

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ
АКАДЕМИЯ

Кафедра «Электротехника и электрооборудование»

Пояснительная записка

к курсовому проекту по дисциплине «Электрические машины»

Тема проекта:

«Электрический двигатель постоянного тока»

Руководитель проекта:

доцент кафедры

«ЭТ и ЭО»

кандидат технических наук

В.Т. Климченков

Разработчик проекта:

студент гр. ЭСА-99-1зу

Краматорск, 2003

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к курсовому проекту по дисциплине “Электрические машины”: с., разделов, рис., перечень ссылок из наименований.

Объектом курсового проекта явился электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения, предназначенный для общепромышленного применения.

Предметом проекта – расчетные параметры электродвигателя, характеризующие основные размеры деталей его конструкции, их электрические, магнитные и механические нагрузки, позволяющие изготовить работоспособную и надежную конструкцию двигателя.

Целью курсового проекта явилась разработка конструкции электродвигателя, соответствующей заданным параметрам, учитывающей состояние современного конструктивного исполнения электрических машин такого типа и технологии их промышленного изготовления, обеспечивающей высокую степень использования активных и конструктивных деталей, наименьшую стоимость спроектированной конструкции при заданной долговечности.

В курсовом проекте разработаны: конструктивное исполнение деталей; выбран для них соответствующий материал; просчитаны электрические, магнитные и механические нагрузки материала деталей, проведено их сравнение с допускаемыми; проверена степень использования электрической энергии при ее преобразовании в механическую данным двигателем.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПОСТОЯННЫЙ ТОК, КОНСТРУКЦИЯ, НАГРУЗКИ, РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

ВВЕДЕНИЕ.....	
1 ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК.....	
1.1 Выбор диаметра и длины ротора, электромагнитных нагрузок.....	
1.2 Выбор параметров обмотки ротора и уточнение ранее принятых.....	
1.3 Размеры и спецификация паза ротора, сердечник ротора, вал.....	
1.4 Расчет параметров коллектора, выбор щеток.....	
1.5 Определение размеров главного и дополнительного полюсов, ста- нины.....	
1.6 Проверка условий коммутации.....	
2 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ МАШИНЫ.....	
2.1 Эскиз магнитной цепи, линейные размеры ее участков.....	
2.2 Применение закона полного тока.....	
2.3 Определение параметров шунтовой обмотки возбуждения главных полюсов.....	
3 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В МАШИНЕ И КОЭФФИЦИЕНТА ПО- ЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.....	
3.1 Электрические потери мощности в обмотках и на коллекторе.....	
3.2 Потери мощности на перемагничивание сердечника ротора.....	
3.3 Механические и вентиляционные потери мощности.....	
3.4 Определение коэффициента полезного действия проектируемой машины.....	
4 РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.....	
4.1 Расчет характеристик холостого хода, переходной и намагничива- ния.....	
4.2 Расчет рабочих характеристик двигателя.....	
5 ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ.....	
5.1 Выбор системы вентиляции машины.....	

5.2	Определение основных параметров вентилятора.....
6	ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МАШИНЫ.....
6.1	Допускаемые превышения температуры деталей конструкции.....
6.2	Перепад температуры по толщине пазовой изоляции обмотки ротора.....
6.3	Превышение температуры сердечника и обмотки ротора.....
6.4	Превышение температуры обмотки возбуждения главного полюса.....
6.5	Превышение температуры обмотки возбуждения добавочного полюса.....
6.6	Превышение температуры коллектора.....
7	МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИИ.....
7.1	Расчет вала на жесткость и прочность.....
7.1.1	Расчет вала на жесткость.....
7.1.2	Расчет вала на прочность.....
7.2	Расчет подшипников.....
	ВЫВОДЫ.....
	ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....
	РЕЦЕНЗИЯ.....
	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства спроектированной и изготовленной электрической машины имеют важное значение при ее использовании во всех отраслях народного хозяйства. Проектирование машины предусматривает: расчет линейных размеров статора; выбор типа обмоток, размеров и числа пазов, обмоточных проводов, изоляции, материала активных и конструктивных деталей. Отдельные детали машины должны быть сконструированы и рассчитаны так, чтобы при их изготовлении и сборке машины обеспечивались наименьший расход материалов и трудоемкость, а в условиях эксплуатации наиболее высокие энергетические показатели (минимальные потери мощности и высокий коэффициент полезного действия). Но при этом машина должна соответствовать производственным требованиям по месту ее применения. Проектирование машины должно учитывать накопленный ранее опыт, требования государственных и отраслевых стандартов.

В представленном проекте речь идет о проектировании электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения, предназначенного для общепромышленного применения (в станкостроении, текстильной и полиграфической промышленности и других отраслях). Двигатель обеспечивает высокий вращательный момент при пуске в ход, плавное регулирование частоты вращения ротора и производственного механизма (например, поворота платформы грузоподъемного крана), высокую перегрузочную способность. Отличительной особенностью такого двигателя является наличие коллекторного узла, создающего непрерывный скользящий электрический контакт вращающейся обмотки ротора с неподвижной питающей сетью. Двигатель имеет горизонтальный вал, цилиндрический ротор с коллектором, цилиндрическую станину с главными и дополнительными полюсами, ротор установлен в подшипниковых щитах.

1 ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК

1.1 Выбор диаметра и длины ротора, электромагнитных нагрузок

Для каждой проектируемой машины из предыдущего опыта [1-3] установлено оптимальное соотношение между частотой вращения ротора и полезной механической мощностью, передаваемой через вал производственному механизму. При заданных габаритах мощность пропорциональна частоте вращения ротора. Выбрав оптимальное соотношение $P_{2ном}/n_{ном}$, мы обеспечиваем высокое использование активных материалов и наименьшую стоимость проектированной конструкции.

В соответствии с указанным по кривой рис. 1 [4] предварительно находим рекомендуемую величину внешнего диаметра ротора D_a по заданному соотношению $K = P_{2ном}/n_{ном}$ [Вт/мин⁻¹]. При $K =$ [Вт/мин⁻¹] выбираем $D_a =$ [м].

По выбранному D_a из кривой рис. 2 [1] находим рекомендуемую величину линейной токовой нагрузки A [А/м], приходящейся на единицу длины окружности ротора (πD_a). Для заданного класса нагревостойкости изоляции машины F по $D_a =$ [м] находим $A =$ [А/м].

По кривой рис. 3 [1] находим рекомендуемое значение магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ под главным полюсом машины в зависимости от выбранного D_a . Находим $B_\delta =$ [Тл].

Мощность $P_{1ном}$, потребляемая двигателем из питающей сети, зависит от его коэффициента полезного действия (КПД) $\eta_{ном}$. По кривым рис. 4 [1] находим предварительное значение КПД для машин общепромышленного применения в зависимости от $P_{2ном}$ [кВт]. Находим $\eta_{ном} =$. Отсюда $P_{1ном} = P_{2ном} (100 - \eta_{ном}) / 2 * \eta_{ном} =$ [кВт].

Наиболее выгодное число главных полюсов машины $2 * p$ выбираем по кривым рис. 5 [1] в зависимости от D_a . Находим $2 * p = 2$. Отсюда полюсное

деление $\tau = \frac{\pi * D_a}{2 * p} =$ [м]. Величину коэффициента полюсного

перекрытия a_p , равного отношению длины дуги главного полюса b_p к полюсному делению τ , для машин с дополнительными полюсами выбираем в пределах 0,65 – 0,75, для машин без этих полюсов – до 0,8. Принимаем $a_p = b_p/\tau =$. Отсюда $b_p = a_p * \tau =$ [м].

В соответствии с принятыми ранее параметрами расчетную длину ротора находим из выражения: $l_a = 6.1 * P_{1ном} * 10^3 / a_p A * B_\delta * D^2 * n_{ном}$ [м].
 . Полученное l_a проверяем по соотношению $\lambda = l_a / \tau$. Рекомендуют выбирать $0,5 \leq \lambda \leq 1,5$. В проектируемой машине $\lambda =$, т. е. находится в рекомендуемых пределах.

1.2 Выбор параметров обмотки ротора и уточнение ранее принятых

Чем меньше общее число проводников N в обмотке ротора (якоря), тем ниже трудоемкость изготовления ротора и его стоимость, объем изоляции в пазах и размеры паза. Из формулы для электродвижущей силы (ЭДС) обмотки якоря следует, что минимальное число проводников получается при простой волновой обмотке: $2a=2$, $a=1$, $2p=2$. У электродвигателя ЭДС ниже, чем напряжение питающей сети: $E_{аном} = (0,91 - 0,98) * U_{ном}$ [В]. Принимаем коэффициент 0,95, тогда $E_{аном} =$ [В].

При выбранных параметрах магнитный поток в воздушно зазоре под главным полюсом определяем из выражения: $\Phi = a_p * \tau * l_a * B_\delta =$ [Вб].

Возможность применения простой волновой обмотки проверяют по допустимой величине тока в одной параллельной ветви. Ток $I_{ном}$, потребляемый двигателем из сети, найдем по мощности $P_{1ном} : I_{ном} = P_{1ном} / U_{ном} =$ [А]. Для машин мощностью от 10 до 100 [кВт] ток возбуждения $I_{вном}$ главных полюсов составляет 0,025. Тогда $I_{вном} = 0,025 * I_{ном} =$ [А]. Ток в одной параллельной ветви: $i_{аном} = I_{аном} / 2a$, $I_{аном} = I_{ном} - I_{вном} =$ [А], $i_{аном} =$ [А]. В одной параллельной ветви допускается ток 250 – 300 [А], по этому параметру выбранный тип обмотки проходит.

Из данных табл. 2 ориентировочно выбираем число пазов Z ротора, приходящихся на один полюс, т. е. $Z/2 \cdot p$ в зависимости от D_a . При выбранном D_a находим $Z/2 \cdot p =$. Тогда общее число пазов на поверхности ротора: $(Z/2 \cdot p) \cdot 2 \cdot p =$.

Чтобы верно спроектировать обмотку якоря, необходимо соблюсти соотношения между основными параметрами: Z – нечетное целое число; $Z/2 \cdot p$ – дробное число; $N/Z = N_{\Pi}$ – четное целое число; $K = S$ – нечетное целое число; $W_c = 2, 4, 6$ – четное число; $2 \cdot K \cdot W_c = N$ – четное целое число; $U_{\Pi} = K/Z$ – нечетное целое число; $K/2 \cdot p$ – дробное число; $W_a = (N/2 \cdot a)/W_c$ – целое четное число; Z/a – целое число, K/a – целое число, $2 \cdot p/a$ – целое число. Выполнение этих соотношений обеспечивает симметричность обмотки.

Принимаем: $Z =$, $U_{\Pi} =$; $k = U_{\Pi} \cdot Z =$; $S = Z_{\odot} = K =$; $Z/a =$
 $=$, $K/a =$, $2 \cdot p/a =$; $2 \cdot K \cdot W_c = N =$;
 $N/Z = N_{\Pi} =$; $Z/2 \cdot p =$; $y_Z =$; $\varepsilon_k =$;
 $N_{\Pi}/U_{\Pi} =$ - слоя проводников в пазу, в одном слое 2 проводника; $y_1 =$
 $= y_Z \cdot U_{\Pi} =$ - коллекторных делений; $y_k = y = \frac{K-1}{K} =$ кол-
лекторных делений; $y_2 = y - y_1 =$ коллекторных делений;
 $y = y_1 + y_2 =$ коллекторных деления; $Z_{\odot} = U_{\Pi} \cdot Z =$; $y_z = Z/2 \cdot p$
целая часть; $y =$; $W_a = N/2 \cdot a \cdot W_c =$.

Обмотку якоря (ротора) изготовят из -ти якорных катушек по 8 проводников в катушке, по секций в катушке, катушку изолируют от стенок паза и в лобовых частях. На рис. 6 показана схема укладки в пазы простой волновой обмотки. Последовательность укладки катушек в пазы ротора: изготавливают катушки на шаблоне и изолируют ее; укладывают катушку в первый паз, вторую сторону этой катушки уложат в -й паз (правее первого по окружности ротора); 1-я коллекторная пластина сдвинута левее 1-го паза по окружности ротора на коллекторных пластин (элементарных пазов), т. е. к -ой коллекторной пластине слева от 1-го паза присоединяют начало 1-ой секции; от 1-ой коллекторной пластины перехо-

дим к -ой коллекторной пластине вправо от окружности ротора, затем к 1-ой коллекторной пластине; номера пазов при укладке катушек следуют - .

В результате выполнения условий симметрии обмотки якоря появилась возможность проверить ряд ранее выбранных по рекомендациям параметров.

Линейная токовая нагрузка: $A = \frac{N * i_{ном}}{D_a} =$ [А/м], уточ-

няем в связи с определением числа проводников в обмотке ротора. Проверяем выбранное число коллекторных пластин по допустимому среднему напряжению $V_{ксп}$ между двумя соседними пластинами;

$U_{иср} = \frac{U_{ном} * 2 * p}{K} =$

= [В], по условиям коммутации это напряжение не должно превышать 15-16 [В] для машин без компенсационной обмотки, при выбранном К оно не превышает допустимого значения.

Проверяем величину ЭДС $E_{аном} = \frac{p * N}{60 * a} * n_{ном} * \Phi =$ [В],

отношение $\frac{E_{аном}}{U_{ном}} =$ [В], близко к рекомендуемому. Величина маг-

нитного потока: $\Phi = \frac{60 * a * E_{аном}}{p * n_{ном} * N} =$ [Вб]. В

этом случае магнитная индукция в воздушном зазоре : $B_{\delta} = \frac{\Phi}{a_p * \tau \ell} =$

= [Тл], что соответствует допустимой величине в 0,8-1 [Тл]. По условиям коммутации произведе-

ние $A * t_1$ не должно превышать 1500 – 1800 [А] при $D_a \leq 1.0$ [М], где

$t_1 = \frac{\pi * D_a}{Z}$ - зубцовое деление. При $D_a \leq 0,3$ м рекомендуют $t_1 = 0,015 - 0,028$

[м], при $D_a > 0,3$ [м] - (0.022-0.035) [м]. У проектируемой машины: $t_1 =$

= [м]; $A * t_1 =$ [А]; выбран-

ные параметры находятся в допусаемых пределах.

1.3 Размеры и спецификация паза ротора, сердечник ротора, вал

При известной величине тока в проводнике обмотки ротора $i_{\text{аном}} =$
 $=$ [А] следует определить сечение этого проводника S_a и его разме-
ры. Для проводников обмотки якоря допускаемая плотность тока находится в
пределах 4 – 10 [А/мм²]. Если полученное S_a не превышает 2,57 мм² (этому
соответствует диаметр круглого проводника – 1,81 мм), то выбирают круг-
лый изолированный провод и полужакрытый паз. Если требуется большое се-
чение, то выбирают изолированный проводник прямоугольного сечения. Паз
при этом открытый прямоугольного сечения, что облегчает укладку катушек
обмотки якоря в пазы при изготовлении машины.

Принимаем $j_a =$ [А/мм²], тогда: $S_a = \frac{i_{\text{аном}}}{j_a} =$ [мм²], провод

прямоугольного сечения и открытый паз прямоугольного сечения. По табл.
3 выбираем прямоугольный провод размером $a*b$ (a - меньший размер, b –
большой размер) близкого по площади S_a поперечного сечения: $S_a =$ [мм²];
размеры проводника без изоляции - $a =$ мм, $b =$ мм; с учетом изоляции
при ее толщине на обе стороны в мм размеры проводника – мм;
изоляция- высокопрочная эмаль на полиэфиримидной основе; провод марки
ПЭТ-155А; класс нагревостойкости изоляции - . Фактически плотность то-
ка в проводнике составит: $j_a = \frac{i_{\text{аном}}}{S_a} =$ [А/мм²], что находится в до-
пускаемых пределах.

Размеры паза «в свету определяем» по размеру изолированного про-
водника и количеству проводников $N_{\text{п}}$ в одном пазу ротора, добавляется еще
толщина изоляции каждого витка (витковая изоляция) и всей катушки от сте-
ны паза (корпусная изоляция). На рис. 7 приведена схема заполнения паза
ротора по ширине и высоте проводниками с витковой и корпусной изоляци-
ей. Крепление проводников обмотки в пазу осуществлено стеклотекстолито-
вым клином толщиной 3,5 мм (рекомендуемая толщина - 3 – 4 мм). В табл. 4
приведена спецификация паза ротора с объемной привязкой, соответствующей

щей отдельным позициям на рис. 7. Учитывая схему заполнения паза, спецификацию элементов обмотки и изоляции в пазу, размеры всех элементов паза, определены размеры паза «в свету»: ширина паза – $b_{\Pi} =$ [мм], высота паза равна высоте зубца - $h_{\Pi} = h_z =$ [мм].

Проверяем полученную высоту паза с рекомендуемой по рис. 8. При выбранном D_a высота паза не должна превышать [мм], что выполнено. Ширина паза проверяется по максимально допустимой индукции $B_{Z_{\max}}$ в самом узком сечении зубца ротора, т. е. у его основания. Магнитная индукция в минимальном сечении зубца сердечника ротора с прямоугольными пазами не должна превышать 2,1-2,3 [Тл] при частоте перемагничивания стали сердеч-

ника f до 50 [Гц]. Для проектируемой машины $f = \frac{p * n}{60} =$ [Гц]

принимаем $B_{Z_{\max}} =$ [Тл]. Ширина зубцового сечения у основания зубца:

$$t_3 = \pi * (D_a - 2 * h_{\Pi}) / Z =$$

[мм]. Ширина самого зубца в этом месте: $b_z = t_3 - b_{\Pi} =$

Отсюда минимальная ширина зубца при $B_{z_{\max}}$ должна быть не менее, чем:

$$b_{z_{\min}} = B_{\sigma} * t_1 * l_a / \kappa * l_a * B_{z_{\max}} =$$
 [мм].

Принятая ширина зубца соответствует требованиям.

При $D_a \leq 0.59$ [м] сердечник ротора напрессовывают на вал машины, тогда внутренний диаметр сердечника равен диаметру вала d_B . Ориентировочно диаметр вала выбирают в соответствии с выражением:

$$d_B = K * \sqrt[3]{P_{2\text{ном}} / n_{\text{ном}}} \text{ [см]}, \text{ где } K=25-35, \text{ при } D \text{ до } 0,5 \text{ м;}$$

$$d_B = (25 - 35) \sqrt[3]{11.6} \text{ [мм]} \quad \text{.Принимаем}$$

$d_B =$ [см]. Высота ярма ротора h_a при этом определится в соответствии с рис. 9. Так как машина выполнена в соответствии с аксиальной системой вентиляции, то в сердечнике ротора предусмотрены вентиляционные каналы. При $D_a < 0.3$ [м] предусматривают один ряд аксиальных каналов: диаметр каналов d_k от 15 до 22 мм, число каналов – $n_k = 14-22$. Предварительно выбираем один ряд каналов $d_k =$ [мм], $n_k =$ [шт]. Отсюда

$$h_a = \frac{(D_a - d_B)}{2} - h_z - d_k = \quad \text{[мм]}. \text{ Предельно}$$

допустимая индукция в ярме ротора при частоте перемагничивания стали f до 50 [Гц] составляет $B_a = 1,45$ [Тл]. Проверяем величину магнитной индукции

$$\text{в ярме ротора при выбранной } h_a: B_a = \frac{\Phi}{2 * K_c * l_a * h_a} =$$

$$= \quad \text{Тл}]. \text{ Величина магнитной индукции}$$

не превышает предельно допустимое значение.

Пакет сердечника ротора набирают из штампованных и изолированных лаком листов электротехнической стали марки 2211 толщиной 0,5 мм. Напрессовывают непосредственно на вал и зажимают между двумя кольцами, которые одновременно служат опорой для лобовых частей обмотки ротора (выполняют роль обмоткодержателей). Вал будет изготовлен из стали марки 45, имеет ступенчатую форму для отдельной посадки на него сердечника ротора, коллектора, вентилятора и подшипников.

$$\text{Длина лобовых частей обмотки ротора зависит от } \tau: l_{л} = 1,4 \tau =$$

$$\text{[м]}. \text{ Средняя длина одного витка обмотки: } l_{ocp} = 2 * (l_a + l_{л}) =$$

$$= \quad \text{[м]}. \text{ Полная длина проводников обмотки}$$

$$\text{якоря: } L_{oa} = W_a * l_{ocp} \text{ [м]}, \text{ где } W_a - \text{ число витков обмотки; } W_a = \frac{(N/2)}{W_c} = \quad ;$$

$$L_{oa} = W_a * l_{ocp} = \quad \text{[м]}. \text{ Масса обмотки якоря:}$$

$$m_{oa} = 8900 * L_{oa} * S_a = \quad \text{[кг]}. \text{ Сопротивление об-}$$

$$\text{мотки ротора при температуре } t = 20^{\circ} \text{ C: } R_a =$$

$$\text{[Ом]}.$$

1.4 Расчет параметров коллектора, выбор щеток

Диаметр коллектора D_k при открытых пазах ротора выбирают в пределах: $D_k = (0,65 - 0,8) * D_a =$ [м]. По табл. 5 выбираем

стандартный диаметр $D_k =$ [м]. На рис. 10 приведен продольный разрез

выбранной конструкции коллектора. Коллекторные пластины изготавливают

из твердотянутой меди трапецеидального сечения, изоляционные прокладки – из коллекторного миканита толщиной 0,8-1,5 [мм]. Изоляционные манжеты – из формовочного миканита толщиной 1-1,5 [мм], изоляционный цилиндр – толщиной 0,75-1 [мм].

При D_k до 0,5 [мм] размер коллекторного деления t_k должен быть не менее 3-8 [мм], при $D_k > 0.5 [м] - t_k \geq 5 [мм]$, при $D_k > 21[см]$ применяют пестушки для соединения проводников обмотки якоря с коллекторными пластинами. Проверяем размер коллекторного деления:

$$t_k = \frac{\pi * D_k}{K} =$$

= [мм], что соответствует требованиям. При толщине изоляционной прокладки в 0,8 мм толщина медной пластины на рабочей поверхности коллектора составит: $(t_k - 0.8) =$ [мм].

Высоту коллекторной пластины принимают: $h_k = (0.8 - 1.15) \sqrt{D_k} =$

$$[см]. \text{ Принимаем } h_k = [см]. \text{ Высота ласточкина хвоста } h_1: h_1 = (0.5 - 0.55) * h_k = [см].$$

Принимаем $h_1 = [см]$.

Принимаем $h_1 = [см]$.

Для машин мощностью от 10 до 200 [кВт] при напряжении до 1000 [В] по табл. 6 рекомендованы электрографитированные щетки. Принимаем щетки марки ЭГ2а: переходное падение напряжения на пару щеток разной полярности - $\Delta V_{щ} = 2,6 [В]$; удельное нажатие на щетку – $p_{щ} = 200-250 [Г/см^2]$; окружная скорость на рабочей поверхности коллектора - V_k до 45 [м/с]; коэффициент трения щеток о поверхность – $f_{тр} = 0,25$.

Суммарную поверхность щеточного контакта на поверхности коллектора найдем из выражения: $\sum S_{щ} = \frac{2 * I_{аном}}{j_{щ}} [см^2]$, где $j_{щ} = 10 [А/см^2]$ - рекомендуемая плотность тока на рабочей поверхности щеток принятой марки;

$$\sum S_{щ} [см^2]$$

. Размеры щетки определяют с учетом щеточного перекрытия $\beta_{щ}$. Для простой волновой обмотки якоря принимают $\beta_{щ} = e_{щ} / t_k$, где $b_{щ}$ - ширина щетки по длине окружности ра-

бочей поверхности коллектора ($\pi * D_k$). По табл. 7 выбираем стандартные размеры щетки: $b_{щ}$ [мм] ; $l_{щ}$ [мм] размер вдоль оси

коллектора; высота щетки $h_{щ}$ [мм] . Тогда: $\frac{b_{щ}}{t_k} =$. Площадь

рабочей поверхности одной щетки $S_{1щ}$ [мм²] . Общее чис-

ло щеток на рабочей поверхности коллектора: $n_{щ} = \frac{\sum S_{щ}}{S_{1щ}} =$. Так

как машина имеет $2 * p =$ и щеткодержателя, то принимаем $n_{щ} =$, а в каждом щеткодержателе по одной щетке. Тогда

$$\sum S_{щ} = S_{1щ} * n_{щ} = [см^2], \quad j_{щ} = \frac{2 * T_{ном}}{\sum S_{щ}} = [A / см^2]$$

По условиям коммутации ширина щетки $\epsilon_{щ}$ не должна превышать $(0,55 - 0,7) * (\tau - \epsilon_p)$, где ϵ_p - длина дуги полюсного наконечника главного полюса по окружности статора. Так как $a_p = \frac{\epsilon_p}{\tau}$ принято ранее, то $\epsilon_p = a_p * \tau$ [мм]

= . Поверяем указанное требование: $\epsilon_{щ} =$

[мм], принятая ширина щетки не превосходит рекомендуемого размера. Окружная скорость на рабочей поверхности коллектора: $V_k = \pi * D_k * \frac{n_{ном}}{60}$ [м / с]

При $D_k \leq 0,2$ [м] можно применять корпус коллектора из пластмассы, при $D_k \geq 0,21$ [м] следует применять коллектор арочного типа с металлическим разъемным корпусом, последний принят в проектируемой машине. Длина рабочей поверхности коллектора: $l_k = l_{щ} + 8$ [мм]

При $D_k \leq 0,2$ [м] можно применять корпус коллектора из пластмассы, при $D_k \geq 0,21$ [м] следует применять коллектор арочного типа с металлическим разъемным корпусом, последний принят в проектируемой машине. Длина рабочей поверхности коллектора: $l_k = l_{щ} + 8$ [мм]

1.5 Определение размеров главного и дополнительного полюсов, станины

Величина воздушного зазора между наконечником главного полюса и внешней поверхностью ротора определяется из выражения:

$$b = \frac{K_{\sigma} * A * \epsilon_p * 10^{-6}}{B_{\sigma}} [м],$$
 где $K_{\sigma} = 0,46 - 0,5$ при полузакрытых пазах ротора; $K_{\sigma} = 0,43 - 0,46$ при открытых пазах ротора с пазовыми клиньями; $K_{\sigma} = 0,35 - 0,4$ при открытых пазах с проволочными бандажами; при этом находим минимальную величину зазора. Отсюда $b =$
 $=$ [мм]; для ослабления влияния реакции якоря на поле главных полюсов принимаем $b =$
 $=$ [мм].

На рис. 11 показаны основные размеры главного полюса машины. Сердечник главного полюса штампуют с уширением к зазору (с наконечником) из листов электрической стали 3411 толщиной 1 мм или 0,5 мм. Листы скрепляют заклепками. Полюсы крепят к станине болтами. Ширина сердечника главного полюса b_r рассчитывается с учетом рассеяния магнитного потока. Коэффициент рассеяния при $2 * p = 4,6$ можно принять равным 1,2. Тогда:

$$b_r = \frac{1,2 * \Phi}{K_c * l_a * B_r},$$

где K_c - коэффициент заполнения сталью сердечника главного полюса; $B_r = 1,6 - 1,7 [Тл]$ - допустимая индукция в стали сердечника; принимаем $B_r = 1,7 [Тл]$, $b_r =$ [см],

ширину выступа $b_{нз}$ наконечника главного полюса принимают:

$$b_{нз} = (0,1 - 0,15) * b_r [см],$$

, принимаем $b_{нз} =$ [см], с обеих сторон одинаковая ширина выступов, длина дуги наконечника –

$$b_p =$$
 [см].

По кривой рис. 12 выбираем высоту h_r главного полюса в зависимости от D_a . Находим $h_r =$ [см]. Высоту наконечника $h_{нз}$ главного полюса выбираем из условия, что магнитная индукция в его сечении ($h_{нз} * l_a$) не превышала (1,8–1,9) [Тл]. Отсюда:

$$h_{нз} = \frac{0,5 * B_{\sigma} * (b_p - b_r)}{1,9 * l_a * 10} =$$
 [м],

принимаем $h_{нз} =$ [м]. Площадь поперечного сечения сердечника главного полюса: $S_r = K_c * b_r * l_a [см^2]$.

Станину изготавливают из стального литья (цельнотянутой трубы или сваренной продольно листовой стали), к ней приваривают фундаментные лапы из сортового стального проката. Материал станины – Сталь 3. Допустимая индукция до 1,3 [Тл]. Выходя из сердечника главного полюса, магнитный поток Φ разделяется на две стороны, через сечение станины ($h_c * l_c$) проходит половина потока главного полюса. Сечение ярма станины: $S_c = \frac{1,2 * \Phi}{2 * B_c}$ [см²]

S_c . Максимальная длина станины: $l_c = l_a + 8$ [см]

$l_c =$. Радиальная высота станины: $h_c = \frac{S_c}{l_c} =$ [см].

Наружный диаметр станины: $D_c = D_a + 2 * (\delta + h_r + h_c) =$
 $=$ [см].

Добавочный полюс выполняют цельным или собирают из штампованных стальных листов. Сердечник полюса может быть отлит из стали, материал - Сталь 3. Наконечник полюса служит для поддержания катушки, его выполняют из немагнитного материала и крепят заклепками к сердечнику полюса. У машин большой мощности сердечник собирают из листовой стали (марки 3411) толщиной 1 [мм]. На рис. 13 показаны основные размеры добавочного полюса. Воздушный зазор под добавочным полюсом: $b_\delta = (1,5 - 2) * \delta =$
 $=$ [мм], принимаем $b_\delta =$. Сердечник добавочного полюса должен разместиться в пространстве - $\frac{(\tau - \epsilon_p)}{2} =$ [мм].

Для ширины добавочного полюса ϵ_δ в этом пространстве отводится - $(0,65 - 0,75) * 3$ [см] =
 принимаем: $\epsilon_\delta =$ [см], осевая длина добавочного полюса - $l_\delta = l_r = l_a =$ [см]. Сечение стали сердечника: $S_\delta = b_\delta * l_\delta$ [см²]

$=$. При допустимой для Стали 3 индукции $B_\delta = 1,3$ [Тл] расчетную принимаем равной [Тл], магнитный поток полюса: $\Phi_\delta = S_\delta * B_\delta$ [Вб]

$=$. Расчетная ширина полюсного наконечника:
 $\epsilon_{но} = \epsilon_\delta + 2 * b_\delta =$ [мм] , длина наконечника:

$l_{\text{но}} = l_a + (5+10) [\text{мм}]$, высота: $h_{\text{но}} =$ [мм], высота сердечника добавочного полюса - $h_{\text{д}} = (h_r + \delta) - (\delta_{\text{д}} + h_{\text{но}}) [\text{см}]$.

Из табл. 8, представляющей данные по кривой намагничивания Сталь 3, находим при $B_{\text{д}} =$ [Тл] напряженность магнитного поля $H_{\text{д}} =$ [А/м].

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения добавочного полюса $F_{\text{д}}$ у машин без компенсационной обмотки приближенно может быть найдена по:

$F_{\text{д}} = (1,2-1,4) * A * (\frac{\tau}{2}) [\text{А}]$. Тогда $F_{\text{д}} =$ [А]. Число витков полюса: $W_{\text{д}} = \frac{F_{\text{д}}}{I_{\text{аном}}} =$.

Для исполнения машины 1Р22 рекомендуется плотность тока в проводнике обмотки - $j_{\text{д}} = 4,5-6,5 [\text{А/мм}^2]$, принимается $j_{\text{д}} = 5,5 [\text{А/мм}^2]$. Тогда сечение проводника $S_{\text{од}} = \frac{I_{\text{аном}}}{j_{\text{д}}} = [\text{мм}^2]$ =

. Принимаем провод прямоугольного сечения марки ПЭТВП. По табл. 3 выбираем провод: сечение - $S_{\text{од}} =$ [мм²], $a =$ [мм], $b =$ [мм]; размеры с изоляцией $a =$ [мм], $b =$ [мм], $\Delta u =$ [мм]. Средняя длина одного витка: $l_{\text{од}} = 2 * (e_{\text{д}} + l_a) = [\text{см}]$.

Полная длина обмотки возбуждения всех добавочных полюсов: $L_{\text{од}} = 2 * p * l_{\text{од}} * W_{\text{д}} = [\text{м}]$

. Сопротивление обмотки при температуре $\theta = 20^{\circ} \text{C}$: $R_{\text{д}} = \frac{L_{\text{од}}}{57 * 10^6 * S_{\text{од}}} = [\text{Ом}]$

. При температуре 75°C : $R_{\text{д}75} = 1,22 * R_{\text{д}} = [\text{Ом}]$. Масса меди обмотки: $m_{\text{од}} = 8900 * L_{\text{од}} * S_{\text{од}} = [\text{кг}]$.

После изготовления катушки ее размеры на сердечнике дополнительного полюса таковы: $h_{\text{к}} [\text{мм}]$, $e_{\text{к}} [\text{мм}]$, ; рядов по высоте и рядов по ширине.

1.6 Проверка условий коммутации

Чтобы обеспечить удовлетворительные условия коммутации, следует ограничить проникновение магнитного поля главных полюсов в зону коммутации. Для этого следует принять расстояние между главным и добавочным полюсом $(\tau - e_p)$ более или равным $(1,35-2)e_{\text{кз}}$ при $D_a \leq 0,5 [\text{м}]$. При

$D_a > 0.5 [M]$ принимают $(\tau - \epsilon_p) \geq (1.65 - 2)\epsilon_{кз}$, где $\epsilon_{кз}$ - ширина коммутационной зоны по окружности ротора (πD_a). Ширина зоны коммутации определяется

так: $\epsilon_{кз} = \epsilon'_{щ} + t'_k * (I_n + \epsilon_k - \frac{a}{p})$, где $\epsilon'_{щ} = \frac{\epsilon_{щ} * D_a}{D_k} =$

укорочение шага обмотки ротора - $\epsilon_k =$, $\epsilon_k = K/2 * p - I_{II} * y_Z = Z/2 * p - y_Z =$

= ; $\frac{a}{p} =$; $t'_k = \frac{t_k * D_a}{D_k} =$ [мм]. Отсюда $\epsilon_{кз} =$

= [мм]. Тогда проверяем межполюсное расстояние:

$(\tau - \epsilon_p) = (1,35 - 2) * \epsilon_{кз} =$ [см]; у спроектированной машины

$(\tau - \epsilon_p) =$ [см], что находится в допустимых пределах. Отношение

$\frac{\epsilon_{кз}}{(\tau - \epsilon_p)} =$ рекомендуется выдерживать в указанных пределах. В

данной машине-

2 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ МАШИНЫ

2.1 Эскиз магнитной цепи, линейные размеры ее участков

Для расчета магнитной цепи достаточно выделить спектр машины, содержащий $1/2 \cdot p$ часть ее поперечного сечения. Расчет ведется на пару главных полюсов, так как магнитная система у машины симметричная. На рис. 14 приведен эскиз магнитной цепи машины, включающий $1/4$ часть поперечного сечения. Пунктиром показана средняя линия магнитного потока пары главных полюсов. Магнитная цепь разделяется на несколько последовательно соединенных участков, каждый из которых имеет свои линейные размеры, поперечное сечение и одинаковую напряженность магнитного поля по длине участка. Это следующие участки: воздушный зазор между полюсом N и ротором, сердечник этого полюса, ярмо станины, сердечник полюса S, воздушный зазор между полюсом S и ротором, зубцовая зона ротора под полюсом S, ярмо ротора, зубцовая зона ротора под полюсом N. Для расчета магнитной цепи следует знать: размеры участков (длину вдоль силовой линии, ширину по нормам к ней), площадь сечения (нормального к направлению силовой линии), магнитный поток главного полюса, магнитную индукцию в каждом сечении, напряженность магнитного поля по длине каждого участка.

2.2 Применение закона полного тока для расчета магнитной цепи машины

Для расчета магнитной цепи использовано уравнение полного тока для замкнутой цепи: $F_{\Sigma} = \oint H * dl$. Интеграл берут по контуру вдоль силовой линии магнитного потока (см. рис. 14). Правая часть этого уравнения представляется в виде суммы падений магнитного напряжения на указанных участках магнитной цепи: $F_{\Sigma} = F_r + F_c + F_z + F_a$ [A].

Падение магнитного напряжения на двух участках воздушного зазора:

$$F_{\delta} = H_{\delta} * 2\delta_p; H_{\delta} = B_{\delta} / \mu_0; \mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \text{ [Гн/м]};$$

магнитная индукция - $B_{\delta} = \frac{\Phi}{S_{\delta}}; S_{\delta} = l_{\delta} * l_a; l_{\delta} = \sigma_p + 2 * \delta = \text{[см]};$

$$\delta_p = \bar{\delta} + (\bar{\delta}_{\text{макс}} - \bar{\delta}) / 6 = \bar{\delta} + (2 * \bar{\delta} - \bar{\delta}) / 6 = \text{[м]}$$

$$F_{\delta} = \text{[А]}$$

Падение магнитного напряжения в сердечниках главных полюсов:

$$F_c = H_c * 2h_c; B_c = \Phi / S_c; S_c = \text{[м}^2\text{]}; \Phi = \text{[Вб]}; B_c = \text{[Тл]}$$

по табл. 9 при $B_r = \text{[Тл]}$ для листов стали 3411 толщиной 1 мм находим

$$H_c = \text{[А/м]}; l_c = \frac{\pi * (D_c - h_c)}{2 * p} + h_c = \text{[м]}, F_c = \text{[А]}$$

Падение магнитного напряжения в ярме статора: $F_c = H_c l_c; B_c = \Phi / 2S_c; S_c = \text{[м}^2\text{]}$
 $\Phi = \text{[Вб]}; B_c = \text{[Тл]}$; по
 табл. 10 при $B_c = \text{[Тл]}$ для литой Ст. 3 находим $H_c = \text{[А/м]}; l_c =$
 $= \pi (D_c - h_c) / 2p + h_c = \text{[м]}$
 $F_c = \text{[А]}$.

Падение магнитного напряжения в зубцовой зоне ротора:

$$F_z = H_z * 2 * l_z; l_z = h_z = \text{[мм]}; \text{зубцовое деление} - t = \frac{\pi * D_a}{Z} =$$

$\text{[мм]}; \text{магнитный поток через зубцовое деление} - \Phi_1 = B_{\delta} * t * l_a = \text{[Вб]}$
 $= \text{[Вб]}$; диаметр расчетной зоны зубца -
 $D_{1/3} = D_a - 2 * (h_z * 2/3) = \text{[мм]}; \sigma_{z1/3} = (\pi * D_{1/3} / Z) - \sigma_{\Pi} = \text{[мм]}$
 ;

поперечное сечение зубца на высоте 1/3 от основания этого зубца -

$$S_{1/3} = K_c * \sigma_{z1/3} * l_a = \text{[м}^2\text{]} \quad ; \text{индукция в}$$

этом сечении зубца - $B_{z1/3} = \frac{\Phi_1}{S_{1/3}} = \text{[Тл]}$; по

табл. 11 из данных кривой намагничивания стали марки 2211 при B_z [Тл]= находим $H_z = [A/м]$; $F_z = [A]$.

Падение магнитного напряжения в ярме ротора:

$$F_a = H_a * l_{я}; l_{я} = \pi * d_{я} / 2 * p + h_a = [см]; S_{я} = K_c * h_a * l_a = [см^2]; B_a = \frac{\Phi}{2 * S_{я}} = [Тл]$$

; по данным табл. 11 при $B_a =$ [Тл] для стали марки 2211 находим $H_a = [A/м]$; $F_a = [A]$.

Падение магнитного напряжения в замкнутом контуре магнитной цепи машины: $F_{ц} = [A]$. Наибольшее

падение магнитного напряжения обычно приходится на воздушный зазор от 60 до 90% всей суммы $F_{ц}$. У проектируемой машины: $(\frac{F_{\delta}}{F_{ц}}) * 100\% =$

что соответствует норме.

2.3 Определение параметров шпунтовой обмотки возбуждения главных полюсов

Магнитодвижущая сила обмотки параллельного возбуждения главных полюсов без учета поперечной реакции якоря F_{aq} определяется из расчета падений магнитного напряжения на участках магнитной цепи:

$$F_{ц} = 2 * I_{вном} * W_B; W_B = \frac{F_{ц}}{I_{вном}} \quad - \text{число витков на}$$

одном главном полюсе; это для машины с компенсационной обмоткой.

С учетом поперечной реакции якоря магнитодвижущая сила обмотки должна быть увеличена: $F'_e = K_z * (F'_B + F_{aq})$, $F'_B = I_{вном} * W'_e$ - магнитодвижущая сила обмотки из расчета магнитной цепи. При наличии добавочных полюсов щетки устанавливают на геометрическую нейтраль машины, поэтому продольная составляющая реакции якоря F_{ad} отсутствует.

Магнитодвижущая сила обмотки якоря возникает при нагрузке машины:

$$F_a = W_c * S * i_{аном} / 2 * p = [A], \text{ где } W_c * S = W_c * K = W_a - \text{чис-}$$

ло витков в обмотке якоря; $W_a =$ коэффициент запаса по магни-

тодвижущей силы обмотки принимают - $K_s = 1,1 - 1,2$. Поперечную размагни-

чивающую составляющую F_{aq} от F_a находят по: $F_{aq} = K_q * F_a$ коэф-

фициент K_q зависит от величины магнитной индукции в зубцах ротора

$$(B_{z_{макс}}) \text{ и соотношения } \frac{F_a}{F_y}. \text{ Для проектируемой машины: } B_{z_{макс}} = [Тл]; \frac{F_a}{F_y} =$$

по кривой рис. 15 находим величину $K_q =$; тогда $F_{aq} =$

$= [A]$. Для машины без компенсационной обмотки с

учетом размагничивающего действия реакции якоря F_{aq} и коэффициента за-

$$\text{паса: } F_g = 1.15 * (I_{вном} * W_g' + F_{aq}) = [A]; W_g = \frac{F_g}{I_{вном}} =$$

.

При исполнении машины 1Р22 допускаемая плотность тока в провод-
нике обмотке возбуждения - $j_g = 4,5 - 6 [A / мм^2]$. Сечение провода:

$$S_g = \frac{I_{вном}}{j} = [мм^2], \text{ принимаем } j_{доп} = . \text{ По табл. 12 вы-}$$

бираем круглый медный изолированный провод марки ПЭТ-155: сечение -
 $мм^2$; диаметр неизолированного провода - мм; диаметр изолированного

провода - 0,69 мм. Средняя длина витка обмотки: $l_{ср} = 2 * (l_r - \sigma_r) = [м]$.

. Полная длина провода обмотки возбужде-
ния: $L_g = 2 * p * l_{ср} * W_g = [м]$.

Сопротивление обмотки возбуждения при температуре 20^0 С:

$$R_g = L_g / 57 * 10^6 * S_g = [Ом]; \text{ ; сопротив-}$$

ление обмотки при температуре 75^0 С: $R_{g75} = 1,22 * R_g = [Ом]$.

Масса меди в обмотке возбуждения на всех полюсах: $m_g = 8900 * L_g * S_g = [кг]$

Площадь поперечного сечения катушки, размещенной на сердечнике
главного полюса и изготовленной из круглого изолированного провода с

диаметром $d_u : S_k = W_\sigma * d_u^2 = [\text{мм}^2]$.

Размер этой катушки: высота - $h_k = h_r - 8 =$ [мм], ширина -

$$b_k = \frac{S_k}{h_k} = \quad [\text{мм}].$$

Постоянная $C_l = \frac{p * N}{60 * a} =$. Постоянная

$$C_m = \frac{p * N}{2\pi * a} =$$

Отсюда: $E_a = C_l * n * \Phi = 15,6 * n * \Phi [\text{В}]; M_{эм} = C_m * I_a * \Phi = 149 * I_a * \Phi [\text{Н} * \text{м}]$