

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие промышленности, транспорта, сельского хозяйства и новых отраслей техники — авиации, радиолокации, телевидения и специальных видов техники — вызвало широкое применение автоматизации управления различными рабочими процессами и исполнительными механизмами. Эта автоматизация немыслима без разнообразного применения различных маломощных электродвигателей постоянного и переменного тока в диапазоне мощностей от нескольких единиц до сотен ватт как в качестве управляющих, так и исполнительных элементов в схемах автоматики. Вместе с этим электрические машины малой мощности широко используют не только в автоматических устройствах, но также и для других разнообразных целей как в промышленности, так и в домашнем быту.

Следует отметить, что электрические машины малой мощности применяют на практике главным образом в качестве электродвигателей. Однако встречается ряд специальных установок, в которых наряду с электродвигателями имеют применение также и маломощные генераторы, преобразователи и электромашинные усилители.

В настоящее время электродвигатели и генераторы малой мощности занимают важное место в современной технике, так как практически ни одна отрасль техники, использующая в той или иной мере принципы электротехники, почти не обходится без применения электродвигателей малых мощностей в качестве привода или исполнительного элемента.

Целью данной работы является проектирование маломощного однофазного конденсаторного двигателя с постоянно включенной емкостью для привода бытового вентилятора.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Области применения

Области применения электродвигателей, генераторов и преобразователей постоянного и переменного тока в диапазон мощностей от долей ватта до нескольких сотен ватт весьма разнообразны.

Важнейшими из этих областей применения являются следующие:

- а) установки автоматического управления и регулирования в промышленности и в специальной технике;
- б) устройства проводной и радиосвязи (телеграфия, сигнализация, телевидение, радиолокация и др.);
- в) счетно-решающие приборы и устройства;
- г) гироскопические приборы;
- д) самолеты, автомашины, тракторы и другие движущиеся объекты;
- е) всевозможные механизмы дистанционного управления;
- ж) различные самопишущие приборы, часы, звуковое кино;
- з) часовая промышленность;
- и) индивидуальный привод веретен в текстильной промышленности;
- к) вентиляторы, дрели, сирены и другие устройства;
- л) мелкие электромеханизмы в сельском хозяйстве;
- м) установки домашнего быта (патефоны, швейные и полоторные машины, пылесосы, холодильники и т. д.).

Имеется также целый ряд других установок и устройств, в которых широко используются электрические машины малой мощности.

В этих установках, в зависимости от их назначения, применяются маломощные электродвигатели и генераторы постоянного тока, вращающиеся преобразователи, электромашинные усилители, универсальные коллекторные двигатели, синхронные реактивные и гистерезисные двигатели, асинхронные двигатели, сельсины и вращающиеся

трансформаторы в диапазоне мощностей от долей ватта до нескольких сотен ватт. Наименьшая мощностью применяемых и строящихся в настоящее время электродвигателей постоянного тока достигает величины порядка нескольких десятых долей ватта при скоростях вращения до 10000-15000 об/мин.

Минимальная мощность построенных асинхронных двигателей достигает порядка нескольких долей ватта на 2000 - 2500 об/мин при частоте 50 гц, но имеются так называемые малоинерционные управляемые асинхронные двигатели с тонкостенным немагнитным полым ротором, а также с беличьей клеткой на 8000 - 12 000 об/мин и выше при частоте 400 гц.

Встречаются также сверхвысокоскоростные асинхронные двигатели для гироскопов на скорости вращения 20 000- - 60 000 об/мин при питании от источника переменного тока с частотой 400 - 1200 гц и асинхронные двигатели малой мощности для внутришлифовальных станков на скорости вращения до 120000 - 180000 об/мин при частотах питания до 2000 - 3000 гц.

1.2. Требования, предъявляемые к проектируемым электрическим машинам

Общие технические требования. Электрические машины должны иметь высокую надежность работы, хорошие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), по возможности минимальные габаритно-установочные размеры, массу и стоимость: они должны быть простыми по конструкции, не сложными в изготовлении и удобными в обслуживании и эксплуатации. Общие технические требования для машин общепромышленного применения сформулированы в специальном ГОСТе, а для машин специального исполнения — в соответствующих ГОСТах, учитывающих специфические условия работы этих машин.

Каждая электрическая машина рассчитана на работу при вполне определенных условиях эксплуатации: режиме нагрузки, допускаемых

перегрузках, напряжении, частоте переменного тока, частоте вращения, температуре охлаждающей среды, высоте над уровнем моря, влажности и др. При этом машина должна развивать номинальную мощность и работать без аварий и повреждений в течение установленного времени.

Надежность работы машины обеспечивается путем закладки достаточных запасов при проектировании, применения высококачественной технологии изготовления и правильной эксплуатации (работы машины в режимах, для которых она спроектирована, и своевременного выполнения профилактических ремонтов).

При проектировании должны быть обеспечены:

- механическая прочность всех элементов машины (вала, станины, ротора, статора, деталей крепления обмоток и пр.). В частности, машины должны без повреждений и деформаций выдерживать кратковременные перегрузки по току и кратковременные превышения номинальной частоты вращения;
- электрическая прочность изоляции обмоток, которая не должна терять своих качеств при длительной эксплуатации машины. Изоляция обмоток относительно корпуса, изоляция между обмотками и изоляция между витками обмоток должна выдерживать повышенное по сравнению с номинальным испытательное напряжение. Сопротивление изоляции всех обмоток должно соответствовать значениям, указанным в ГОСТе;
- достаточное охлаждение элементов машины, в которых при работе выделяется теплота (магнитопровода, скользящих контактов, обмоток, подшипников).

Наиболее чувствительными к нагреванию являются электроизоляционные материалы обмоток, от качества которых зависит допустимый уровень нагрева электрической машины. Максимальные температуры всех частей машины не должны превышать значений, указанных в ГОСТах.

Требования, предъявляемые к электрическим микромашинам автоматических устройств. Электрические микромашины кроме общих технических требований должны также обеспечивать:

- высокую точность преобразования входного сигнала в выходной, например частоту вращения в выходное напряжение в тахогенераторах или управляющее напряжение в частоту вращения в исполнительных двигателях;
- стабильность выходных характеристик при изменении условий эксплуатации, например, температуры окружающей среды;
- линейность характеристик при изменении управляющего сигнала и нагрузки;
- высокое быстродействие;
- широкий диапазон регулирования.

Для выполнения этих требований при создании электрической микромашины в ряде случаев отступают от принципов оптимального проектирования, принятых для машин средней и большой мощности. Так, например, для уменьшения погрешностей в информационных электрических микромашинах выбирают относительно небольшие электромагнитные нагрузки и увеличивают воздушный зазор между статором и ротором. В исполнительных двигателях и других микромашинах, выполняющих силовые функции, для увеличения развиваемого машиной момента электромагнитные нагрузки выбирают максимально возможными по условиям отвода теплоты от машины. Все это приводит к ухудшению энергетических показателей — КПД и коэффициента мощности, которые весьма важны для электрических машин средней и большой мощности, однако в микромашинах показатели, характеризующие точность, быстродействие, диапазон регулирования, могут иметь преобладающее значение.

Кроме перечисленных требований к отдельным видам микромашин предъявляют специфические требования, обусловленные особенностями их эксплуатации. Так, микромашины, применяемые в звукозаписывающей и звуковоспроизводящей аппаратуре, должны иметь низкий уровень

создаваемых шумов; микромашины, используемые в радиоаппаратуре, не должны создавать значительных радиопомех; при установке их, например, в ядерных реакторах и космических аппаратах должна быть обеспечена радиационная устойчивость. Все это также накладывает определенные ограничения на конструкции соответствующих микромашин и приводит к увеличению их массы, габаритных размеров и ухудшению энергетических показателей.

1.3. Конденсаторный двигатель

Конденсаторный двигатель - двигатель с расщепленной фазой, у которого в цепь вспомогательной обмотки постоянно включен конденсатор.

Конденсаторный двигатель, хотя и питается от однофазной сети, по существу является двухфазным, схема ёмкостного сдвига фаз конденсаторного двигателя с постоянно включенной емкостью приведена на рисунке 2.

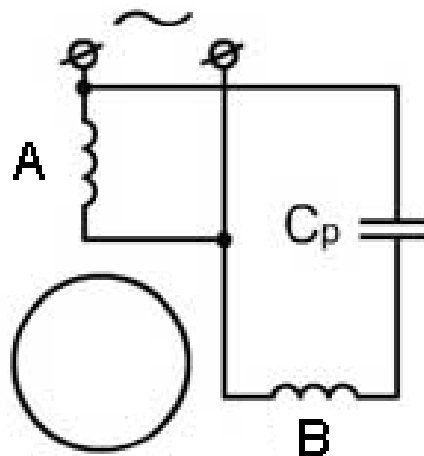


Рисунок -1 – Ёмкостной сдвиг фаз с рабочим конденсатором

Конструктивно конденсаторный асинхронный двигатель представляет из себя двухфазный двигатель. На статоре располагают две обмотки фаз, оси которых смещены относительно друг друга на 90 электрических градусов. Обе обмотки занимают равное число пазов. Питание электродвигателя осуществляется от однофазной сети переменного тока, при этом одна обмотка подключается непосредственно к сети, а другая через конденсатор. Таким

образом, в отличие от однофазного двигателя, который после пуска работает с пульсирующим магнитным потоком, конденсаторный электродвигатель работает с вращающимся магнитным потоком.

Емкость рабочего конденсатора, требуемая для получения кругового вращающегося поля, определяется по формуле:

$$C_{\text{раб}} = \frac{I_B \cos \varphi_A}{2\pi f U} = \frac{I_A \cos \varphi_A}{2\pi f U k},$$

- где $C_{\text{раб}}$ — емкость рабочего конденсатора, Ф,
- I_A — ток обмотки А;
- I_B — ток обмотки В;
- φ_A - угол фазового сдвига между током I_A и напряжением питания U при круговом вращающемся поле, градусов,
- U - напряжение питания сети, В;
- f - частота сети, Гц;
- k - коэффициент, определяемый отношением эффективных чисел витков в обмотках фаз статора В и А;

$$k = \frac{\omega_B k_{\text{обВ}}}{\omega_A k_{\text{обА}}},$$

- где ω_A, ω_B — число последовательно соединенных витков в обмотки фазы А и В статора;
- $k_{\text{обА}}$ и $k_{\text{обВ}}$ — обмоточный коэффициент обмоток фаз статора А и В.

Для повышения пускового момента параллельно рабочему конденсатору C_p включают пусковой конденсатор $C_{\text{п}}$. Для создания пускового момента, равного номинальному, требуется пусковой конденсатор $C_{\text{п}}$ в 2 - 2,5 раза больше рабочего C_p .

2. РАСЧЕТ ОДНОФАЗНОГО КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННО ВКЛЮЧЕННОЙ ЕМКОСТЬЮ

В данном разделе произведен расчет однофазного конденсаторного двигателя с постоянно включенной мощностью по методике «Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока». М-Л, ГОСэнергоиздат, 1961г. Лопухина Е.М, Сомухина Г.С. [1].

Данная методика представлена в системе единиц измерения МКС, которая использовалась в советское время, поэтому по ходу расчета будет произведен перевод в международную систему СИ.

2.1. Определение главных размеров

Данные проектируемого двигателя:

Номинальная мощность $P_H = 60 \text{ Вт}$;

Частота сети питания: $f = 50 \text{ Гц}$;

Число фаз $m=1$;

Синхронная скорость вращения $n_c = 3000 \text{ об/с}$;

Номинальное напряжение $U_H = 220 \text{ В}$;

Окружающая температура $T_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$;

Число полюсов $p=1$.

Для однофазной машины с пусковым моментом $\beta_n = 2,5$.

Номинальная мощность эквивалентной трехфазной машины рассчитывается по формуле:

$$P_{H3} = P_H \cdot \beta_n = 60 \cdot 2,5 = 150 \text{ Вт}.$$

С помощью графика зависимости энергетических показателей от номинальной мощности [1, стр. 21 рис.1.1] предварительно определяем энергетические показатели двигателя:

Принимаем $\eta_3 \cos_3 = 0,56$ о.е.

Тогда расчетная мощность можно вычислить по формуле:

$$P_{с3} = \frac{P_{н3}}{\eta_3 \cos_3} = \frac{150}{0,56} = 267,857 \text{ Вт.}$$

Определим наружный диаметр статора по формуле:

$$Da = \frac{8,15}{K_D} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{с3} \cdot p}{\frac{B_\delta}{100} \cdot A \cdot \lambda \cdot \frac{n_v}{1000}}} = \frac{8,15}{0,58} \cdot \sqrt[3]{\frac{267,857 \cdot 1}{\frac{4000}{100} \cdot 110 \cdot 0,47 \cdot \frac{3000}{1000}}} = 0,106 \text{ м.}$$

где коэффициент $K_D = f(2p)$ принимается $K_D = 0,58$;

Электромагнитные нагрузки: линейная нагрузка A , индукция в воздушном зазоре B_δ выбираются следующими: $A = 11000$ а/м и $B_\delta = 0,4$ Тл. Из условий оптимального раскроя листа, окончательно выбираем наружный диаметр $Da = 100$ мм.

Проверяем машинные постоянные при выбранном наружном диаметре статора с помощью формул:

$$C = \frac{Da^3 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot K_D}{P_{с3} \cdot 2 \cdot p} = \frac{100^3 \cdot 0,47 \cdot 3,14 \cdot 0,58}{267,857 \cdot 2 \cdot 1} = 1599;$$

$$C = \frac{(Da \cdot K_D)^3 \cdot \lambda \cdot \pi}{2 \cdot p \cdot \frac{P_H}{n_c}} = \frac{(100 \cdot 0,58)^3 \cdot 0,47 \cdot 3,14}{2 \cdot 1 \cdot \frac{150}{3000}} = 7202 \cdot 10^3;$$

Сравнение показателей показывает, что проектируемая машина мало отличается от существующих.

Внутренний диаметр статора рассчитаем по формуле:

$$D = Da \cdot K_D = 100 \cdot 0,58 = 58 \text{ мм};$$

Полюсное деление вычисляется по формуле:

$$\tau = \frac{D \cdot \pi}{2 \cdot p} = \frac{58 \cdot 3,14}{2 \cdot 1} = 91,66 \text{ мм};$$

Тогда расчетная длина статора:

$$l = \lambda \cdot \tau = 0,47 \cdot 91,66 = 43,18 \text{ см}; \text{ Принимаем } l = 44 \text{ мм}.$$

2.2. Обмотка статора

В конденсаторных двигателях единой серии нулевого габарита осуществляется вариант $q=Qa=Qb=4$.

Принимаем число пазов на статоре $Z_1 = 16$;

Выбираем на статоре однослойную двухплоскостную обмотку с шагом

$$y = \frac{Z_1}{2 \cdot p} = 8.$$

Обмоточный коэффициент для двухфазной обмотки:

$$k_0 = \frac{0,707}{q \cdot \sin(\frac{\pi}{4q})} = 0,906;$$

Предварительно принимаем коэффициенты согласно:

$k_z = 1,1$ – коэффициент насыщения;

$a_\delta = 0,665$ – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;

$B_\delta = 5000 \text{ Гс} \in 0,5 \text{ Тл};$

Магнитный ток в воздушном зазоре определяем по формуле:

$$\Phi = a_\delta \cdot \tau \cdot l \cdot B_\delta = 0,665 \cdot 91,66 \cdot 44 \cdot 5000 = 1,375 \cdot 10^{-3} \text{ мкс};$$

Тогда число витков главной обмотки можно будет определить следующим образом:

$$\omega_{sa} = \frac{U_H \cdot k_E \cdot 10^8}{4 \cdot k_B 50 \cdot \Phi \cdot k_0} = \frac{220 \cdot 0,9 \cdot 10^8}{4 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 137500 \cdot 0,906} = 718,348;$$

Где коэффициент k_E предварительно принимаем $k_E = 0,9$;

Окончательно принимаем $\omega_{sa} = 720$ витков.

Число проводников в пазу определяется по формуле:

$$u_{nA} = \frac{\omega_{sa} \cdot a}{p \cdot q} = \frac{720 \cdot 1}{1 \cdot 4} = 180, \text{ где } a - \text{число параллельных ветвей (принимаем } a=1 \text{)}.$$

Окончательное число проводников в пазу принимаем $u_{nA} = 180$.

Предварительно определяем номинальный ток в главной обмотке по формуле:

$$I_{nA} = \frac{P_H}{\eta_3 \cos_3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_H} = \frac{60}{0,56 \cdot \sqrt{2} \cdot U_H} = 0,344 \text{ А},$$

Находим сечение провода статора при выбранной плотности тока по формуле:

$$S_{SA} = I_{nA} \frac{1}{a \cdot \Delta_S} = \frac{0,344}{1 \cdot 5,5} = 0,063 \text{ мм}^2,$$

Где $\Delta_S = 5,5 \text{ А/мм}^2$ - плотность тока.

По найденному сечению выбираем провод марки ПЭВ-2:

$S_{SA} = 0,0636 \text{ мм}^2$ – площадь сечения;

$d_{гол} = 0,28 \text{ мм}$ – диаметр голого провода;

$d_{из} = 0,325 \text{ мм}$ – диаметр изолированного провода.

Сечение меди в пазу:

$$S_{MSA} = S_{SA} \cdot u_{nA} = 0,0636 \cdot 180 = 11,448 \text{ мм}^2$$

2.3. Пазы и ярмо статора

Высота ярма вычисляется по формуле:

$$h_{ас} = 0,2 \cdot b_{zs} \frac{Z_s}{p} = 0,2 \cdot 4,5 \cdot \frac{16}{1} = 14,4 \text{ мм},$$

Где $b_{zs0} = 4,5 \text{ мм}$ - ширина зубца.

В процессе расчета паза магнитной цепи величина спинки взята $h_{ас} = 15 \text{ мм}$.

Выбираем размеры прорези:

Высота $h_{us} = 0,5 \text{ мм}$;

Ширина $b_{us} = d_{из} 1,1 = 1,425 \text{ мм}$.

принимаем $b_{us} = 1,5 \text{ мм}$.

Размеры полуовального паза:

$$d_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{us}) - b_{zs} \cdot Z_s}{Z_s - \pi} = \frac{3,14 \cdot (58 + 2 \cdot 1,5) - 4,5 \cdot 16}{16 - \pi} = 8,816 \text{ мм};$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (Da - 2 \cdot h_{ас})}{Z_s} = \frac{3,14 \cdot (100 - 2 \cdot 15)}{16} = 9,244 \text{ мм}.$$

Высота паза:

$$h_{нс} = \frac{Da - D - 2 \cdot h_{ас}}{2} = \frac{100 - 58 - 2 \cdot 15}{2} = 6 \text{ мм};$$

$$h_{12} = h_{нс} - (h_3 + 2 \cdot h_{us}) = 4 \text{ мм}.$$

Площадь паза:

$$S_{нс} = 0,5 \cdot [h_{12} \cdot (b_1 + b_2) + h_3 \cdot (b_1 + b_{us})] = 37,932 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения для главной обмотки:

$$k_{зан} = \frac{d_{из}^2 \cdot u_{нА}}{S_{нс} - S_{из}} = \frac{0,325^2 \cdot 180}{37,932 - 9} = 0,657.$$

2.4. Сопротивление обмоток статора и ротора

Рассчитываем среднюю длину лобовой части:

$$l_{лс} = \left[k_y \cdot \pi \cdot \frac{(D + h_{нс})}{2 \cdot p} \cdot \frac{y_{cp}}{\tau} + 2 \cdot B \right] = \left[1,2 \cdot 3,14 \cdot \frac{(58 + 6)}{2 \cdot 1} \cdot \frac{7}{9,4} + 2 \cdot 1 \right] = 84,923 \text{ мм},$$

Принимаем $l_{лс} = 8,5 \text{ см}$.

Средняя длина полувитка:

$$l_{cp} = l + l_{лс} = 8,5 + 4,4 = 12,9 \text{ см}, \text{ принимаем } l_{cp} = 129 \text{ мм};$$

Общая длина провода главной обмотки:

$$L_{SA} = 2 \cdot l_{cp} \cdot \omega_{SA} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 12,9 \cdot 720 \cdot 10^{-2} = 185,76 \text{ см}, \text{ принимаем } L_{SA} = 1857,6 \text{ мм};$$

Активное сопротивление главной обмотки:

$$r_{SA} = \rho \cdot \frac{L_{SA}}{S_{SA} \cdot a} = \frac{1}{46} \cdot \frac{185,76}{63,495 \cdot 1} = 63,495 \text{ Ом};$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния однослойной обмотки и полуовального паза:

$$\lambda_n = \left[\frac{h_1}{3 \cdot d_1} \cdot k_3 + \left(0,785 - \frac{b_{us}}{2 \cdot d_1} + \frac{h_2}{d_1} + \frac{h_{us}}{b_{us}} \right) \cdot k_{\beta 1} \right] = \left[\frac{3,83}{3 \cdot 8,816} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{1,5}{2 \cdot 8,816} + \frac{0,3}{d_1} + \frac{0,5}{1,5} \right) \cdot 1 \right] = 1,212$$

$$\xi_S = 2 \cdot \left(F \cdot k_{\beta 1} - \frac{F_1 \cdot N}{2 \cdot Q} \right) - \Delta_Z \cdot \left(G \cdot k_{\beta 1} - \frac{G_1 \cdot N}{2 \cdot Q} \right) - k_0^2 \cdot (1,18^2) \cdot (1 + \beta_{ck}^2) = 0,34$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_\delta = \frac{t_s}{11,9 \cdot 0,3 \cdot k_\delta} \cdot \xi_S = \frac{11}{11,9 \cdot 0,3 \cdot 1,17} = 0,896;$$

$$\lambda_L = 0,27 \cdot \frac{q}{l} \cdot (l_{лс} - 0,64 \cdot \tau) = 0,27 \cdot \frac{4}{4,4} \cdot (8,5 - 0,64 \cdot 9,4) = 0,61.$$

$$\text{Где } t_R = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot \delta)}{Z_R} = \frac{3,14 \cdot (58 - 2 \cdot 0,03)}{15} \approx 12 \text{ мм}; t_S = \frac{\pi \cdot D}{Z_S} = \frac{3,14 \cdot 58}{16} \approx 11 \text{ мм} -$$

зубцовые деления статора и ротора.

Суммарный коэффициент магнитной проводимости:

$$\sum \lambda_{\delta} = \lambda_n + \lambda_{\delta} + \lambda_{\text{л}} = 0,896 + 0,61 + 1,212 = 2,718.$$

Индуктивное сопротивление главной обмотки статора:

$$x_{\text{сА}} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{сА}}}{100} \right)^2 \cdot \frac{1}{p \cdot q} \cdot \sum \lambda = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{720}{100} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 \cdot 4} \cdot 2,718 = 12,245 \text{ Ом.}$$

2.5. Выбор размеров ротора

Рассчитываем индуктивное сопротивление ротора, предварительно принимая

$$b_{\text{вр}} = 1,5 \text{ мм и } h_{\text{вр}} = 0,645 \text{ мм.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеивания ротора при $k_{\mu} = 1$:

$$\lambda_{\text{нР}} = \left(0,785 - \frac{b_{\text{вр}}}{2 \cdot d_{\text{Р}}} \right) \cdot k_{\mu} + \frac{h_{\text{вр}}}{b_{\text{вр}}} = \left(0,785 - \frac{1,5}{2 \cdot 5,2} \right) \cdot 1 + \frac{0,645}{1,5} = 1,071;$$

Для определения коэффициента магнитной проводимости дифференциального рассеивания находим коэффициенты [1, стр.82 рис.4.7]
 $\Delta_z = 0,05$, $\xi_{\text{Р}} = 1 - \Delta_z = 0,95$.

Тогда коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеивания можно найти по формуле:

$$\lambda_{\delta} = \frac{t_{\text{Р}}}{11,9 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} = \frac{12}{11,9 \cdot 0,3 \cdot 1} = 1,071,$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеивания:

$$\lambda_{\text{лР}} = \frac{2,9 \cdot D_k}{Z_{\text{Р}} \cdot l_{\text{см}} \cdot \left(2 \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_{\text{Р}}} \right) \right)^2} \cdot \log \left[\frac{4,7 \cdot D_k}{2 \cdot (a + b)} \right] = 1,216,$$

Тогда суммарный коэффициент магнитной проводимости:

$$\sum \lambda_R = \lambda_{nR} + \lambda_{\delta R} + \lambda_{jR} = 1,071 + 2,729 + 1,216 = 5,016.$$

$$\sum \lambda'_R = \sum \lambda_R \cdot \frac{l_R \cdot Z_S}{l_S \cdot Z_R} \cdot \left(\frac{k_0}{k_{0R}} \right)^2 = 5,016 \cdot \frac{4 \cdot 16}{4,4 \cdot 15} \cdot \left(\frac{0,96}{0,99} \right)^2 = 4,073;$$

Приведенное индуктивное сопротивление ротора:

$$x_R = x_{SA} \cdot \frac{\sum \lambda'_R}{\sum \lambda_R} = 12,245 \cdot \frac{4,073}{5,016} = 9,945 \text{ Ом.}$$

2.6. Намагничивающий ток

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_\delta = 1,6 \cdot k_\delta \cdot B_\delta \cdot \delta = 1,6 \cdot 1,17 \cdot 5000 \cdot 0,03 = 280,8 \text{ А,}$$

Индукция в зубцах при $k_c = 0,93$:

$$B_{zs} = B_\delta \cdot \frac{t_s}{b_{zs} \cdot k_c} = 5000 \cdot \frac{11}{3,3 \cdot 0,93} = 13,14 \cdot 10^3 \text{ Гс, Принимаем } B_{zs} = 1,314 \text{ Тл;}$$

Магнитное напряжение зубцов статора:

$$F_{zs} = H_{zs} \cdot 2 \cdot h_{zs} = 12,8 \cdot 2 \cdot 0,85 = 21,76 \text{ А;}$$

Индукция в ярме статора:

$$B_{as} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{as} \cdot l \cdot k_c} = \frac{1,375 \cdot 10^5}{2 \cdot 1,025 \cdot 4,4 \cdot 0,93} = 16,39 \cdot 10^3 \text{ Гс, принимаем } B_{as} = 1,639 \text{ Тл;}$$

$$F_{as} = \xi \cdot H_{as} \cdot \pi \cdot \frac{(Da - h_{as})}{2 \cdot p} = 0,4 \cdot 11,4 \cdot 3,14 \cdot \frac{(100 - 1,025)}{2 \cdot 1} = 64,286 \text{ А;}$$

Индукция в зубцах ротора находится по формуле:

$$B_{zR} = B_\delta \cdot \frac{t_s}{b_{zR} \cdot k_c} = 5000 \cdot \frac{11}{4,87 \cdot 0,93} = 13,25 \cdot 10^3 \text{ Гс, принимаем } B_{zR} = 1,325 \text{ Тл;}$$

Магнитное напряжение зубцов ротора:

$$F_{zR} = H_{zR} \cdot 2 \cdot h_{zR} = 5,14 \cdot 2 \cdot 0,518 = 5,325 \text{ А,}$$

Индукция в ярме ротора:

$$B_{aR} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{aR} \cdot k_c} = \frac{1,375}{2 \cdot 1,36 \cdot 0,93} = 12,36 \cdot 10^3 \text{ Гс, принимаем } B_{aR} = 1,236 \text{ Тл};$$

Магнитное напряжение ярма ротора при $d_B = 1,62$:

$$F_{aS} = \xi \cdot H_{aR} \cdot \pi \cdot \frac{(d_B - h_{aR})}{2 \cdot p} = 0,58 \cdot 5,02 \cdot 3,14 \cdot \frac{(1,62 - 1,36)}{2 \cdot 1} = 13,629 \text{ А},$$

Суммарное магнитное напряжение можно найти по формуле:

$$F_{\Sigma} = F_{aS} + F_{\delta} + F_{aR} + F_{ZR} + F_{ZS} = 385,8.$$

Коэффициент насыщения:

$$k_Z = \frac{F_{\delta} + F_{ZS} + F_{ZR}}{F_{\delta}} = 1,096. \text{ Полученное значение мало отличается от}$$

принятого 1,1, поэтому перерасчет не требуется.

Намагничивающий ток:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\Sigma}}{0,9 \cdot 2 \cdot \omega_{SA} \cdot k_0} = \frac{1 \cdot 385,8}{0,9 \cdot 2 \cdot 720 \cdot 0,906} = 0,329;$$

Индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре:

$$X_{mA} = \frac{k_E \cdot U_H}{I_{\mu}} = \frac{0,9 \cdot 220}{0,329} = 602,603 \text{ Ом};$$

2.7. Расчетные потери в стали

Вес ярма статора:

$$G_{aS} = 7,8 \cdot \pi \cdot (Da - h_{aS}) \cdot l \cdot h_{aS} \cdot k_c \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 3,14 \cdot (10 - 1,025) \cdot 4,4 \cdot 1,025 \cdot 0,93 \cdot 10^{-3} = 0,922 \text{ кг};$$

Вес зубцов статора

$$G_{ZS} = 7,8 \cdot Z_S \cdot b_{ZS} \cdot h_{ZS} \cdot k_c \cdot 10^{-3} = 0,444 \text{ кг};$$

Вес зубцов ротора:

$$G_{aR} := 7.8 \pi \cdot (d_a + h_{aR}) \cdot h_{aR} \cdot l_R \cdot k_c \cdot 10^{-3} = 0.369 \text{ кг};$$

$$G_{ZR} := 7.8 Z_R \cdot b_{ZR} \cdot h_{ZR} \cdot l_R \cdot k_c \cdot 10^{-3} = 1.098 \text{ кг};$$

Расчетные потери в ярме статора и ротора:

$$P_{caS} = 1,6 \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{B_{aS}}{10^4} \right)^2 \cdot G_{aS} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} = 1,6 \cdot 3,3 \cdot \left(\frac{16390}{10^4} \right)^2 \cdot 0,922 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} = 13,09$$

$$P_{caR} = 1,6 \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{B_{aR}}{10^4} \right)^2 \cdot G_{aR} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} = 1,6 \cdot 3,3 \cdot \left(\frac{1236}{10^4} \right)^2 \cdot 0,922 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} = 2,978$$

Расчетные потери в зубцах статора и ротора:

$$P_{cZS} = 1,8 \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{B_{ZS}}{10^4} \right)^2 \cdot G_{ZS} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot k_t = 1,8 \cdot 3,3 \cdot \left(\frac{13140}{10^4} \right)^2 \cdot 0,444 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} \cdot 1 = 4,55 \text{ Вт};$$

$$P_{cZR} = 1,8 \cdot \rho_1 \cdot \left(\frac{B_{ZR}}{10^4} \right)^2 \cdot G_{ZR} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} = 1,8 \cdot 3,3 \cdot \left(\frac{13250}{10^4} \right)^2 \cdot 1,098 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} = 11,446 \text{ Вт};$$

Суммарные потери в стали ротора находятся по формуле:

$$P_{cR} = P_{caR} + P_{cZR} = 2,978 + 11,446 = 14,424 \text{ Вт}.$$

2.8. Расчет номинального режима

Исходные параметры схемы замещения главной фазы:

$$r_{SA} = 63,495 \text{ Ом}, x_{SA} = 12,245 \text{ Ом}, x_{mA} = 602,603 \text{ Ом};$$

$$k_{ck} = 0,99 - \text{коэффициент скоса пазов};$$

$$Z_R = 15 - \text{число зубцов ротора};$$

$$l_R = 4,6 - \text{длина ротора}.$$

Приведённое активное сопротивление:

$$r_{RA} = \frac{r_{\mathcal{O}} \cdot 4 \cdot 2 \cdot \omega_{SA}^2 \cdot k_{0A}^2}{Z_R \cdot k_{ck}^2} = \frac{r_{\mathcal{O}} \cdot 4 \cdot 720^2 \cdot 0,9^2}{15 \cdot 0,99^2} = 15,06 \text{ Ом},$$

Приведенное реактивное сопротивление ротора:

$$\sum \lambda_R' = \sum \lambda_R \cdot \frac{l_R}{l} \cdot \frac{Z_S}{Z_R} \cdot \left(\frac{k_{0A}}{k_{k0}} \right)^2 = 5,016 \cdot \frac{4,6}{4,4} \cdot \frac{16}{15} \cdot \left(\frac{0,9}{0,99} \right)^2 = 4,623;$$

$$x_{RA} = x_S \cdot \frac{\sum \lambda_R'}{\sum \lambda_S'} = 20,825 \text{ Ом.}$$

Номинальное скольжение принимаем $s_H = 0,042$ о.е.

Рассчитываем коэффициенты α и β для сопротивлений разветвления:

$$\alpha = \frac{r_{RA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{15,057}{602,603 + 20,825} = 0,024; \beta = \frac{x_{mA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{602,603}{602,603 + 20,825} = 0,967;$$

Активное сопротивление разветвления по формуле:

$$r_{RA1}' = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_{mA} \cdot s_H}{\alpha^2 + \beta^2} = \frac{0,024 \cdot 0,967 \cdot 602,603 \cdot 0,042}{0,024^2 + 0,967^2} = 251,711 \text{ Ом};$$

Реактивное сопротивление разветвления:

$$x_{RA1}' = \beta \cdot x_{RA} \cdot \frac{\frac{r_{RA}}{x_{RA}} \cdot \alpha \cdot s_H}{\alpha^2 + s_H^2} = 0,967 \cdot 20,825 \cdot \frac{\frac{15,057}{20,825} \cdot 0,024 \cdot 20,825 \cdot 0,042}{0,024^2 + 0,042^2} = 509,918 \text{ Ом};$$

Полное сопротивление главной фазы:

$$Z_{A1} = (r_{SA} + r_{RA1}') + j \cdot (x_{SA} + x_{RA1}') = 315,2 + 522,16j \text{ Ом};$$

$$|Z_{A1}| = 609,925 \text{ Ом.}$$

Ток в главной обмотке без учета потерь стали:

$$I_{A1} = \frac{U_H}{Z_{A1}} = \frac{220}{315,2 + 522,16j} = 0,186 - 0,309j \text{ А};$$

$$|I_{A1}| = 0,361 \text{ А.}$$

Полное сопротивление разветвления:

$$Z_{RA1}' = r_{RA1}' + j \cdot x_{RA1}' = 25,711j \text{ Ом};$$

$$|Z_{RA1}'| = 568,66 \text{ Ом.}$$

ЭДС:

$$E_1 = I_{HA1} \cdot z_{RA1} = 205,116 \text{ В};$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{\vartheta} = 2 \cdot I_{HA1}^2 \cdot r_{RA1} = 65,497 \text{ Вт};$$

Полная механическая мощность на валу двигателя:

$$P_R = P_{\vartheta} \cdot (1 - s_H) = 65,497 \cdot (1 - 0,042) = 62,746 \text{ Вт};$$

Полезная механическая мощность на валу:

$$P_R = P_R - (P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}) = 62,746 - (3 + 0,5) = 59,246 \text{ Вт};$$

Полезный момент:

$$M = \frac{P_R \cdot 10^5}{1,028 \cdot n} = \frac{59,246 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 2874} = 2005 \text{ Н} \cdot \text{см};$$

Где $n = n_c \cdot (1 - s_H) = 3000 \cdot (1 - 0,042) = 2874 \text{ об / мин.}$

Потери в стали статора и ротора:

$$P_{CR1} = P_{CS} \cdot \left(\frac{E_1}{k_E \cdot U_H} \right)^2 = 17,465 \cdot \left(\frac{205,116}{0,9 \cdot 220} \right)^2 = 18,936 \text{ Вт};$$

$$P_{CS1} = P_{CR} \cdot \left(\frac{E_1}{k_E \cdot U_H} \right)^2 = 14,424 \cdot \left(\frac{205,116}{0,9 \cdot 220} \right)^2 = 15,479 \text{ Вт};$$

Суммарные потери в стали:

$$P_c = P_{CS1} + P_{CR1} = 15,479 + 18,936 = 34,415 \text{ Вт};$$

Ток потери в стали [1, стр.223]:

$$I_C = \frac{P_{CS1} + P_{CR1}}{2 \cdot E_1} = \frac{15,479 + 18,936}{2 \cdot 205,116} = 0,084 \text{ А};$$

Ток в главной обмотке с учетом потерь в стали:

$$I_{SA} = I_{SA}' + j \cdot I_{\varepsilon}'' = 0,186 - 0,309j + 0,084j = 0,186 - 0,225j \text{ A};$$

$$|I_{SA}| = 0,292 \text{ A}.$$

Плотность тока в главной обмотке:

$$\Delta_A = \frac{I_{SA1}'}{s_A} = \frac{0,292}{0,064} = 4,593 \text{ A / мм}^2;$$

Коэффициент мощности главной фазы:

$$\cos \phi_A = \frac{I_{SA}'}{|I_{SA}|} = \frac{0,186}{0,292} = 0,637;$$

Потери в меди статора:

$$P_{MS} = 2 \cdot (|I_{SA}|)^2 \cdot r_{RA} = 10,836 \text{ Вт};$$

Потребляемая мощность:

$$P_S = P_{\Sigma} + P_{MS} + P_C = 65,497 + 10,836 + 34,415 = 110,748 \text{ Вт};$$

КПД:

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} = \frac{59,246}{110,748} = 0,535.$$

2.9. Расчет вспомогательной обмотки

Рассчитываем вспомогательную обмотку из условия кругового поля в номинальном режиме по формуле:

$$k = \frac{x_{A1}}{r_{A1}} = \frac{509,918}{251,711} = 2,026.$$

Емкость по вспомогательной обмотке находим по формуле:

$$x_{C\phi} = k^2 \cdot x_{A1} + k \cdot r_{A1} = 2,026^2 \cdot 509,918 + 2,026 \cdot 251,711 = 2,603 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$C_p = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_{C\phi}} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2603} = 1,223 \text{ мкФ};$$

Выбираем ближайший по емкости конденсатор емкостью $C_p = 1,6 \text{ мкФ}$.

$$x_{Cp} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_p} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,6} = 1989 \text{ Ом};$$

Число витков вспомогательной обмотки находим по формуле:

$$\omega_B = k \cdot \omega_{sa} = 2,026 \cdot 720 = 1459.$$

Принимаем $t = k$; $S_A = S_{SA}$, тогда

$$S'_B = \frac{S_A}{t} = \frac{0,064}{2,026} = 0,031 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод со следующими параметрами:

$$S_B = 0,0314 \text{ мм}^2, d_{\text{тол}} = 0,23 \text{ мм}, d_{\text{из}} = 0,2 \text{ мм}.$$

Активное сопротивление:

$$r_{SB} = k^2 \cdot r_{SA} \cdot \frac{S'_B}{S_B} = 2,026^2 \cdot 63,495 \cdot \frac{0,031}{0,0314} = 260,533 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление вспомогательной фазы по формуле:

$$Z'_{B1} = (k^2 \cdot r_{A1} + r_c) + j \cdot (k^2 \cdot x_{A1} - x_{Cp}) = (2,026^2 \cdot 251,711 + 0) + j \cdot (2,026^2 \cdot 509,918 - 1989) = 1033 + 103,213j$$

Так как из-за округления величины рабочей емкости мы несколько отступили от условий получения круглого поля, уточняем номинальный режим по формулам для общего случая эллиптического вращающегося поля.

Сопротивления разветвления главной фазы обратной последовательности найдем по формуле:

$$r'_{RA2} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_{mA} \cdot (2 - s_H)}{\alpha^2 + (2 + s_H)^2} = \frac{0,024 \cdot 0,967 \cdot 602,603 \cdot (2 - 0,042)}{0,024^2 + (2 + 0,042)^2} = 6,603 \text{ Ом}.$$

$$x'_{RA2} = \beta \cdot x_{RA} \frac{\alpha \cdot \frac{r_{RA}}{x_{RA}} \cdot (2 - s_H)^2}{\alpha^2 + (2 - s_H)^2} = 0,967 \cdot 20,825 \frac{0,024 \cdot \frac{15,057}{20,825} \cdot (2 - 0,042)^2}{\alpha^2 + (2 - 0,042)^2} = 20,218 \text{ Ом}.$$

$$Z_{RA2} = r_{RA2} + j \cdot x_{RA2} = 6,603 + j \cdot 20,218 = 6,605 + 20,218j \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление вспомогательной фазы прямой и обратной последовательностей находим по формуле:

$$\begin{aligned} Z_{A2} &= (r_{RA} + r_{RA2}) + j \cdot (x_{SA} + x_{RA2}) = (63,495 + 6,603) + j \cdot (12,245 + 20,218) = \\ &= 70,099 + 32,463j \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Полные сопротивления вспомогательной фазы прямой и обратной последовательностей формуле:

$$\begin{aligned} Z_{B1} &= k^2 \cdot r_{A1} + j \cdot (k^2 \cdot x_{A1} - x_{Cp}) = 2,06^2 \cdot 251,711 + j \cdot (2,026^2 \cdot 509,918 - 1989) = 1033 + 103,213j \\ Z_{B2} &= k^2 \cdot r_{A2} + j \cdot (k^2 \cdot x_{A2} - x_{Cp}) = 2,026^2 \cdot 70,099 + j \cdot (2,026^2 \cdot 32,463 - 1989) = 287,679 + 1856j \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Составляющие тока статора прямой и обратной последовательностей главной фазы можно определить по формулам формуле:

$$\begin{aligned} I_{A1} &= U_H \cdot \frac{Z_{B2} - j \cdot k \cdot Z_{A2}}{Z_{A1} \cdot Z_{B2} + Z_{A2} \cdot Z_{B1}} = \\ &= 220 \cdot \frac{287,679 - 1856j - j \cdot 2,026 \cdot 70,099 + 32,463j}{(315,205 + 522,163j) \cdot (287,679 - 1879j) + 70,099 + 32,463j \cdot (1033 + 103,213j)} = 0,183 - 0,326j \end{aligned}$$

$$|I_{A1}| = 0,373 \text{ А;}$$

$$\begin{aligned} I_{A2} &= U_H \cdot \frac{Z_{B1} - j \cdot k \cdot Z_{A1}}{Z_{A1} \cdot Z_{B2} + Z_{A2} \cdot Z_{B1}} = \\ &= 220 \cdot \frac{1033 + 103,213j - j \cdot 2,026 \cdot 315,205 + 522,163j}{(315,205 + 522,163j) \cdot (287,679 - 1879j) + 70,099 + 32,463j \cdot (1033 + 103,213j)} = -0,049 + 0,127j \text{ А;} \\ |I_{A2}| &= 0,137 \text{ А.} \end{aligned}$$

Ток статора главной фазы без учета потерь в стали находим по формуле:

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} = 0,183 - 0,326j + 0,127j - 0,049 = 0,133 - 0,198j \text{ А}$$

$$|I_A| = 0,239 \text{ А.}$$

Потери в стали от поля прямой последовательности при $E_1 = |I_{A1} \cdot z_{RA1}| = 212,3 \text{ В.}$ формуле:

$$P_{cs1} = P_{cs} \cdot \left(\frac{E_1}{U_H \cdot k_E} \right) = \left(\frac{212,3}{220 \cdot 0,9} \right) = 20,285 \text{ Вт;}$$

$$P_{cR1} = P_{cR} \cdot \left(\frac{E_1}{U_H \cdot k_E} \right) \cdot s_H^{1.3} = 14,424 \cdot \left(\frac{212,3}{220 \cdot 0,9} \right) \cdot 0,042^{1.3} = 0,269 \text{ Вт};$$

$$P_{c1} = P_{cS1} + P_{cR1} = 20,285 + 0,269 = 20,554 \text{ Вт};$$

Добавочный ток от потерь в стали прямой последовательности находим по формуле:

$$I_{c1} = \frac{P_{c1}}{2 \cdot E_1} = 0,048 \text{ А.}$$

Потери в стали от поля обратной последовательности при $E_1 = |I_{A2} \cdot z_{RA2}| = 2,904 \text{ В}$ формуле:

$$P_{cS2} = P_{cS} \cdot \left(\frac{E_2}{U_H \cdot k_E} \right) = \left(\frac{2,904}{220 \cdot 0,9} \right) = 3,796 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{cR2} = P_{cR} \cdot \left(\frac{E_2}{U_H \cdot k_E} \right) \cdot s_H^{1.3} = 14,424 \cdot \left(\frac{2,904}{220 \cdot 0,9} \right) \cdot 0,042^{1.3} = 5,035 \cdot 10^{-5} \text{ Вт};$$

$$P_{c2} = P_{cS2} + P_{cR2} = 3,796 \cdot 10^{-3} + 5,035 \cdot 10^{-5} = 3,846 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

Добавочный ток от потерь в стали прямой последовательности находим по формуле:

$$I_{c2} = \frac{P_{c2}}{2 \cdot E_1} = \frac{3,846 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 26904} = 6,622 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Токи статора с учетом потерь в стали находим по формулам:

$$I_{SA1} = (I_{A1} + I_{c1}) + j \cdot I_{A1} = (0,183 - 0,326j + 0,048) + j \cdot 0 = 0,231 - 0,326j \text{ А};$$

$$I_{SA2} = (I_{A2} + I_{c2}) + j \cdot I_{A1} = (-0,049 + 6,622 \cdot 10^{-4} + 0,127j) + j \cdot 0 = -0,049 + 0,127j \text{ А};$$

$$I_{SA} = |I_{SA1} + I_{SA2}| = |0,231 - 0,326j - 0,049 + 0,127j| = 0,269 \text{ А};$$

$$I_{SB1} = j \cdot \frac{I_{A1}}{k} + \frac{I_{c1}}{k} = j \cdot \frac{0,183 - 0,326j}{2,026} + \frac{0,048}{2,026} = 0,185 + 0,09j \text{ А};$$

$$I_{SB2} = -j \cdot \frac{I_{A2}}{k} + \frac{I_{c2}}{k} = j \cdot \frac{-0,049 + 0,127j}{2,026} + \frac{6,622 \cdot 10^{-4}}{2,026} = 0,063 + 0,024j \text{ А};$$

$$I_{SB} = |I_{SB2} + I_{SB1}| = |0,185 + 0,09j + 0,063 + 0,024j| = 0,273 \text{ А.}$$

Плотности тока в главной и вспомогательной обмотках находим по формулам:

$$\Delta_A = \frac{I_{SA}}{s_A} = \frac{0,269}{0,064} = 4,236 \text{ A / мм}^2;$$

$$\Delta_B = \frac{I_{SB}}{s_B} = \frac{0,273}{0,031} = 8,695 \text{ A / мм}^2;$$

Полный ток сети находим по формуле:

$$I_S = I_{SA} + I_{SAB} = 0,269 + 0,273 = 0,542 \text{ A};$$

Электромагнитная мощность находится по формуле:

$$P_{\mathcal{O}} = 2 \cdot I_{A1} \cdot r_{RA1} = 2 \cdot 0,373 \cdot 251,711 = 70,16 \cdot \text{Bm};$$

Полная механическая мощность на валу находится по формуле:

$$P_R = P_{\mathcal{O}} \cdot (1 - s_H) = 70,166 \cdot (1 - 0,042) = 67,219 \text{ Bm};$$

Полезная механическая мощность на валу находится по формуле:

$$P_R = P_R - P_{\text{мех}} = 67,219 - 6 = 61,219 \text{ Bm};$$

Полезный момент находится по формуле:

$$M_H = \frac{P_R \cdot 10^5}{1,028 \cdot n} = \frac{61,219 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 2874} = 2072 \text{ э · см};$$

Потери в меди статора можно найти по формуле:

$$P_{MS} = I_{SA}^2 \cdot r_{SA} + I_{SB}^2 \cdot r_{SB} = 0,269^2 \cdot 63,495 + 0,273^2 \cdot 260,533 = 24,023 \text{ Bm};$$

Потери в меди ротора находим по формуле:

$$P_{MR} = 2 \cdot I_{A1}^2 \cdot r_{A1} \cdot s_H + 2 \cdot I_{A2}^2 \cdot r_{RA} \cdot (2 - s_H) = 2 \cdot 0,373^2 \cdot 251,71 \cdot 0,042 + 0,137^2 \cdot 6,6 \cdot (2 - s_H) = 3,429$$

Потребляемая мощность находится по формуле:

$$P_S = P_{MS} + P_{MR} + P_R = 24,023 + 3,429 + 67,219 = 129,087 \text{ Bm};$$

Сумма потерь находится по формуле:

$$\sum P = P_{MS} + P_{MR} + P_C = 24,023 + 3,429 + 34,415 = 61,867 \text{ Вт};$$

КПД находится по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_S} = \frac{61,867}{129,087} = 0,521.$$

Коэффициент мощности главной фазы находится по формуле:

$$\cos \varphi_A = \frac{I_{SA}''}{I_{SA}} = \frac{0,182}{0,269} = 0,676.$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы находится по формуле:

$$\cos \varphi_B = \frac{I_{SB}'}{I_{SB}} = \frac{0,248}{0,273} = 0,908.$$

Напряжение на вспомогательной обмотке находится по формулам:

$$U_{B1} = I_{SB1} \cdot (Z_{B1} - Z_C) = I_{SB1} \cdot (Z_{B1} + j \cdot x_{C\phi}) = (0,185 + 0,09j) \cdot (1033 + 103,213j + j \cdot 1989) = 360,719 - 255,205j \text{ В};$$

$$U_{B2} = I_{SB2} \cdot (Z_{B2} - Z_C) = I_{SB2} \cdot (Z_{B2} + j \cdot x_{C\phi}) = (0,193 + 0,05j) \cdot (287,679 + 1856j + j \cdot 1989) = 111,736 - 235,989j \text{ В};$$

$$U_B = U_{B1} + U_{B2} = 360,719 - 255,205j + 111,736 - 235,989j \text{ В};$$

$$|U_B| = 681,532 \text{ В}.$$

Напряжение на конденсаторе находится по формуле:

$$U_C = I_{SB} \cdot Z_C = (0,193 + 0,05j) \cdot (-1989j) = -99,472 + 383,961j \text{ В};$$

$$|U_C| = 396,637 \text{ В}.$$

2.10. Расчет пускового режима

Параметры схемы замещения находим по формулам:

$$r_{RAK}' = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_{mA}}{\alpha^2 + 1} = \frac{0,024 \cdot 0,967 \cdot 602,603}{0,024^2 + 1} = 14,059 \text{ Ом};$$

$$x_{RAK}' = \beta \cdot x_{RA} \frac{\alpha \frac{r_{RA}}{x_{RA}} + 1}{\alpha^2 + 1} = 0,967 \cdot 20,825 \frac{0,024 \cdot \frac{15,057}{20,825} + 1}{0,024^2 + 1} = 20,469 \text{ Ом};$$

$$Z_{AK} = (r_{RA} + r_{RAK}') + j \cdot (x_{SA} + x_{RAK}') = (15,057 + 14,059) + j \cdot (12,245 + 20,469) = 29,116 + 32,714j \text{ Ом};$$

$$Z_{BK} = k^2 \cdot (r_{AK} + r_C) + j \cdot (k^2 \cdot x_{AK} - x_C) = 2,026^2 (29,116 + 0) + j \cdot (2,026^2 \cdot 32,714 - 1989) = 119,489 - 1855j \text{ Ом}.$$

Токи прямой последовательности главной обмотки находим по формулам:

$$I_{Ak1} = \frac{U_H}{2} \cdot \left(\frac{1}{Z_{Ak}} - j \cdot \frac{k}{Z_{Bk}} \right) = \frac{220}{2} \cdot \left(\frac{1}{29,116 + 32,714j} - j \cdot \frac{2,026}{119,489 - 1855j} \right) = 1,789 - 1,884j \text{ A};$$

$$|I_{Ak1}| = 2,598 \text{ A};$$

$$I_{Ak2} = \frac{U_H}{2} \cdot \left(\frac{1}{Z_{Ak}} + j \cdot \frac{k}{Z_{Bk}} \right) = \frac{220}{2} \cdot \left(\frac{1}{29,116 + 32,714j} + j \cdot \frac{2,026}{119,489 - 1855j} \right) = 1,55 - 1,869j \text{ A};$$

$$|I_{Ak2}| = 2,428 \text{ A};$$

Полный ток главной обмотки находим по формуле:

$$I_{Ak} = I_{Ak1} + I_{Ak2} = 1,789 - 1,884j = 3,34 - 3,752j \text{ A};$$

$$|I_{Ak}| = 5,023 \text{ A};$$

Полный ток вспомогательной обмотки находим по формуле:

$$I_{Bk} = \frac{j \cdot I_{Ak1}}{k} + \frac{j \cdot I_{Ak2}}{k} = \frac{j \cdot (1,789 - 1,884j)}{2,026} - \frac{j \cdot (1,55 - 1,869j)}{2,026} = 7,606 \cdot 10^{-3} + 0,118j \text{ A};$$

$$|I_{Bk}| = 0,118 \text{ A};$$

Плотность тока в главной обмотке находим по формуле:

$$\Delta_{Ak} = \frac{I_{Ak}}{S_B} = \frac{5,023}{0,031} = 78,985 \text{ A / мм}^2;$$

Коэффициент мощности главной фазы находим по формуле:

$$\cos \varphi_{Ak} = \frac{I'_{Ak}}{I_{Ak}} = \frac{3,34}{5,023} = 0,665.$$

Плотность тока в вспомогательной обмотке находим по формуле:

$$\Delta_{Bk} = \frac{I_{Bk}}{S_B} = \frac{0,118}{0,031} = 3,769 \text{ A / мм}^2;$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы находим по формуле:

$$\cos \varphi_{Bk} = \frac{I'_{Bk}}{I_{Bk}} = \frac{7,606 \cdot 10^{-3}}{0,118} = 0,064.$$

Полный пусковой ток находим по формуле:

$$I_k = I_{Ak} + I_{Bk} = 3,34 + 3,752j + 7,606 \cdot 10^{-3} + 0,118j = 3,347 - 3,634j \text{ A};$$

$$|I_k| = 4,941 \text{ A}.$$

Кратность пускового тока находим по формуле:

$$i_k = \frac{I_{k1}}{I_H} = \frac{3,347}{0,542} \approx 6;$$

Полный коэффициент мощности при пуске находим по формуле:

$$\cos \varphi_k = \frac{I_k'}{I_k} = \frac{3,347}{4,941} = 0,677.$$

Электромагнитная мощность при пуске находится по формуле:

$$P_{\text{э\kappa}} = 2 \cdot r_{RAk}' \cdot (I_{AK1}^2 - I_{AK2}^2) = 2 \cdot 14,059 \cdot (2,598^2 - 2,428^2) = 24,093 \text{ Вт};$$
$$M_k = \frac{P_{\text{э\kappa}} \cdot 10^5}{1,028 \cdot n_C} = \frac{24,093 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 3000} = 781,224 \text{ э\kappa} \cdot \text{см};$$

Кратность пускового момента находим по формуле:

$$m_k = \frac{M_k}{M_H} = \frac{781,224}{2072} = 0,377;$$

Потребляемая мощность при пуске находим по формуле:

$$P_{SK} = U_H \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = 220 \cdot 4,941 \cdot 0,677 = 736,34 \text{ Вт};$$

Напряжение на вспомогательной обмотке при пуске находим по формуле:

$$U_{BK} = I_{BK}' \cdot (Z_{BK}' - Z_C) = (7,606 \cdot 10^{-3} + 0,118j) \cdot (119,489 - 1989j) = 235,855 - 1,021j \text{ Ом};$$
$$|U_{BK}| = 235,857 \text{ В}.$$

Напряжение на конденсаторе находим по формуле:

$$U_C = I_{BK}' \cdot Z_C = (7,606 \cdot 10^{-3} + 0,118j) \cdot 1989j = -234,946 + 15,132j \text{ Ом};$$
$$|U_C| = 235,433 \text{ В}.$$

Данные спроектированного двигателя:

Номинальная мощность $P_H = P_R \approx 61 \text{ Вт}$;

Номинальная скорость $n = 2874 \text{ Об / мин}$;

Номинальный ток $I_H = 0,542 \text{ А}$;

Коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,93$;

Коэффициент полезного действия $\eta = 0,521$.

2.11. Тепловой расчет закрытого асинхронного микродвигателя

Исходные данные к тепловому расчету – геометрические размеры двигателя в сантиметрах:

$D_a = 10 \text{ см} = 100 \text{ мм}$ – внешний диаметр статора;

$D = 5,8 \text{ см} = 58 \text{ мм}$ – внутренний диаметр статора;

$D_{\text{кор}} = 12 \text{ см} = 120 \text{ мм}$ – диаметр корпуса;

$D_{\text{в1}} = 11,4 \text{ см} = 114 \text{ мм}$: $D_{\text{в2}} = 5,6 \text{ см} = 56 \text{ мм}$;

$l_{\text{кор}} = 13,6 \text{ см} = 136 \text{ мм}$ – длина корпуса;

$t_{\text{окр}} = 25^\circ \text{ C}$.

Сопротивление изоляции проводников в пазу рассчитывается по формуле:

$$n_1 = \frac{d_1 + d_2}{4 \cdot d_{\text{из}}} = \frac{0,88 + 0,92}{4 \cdot 0,0325} = 13,846;$$

$$n_2 = \frac{h_{\text{ЗС}}}{4 \cdot d_{\text{из}}} = \frac{0,85}{4 \cdot 0,0325} = 13,077;$$

$$\delta_1^* = \delta^* \cdot (n_1 - 1) + \frac{\delta^*}{2} = 0,04 \text{ см} = 0,004 \text{ мм};$$

$$\delta_2^* = \delta^* \cdot (n_2 - 1) + \frac{\delta^*}{2} = 0,038 \text{ см} = 0,0038 \text{ мм};$$

$$\delta_3 = \frac{\delta_1^* \cdot \delta_2^*}{2 \cdot \delta_1^* + \delta_2^*} = \frac{0,04 \cdot 0,038}{2 \cdot 0,038 + 0,04} = 0,013 \text{ см} = 0,0013 \text{ мм};$$

$$l_\tau = l \cdot k_c = 4,4 \cdot 0,93 = 4,092 \text{ см} = 0,41 \text{ мм};$$

$$\Pi = d_1 + 2 \cdot h_1 = 0,88 + 0,383 = 1,646 \text{ см} = 0,165 \text{ мм};$$

$$R_{\text{из}} = \frac{\delta_3}{Z_s \cdot l_\tau \cdot \Pi \cdot k_{12}} = \frac{0,013}{16 \cdot 4,092 \cdot 1,646 \cdot 0,0004} = 0,303 \text{ град / Вт}.$$

Сопротивление пазовой изоляции рассчитывается по формуле:

$$R_n = \frac{\delta_n}{Z_s \cdot l_r \cdot \Pi \cdot k_{123}} = \frac{0,03}{16 \cdot 4,092 \cdot 1,646 \cdot 0,0005} = 0,557 \text{ град} / \text{Вт};$$

Сопротивление спинки статора рассчитывается по формуле:

$$R_c = \frac{h_{as}}{S_{as} \cdot k_{fc}} = \frac{1,025}{120,951 \cdot 0,58} = 0,303 \text{ град} / \text{Вт};$$

Где $S_{as} = \pi \cdot D_{a1} \cdot l = 3,14 \cdot 4,4 \cdot 9,3 = 120,951 \text{ см}^2$;

$$D_{a1} = \frac{Da + D + 2 \cdot h_{zs}}{2} = \frac{10 + 5,8 + 2 \cdot 0,85}{2} = 8,75 \text{ см} = 87,5 \text{ мм};$$

Сопротивление зубцового слоя статора рассчитывается по формуле:

$$R_c = \frac{h_{zs}}{S_z \cdot k_{fc}} = \frac{0,85}{29,462 \cdot 0,58} = 0,05 \text{ град} / \text{Вт};$$

Где $S_z = Z_s \cdot l_r \cdot b_{zs} = 16 \cdot 4,092 \cdot 0,45 = 29,462 \text{ см}^2$;

Сопротивление зубцового слоя для потерь меди статора рассчитывается по формуле:

$$R_{zM} = R_z \frac{2 \cdot h_{zs}}{\Pi} = 0,05 \frac{2 \cdot 0,85}{1,646} = 0,051 \text{ град} / \text{Вт};$$

Сопротивление зазора рассчитывается по формуле:

$$R_\delta = \frac{\delta}{S_\delta \cdot k_{lb}} = \frac{0,03}{80,173 \cdot 0,00023} = 1,627 \text{ град} / \text{Вт};$$

Где $S_\delta = \pi \cdot D \cdot l = 3,14 \cdot 4,4 \cdot 5,8 = 80,173 \text{ см}^2$;

Сопротивление ротора принимаем $R_R = 0,5 \text{ град} / \text{Вт}$.

Сопротивление подшипникового щита принимаем $R_{ш} \approx 0,001 \text{ град} / \text{Вт}$.

Потенциал генератора потерь в стали статора рассчитывается по формуле:

$$V_C = 0,5 \cdot P_C \cdot (R_C + R_z) = 0,5 \cdot 34,415 \cdot (0,015 + 0,05) = 1,1 \text{ }^\circ\text{C};$$

Потенциал генератора потерь в меди статора рассчитывается по формуле:

$$V_{MS} = (P_{MS} + 0,5 \cdot P_{доб}) \cdot R_{из} = (24,023 + 0,5 \cdot 0,5) \cdot 0,303 = 7,365 \text{ }^\circ\text{C}$$

Потенциал генератора потерь в роторе рассчитывается по формуле:

$$V_{MS} = (P_{MR} + P_{мех} + 0.5 \cdot P_{доб}) \cdot R_R = (3,43 + 6 + 0.5 \cdot 0,5) \cdot 0,5 = 4,84^\circ C.$$

Приблизительное превышение температуры корпуса рассчитывается по формуле:

$$\theta_{CK} = \frac{\sum P}{S_{кор} \cdot k_S \cdot k_{жс}} = \frac{61,87}{738,903 \cdot 7,846 \cdot 1,94 \cdot 10^{-3}} = 5,5^\circ C$$

$$\text{Где } S_{кор} = \pi \cdot \frac{D_{кор}^2}{2} = 3,14 \cdot \frac{12^2}{2} = 738,9 \text{ см}^2 = 73900 \text{ мм}^2;$$

$$k_S = \frac{7,06}{k_{n1}} \cdot 10^{-4} = \frac{7,06}{1,5} \cdot 10^{-4} = 7,846;$$

$$k_{жс} = 0,56 \cdot 10^{-3} \cdot D_{кор}^{0,5} = 1,94 \cdot 10^{-3};$$

$$k_{n1} = 1,5 \text{ для } 2p = 2.$$

Излучаемое тепло рассчитывается по формуле:

$$P_{Л} = 1,63 \cdot k_{изд} \cdot S_{кор} \cdot D_{кор}^{0,5} \cdot \left[\left(\frac{t_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{t_1}{1000} \right)^4 \right] = 1,63 \cdot 0,9 \cdot 73,9 \cdot 12^{0,8} \cdot \left[\left(\frac{303,5}{1000} \right)^4 - \left(\frac{298}{1000} \right)^4 \right] = 2,248 \text{ Вт};$$

где $k_{изд} = 0,9$ – серый цвет;

$$t_1 = 273 + t_{окр} = 273 + 25 = 298K;$$

$$t_2 = t_1 + \theta_{CK} = 303,5K.$$

Тепло, рассеиваемое путем конвекции рассчитывается по формуле:

$$P_K = \sum P - P_{Л} = 61,867 - 2,248 = 59,619 \text{ Вт};$$

Среднее превышение температуры корпуса рассчитывается по формуле:

$$\theta_{ск} = \left(\frac{5360 \cdot k_{n2} \cdot P_K}{S_{кор} \cdot k_S \cdot D_{кор}^{0,5}} \right)^{0,8} = \left(\frac{5360 \cdot 0,87 \cdot 59,619}{738,9 \cdot 7,846 \cdot 12^{0,5}} \right)^{0,8} = 8,185^\circ C;$$

Так как $\theta_{ск} = 8,185^\circ C$ не соответствует ранее принятому значению $\theta_{ск} = 5,5^\circ C$, то делаем второе приближение. Принимаем $\theta_{ск} = 8^\circ C$, тогда получаемое тепло может быть рассчитано при $t_1 = 298^\circ C$ и $t_2 = t_1 + \theta_{ск} = 306^\circ C$ как:

$$P_{Л} = 1,63 \cdot k_{изд} \cdot S_{кор} \cdot D_{кор}^{0,5} \cdot \left[\left(\frac{t_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{t_1}{1000} \right)^4 \right] = 1,63 \cdot 0,9 \cdot 73,9 \cdot 12^{0,8} \cdot \left[\left(\frac{306}{1000} \right)^4 - \left(\frac{298}{1000} \right)^4 \right] = 3,31 \text{ Вт};$$

Тогда

$$P_K = \sum P - P_{Л} = 61,867 - 3,31 = 59,62 \text{ Вт};$$

И среднее превышение температуры корпуса рассчитывается по формуле:

$$\theta_{ck} = \left(\frac{5360 \cdot k_{n2} \cdot P_K}{S_{кор} \cdot k_S \cdot D_{кор}^{0,5}} \right)^{0,8} = \left(\frac{5360 \cdot 0,87 \cdot 59,62}{738,9 \cdot 7,846 \cdot 12^{0,5}} \right)^{0,8} = 8,185^\circ C;$$

Средняя температура корпуса рассчитывается по формуле:

$$t_{ck} = t_{окр} + \theta_{ck} = 25 + 8,185 = 33,185^\circ C;$$

Расчетная температура корпуса рассчитывается по формуле:

$$t_{pk} = \theta_{pk} + t_{окр} = 7,894 + 25 = 32,9^\circ C;$$

Где $\theta_{pk} = \theta_{ck} \cdot k_p = 8,185 + 25 = 7,894^\circ C;$

$$k_p = 0,906 \cdot \left(\frac{l_{кор}}{D_{кор}} \right)^{0,5} = 0,906 \cdot \left(\frac{13,6}{12} \right)^{0,5} = 0,965.$$

Предварительно рассчитываются тепловые потоки на различных участках схемы по формулам:

$$Q_1 = Q_1 = P_{MS} + 0,5 \cdot P_{ооб} = 24,023 + 0,5 \cdot 0,5 = 24,273 \text{ Вт};$$

$$Q_2 = Q_1 + P_C = 24,273 + 34,415 = 58,688 \text{ Вт};$$

$$Q_R = P_{MR} + 0,5 \cdot P_{ооб} + P_{мех} = 3,43 + 0,5 \cdot 0,5 + 6 = 9,68 \text{ Вт}.$$

Средняя температура обмотки может быть найдена по среднему превышению температуры вычисляется по формуле:

$$t_{ооб} = \theta_{сS} + t_{окр} = 29,755 + 25 = 54,76^\circ C;$$

По опытным данным средняя температура для аналогичного двигателя составляет $56,4^\circ C$.

2.12. Выбор подшипников

В электрических машинах с горизонтальным расположением вала подшипники выполняют роль поддерживающих опор. Они воспринимают воздействие силы тяжести ротора, силы одностороннего притяжения, сил, возникающих от несбалансированности ротора и дополнительных продольных нагрузок от приводных механизмов. По конструктивным признакам подшипники подразделяют на подшипники качения (роликовые и шариковые) и подшипники скольжения. В двигателях небольшой мощности чаще всего оба подшипника выбираются шариковыми.

Основной характеристикой подшипника является динамическая грузоподъемность C , но так как проектируемый двигатель является маломощным, то в конструктивных и экономических целях подшипники можно взять безнагрузочные или с малой грузоподъемностью.

По таблице 1 выбираем радиальный однорядный шарикоподшипник 18 (типоразмерный чертеж подшипника представлена на рисунке 3) легкой серии, параметры которого сведены в таблицу.

Таблица 1. Параметры выбранного подшипника

Условное обозначение подшипника	d , мм	D , мм	B , мм	r , мм	C , Н	C_0 , Н	n , об/мин
<i>Легкая серия</i>							
18	8	22	7	1,5	3250	1340	5600

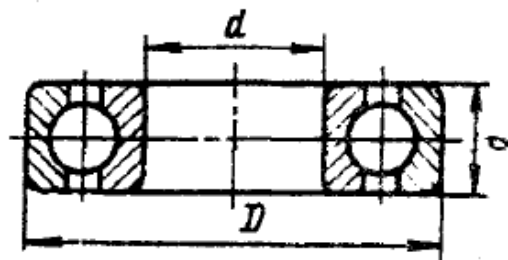


Рисунок 2 -. Шарикоподшипник

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Качество выполнения технологических процессов во многом определяет работоспособность и надежность электрических машин. При проектировании технологического процесса стоит задача с минимальными затратами обеспечить производство изделия, отвечающего его служебному назначению.

Основной и наиболее важной частью технологической подготовки сборочного производства является проектирование технологического процесса сборки. Технологический процесс сборки представляет собой совокупность операций по соединению деталей в определенной, техничеcки и экономически целесообразной последовательности для получения сборочных единиц, и изделий, полностью отвечающих установленным требованиям. Выполнение сборочных работ связано с большой затратой времени, составляющей значительную долю общей трудоемкости изготовления машины. В зависимости от типа производства затраты времени на сборочные работы составляют от 20 – 30 % в массовом и крупносерийном производстве до 35 – 40 % в мелкосерийном и единичном.

В состав технологического процесса сборки в качестве технологических операций и переходов включаются разнообразные сборочные работы. К этим работам относится: приведение деталей и покупных изделий в состояние, требуемое условиями сборки; обеспечение собираемости соединений и технических требований к ним; соединение сопрягаемых деталей посредством приведения в соприкосновение их сборочных баз; проверка точности взаимного расположения собираемых деталей и узлов и внесение, если это необходимо, соответствующих исправлений путем регулировки или пригонки; фиксация положения деталей и узлов для правильного выполнения ими целевого назначения при работе машины; проверка в процессе сборки и после её окончания соответствия сборочных единиц и изделия в целом

параметрам, установленным чертежом и техническими условиями; очистка, промывка, окраска и отделка изделия или составляющих его сборочных единиц и деталей.

Поэтому разработка технологии сборки машины является одной из важных составных частей технологической подготовки производства.

3.1. Анализ исходных данных

Исходя из задания, необходимо рассмотреть ротор двигателя КД51, дан сборочный чертеж и спецификация. В работе следует выполнить анализ исходных данных, определить служебное назначение и особенности конструкции ротора; оценить технологичность конструкции и произвести расчёт усилия запрессовки ротора без вала на вал, выбрать оборудование и оснастку для запрессовки. Сделать схему сборки ротора, маршрутную технологию сборки, рассчитать нормы времени, количества оборудования для выполнения годовой программы на выпуск 14000 штук. Выполнить эскизы схемы сборки, прессования ротора и график загрузки оборудования.

Ротор — вращающаяся часть двигателей и рабочих машин, на роторе расположены органы, получающие энергию от рабочего тела. Ротор вместе со статором предназначен для преобразования в асинхронном двигателе электрической энергии в механическую. Сердечник ротора является элементом магнитной цепи. Вращающий момент на валу ротора образуется в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля, созданного обмоткой статора, и тока, наведённого в литой короткозамкнутой обмотке.

Сердечник ротора с обмоткой напрессован на вал. Неподвижность сердечника на валу обеспечивается за счёт посадки с натягом под действием осевой силы, создаваемой прессом или с термовоздействием. Ротор после сборки с валом подлежит дополнительной механической обработке: точить наружный диаметр сердечника и галтели; шлифовать шейки вала под подшипники и выходной конец вала. После балансировки ротора

обработанную наружную поверхность сердечника необходимо окрасить эмалью ГФ-92ГС серой или ЭП-91 тёмно-зелёной ГОСТ 15943-80.

Для того, чтобы обеспечить качество продукции двигателя, то есть вращающего момента (величину, стабильность), а также самого двигателя (уменьшить шумы, вибрации, потери, увеличить долговечность и пр.), необходимо повысить точность формы, размеров, относительного положения и движения исполнительных поверхностей двигателя. В роторе для этой цели предусмотрены конструкторские и технологические меры. Балансировочные шайбы и предусмотренные для их монтажа бобышки позволяют выполнить динамическую балансировку ротора и уменьшить вибрации и шумы. Применение посадки ротора на вал с натягом позволяет уменьшить число деталей (нет шпонки) и снизить трудоемкость при сборке. Проточка наружного диаметра сердечника и шлифовка шеек вала под подшипники позволяют обеспечить точность и равномерность воздушного зазора, тем самым повысить качество двигателя и снизить стоимость штампа для штамповки листов сердечников.

3.2. Оценка технологичности конструкции

Технологичностью конструкции изделия называют совокупность свойств изделия, определяющих возможность достижения минимальных затрат средств, труда, материалов и времени при технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с однотипными конструкциями того же назначения при заданном уровне качества и принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта.

Ротор асинхронного двигателя – сборочная единица, состоящая из небольшого числа составных частей, что является подтверждением технологичности конструкции. Ротор состоит из: сборочная единица ротор без вала поз. 1, деталь вал поз. 2 и может быть несколько (по надобности) деталей шайб балансировочных поз. 3.

Компоновка ротора исключает необходимость проведения промежуточной разборки и повторной сборки его составных частей, а также сборочные единицы являются унифицированными, что позволяет заменять одни детали другими в случае дефектов.

Для сборки ротора применены технологичные виды соединений. Неподвижность ротора без вала на валу обеспечивает прессовая посадка. Балансировочная шайба фиксируется на бонке между вентиляционными лопатками расклёпыванием бонки.

Конструкция ротора обеспечивает свободный доступ рабочих органов оборудования и сборочных инструментов к соответствующим местам соединения деталей.

В конструкции ротора предусмотрена базовая составная часть – вал, являющийся основой для установки остальных составных частей.

При сборке ротора предусмотрена дополнительная механическая обработка. Внутреннее отверстие ротора без вала калибруют прошивкой или протяжкой, так как его ось не прямолинейна из-за разнотолщинности электротехнической стали. Шейки вала под подшипники, под вентилятор и выходной конец вала шлифуют после сборки ротора, так как вал деформируется при сборке. Всё это снижает технологичность конструкции ротора, но позволяет обеспечить равномерность воздушного зазора при сборке двигателя.

3.3. Запрессовка ротора без вала на вал

При общей сборке электрических машин и аппаратов обычно не возникает потребность в дополнительной механической обработке, необходимость в расчётах, связанных с образованием соединений. В тоже время при проектировании технологии узловой сборки часто приходится считать припуски на обработку сборочной единицы и режимы резания, определять усилия, необходимые для выполнения различных типов

соединений, выбирать режимы изготовления обмоток различной конструкции, выполнять расчеты, связанные с выбором приспособлений и сборочного оборудования и т.д.

3.3.1. Расчет усилия запрессовки

Исходные данные: наружный диаметр ротора $D=58_{-0,05}$ мм, номинальный диаметр соединения $d=10$ мм, диаметр отверстия в роторе без вала $\varnothing 10H7^{(+0,018)}$ мм, диаметр вала под напрессовку ротора $\varnothing 10u8^{(+0,060)}_{(+0,033)}$ мм, осевая длина ротора без вала $L=46$ мм.

Сборку подобных соединений (с натягом) осуществляют под действием осевой силы, создаваемой прессом (продольнопрессовое соединение), или с термовоздействием (поперечнопрессовое соединение). Критерием выбора способа сборки будет величина мощности, потребляемая оборудованием.

При продольнопрессовом соединении необходимо определить максимальное значение осевой силы P , создаваемой прессом.

$$P = f_3 \pi d L p = 0,14 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 46 \cdot 580,44 = 11740 \text{ Н} \in 11,74 \text{ кН};$$

где $f_3 = 0,14$ – коэффициент трения при запрессовке;

$$p = \frac{1}{d} \cdot \frac{\delta_p \cdot 10^{-3}}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}} = \frac{1}{10} \cdot \frac{58,08 \cdot 10^{-3}}{\frac{0,72}{20,6 \cdot 10^4} + \frac{1,341}{20,6 \cdot 10^4}} = 580,44, \quad \text{– давление на}$$

поверхности контакта, МПа

$$\delta_p = \delta_{\max} - 1,2(R_{a1} + R_{a2}) = 60 - 1,2 \cdot (0,8 + 0,8) = 58,08, \quad \text{– расчётный натяг}$$

в соединении, мкм;

$$\delta_{\max} = e s_{\epsilon} - E I_o = 60 - 0 = 60 \quad \text{– максимальный натяг в соединении, мкм;}$$

$$e s_{\epsilon} = 60 \quad \text{– верхнее предельное отклонение вала, мкм;}$$

$EI_o = 0$ – нижнее предельное отклонение отверстия, мкм;

$R_{a1} = R_{a2} = 0,8$ – шероховатость сопрягаемых поверхностей, мкм;

$C_1 = 1 - \mu_1 = 1 - 0,28 = 0,72$ – расчётный коэффициент для вала;

$C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2 = \frac{58^2 + 10^2}{58^2 - 10^2} + 0,28 = 1,341$ – расчётный коэффициент

для сердечника ротора;

$E_1 = E_2 = 20,6 \cdot 10^{10}$ – модуль Юнга для стали, Н/м²;

$\mu_1 = \mu_2 = 0,28$ – коэффициент Пуассона для стали.

Осевая сила, которую должен развивать пресс, равна 11,74 кН. Выбираем гидравлический одностоечный пресс типа П6320 с номинальной силой 12 кН.

Сборка с термовоздействием осуществляется путём нагрева ротора без вала для получения теплового сборочного зазора в соединении. Необходимая температура равна:

$$T = \frac{\delta_{max} + i}{k_\alpha \cdot d} + T_o = \frac{0,06 + 0,032}{11,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10} + 20 = 810 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $i = 0,01\sqrt{d} = 0,01\sqrt{10} = 0,032$ – тепловой сборочный зазор, мм,

$k_\alpha = 11,6 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент линейного расширения, С⁻¹,

$T_o = 20$ – температура окружающей среды, °С.

В серийном производстве часто применяют индукционные нагреватели, мощность которых можно рассчитать по формуле

$$W = \nu \frac{mc(T - T_o)}{\tau \eta \cdot 10^3} = 1 \cdot \frac{0,92 \cdot 481 \cdot (810 - 20)}{197,5 \cdot 0,4 \cdot 10^3} = 4,42 \text{ кВт},$$

где $\nu = 1$ – коэффициент, учитывающий величину зоны нагрева, принимаем равным 1, т.к. отношение длины ротора к диаметру мало и ротор будет нагреваться по всему объёму;

$$m = 0,25\pi(D^2 - d^2)L\gamma = 0,25 \cdot \pi \cdot (0,058^2 - 0,01^2) \cdot 0,04 \cdot 7800 = 0,92 \text{ кг} \quad -$$

ориентировочная масса ротора без вала;

$\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность электротехнической стали;

$c = 481 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ – удельная теплоёмкость стали;

$\tau = (T - T_o) / v_n = (810 - 20) / 4 = 197,5 \text{ , с}$ – время нагрева ротора;

$v_n = 4 \text{ , } ^\circ\text{C/с}$ – скорость нагрева ротора;

$\eta = 0,4$, общий КПД индуктора.

Так как качество сопряжения при термовоздействии выше, то выбираем именно этот метод и оборудование в виде индукционной нагревательной установки.

3.3.2. Выбор оборудования и оснастки

Для запрессовки ротора выбираем установку индукционного нагрева среднего модельного ряда SEIT Elettronica 1/2TSSS. Его рабочие характеристики:

Питание: ~3, 400 В (230 В, 480 В - на заказ), 50/60 Гц.

Частота генераторов: 25... 50 кГц.

Номинальная выходная мощность: 5...15 кВт.

Цифровой контроль.

Регулируемая мощность: от 10 до 100%.

Управление процессом: ручное или посредством таймера.

Индикатор аварийного сигнала с сигнальным реле.

Габариты: 495x495x910 мм.

Вес: 100 кг.

Токарный станок для обтачивания наружного диаметра сердечника ротора выбираем Jet BD-920W с набором резцов 10x10 мм (11 шт.) для

токарных станков Jet 50000094. Обработка за один проход резцом, заранее установленным на размер (рис. 3). В процессе обработки всей партии заготовок резец, установленный на размер $d=58$ мм, не перемещается в поперечном направлении. После обтачивания детали на длине $l=40$ ее снимают, а резец отводят в исходное положение.

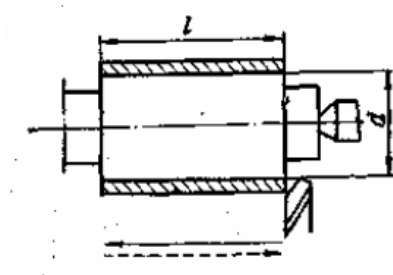


Рис. 3. Метод обработки наружного диаметра ротора

Таблица 2 – Технические характеристики станка JET BD-920W

Система подачи СОЖ - нет	Напряжение, В - 220
Конус задней бабки - МК-2	Мощность, Вт - 980
Мах диаметр обработки над станиной, мм - 220	Расстояние между центрами, мм - 500
Частота вращения шпинделя, об/мин 110-1700	Диапазон метрической резьбы, мм - 0.4-3.5
Мах размер державки резца, мм - 12	Ход пиноли, мм - 40
Поперечный ход суппорта, мм - 125	Продольный ход суппорта, мм - 45
Конус шпинделя - МК-3	Диаметр сквозного отверстия шпинделя, мм20
Габариты, мм940x510x500	Вес, кг - 110

При изготовлении гладких валов в массовом производстве в качестве заготовок применяют калиброванные прутки 3-го, 3а и 4-го классов точности. В этом случае обработка гладких валов производится на станках шлифовальной группы —предварительное и окончательное шлифование на бесцентрово-шлифовальном станке. При обработке длинных гладких валов из горячекатаного проката их предварительно обтачивают на бесцентрово-обточных станках, а затем шлифуют на бесцентрово-шлифовальных станках или обкатывают роликами на правильно-полировальных станках. Для этого применим комбинированный шлифовальный станок PROMA ВРК-2100/400.

Таблица 3 – Технические характеристики станка PROMA ВРК-21--/400

Материал обработки	Мощность, Вт	Длина ленты, мм	Напряжение, В	Ширина ленты, мм	Вес, кг
металл	3300	2000	380	100	159

Для балансировки выберем станок из серии БС-24 для роторов массой от 100 грамм до 10 килограмм. Модельный ряд балансировочных станков БС-24 включает в себя балансировочные машины БС-24-8, БС-24-16.

Таблица 4 - Технические характеристики балансировочных станков

Параметры	БС-24-8	БС-24-16
Максимальная масса ротора, кг	10	20
Минимальная масса ротора, кг	0,1	0,2
Максимальная нагрузка на одну опору, кг	5	10
Диаметр балансируемых роторов (min-max), мм	15-300	15-400
Расстояние между серединами, опорных шеек ротора (min-max), мм *	40-500	
Диаметр опорных шеек ротора (min-max), мм	6-16	8-30
Максимально достижимый, остаточный дисбаланс, г х мм/кг	0,1	0,11
Частота вращения при балансировке		
	600-4000	
Тип привода	Ременной, асинхронный, частотно регулируемый	
Система натяжения	Тангенциальная / 4 шкива	
Тип опор	Роликовые, V-образные	

Продолжение таблицы 4

Мощность привода, кВт	0,15	0,37
Габариты станка, мм	650x750x800	
Масса механической части станка (не более), кг	130	160
Напряжение питания, В	220/380	

Инструмент для окраски сердечника ротора выбираем компрессор Калибр Мастер кб-1100м. Характеристики: поршневой компрессор, тип – безмасляный, привод – прямой, мобильность – стационарный, тип двигателя – электрический, производительность на входе - 180л/м, давление - 8 бар, мощность - 1.1 кВт.

Для определения биений используем прибор RPGP. В основе закалённая и шлифованная опорная плита с 2 зажимными пазами. Бесступенчатая регулировка положения призматических поверочных приспособлений (с твердосплавными накладками), откаточного приспособления и шарнирного штатива. Универсальный упор, который может быть установлен точно в одной плоскости и под прямым углом к призмам. Благодаря углу призм 108° возможен также контроль деталей полигональной формы. Шарнирный штатив для крепления индикатора часового типа или рычажного индикатора. Позволяет измерять торцевые и радиальные биения вращающихся деталей (рисунок 4).

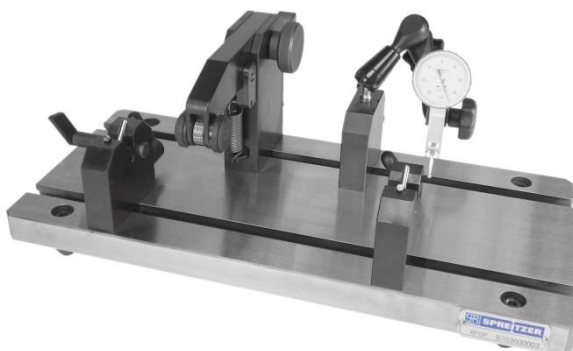


Рисунок 4 - Биениемер

3.4. Составление схемы сборки и маршрутной технологии

В качестве базовой детали принимаем вал, так как его проще зафиксировать в приспособлении. Ротор без вала напрессовать на вал на гидравлическом прессе типа П6320.

Затем точить наружный диаметр сердечника ротора без вала на станке Jet BD-920W, шлифовать шейки вала на шлифовальном станке ПРОМА ВРК-2100/400, балансировать динамически на балансировочном станке БС-24-8, устраняя дисбаланс установкой шайб на бонки ротора, расклепать бонки для фиксации шайб. В заключение наружную поверхность ротора необходимо покрыть эмалью ГФ-92ГС (рисунок 5). Провести контроль сборки.

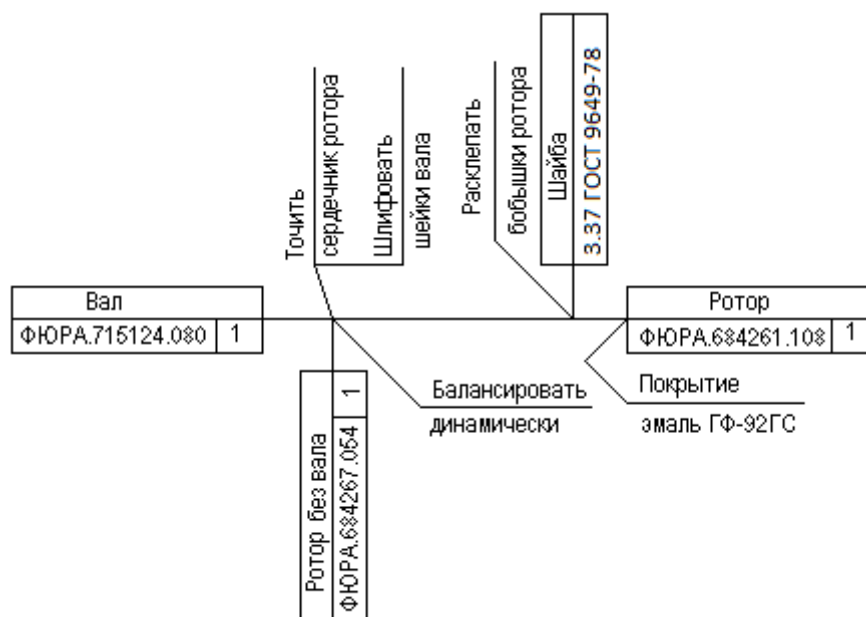


Рисунок 5 - Схема сборки ротора

На базе схемы сборки разрабатывается маршрутная технология, устанавливающая последовательность и содержание операций. Если последовательность операций уже predeterminedена схемой сборки, то содержание операций устанавливают в зависимости от выбранного типа производства и темпа сборки.

3.5. Расчет норм времени

Определение норм времени производится по укрупнённым нормативам (на технологические переходы) и по типовым нормам, составленным аналитическим методом для типовых технологических процессов. В нормировочном справочнике [3] в специальных подразделах приведены различные операции с разбивкой на технологические переходы. Для каждого перехода приведены возможные варианты их выполнения в зависимости от факторов, влияющих на процесс сборки (масса, диаметр, вид посадки, величина перемещения, способ перемещения, число точек ориентации и пр.). Для каждого перехода приведены значения штучного времени, т.е. в этих

значениях учтено не только операционное время, но и время на обслуживание рабочего места и время на личные потребности и отдых. Расчёт штучного времени на операцию произведем с помощью таблицы 5.

Таблица 5. Нормы времени для прессования ротора

№	Содержание работы	Факторы, влияющие на время сборки	№ карты и позиции	Время мин.
1	Взять ротор без вала, протереть отверстие под вал. Протереть и смазать поверхность вала под ротор без вала. Установить ротор без вала в оправку. Нагреть.	Диаметр отверстия в оправке 58 мм, масса ротора без вала 1,098 кг (до 2 кг), длина продвижения 25 мм, посадка H12/d12 (ходовая).	К. П.	1,6 0,35
2	Установить вал в отверстие ротора без вала.	Установочный диаметр вала 10 мм, масса вала 0,369 кг (до 0,5 кг), длина продвижения 55 мм, посадка H12/d12 (ходовая).		0,22
3	Установить оправку на вал.	Диаметр отверстия в оправке 10 мм, масса оправки 1.5 кг (до 3 кг), длина продвижения 15 мм, посадка H12/h12 (скольжения).		0,25
4	Запрессовать вал в ротор без вала. Установить и снять оправку.	Масса вала 0,369 кг (до 0,5 кг), длина запрессовки 58 мм (до 100 мм), посадка H7/u8 (прессовая) Оправка массой 1.5 кг (до 3 кг).		0,45 0,11
Итого				2,98

Тогда оперативное время $T_{оп}=2,98$.

Процент времени на обслуживание и отдых оперативного $П_{об.от}= 8 \%$,
 $T_{об.от.}=0,08 \cdot 2,98=0,238$ мин.

Норма штучного времени $T_{шт}$ рассчитывается по формуле:

$$T_{шт}=T_{оп}+T_{обсл}+T_{отд}=2,98+0,238+0,025 \cdot 2,98=3,268 \text{ мин.}$$

где $T_{оп}$ – норма оперативного времени, $T_{обсл}$ – время обслуживания рабочего места (8% от $T_{оп}$), $T_{отд}$ – время на личные надобности (2,5% от $T_{оп}$).

Определим штучно-калькуляционное время для каждой операции. Результаты расчёта штучно-калькуляционного времени для каждой операции для удобства сведём в нижеуказанную таблицу.

Таблица 5 - Нормы времени

операция время	протяжка	соединение вала с ротором	токарная	Шлифовка вала	вибрационная	Балансировка ротора	окрашивание	Контрольная (общая)
T_0 , мин	2,02	1,28	1,10	1,37	0,53	1,40	0,8	4,49
$T_в$, мин	0,34	1,70	0,26	0,34	0,20	0,26	0,21	1,45
$T_{оп}$, мин	2,36	2,98	1,36	1,71	0,73	1,66	1,01	5,94
$T_{об}$, мин	0,189	0,23	0,109	0,137	0,058	0,080	0,081	0,475
$T_{п}$, мин	0,059	0,075	0,034	0,043	0,018	0,042	0,025	0,149
$T_{шт}$, мин	2,61	3,26	1,50	1,89	0,81	1,78	1,12	6,56
$T_{пз}$, мин	0,91	1,15	0,53	0,66	0,28	0,62	0,39	2,30
$T_{шт-к}$, мин	2,61	3,27	1,50	1,89	0,81	1,78	1,12	6,57

3.6. Расчет количества оборудования

Количество оборудования, необходимое для организации производства, и его загрузка являются исходными данными для проектирования участка цеха. Определяем составляющие на 2015 год, число дней в котором 365.

$B_d = 118$ – количество выходных дней;

$\Pi_d = 8$ – количество праздничных дней;

$z = 1$ – число смен работы оборудования;

$K_p = 0,97$, т.к. масса пресса равна 1,208 т.

Эффективный годовой фонд времени работы индукционного нагревателя равен

$$F_d = [(365 - B_d - \Pi_d) \cdot 8 - \Pi_{пд}] \cdot z \cdot K_p = \\ = [(365 - 118 - 14) \cdot 8] \cdot 1 \cdot 0,97 = 1971 \text{ часов.}$$

Норма штучного времени $T_{шт}$ рассчитывается по формуле:

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{обсл} + T_{отд} = 2,98 + 0,238 + 0,025 \cdot 2,98 = 3,268 \text{ мин.}$$

где $T_{оп}$ – норма оперативного времени, $T_{обсл}$ – время обслуживания рабочего места (8% от $T_{оп}$), $T_{отд}$ – время на личные надобности (2,5% от $T_{оп}$).

Расчетное число оборудования равно

$$C_p = \frac{T_{шт-к} \cdot N}{60 F_d} = \frac{3,27 \cdot 14000}{60 \cdot 1971} = 0,39, \text{ где}$$

$$T_{шт-к} = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n_{изд}} = 3,268 + \frac{1,14}{1167} = 3,27 \text{ мин,}$$

где $T_{пз}$ – подготовительно-заключительное время, можно принять $T_{пз} = 0,35 \cdot T_{шт} = 0,35 \cdot 3,268 = 1,14$ мин, $n_{изд} = \frac{N}{12} = \frac{14000}{12} = 1167$ – число изделий в месячной партии.

Принимаем число оборудования равным $C_n = 1$ и определяем коэффициент загрузки $K_z = (C_p / C_n) \cdot 100 = (0,39 / 1) \cdot 100 = 39 \%$.

Аналогичным образом рассчитываем другие коэффициенты загрузки для другого оборудования. График загрузки оборудования представлен на рисунке 6.

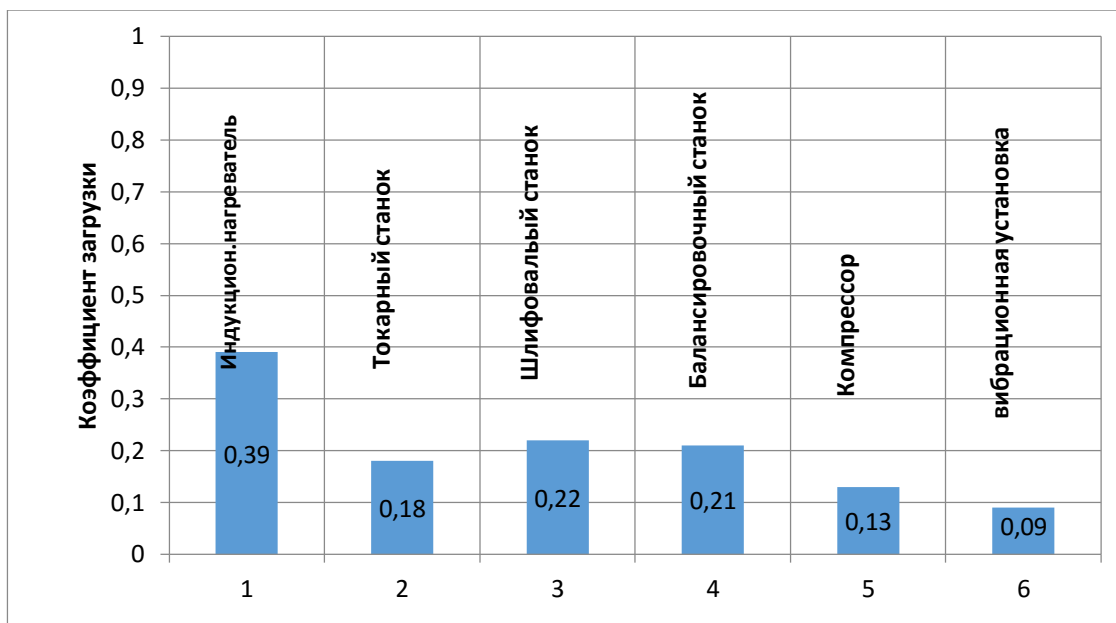


Рисунок 6 - График загрузки оборудования

В данном разделе был разработан оптимальный технологический процесс сборки однофазного ротора для двигателя КД51. Проанализированы входные данные для определения технологичности конструкции и дальнейших работ. Отдельно рассмотрен процесс напрессовки вала несколькими способами, выбран наиболее оптимальный – продольно-прессовое соединение. Также выбрано оборудование и оснастка для осуществления сборки по выбранной схеме. При разработке технологических процессов сборки использовалась информация: базовая, руководящая и справочная. Разработка основывалась на методе полной взаимозаменяемости.