lambda_{n2\xi} = 1,266.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора с учетом насыщения по формуле

$$\lambda_{\sigma 2 \text{нас}} = \lambda_{\sigma 2} k_{\delta} = 1,54 \cdot 0,3 = 0,154.$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом насыщения и вытеснения тока по формуле

$$x'_{2\xi \text{нас}} = x'_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xi \text{нас}}}{\Sigma \lambda_2} = 0,638 \text{ Ом,}$$

коэффициент $c_{1п.нас}$ по формуле

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1 \text{нас}}}{x_{12п}} = 1 + \frac{0,52}{28,8} = 1,018.$$

2.9.6 Расчет токов и моментов:

токи по формуле

$$I'_{2 \text{нас}} = \frac{U_{1 \text{ном}}}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,34^2 + 0,6^2}} = 215,4 \text{ А,}$$

Кратность пускового тока с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1, с. 251]:

$$I_{П*} = \frac{I_{1 \text{нас}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{317}{57} = 6$$

Лежит в допустимых пределах 6,5-7,5.

Кратность пускового момента с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1, с. 251]:

$$M_n' = \left(\frac{I'_{2п.нас}}{I'_{2 \text{ном}}} \right)^2 K_R \frac{S_{\text{ном}}}{S} = \left(\frac{317}{58} \right)^2 1,95 \frac{0,0195}{1} = 1,29$$

Лежит в допустимых пределах 1,2-1,4.

Результаты расчёта сведены в таблице 2. По результатам расчётов строятся пусковые характеристики $M_*, I_* = f(s)$, которые представлены на рисунке 7.

Таблица 2. Расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния.

Таблица 2

№	Расчётная формула	Ед	Скольжение S					
			1	0.8	0.7	0.65	0,6	0.001
1	$\xi = 65.15 h_c \sqrt{s}$	—	2,51	2,24	2,1	2,02	1,94	0,025
2	$\varphi(\xi)$	—	1,4	1,3	1,2	1	0,8	0,5
3	$k_r = q_c / q_r$	—	1,989	1,825	1,723	1,5	1,06	1
4	$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} (k_r - 1)$	—	1,95	1,86	1,73	1,64	1	0,005
5	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом	0,130	0,12	0,104	0,09	0,08	0,007
6	$k_d = \varphi'(\xi)$	—	0,5	0,6	0,7	0,9	0,95	0,96
1 1	$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}}$	—	1,018	1,017	1,018	1,019	1,02	1,021
1 2	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	0,346	0,379	0,4	0,418	0,435	1331
1 3	$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}} A$		130,9	128,9	122,8	98,6	69,2	0,97
1 4	$I_{1нас} = I'_{2нас} \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} - x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \cdot x_{12п}} A$	A	317	309	304	301	297	7,5
1 5	$I_{п*} = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1ном}}$	—	6	5,8	5,6	5,2	5,1	0,13
1 6	$M'_п = \left(\frac{I'_{2п.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{S_{ном}}{S}$	—	1,29	1,54	1,69	1,78	1,87	0,004

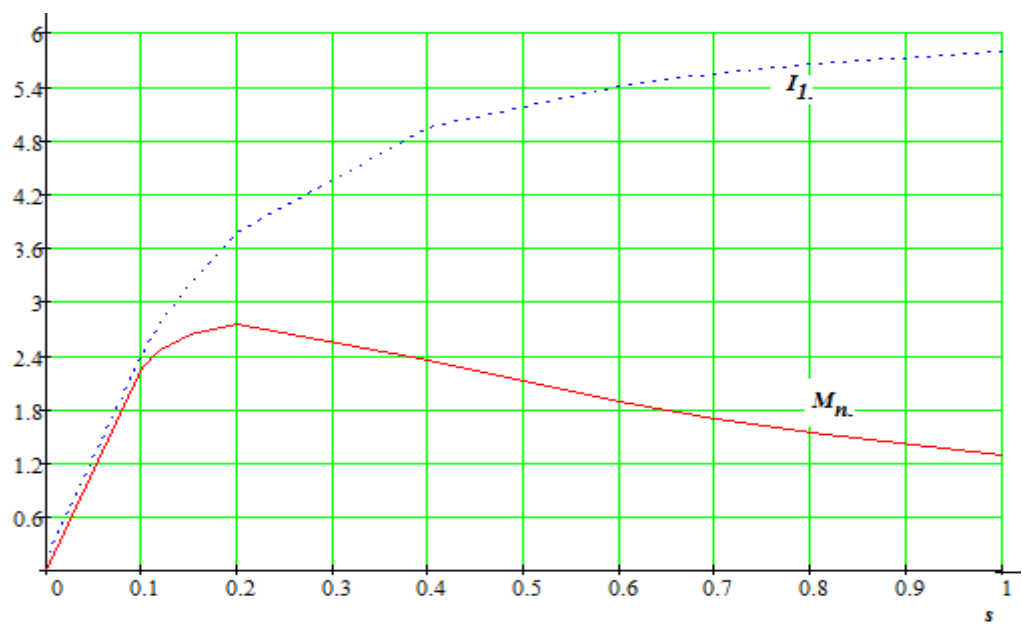


Рис.7 Пусковые характеристики

2. Тепловой расчет

Расчёт нагрева проводят, используя значения потерь которые получились 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 плюс 160 °С. При этом коэффициент увеличения потерь k_p по сравнению с полученными для расчётной температуры составит $k_p = 1.15$.

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

$$P'_{э.н.1} = k_p \cdot P_{э1} \cdot \frac{2 \cdot l_\delta}{l_{ср1}} = 1,15 \cdot 2119 \cdot \frac{2 \cdot 0,123}{1,07} = 564,3 \text{ Вт} \quad (2.1)$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя :

$$\Delta V_{нов1} = K \cdot \frac{P'_{э.н.1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_\delta \cdot \alpha_1}, \quad (2.2)$$

где α_1 - коэффициент теплоотдачи с поверхности, зависит от D_a

$$\alpha_1 = 165 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$$

K – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передаётся через станину непосредственно в окружающую среду, зависит от $2p$, $K = 0,25$ тогда:

$$\Delta V_{нов1} = 0,25 \cdot \frac{564,3 + 400,8}{3,14 \cdot 0,178 \cdot 0,123 \cdot 115} = 21,1^\circ\text{С} \quad (2.3)$$

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полу-закрытых трапецеидальных пазов:

$$P_1 = 2 \cdot h_{н.к.} + b_{11} + b_{12} = 2 \cdot 0,023 + 10,1 \cdot 10^{-3} + 13,4 \cdot 10^{-3} = 0,058 \quad (2.4)$$

10.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta V_{уз.н1} = \frac{P'_{э.н.1}}{Z_1 \cdot P_1 \cdot l_\delta} \cdot \left(\frac{b_{уз.н1}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{экв}} \right), \quad (2.5)$$

где $\lambda_{экв}$ - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции; для классов нагревостойкости В, F и Н

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,16 \text{ Вт / (м} \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (2.6)$$

$\lambda'_{\text{экв}}$ – среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников, $\lambda'_{\text{экв}} = 1,3 \text{ Вт / (м} \cdot ^\circ\text{C)}$, зависит от $d/d_{\text{из}} = 0,95$,

тогда:

$$\Delta v_{\text{из.л1}} = \frac{564,3}{36 \cdot 0,058 \cdot 0,123} \cdot \left(\frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{(10,1 + 13,4) \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 1,3} \right) = 4,7^\circ \text{C} \quad (2.7)$$

10.3 Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta v_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{эл.л1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_\delta} \cdot \left(\frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{л1}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right),$$

$$\Delta v_{\text{из.л1}} = \frac{1872}{2 \cdot 36 \cdot 0,058 \cdot 0,409} \cdot \left(\frac{0,029}{12 \cdot 0,16} \right) = 1,62^\circ \text{C}$$

Перепад температуры наружной поверхности лобовых частей

$$P'_{\text{эл.л1}} = k_p \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} = 1,15 \cdot 2118 \cdot \frac{2 \cdot 0,409}{1,07} = 1872 \text{ Вт} \quad (2.8)$$

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

$$\Delta v_{\text{пов.л1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{эл.л1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{был}} \cdot \alpha_1} = \frac{0,25 \cdot 1872}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,178 \cdot 0,097 \cdot 160} = 26,03^\circ \text{C} \quad (2.9)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{\text{пов.л1}} + \Delta v_{\text{из.л1}}) \cdot 2 \cdot l_\delta + (\Delta v_{\text{из.л1}} + \Delta v_{\text{пов.л1}}) \cdot 2 \cdot l_\delta}{l_{\text{ср1}}} \quad (2.10)$$

$$\Delta v'_1 = \frac{(21,1 + 4,7) \cdot 2 \cdot 0,123 + (1,62 + 26) \cdot 2 \cdot 0,409}{1,06} = 27,2^\circ \text{C}$$

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

$$\Delta v_B = \frac{\sum P'_B}{s_{\text{кор}} \cdot \alpha_B}, \quad (2.11)$$

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

$$\sum P'_B = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эл.л1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9 \cdot P_{\text{мех}}, \quad (2.12)$$

$$P' = P + (1.15 - 1)(P_{\text{з1}} + P_{\text{з2}}) = 4166 + (1.15 - 1)(2118 + 595) = 4573 \text{ Вт}, \quad (2.13)$$

$$\text{тогда: } \sum P'_B = 4573 - (1 - 0.25) \cdot (564.3 + 400.8) = 3849 \text{ Вт}$$

$S_{\text{кор}}$ -эквивалентная поверхность охлаждения корпуса [с.453, формула 9.327]:

$$S_{\text{кор}} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_\delta + 2 \cdot l_{\text{выл}}) = (3.14 \cdot 0.178 + 8 \cdot 0.38) \cdot (0.123 + 2 \cdot 0.097) = 1.28 \text{ м}^2$$

где Π_p - условный периметр поперечного сечения рёбер корпуса двигателя [с.453, рис. 9.70], $\Pi_p = 0.38 \text{ м}$, зависит от h , способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины [с.450, рис. 9.67 а],

$$\alpha_B = 27 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}), \text{ зависит от } D_a, \quad (2.15)$$

тогда:

$$\Delta v_B = \frac{3849}{1.28 \cdot 27} = 111.5^\circ \text{C} \quad (2.16)$$

10.6 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_B = 27.2 + 111.5 = 138.7^\circ \text{C} \quad (2.17)$$

Тепловое состояние рассчитанной ЭМ соответствует требованиям ГОСТ 183-74,

при температуре окружающей среды $+40^\circ\text{C}$ над уровнем не более 1000 м предельно допустимая температура составляет 160°C -для класса нагревостойкости Н.

3. 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.

11.1 Требуемый для охлаждения расход воздуха:

$$\theta_B = \frac{k_m \cdot \sum P'_B}{1100 \cdot \Delta v_B}, \quad (3.1)$$

где k_m – коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором:

$$k_m = m' \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_a} = 2,6 \cdot \sqrt{\frac{3000}{100} \cdot 0,313} = 7,96, \quad (3.2)$$

где $m' = 2,6$, для двигателей с $2 \cdot p = 2$ при $h \geq 160$ мм.

тогда:

$$\theta_B = \frac{7,97 \cdot 3849}{1100 \cdot 111,5} = 0,25 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (3.3)$$

11.2 Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором:

$$\theta'_B = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot (0,313)^3 \cdot \frac{3000}{100} = 0,552 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (3.4)$$

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

4. Механический расчет

Конструкция вала приведена на рисунке.

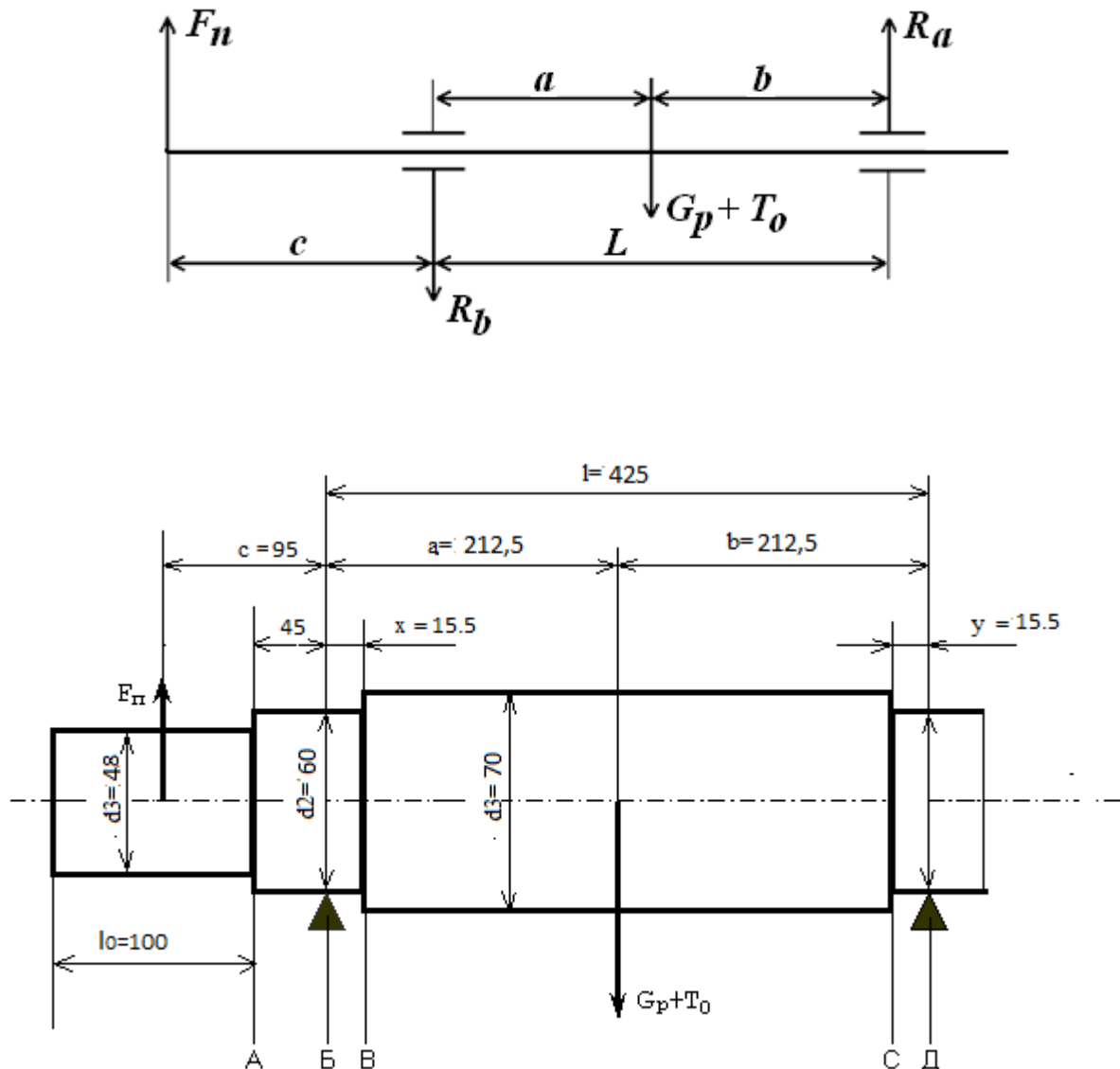


Рисунок 1.10 Конструкция и основные размеры вала для механического расчёта

Валы двигателей с высотами оси вращения $h \leq 250$ мм выполняют с минимальным числом ступеней – 3. Согласно таблице 4.1 [4] определяем по величине наибольшего допускаемого момента длину выступающего конца вала, связанные с диаметром выступающего цилиндрического конца вала: $d_1 = 48$ мм; $l_1 = 100$ мм.

Диаметр вала под подшипник и диаметр вала за подшипником принимаем по таб. 4.1 [4]: $d_2 = 60$ мм; $d_3 = 70$ мм.

Выберем предварительно для вала подшипник радиальный однорядный с двухсторонним уплотнением (ГОСТ 8882-75) средней серии 6310, который имеет следующие параметры: $d=60 \text{ мм}$; $D=130 \text{ мм}$; $B=31 \text{ мм}$; $C=63000 \text{ Н}$;

Из предварительной компоновки вала имеем:

$$l=425 \text{ мм}; a=212,5 \text{ мм}; b=212,5 \text{ мм}; x=y=15,5 \text{ мм}; c=95 \text{ мм}.$$

Модуль Юнга для стали равен: $E=2,06 \cdot 10^{11} \text{ м}$.

4.1 Расчёт на жёсткость

13.1.1 Определим приближённое значение силы тяжести:

$$m_p = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0,177^2 \cdot 0,123 = 25, \text{ кг} \quad (4.1)$$

13.1.2 Определим момент инерции участка вала:

$$J = \frac{\pi \cdot d_2^4}{64} = \frac{\pi \cdot (60 \cdot 10^{-3})^4}{64} = 6,4 \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2. \quad (4.2)$$

13.1.3 Приближённое значение силы тяжести

$$G_p = 9,81 \cdot m_p = 9,81 \cdot 25 = 245, \text{ Н}. \quad (4.3)$$

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

Для асинхронного двигателя с $h=180 \text{ мм}$ с достаточным приближением можно принять коэффициенты [1, с.248, табл.8.3]:

$$S_a = S_b = \frac{a^3 - x^3}{J} = \frac{0,2125^3 - 0,0155^3}{6,36 \cdot 10^{-7}} = 1,5 \cdot 10^4, \text{ м}^{-1}; \quad (4.4)$$

$$S_0 = (a^2 - x^2) / J = (0,2125^2 - 0,0155^2) / 6,36 \cdot 10^{-7} = 7,06 \cdot 10^4, \text{ м}^{-2}. \quad (4.5)$$

13.1.4 Прогиб вала под действием силы тяжести [1, с.245, ф.8.15]

$$f_G = \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) =$$

$$= \frac{245}{3 \cdot 0,425^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} \cdot (0,2125^2 \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 0,2125^2 \cdot 1,5 \cdot 10^4) = 2,99 \cdot 10^{-6}, \text{ м}, \quad (4.6)$$

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

13.1.5 Определим номинальный вращающий момент [1, с.246, ф.8.18]:

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n} = 9,55 \cdot \frac{30000}{3000} = 95,56 \text{ , } Н \cdot м. \quad (4.7)$$

13.1.6 Реакция передачи [1, с.246, ф.8.17]

$$F_{II} = \frac{k_n}{r} \cdot M_{ном} = \frac{0,3}{60 \cdot 10^{-3}} \cdot 95,56 = 477,7 \text{ , } Н, \quad (4.8)$$

где $k_n = 0,3$ коэффициент при передаче упругой кулачковой муфтой. Радиус упругой муфты $r = 60 \cdot 10^{-3}$.

13.1.7 Прогиб вала посредине сердечника ротора от реакции передачи [1, с.246, ф.8.19]

$$\begin{aligned} f_{II} &= \frac{F_{II} \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot \left[(1,5 \cdot l \cdot S_0 - S_b) \cdot a + b \cdot S_a \right] = \\ &= \frac{477,7 \cdot 0,095}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,425^2} \cdot ((1,5 \cdot 0,425 \cdot 7,06 \cdot 10^4 - 1,5 \cdot 10^4) \cdot \\ &\quad \cdot 0,2155 + 0,2155 \cdot 1,5 \cdot 10^4) = 3,89 \cdot 10^{-6} \text{ , } м \end{aligned} \quad (4.9)$$

13.1.8 Начальный эксцентриситет ротора [1, с.247, ф.8.20]:

$$\begin{aligned} e_0 &= 0,1 \cdot \delta + f_G + f_I = \\ &= 0,1 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} + 3,89 \cdot 10^{-6} + 2,99 \cdot 10^{-6} = 9,68 \cdot 10^{-5}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

13.1.9 Начальная сила одностороннего магнитного притяжения [1, с.247, ф.8.21]:

$$\begin{aligned} T_0 &= 0,15 \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = \\ &= 2,94 \cdot 0,177 \cdot 0,123 \cdot \frac{96,9 \cdot 10^{-6}}{9 \cdot 10^{-4}} \left(2,94 \cdot 0,177 \cdot 0,123 \cdot \frac{96,9 \cdot 10^{-6}}{9 \cdot 10^{-4}} \right) \cdot 10^5 = 689,7 \text{ , } Н \end{aligned}$$

13.1.10 Прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения [1, с.247, ф.8.22]

$$f_T = f_G \cdot \frac{T_0}{G_p} = 2,99 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{689,7}{245,4} = 8,41 \cdot 10^{-6} \text{ , } м. \quad (4.12)$$

13.1.11 Установившийся прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения [2, с. 79]

$$f_M = \frac{f_T}{1 - f_T/e_0} = \frac{8,41 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,087} = 9,21 \cdot 10^{-6} \text{ , } м. \quad (4.13)$$

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

[1, с.247, ф.8.24]

$$f = f_T + f_{II} + f_M = (3,88 + 2,99 + 9,21) \cdot 10^{-6} = 1,6 \cdot 10^{-5}, \text{ м.} \quad (4.14)$$

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

$$x = \frac{f}{\delta} \cdot 100\% = \frac{1,6 \cdot 10^{-5}}{0,9 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 0,018 \%. \quad (4.15)$$

13.1.14 Определение критической частоты вращения вала

Определим силу тяжести полумуфты

$$P_{шк} = 9,81 \cdot G_{шк}$$

$$\text{Где } G_{шк} = 4,4$$

$$P_{шк} = 9,81 \cdot 4,4 = 43,16$$

Определяем прогиб вала от тяжести полумуфты

$$f_{шк} = \frac{f_{II} \cdot P_{шк}}{G_p} = \frac{3,89 \cdot 10^{-6} \cdot 43,16}{477,8} = 3,51 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n_{кр} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - f_T/e_0}{f_G + f_{шк}}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - 0,087}{2,99 \cdot 10^{-6} + 3,51 \cdot 10^{-7}}} = 15674, \text{ об / мин} \quad (4.16)$$

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

Проверим это условие $15674 > 1300$. Условие выполняется.

4.2 Расчёт вала на прочность

13.2.1 Изгибающий момент в сечении А:

$$M_{шА} = k \cdot F_{II} \cdot 0,045 = 2 \cdot 477,8 \cdot 0,045 = 43, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.17)$$

где k – коэффициент перегрузки, $k = 2$.

13.2.2 Момент сопротивления при изгибе:

$$W_A = 0,1 \cdot d_2^3 = 0,1 \cdot 0,060^3 = 2,16 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^3. \quad (4.18)$$

13.2.3 Напряжение изгиба:

$$\sigma = \frac{1}{W_A} \sqrt{M_{шА}^2 + (k \cdot M_{ном})^2} =$$

$$= \frac{1}{2,16 \cdot 10^{-5}} \cdot \sqrt{43^2 + (2 \cdot 95,5)^2} = 7,35 \cdot 10^6, \text{ Па}, \quad (4.19)$$

где $\alpha = 0,8$ – отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допустимому напряжению при кручении, для реверсивных машин.

13.2.4 Изгибающий момент в сечении В

$$M_{\text{иВ}} = k \cdot F_{\text{П}} \cdot c = 2 \cdot 477,8 \cdot 0,095 = 90,7 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.20)$$

где T – нагрузка от установившегося магнитного напряжения:

$$T = \frac{T_0}{1 - \frac{f_T}{e_0}} = \frac{710,89}{1 - 0,175} = 861,06 \text{ Н}. \quad (4.21)$$

13.2.5 Момент сопротивления при изгибе:

$$W_B = 0,1 \cdot d_1^3 = 0,1 \cdot 0,048^3 = 1,1 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^3. \quad (4.22)$$

13.2.6 Напряжение изгиба будет для сечения А.

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{W_B} \sqrt{M_{\text{иВ}}^2 + (k \cdot M_{\text{ном}})^2} = \\ &= \frac{1}{1,1 \cdot 10^{-5}} \cdot \sqrt{90,8^2 + (2 \cdot 95,5)^2} = 1,61 \cdot 10^7, \text{ Па} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Нагруженными сечениями является сечение А и В для которого $\sigma_{\text{прА}} = 1,61 \cdot 10^7 < 0,7 \cdot 36 \cdot 10^7 \text{ Па}$, где предел текучести для стали $45 \cdot 36 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

Условие прочности выполняется, а, следовательно, вал можно использовать в данной электрической машине.

4.3 Выбор подшипников

Для подбора подшипников электрической машины, прежде всего, определяем реакции опор. Для двух опорного вала с соединительной муфтой реакции опоры определяются по следующим формулам:

Данные для расчёта: $G_P = 245 \text{ Н}$; $T_0 = 689,7 \text{ Н}$; $F_{II} = 477,7 \text{ Н}$.

13.3.1 Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник расположенный ближе к выходному концу вала [1, с.257, ф.8.37]:

$$\begin{aligned} R_a &= F_{II} \cdot \frac{c}{l} + (G_P + T_0) \cdot \frac{b}{l} = \\ &= 477,7 \cdot \frac{0,095}{0,425} + (245 + 689,7) \cdot \frac{0,2155}{0,425} = 574,36 \text{ , Н} . \end{aligned} \quad (4.27)$$

13.3.2 Принимаем при нагрузке с ударами и частыми сильными толчками ($k_H = 1,5$ - коэффициент учитывающий характер нагрузки двигателя). Для одно-рядных радиальных шарикоподшипников динамическая приведённая нагрузка на один подшипник [1, с.256, ф.8.35а]

$$Q_A = k_H \cdot R_a = 1,5 \cdot 574,36 = 861,5 \text{ , Н} . \quad (4.28)$$

Принимаем расчётный срок службы подшипников $L_D = 18000$ часов.

13.3.3 Необходимая динамическая грузоподъёмность шарикоподшипника [1, с.257, ф.8.38]:

$$C = \frac{Q_A}{25,6} \cdot \sqrt[3]{L_D \cdot n} = \frac{861,5}{25,6} \cdot \sqrt[3]{15000 \cdot 3000} = 11970 \text{ , Н} . \quad (4.29)$$

Наибольшая радиальная нагрузка на другой подшипник

$$\begin{aligned} R_b &= F_{II} \cdot \frac{c+l}{l} + (G_P + T_0) \cdot \frac{a}{l} = \\ &= 477,7 \cdot \frac{0,095 + 0,425}{0,425} + (245 + 689,7) \cdot \frac{0,2155}{0,425} = 1052 \text{ , Н} \end{aligned}$$

$$Q_B = k_H \cdot R_b = 1,5 \cdot 1052 = 1578 \text{ , Н}$$

$$C = \frac{Q_B}{25,6} \cdot \sqrt[3]{L_D \cdot n} = \frac{1052}{25,6} \cdot \sqrt[3]{15000 \cdot 3000} = 21928 \text{ , Н}$$

Выбираем шарикоподшипник серии 6312 с динамической грузоподъёмностью $C = 63000 \text{ Н}$.

5. Исследование частотного регулирования

Оценка пусковых и рабочих свойств двигателя, как частотно-регулируемого, проводится по механическим характеристикам двигателя, рассчитанным при разных напряжениях и частотах питающего напряжения. Предполагается, что напряжение и частота напряжения изменяются по закону $U_{1x} / f_{1x} = \text{const}$, обеспечивающего постоянство момента на валу двигателя.

При частотном пуске влияние насыщения и вытеснение тока на механическую характеристику двигателя обычно не учитывают. Это обусловлено следующими факторами. При частотном пуске по мере разгона двигателя частота и напряжение нарастают практически от нулевых до своих установившихся значений. Это исключает влияние вытеснения тока в стержнях на активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора. Сам преобразователь частоты (ПЧ) предусматривает ограничение по току обмотки статора, что дает возможность не учитывать влияние насыщения магнитопровода на индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, а, следовательно, и на механическую характеристику двигателя.

Следует так же отметить, что даже при прямом пуске влияние насыщения магнитопровода и вытеснение тока в стержнях на механическую характеристику двигателя проявляется только при изменении скольжения s от 1 до $(1 \dots 1,25)s_{\text{кр}}$, где $s_{\text{кр}}$ – критическое скольжение, при котором электромагнитный момент двигателя достигает максимального значения. Это позволяет рассчитывать механическую характеристику двигателя при изменении скольжения от $1,25s_{\text{кр}}$ до 0 без учёта насыщения и вытеснения тока, т.е. при постоянных параметрах (активных и индуктивных сопротивлениях обмоток), свойственных номинальному режиму работы двигателя.

Для расчета возьмем все данные которые получили при проектировании АД. Полезная мощность $P_{\text{н}}=37$ кВт, фазное напряжение $U_{\text{нф}}=220$ В, частота сети $f_1=50$ Гц, число пар полюсов $p=1$, число фаз $m_1=3$. Из электромагнитного расчёта получены параметры номинального режима работы двигателя. Активные сопротивления обмоток двигателя: статора $r_1=0,175$ Ом, короткозамкнутого ротора

$r'_2 = 0,107$ Ом. Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток: статора $x_1 = 0,389$ Ом, ротора $x'_2 = 0,366$ Ом. Индуктивное сопротивление взаимной индукции $x_{12} = 18,1$ Ом. Номинальный момент $M_n = 122,3$ Н·м.

В расчётах рабочих и пусковых характеристик двигателя обычно пользуются Г-образной схемой замещения, для которой необходимо пересчитать параметры двигателя по следующим формулам:

5.1 Активное сопротивление обмотки статора

$$r_1 = r'_1 \cdot c_1 = 0,175 \cdot 1,014 = 0,177 \text{ Ом},$$

5.2 Активное сопротивление обмотки ротора

$$r_2 = r'_2 \cdot c_1^2 = 0,107 \cdot 1,014^2 = 0,11 \text{ Ом};$$

5.3 Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$x_{\sigma 1} = x_1 \cdot c_1 = 0,389 \cdot 1,014 = 0,394 \text{ Ом}$$

5.4 Индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$x_{\sigma 2} = x'_2 \cdot c_1^2 = 0,244 \cdot 1,014^2 = 0,376 \text{ Ом},$$

где коэффициент $c_1 = 1 + x_1 / x_{12} = 0,389 / 18,1 = 1,014$

При частотном регулировании с изменением частоты индуктивные сопротивления обмоток изменяются, а индуктивности обмоток остаются постоянными и пересчитываются по следующим формулам:

5.5 Индуктивность рассеяния обмотки статора

$$L_{\sigma 1} = x_{\sigma 1} / \omega_1 = 0,394 / 314 = 0,001 \text{ Гн},$$

6.6 Индуктивность рассеяния обмотки ротора

$$L_{\sigma 2} = x_{\sigma 2} / \omega_1 = 0,376 / 314 = 0,001 \text{ Гн},$$

где

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 = 314 \text{ – угловая частота напряжения сети, рад/с.}$$

Далее сделаем расчет для 100 Гц а остальные расчеты внесем в таблицу 3 :

$f := 100 \text{ Гц}$

5.7 Синхронная угловая частота

$$\omega := 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 100 = 628$$

5.8 Синхронная частота вращения двигателя

$$n_1 = 60 \cdot f / p = 60 \cdot 100 / 1 = 6000 \text{ об/мин}$$

5.9 Фазное напряжение двигателя Uf_i в зависимости от частоты f_i рассчитывается по формуле

$$Uf = U_{\text{ком}} + \frac{U_{\text{нф}} - U_{\text{ком}}}{f_1} \cdot f = 220 + \frac{220 - 0}{50} \cdot 100 = 440, \text{В}$$

где $U_{\text{ком}}$ – напряжение компенсации, учитывающее падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора с уменьшением частоты.

Рассчитываются критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ и критическая частота вращения ротора $n_{\text{кр}}$ по формулам:

$$s_{\text{кр}} = r_2 / \sqrt{r_1^2 + \omega_i^2 \cdot (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})^2} = 0,11 / \sqrt{0,177^2 + 628^2 \cdot (0,001 + 0,001)^2} = 0,071;$$

5.10 Критическая частота:

$$n_{\text{кр}} = n_1 \cdot (1 - s_{\text{кр}}) = 6000 \cdot (1 - 0,071) = 5574, \text{об/мин}$$

К расчёту механических характеристик двигателя задается количество точек, $n_j := 100$. Рассчитывается шаг скольжения.

$$\Delta s = 1,25 \cdot s_{\text{кр}} / n_j.$$

В цикле $n := 0 \dots n_j$ определяются в Mathcad проводится расчет механической характеристики результат увидим на графике Рис.7

$$sf_j = \Delta s \cdot j$$

$$M_{j,i} = \frac{m_1 \cdot p \cdot (Uf)^2 \cdot r_2 \cdot sf}{\omega_i \cdot \left[(sf \cdot r_1)^2 + (sf \cdot \omega)^2 \cdot (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})^2 \right]}$$

и частота вращения ротора

$$n_{2,i} = n_1 \cdot (1 - sf_{j,i}).$$

5.11 При критических скольжениях $s_{\text{кр}i}$ рассчитываются критические (максимальные) электромагнитные моменты двигателя

Таблица 3 Расчетные точки механической характеристики

$sf_{j,i}$	n_2	$M_{\text{ЭМ}}$
0	6000	79.873

0.01	5940	146,907
0.02	5880	197,607
0.03	5760	232, 251
0.04	5700	253,328
0.05	5640	264,023
0.06	5580	267,31
0.08	5520	265,588
0.09	5460	260,641
0.1	5400	253,728
0.11	5340	245,713
0.12	5280	237,17
0.13	5220	228,475
0.14	5160	219,867

$$M_{кр_i} = \frac{m_1 \cdot p \cdot (Uf_i)^2 \cdot r_2 \cdot s_{кр_i}}{\omega_i \cdot \left[(s_{кр_i} \cdot r_1)^2 + (\omega_i)^2 \cdot (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 1 \cdot 440^2 \cdot 0.11 \cdot 0.071}{628 \left[(0.071 \cdot 0.17)^2 + (628)^2 \cdot (0.001 + 0.001)^2 \right]} = 267.3$$

При частотном регулировании по закону $Uf_i = U_{ком} + \frac{U_{нф} - U_{ком}}{f_1} \cdot f_i$ двигатель должен работать с постоянством момента на валу, например с моментом $M_n = 122,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

5.12 Перегрузочная способность двигателя характеризуется кратностью максимального момента и определяется, как

$$k_{M_i} = M_{кр_i} / M_n = 267.3 / 122,2 = 2,065.$$

Чтобы получить формулу для расчёта скольжения s_{n_i} , соответствующего заданному моменту M_n , воспользуемся выражением электромагнитного момента. Заменим $M_{эм_{j,i}}$ на M_n , $sf_{j,i}$ на s_{n_i} . Введем обозначения и рассчитаем:

$$cx_i = r_1^2 + \omega_i^2 \cdot (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})^2 = 0,117^2 \cdot 628 \cdot 0,002^2 = 2,4;$$

$$qx_i = r_2^2 / cx_i = 0,17^2 / 2,4 = 0,005;$$

$$px_i = \left[\frac{2 \cdot r_1 \cdot r_2}{cx_i} - \frac{m_1 \cdot p \cdot Uf_i^2 \cdot r_2}{\omega_i \cdot M_n \cdot cx_i} \right] = \left[\frac{2 \cdot 0,11 \cdot 0,17}{2,4} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 440^2 \cdot 0,11}{628 \cdot 122,3 \cdot 2,4} \right] = 0,31$$

При принятых обозначениях выражение электромагнитного момента сводится к квадратному уравнению вида $s_{n_i}^2 + px_i \cdot s_{n_i} + qx_i = 0$.

5.13 Формула для расчёта номинального скольжения получается из решения квадратного уравнения и записывается в виде:

$$s_{n_i} = \frac{px_i}{2} - \sqrt{\left(\frac{px_i}{2}\right)^2 - qx_i} = \frac{2,4}{2} - \sqrt{\left(\frac{2,4}{2}\right)^2} - 0,005 = 0,017.$$

6.14 Частота вращения ротора при номинальном скольжении

$$n_{2x_i} = (1 - s_{n_i}) \cdot n_1 (1 - 0,017) = 5897.$$

Механические характеристики двигателя представлены на рис.8,9.

Таблица 4. Расчет для частот 10, 50, 100 Гц

F	ω	n_1	Uf	$n_{кр}$	$s_{кр}$	$M_{кр}$	k_m	S_n	n_n
100	628	6000	440	5575	0.071	267	2.065	0.017	5897
50	314	3000	220	3650	0.139	239	1.897	0.035	2894
10	62	600	44	319	0.468	112	0.912	0.34	362

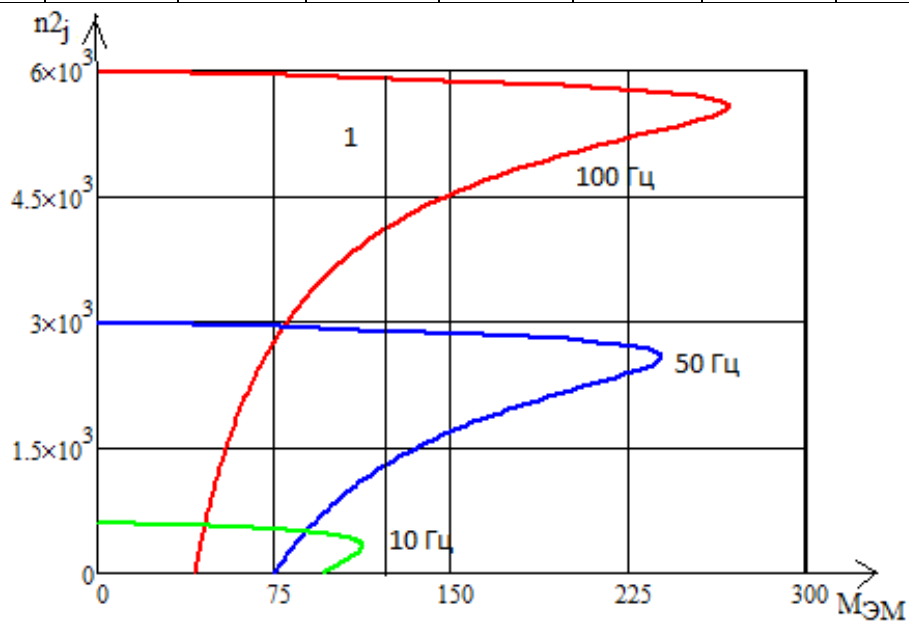


Рис. 10 Механические характеристики двигателя

Прямая линия (рис.8) соответствует нагрузочному моменту двигателя $M_n = 122,3$ Н·м. Точки пересечения прямой 1 с механическими характеристиками соответствуют как номинальному скольжению s_{n_i} , так и номинальной частоте враще-

ния ротора n_{2x_i} . Точки пересечения механических характеристик с осью абсцисс соответствуют синхронной частоте вращения ротора.

С уменьшением частоты уменьшается максимальный момент двигателя, что при постоянстве момента на валу двигателя (прямая 1, Рис.8) приводит к снижению перегрузочной способности двигателя. Например, при уменьшении частоты с 10 до 50 Гц перегрузочная способность двигателя снизилась с 1,89 до 0,9 о.е. Допустимая перегрузочная способность для частотно-регулируемых двигателей должна быть не менее 1,2 о.е. соответственно при 10 Гц двигатель может выйти из строя

При работе двигателя с постоянством момента на валу с уменьшением частоты возрастают номинальное и критическое скольжения двигателя (рис.9), причем более заметно при низких частотах.

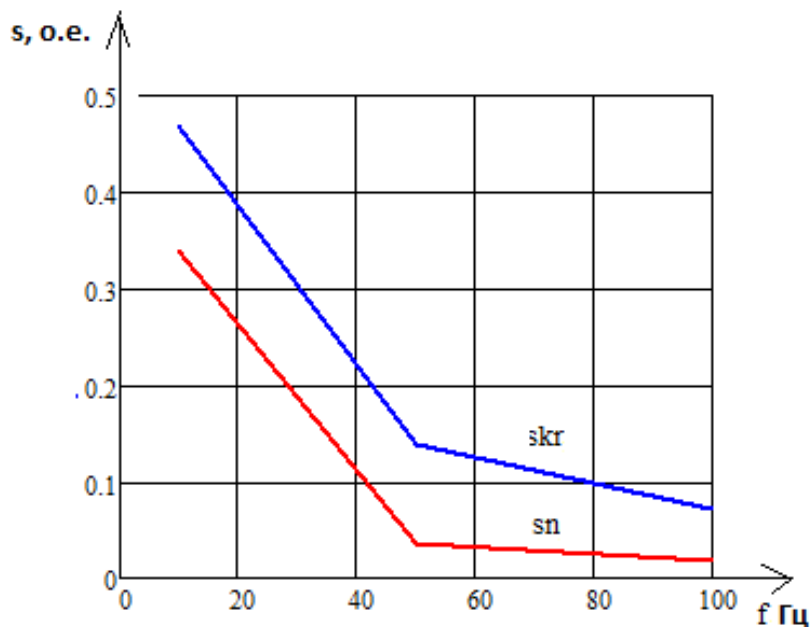


Рис. 11. Зависимость критического скольжения и номинального скольжения двигателя от частоты

Например, для этого двигателя при увеличении частоты с 10 до 100 Гц понижается критическое скольжения от 0,48 до 0,08 о.е. При этом номинальное скольжение также возрастает от 0,035 до 0,02 о.е. Резкий рост номинального скольжения при низких частотах приводит к резкому возрастанию электрических потерь в обмотке ротора, к резкому снижению КПД двигателя. Резкое возрастание номинального скольжения при низких частотах объясняется влиянием на механическую характеристику двигателя падения напряжения на активном сопротивле-

нии обмотки статора. С целью повышения перегрузочной способности, снижения номинального скольжения, повышения КПД двигателя рекомендуется компенсация напряжения, т.е. принять $U_{\text{ком}} > 0$.

Заключение

В данной работе был спроектирован трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. В качестве базовой модели выбрана конструкция асинхронных двигателей серии ВА, которые предназначены для наиболее широкого применения в различных отраслях народного хозяйства.

В начале расчета двигателя были получены значения электромагнитных нагрузок A и B_s , входящие в рекомендуемые пределы, основанные на исследовании работающих двигателей серии 4А. От электромагнитных нагрузок зависят не только размеры машины, а также и ее характеристики. Число пазов статора принято стандартному и равно $Z_1=36$, т.е. обмотка имеет целое число пазов на полюс и фазу ($q=4$).

Плотность тока в обмотке статора получилась значительной, что характерно для двигателей небольшой и средней мощности. Для обмотки статора используется стандартный эмалированный провод с диаметром $d_{из}=1.485\text{мм}$, это позволяет применять механизированную укладку обмотки, коэффициент заполнения паза соответствует механизированной укладке. В расчете зубцовой зоны статора была принята конфигурация пазов, при которой зубцы имеют постоянное поперечное сечение по всей высоте, т.е. в зубцах не будет участков с разной индукцией.

Воздушный зазор был выбран небольшим, что приводит к уменьшению магнитодвижущей силы магнитной цепи и тока намагничивания. При этом будут уменьшаться суммарные потери, благодаря чему в расчете рабочих характеристик повысились значения $\cos \varphi$ и КПД. Число пазов ротора выбрано по рекомендациям, основанным на изучении влияния соотношений числа зубцов статора и ротора на кривую момента, а также шумы и вибрации. Паза ротора выполнены без скоса. При расчете рабочих характеристик получили уточненные значения номинального тока обмотки статора и мощности, потребляемой двигателем, которые меньше, чем принятые вначале работы предварительно.

В расчете пусковых характеристик кратность пускового тока получилась в допустимых пределах, установленных стандартом (ГОСТ 19523 - 74), а пусковой

момент удовлетворяющим техническому заданию, его кратность превысила заданного значения. Это явилось следствием таких факторов, как довольно высокое сопротивление фазы обмотки ротора, высокая и тонкая форма пазов ротора, в которых более сильно проявляется эффект вытеснения тока, проявляющегося в результате действия потока пазового рассеяния. Таким образом можно задавать пусковой момент меняя плотность тока в обмотке ротора или индукцию в зубцах ротора.

В специальной части рассмотренно частотное регулирование для этого двигателя при увеличении частоты с 10 до 100 Гц понижается критическое скольжения от 0,48 до 0,08 о.е. При этом номинальное скольжение также возрастает от 0,035 до 0,02 о.е. Резкий рост номинального скольжения при низких частотах приводит к резкому возрастанию электрических потерь в обмотке ротора, к резкому снижению КПД двигателя. Резкое возрастание номинального скольжения при низких частотах объясняется влиянием на механическую характеристику двигателя падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. С целью повышения перегрузочной способности, снижения номинального скольжения, повышения КПД двигателя рекомендуется компенсация напряжения, т.е. принять $U_{\text{ком}} > 0$.

При выполнении технологической части дипломного проекта была разработана схема сборки статора и маршрутная технология к нему. Выбрано оборудование и оснастка. Определены нормы времени и необходимое количество оборудования для выполнения требуемой программы выпуска. Кол-во 3500 шт в год.

В экономической части проведено планирование дипломного проекта. Произведен расчет ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В разделе «Социальная ответственность» проведён анализ опасных и вредных факторов, возникающих в процессе сборки статора. Затронуты вопросы техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности. Произведён расчёт освещения для помещения сборки статора.