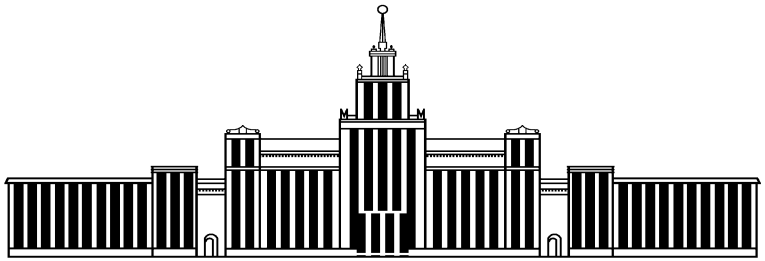
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

621.313(07)
К65

В.Д. Константинов, К.М. Виноградов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Руководство к выполнению курсового проекта

Учебное пособие

Челябинск
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Филиал Южно-Уральского государственного университета в г. Усть-Катаве
Кафедра «Электромеханика»

В.Д. Константинов, К.М. Виноградов

Электрические машины

Руководство к выполнению курсового проекта
Учебное пособие

Под редакцией К.М. Виноградова

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2013

УДК 621.313(076.5)
К65

Одобрено
учебно-методической комиссией филиала ЮУрГУ в г. Усть-Катаве

Рецензенты:
Кочетков Е.В., Дружкова Н.Л.

К65 **Константинов, В.Д.**

Электрические машины: руководство к выполнению курсового проекта. Учебное пособие / В.Д. Константинов, К.М. Виноградов; под ред. К.М. Виноградова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 47 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования асинхронных двигателей общего применения. Пособие предназначено для самостоятельного выполнения курсового проекта по дисциплине «Электрические машины» студентов направления 14040062.

Пособие содержит варианты заданий, методику проектирования, ссылки на литературу и вопросы для защиты курсового проекта.

УДК 621.313(076.5)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Производство современных электрических машин требует применения все более совершенных материалов, а их проектирование должно опираться на результаты последних исследований в области электромашиностроения. Экономия потребляемой электроэнергии и уменьшение капитальных затрат на электропривод различных объектов постоянно требуют новых усовершенствований.

В электроприводе машин и механизмов используются, в основном, асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока. Доминирующее положение по количеству и установленной мощности занимают асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Развитие полупроводниковой технике позволило создать регулируемый асинхронный электропривод с характеристиками, не уступающими по своим показателям электроприводам постоянного тока.

Для современного электромашиностроения свойственны единые серии электрических машин, характеризуемых общностью назначения и подобием конструкции всей серии. С учетом этого законы проектирования машин также характеризуются общностью, устанавливающей наиболее целесообразные соотношения основных размеров и параметров.

Основные методы проектирования электрических машин создавались на основе этих законов и большого опыта проектирования и длительной эксплуатации. Поэтому при проектировании особое внимание уделяется расчету и проектированию серийных электрических машин. Однако студент в своей работе проектирует единичную машину, и для более глубокого усвоения особенностей проектирования на всех этапах выполнения проекта рекомендуется вести «вручную».

Несмотря на сложную экономическую ситуацию, наблюдается значительный прогресс практически во всех отраслях электромашиностроения. Поэтому сложно собрать большое количество технической информации и свести ее в единое целое. В данном учебном пособии представлены лишь основные сведения по проектируемым асинхронным машинам серии 4А и АИ.

Курсовой проект имеет целью ознакомить студента с современной практикой проектирования электрических машин и её основными проблемами, научить его применять полученные знания при решении реальной задачи, развить навыки самостоятельной работы и принятия решений.

Настоящее учебное пособие включает: содержание курсового проекта, указания по оформлению и защите, варианты заданий, перечень учебной литературы, методические рекомендации по выполнению тех разделов проекта, которые недостаточно полно освещены в литературе или в которых студенты наиболее часто совершают ошибки.

Учебное пособие предназначено для курсового проектирования электрических машин на стадии изучения электромагнитных и электромеханических преобразований.

1. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Проектирование электрических машин требует глубоких знаний, поэтому содержание курсового проекта направлено на расширение этих знаний, развитие навыков в расчетах с широким использованием справочной литературы, учебных пособий и др.

Проектирование электрической машины – это сложная многовариантная задача. Студент при работе над проектом обязан научиться оптимизировать многие расчеты. Перед началом расчета он должен внимательно изучить конструкцию базового двигателя, оценить выбранные главные размеры двигателя, уровни электромагнитных нагрузок.

Основные материалы курсового проекта: расчетно-пояснительная записка и графическая часть.

Расчетно-пояснительная записка содержит следующие разделы:

1. Техническое задание на курсовой проект.
2. Введение (оценка современного состояния отрасли электромашиностроения назначение и серии асинхронных машин, основные задачи проектирования).
3. Расчетно-конструкторскую часть, в которую входит:

– выбор главных размеров электродвигателя;
– расчет зубцовой зоны и обмотки статора;
– расчет магнитной цепи и намагничивающего тока;
– определение параметров обмоток статора и ротора;
– расчет потерь в машине и параметров холостого хода;
– рабочие характеристики;
– тепловой и вентиляционный расчеты;
– описание конструкции;
– заключение (анализ расчетных данных).

4. Литература.
5. Оглавление.

Графическая часть проекта содержит:

1. Чертёж общего вида электродвигателя с продольным и поперечным разрезами (рис. П1).
2. Эскизы пазов статора и ротора с расположением проводников и изоляционных материалов.
3. Рабочие характеристики двигателя.

Пояснительная записка оформляется в соответствии со стандартом организации.

2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Спроектировать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с исходными данными, указанными в приложении 1, согласно варианту задания: мощность на валу P, синхронная частота вращения ротора n_1, напряжение и схема соединения обмоток, конструкционное исполнение и исполнение по степени защиты от воздействия окружающей среды IP.

Расчетные формулы и значения, принимаемые по таблицам, выбираются в зависимости от мощности двигателя, его исполнения по способу защиты от воздействия окружающей среды.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ ПРОЕКТИРУЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ

3.1. Выбор главных размеров электродвигателя

Расчет асинхронных машин начинается с определения главных размеров – выбора и расчета размеров активных частей проектируемой машины: внутреннего, внешнего диаметров статора (D, D_a), расчетной длины магнитопровода l, зубцовой зоны статора и ротора. Основным параметром, от которого во многом зависят эти размеры, является высота оси вращения h. Внешний диаметр статора также должен соответствовать условиям, налагаемым требованиями раскроя листов электротехнической стали с наименьшими отходами при штамповке.

Высота оси вращения h выбирается в зависимости от исполнения, числа полюсов и полезной мощности машины [1, табл. 9.1, 9.2, 9.4, 9.5].

Число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1}.$$

Если параметры проектируемой машины выходят за пределы стандарта, высоту оси вращения h (м) можно определить согласно [1, рис. 9.18] или, в зависимости от исполнения, по нижеприведенным формулам:

− при IP44 и 2p = 2

$$h \approx 66\left(\frac{P+0{,}4}{P+0{,}2}\right)P^{0{,}3};$$

− при IP44 и 2p ≥ 2

$$h \approx 60\left(\frac{P+0{,}2}{P+0{,}1}\right)(pP)^{0{,}28};$$

− при IP23 и 2p = 2

$$h \approx 54\left(\frac{P+0{,}4}{P+0{,}2}\right)P^{0{,}32};$$

− при IP23 и 2p ≥ 2

$$h \approx 51\left(\frac{P+0{,}2}{P+0{,}1}\right)(pP)^{0{,}3},$$

где p – число пар полюсов; P – номинальная мощность проектируемой машины, кВт.

Задавшись высотой оси вращения из табл. 1 принимают внешний диаметр статора D_a, в соответствии с серией проектируемой асинхронной машины.

Таблица 1

Соотношение внешнего диаметра статора с высотой оси вращения

h, мм	D_a, мм		h, мм	D_a, мм	
	Серия 4А	Серия АИ		Серия 4А	Серия АИ
45	−	71	132	225	215
50	79	79	160	272	260
56	89	89	180	313	295
63	100	100	200	349	327
71	116	114	225	392	368
80	131	126	250	437	420
90	149	145	280	520	480
100	168	163	315	590	530
112	191	184	355	660	600

Внутренний диаметр статора D зависит от внешнего диаметра статора и параметров пазов статора (табл. 2). Поскольку на начальном этапе расчета параметры пазов неизвестны, то внутренний диаметр статора определяется приблизительно по формуле

$$D = k_D D_a, \text{ м},$$

где k_D – отношение диаметров, определяемое согласно [1, табл. 9.9] в зависимости от числа пар полюсов или по формуле

$$k_D = \frac{p}{1{,}2p + 0{,}6 \pm 0{,}08}.$$

На данном этапе расчета рекомендуется принимать среднее значение внутреннего диаметра статора. При последующем расчете этот параметр может быть изменен в указанных пределах.

Таблица 2

Примерный возможный внутренний диаметр статора D в зависимости от количество пар полюсов p, высоты оси вращения h и внешнего диаметра статора D_a

h	D_a, мм	$2p$	D, мм
50	81	2; 4	41; 46
56	89	2; 4	48; 55
63	100	2; 4; 6	54; 61; 65
71	116	2; 4; 6; 8	65; 70; 76
80	131	2; 4; 6; 8	74; 84; 88
90	149	2; 4; 6; 8	84; 95; 100
100	168	2; 4; 6; 8	95; 105; 113
112	191	2; 4; 6; 8	110; 126; 132
132	225	2; 4; 6; 8	130; 145; 158
160	272	2; 4; 6; 8	155; 185; 197
180	313	2; 4; 6; 8	171; 211; 220
200	349	2; 4; 6; 8	194; 238; 250
225	392	2; 4; 6; 8	208; 254; 284
250	437	2; 4; 6; 8	232; 290; 317
280	520	2; 4; 6; 8; 10	275; 335; 370; 385; 400
315	520	2; 4; 6; 8; 10	275; 335; 370; 385; 400
315	590	2; 4; 6; 8; 10; 12	310; 380; 425; 440; 450
355	590	2; 4; 6; 8; 10; 12	310; 380; 425; 440; 450
355	660	2; 4; 6; 8; 10; 12	345; 435; 470; 490; 500

Полюсное деление и расчетную мощность определяют по формулам

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \text{ м};$$

$$P_p = P\frac{k_E}{\eta \cdot \cos\varphi}, \text{ Вт},$$

где k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению выбирают по графику [1, рис. 9.20], а η и $\cos\varphi$ − по графику [1, рис. 9.21], относительно мощности P и исполнения по степени защиты.

Электромагнитные нагрузки: индукцию в воздушном зазоре и линейную нагрузку предварительно выбирают по графикам [1, рис. 9.22 и 9.23].

Длина магнитопровода l_δ определяется по методике, описанной в [1, с. 344–348], причем для предварительного расчета необходимо принимать средние значения рекомендуемых величин. Длина магнитопровода также определяется величиной обмоточного коэффициента обмотки статора $k_{об1}$, зависящего от типа обмотки. Для машин той или иной серии выбор типа обмотки во многом зависит от высоты оси вращения h и числа пар полюсов p.

Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{об1}$ выбирают в зависимости от типа обмотки статора. Для однослойных обмоток $k_{об1}$ = 0,95.

Коэффициент пропускного перекрытия α_δ и коэффициент формы поля k_B в асинхронных машинах определяются степенью упрощения кривой поля в зазоре, возникающей при насыщении зубцов статора и ротора, и могут быть достаточно достоверно определены только после расчета магнитной цепи.

Вследствие этого, до момента расчета магнитного цепи удобнее рассматривать синусоидальное поле, а влияние уплощения учесть при расчете магнитного напряжения отдельных участков магнитной цепи. Основываясь на этом, значения коэффициентов предварительно принимаются равными [1, с. 167]:

$$\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0{,}64,\ k_B = \pi/2\sqrt{2} = 1{,}11.$$

Расчетная длина воздушного зазора [1, формула (9.6)]:

$$l_\delta = \frac{P}{D^2 \cdot \Omega \cdot k_B \cdot k_{об1} \cdot A \cdot B_\delta}, \text{ м},$$

где синхронная угловая скорость вала [1, формула (9.5)] $\Omega = 2\pi \frac{f}{p}$, рад/с.

Критерием правильности выбора главных размеров D и l_δ служит отношение $\lambda = \frac{l_\delta}{\tau}$, которое должно находиться в пределах, показанных на графике [1, рис. 9.25].

Если магнитопровод необходимо разбивать на пакеты, то окончательная длина магнитопровода определяется после расчета конструктивной длины сердечника статора l_1 с учетом влияния радиальных вентиляционных каналов согласно [1, с. 349–350].

Длина пакета ротора l_2 выбирается согласно [1, с. 350].

Полная конструктивная длина статора, длина стали сердечника статора l_1 и $l_{ст1}$ соответственно равны и по [1, формула (9.7)] получим соотношение:

$$l_1 = l_{ст1} = l_\delta, \text{ м}.$$

3.2. Расчет размеров зубцовой зоны и обмотки статора

По графику [1, рис. 9.26], выбирают предварительные предельные значения зубцового деления t_1: $t_{1\min}$ (м) и $t_{1\max}$ (м).

Число пазов статора [1, формула (9.16)]:

$$Z_{1\min} = \frac{\pi D}{t_{1\max}};\ Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{1\min}}.$$

Окончательное чисто пазов статора Z_1 следует выбирать в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательного для проектируемой машины значения числа пазов на полюс и фазу $q = \frac{Z_1}{2pm}$. Число пазов статора в любой обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число q – должно быть целым. Окончательно выбирают Z_1, ориентируясь на табл. 3.

Таблица 3

Примерное соотношение Z_1 и Z_2

Высота оси вращения	Z_1/Z_2 при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50	12/9	12/15	–	–	–	–
56	24/18	24/18	–	–	–	–
63	24/18	24/18	36/28	–	–	–
71	24/20	24/18	36/28	36/28	–	–
80–100	24/20	36/28	36/28	36/28	–	–
112	24/22	36/34	54/51	48/44	–	–
132	24/19	36/34	54/51	48/44	–	–
160	36/28	48/38	54/50	48/44	–	–
180, 200	36/28	48/38	72/58	72/58	–	–
225	36/28	48/38	72/56	72/56	–	–
250	48/40	60/50	72/56	72/56	90/76	–
280–355	48/38	60/50	72/82	72/86	90/106	90/106

Формы пазов статора приведены в [1, рис. 9.28, 9.29], а их выбор можно произвести по табл. 4.

Таблица 4

h, мм	$2p$	Форма пазов статора	Тип обмотки статора
50–132	2; 4; 6; 8	Трапецеидальные	Однослойная всыпная
160	2; 4; 6; 8	То же	Двухслойная всыпная. Однослойная всыпная
180–250	2; 4; 6; 8	“ “	Двухслойная всыпная. Одно-двухслойная всыпная. Двухслойная всыпная
280–355	2; 4; 6; 8; 10; 12	Прямоугольные полуоткрытые. Трапецеидальные полузакрытые	Двухслойная из жестких полукатушек. Двухслойная концентрическая всыпная

Формы пазов ротора приведены в [1, рис. 9.38], а их выбор производится по [1, с. 377, 378].

Двухслойные обмотки применяются практически во всех машинах переменного тока, мощностью от 15–16 кВт и до крупных гидро- и турбогенераторов.

Основным достоинством двухслойных обмоток является возможность использовать укорочение шага для подавления высших гармоник в кривой ЭДС. Кроме того, двухслойные обмотки имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с однослойными, например, по количеству возможных вариантов выполнения параллельных ветвей, дробного числа пазов на полюс и фазу, равномерности расположения лобовых частей катушек и др.

Окончательное значение зубцового деления t_1 будет определено как:

$$t_1 = \frac{\pi D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q}, \text{ м.}$$

При определении числа эффективных проводников в пазу $u_П$ руководствуются следующим: $u_П$ должно быть целым, а в двухслойной обмотке желательно, чтобы оно было кратным двум. В первую очередь определяем предварительное число эффективных проводников в пазу $u'_П$ при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют (a = 1).

Номинальный ток обмотки статора [1, формула (9.18)]:

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m \cdot U_н \cdot \eta \cdot \cos\varphi}, \text{ А.}$$

Предварительное число эффективных проводников в пазу [1, формула (9.17)]:

$$u'_П = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1н} \cdot Z_1}.$$

Полученное значение $u'_П$ не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмотки a, при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения:

$$u_П = a \cdot u'_П.$$

Принятое на данном этапе расчета число параллельных ветвей a в дальнейшем, при выборе размеров и числа элементарных проводников, может быль изменено. В этом случае пропорционально меняется так же и $u_П$.

Окончательное число витков в фазе обмотки [1, формула (9.20)]:

$$W_1 = \frac{u_П \cdot Z_1}{2a \cdot m}.$$

Окончательное значение линейной нагрузки определяем по [1, формула (9.21)]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1н} \cdot W_1 \cdot m}{\pi D}, \text{ А/м.}$$

В машинах мощностью свыше 15–16 кВт обмотки выполняются двухслойными, а при механизированной укладке применяют одно-двухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага. А обмоточный коэффициент $k_{об} = k_p \cdot k_y$ рассчитывается в зависимости от принятого укорочения шага обмотки и числа q.

В двухслойных обмотках асинхронных двигателей шаг выполняют в большинстве случаев с укорочением, близким к $\beta = 0{,}8$. На графике [1, рис. 3.12], показана область наиболее распространенных в практике значений коэффициента укорочения $0{,}79 \le \beta \le 0{,}83$, при которых достигается значительное уменьшение гармоник ($\nu = 5$ или $\nu = 7$) при относительно малом уменьшении ЭДС первой гармоники. На практике почти все машины, кроме машин малой мощности, выполняют с обмоткой, имеющей укороченный шаг.

Коэффициент укорочения для первой гармоники [1, формула (3.6)] или график [1, рис. 3.12]:

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right).$$

По [1, табл. 3.16] или по [1, формула (3.13)] находят коэффициент распределения (для первой гармоники трехфазных машин):

$$k_p = \frac{\sin(\pi/2m)}{q \cdot \sin(\pi/2m \cdot q)}.$$

Обмоточный коэффициент [1, формула (3.5)]:

$$k_{об1} = k_p \cdot k_y.$$

Окончательно определяют значения потока Ф [1, формула (9.22)] и индукцию в воздушном зазоре B_δ [1, формула (9.23)], которая не должна

выходить за пределы рекомендуемой области более чем на 5%.

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1н}}{4 \cdot k_B \cdot W_1 \cdot k_{об1} \cdot f_1}, \text{ Вб};$$

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p}{D \cdot l_\delta}, \text{ Тл.}$$

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока J_1 должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается на температуре обмотки и на КПД двигателя.

Нагрев пазовой части обмотки зависит от произведения линейной нагрузки на плотность тока ($A \cdot J_1$). Поэтому выбор допустимой плотности тока производят с учетом линейной нагрузки двигателя [1, формула (9.25)]:

$$J_1 = \frac{(A \cdot J_1)}{A}, \text{ А/м}^2.$$

Сечение эффективных проводников определяют, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке:

$$q_{эф1} = \frac{I_{1н}}{a \cdot J_1}, \text{ м}^2.$$

В том случае, если расчетная площадь сечения эффективного проводника превосходит площадь поперечного сечения рекомендуемого, то эффективный проводник следует разделить на несколько элементарных [1, формула (9.26)]:

$$q_{эл} = \frac{q_{эф}}{n_{эл}}, \text{ м}^2.$$

На основании полученных данных выбирают обмоточный провод из табл. [1, П3.1] с параметрами: $d_{эл}$ = … мм; $d_{из}$ = … мм; $q_{эл}$ = … мм^2 ; $q_{эф} = n_{эл} \cdot q_{эл}$ = … мм^2.

Тогда окончательное значение плотности тока в обмотке статора будет рассчитываться по формуле

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}}, \text{ А/м}^2.$$

Для всыпной обмотки могут быть выбраны пазы по [1, рис. 9.29, а–в], для

обмотки из прямоугольного провода – по [1, рис. 9.28].

Размер пазов в электрических машинах выбираются таким образом, чтобы:

– площадь паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции;

– значения индукции в зубцах и ярме статора находились в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника.

Расчет размеров зубцовой зоны проводят по допустимым индукциям в ярме и в зубцах статора (значения принимаются из [1, табл. 9.12]).

Формулы для расчета прямоугольных пазов представлены в [1, с. 356].

Высота ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{cm1} \cdot k_{cm1}}, \text{ м.}$$

Минимальная ширина зубца

$$b_{Z1\min} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{z1\max} \cdot l_{cm1} \cdot k_C}, \text{ м.}$$

Ширина зубца на расстоянии 1/3 его высоты от наиболее узкой части

$$b_{Z1/3} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{z1/3} \cdot l_{cm1} \cdot k_C}, \text{ м.}$$

Далее производят предварительный выбор размеров трапецеидальных пазов, исходя из допустимой индукции в зубцах и ярме статора.

Ширина зубца

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_C}, \text{ м,}$$

где значение коэффициента заполнения сердечника сталью k_C выбрано по [1, табл. 9.13], исходя из h и U.

Далее определяются размеры паза в штампе по [1, формулы (9.38), (9.39), (9.40) и (9.41)]:

$$h_П = \frac{D_a - D}{2} - h_a, \text{ м;}$$

$$b_{Z1} = \frac{\pi(D + 2h_П)}{Z_1} - b_1, \text{ м.}$$

При $\beta = 45°$ и $\beta = 30°$ [1, с. 362]:

$$\beta = 45°:\ b_1 = \frac{\pi\left(D + 2h_ш - b_ш\right) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi},$$

$$\beta = 30°:\ b_1 = \frac{\pi\left(D + 2h_ш - \frac{b_ш}{\sqrt{3}}\right) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \frac{\pi}{\sqrt{3}}},$$

где $h_ш$ – высота шлица паза, а $b_ш$ можно рассчитать по формуле $b_ш = d_{из} + (1{,}5 \div 2$ мм), но так как этот размер нормализуется, то ширину шлица $b_ш$ принимаем из [1, табл. 9.16].

Для нахождения площади поперечного сечения паза в штампе $S_П$ [1, формула (9.43)], необходимо определить h_1 и высоту клиновой части паза h_K [1, формулы (9.44), (9.45)]:

– при $\beta = 30°$:

$$h_K = \frac{b_2 - b_ш}{2},\ м;$$

– при $\beta = 45°$:

$$h_K = \frac{b_2 - b_ш}{2\sqrt{3}},\ м;\ h_1 = h_П - \left(h_ш + h_K\right),\ м;\ S_П = \frac{b_1 + b_2}{2} h_1,\ м^2.$$

По формулам [1, с. 365] определяют расчетные размеры зубцов статора при трапецеидальных пазах.

Для расчета коэффициента заполнения паза необходимо определить площадь паза в свету и учесть площадь сечения паза, занимаемую корпусной изоляцией $S_{из}$ [1, формула (9.46)] и прокладками в пазу $S_{пр}$ [1, формула (9.47)].

Размеры паза в свету определяются по [1, формула (9.42)] с учетом припусков на шихтовку и сборку сердечников $\Delta b_П$ и $\Delta h_П$ (припуски выбираются из табл. 5 в соответствии с h).

Таблица 5

Припуски по ширине и высоте паза

Высота оси вращения h, мм	Припуски, мм	
	по ширине паза	по высоте паза
50–132	0,1	0,1
160–250	0,2	0,2
280–355	0,3	0,3
400–500	0,4	0,3

Площадь поперечного сечения паза, оставшаяся для размещения проводников обмотки, рассчитывается по [1, формула (9.48)]:

$$S'_{П} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{пк} - S_{из} - S_{пр}, \text{ м}^2.$$

Контролем правильности размещения обмотки в пазах является значение коэффициента заполнения паза:

$$k_з = \frac{d_{из}^2 \cdot u_П \cdot n_{эл}}{S'_п}.$$

В современном электромашиностроении плотность укладки обмотки стремятся выполнить такой, чтобы значение $k_З$ было в пределах 0,70 ÷ 0,75 − при ручной укладке обмоток и 0,70 ÷ 0,72 – при механизированной.

3.3. Выбор воздушного зазора

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть суммарной МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответствующему уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает его cos φ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение δ приводит к возрастанию амплитуд пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь, таким образом, КПД двигателя с очень малыми зазорами не возрастает, а наоборот – уменьшается.

Величина воздушного зазора зависит от внутреннего диаметра статора D и для машин серии 4А его можно либо рассчитать [1, формулы (9.49–9.51)], либо взять по графику [1, рис. 9.31]:

– для двигателей мощностью менее 20 кВт, при $2p = 2$:

$$\delta \approx (0{,}3 + 1{,}5D) \cdot 10^{-3}, \text{ мм};$$

– при $2p \geq 4$:

$$\delta \approx (0{,}25 + D) \cdot 10^{-3}, \text{ мм};$$

– для двигателей средней и большой мощности:

$$\delta \approx \frac{D}{1{,}2}\left(1+9/2p\right)\cdot 10^{-3}, \text{ мм.}$$

3.4. Расчет короткозамкнутого ротора

Короткозамкнутые обмотки роторов (в отличие от других видов обмоток) не имеют определенного числа фаз и числа полюсов. Один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых выполнены на различные числа полюсов. Это сделало возможность использование короткозамкнутых роторов в двигателях с регулированием частоты вращения путем переключения числа пар полюсов обмотки статора.

Обычно принято считать, что каждый стержень обмотки образует одну фазу короткозамкнутой обмотки. Тогда число ее фаз равно числу пазов ($m_2 = Z_2$) и обмотка каждой из фаз имеет 1/2 витка, т. е. $W_2 = 1/2$, так как при $m_2 = Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора.

Из [1, табл. 9.18] выбирают число пазов ротора Z_2 при известных $2p$ и Z_1. В крупных двигателях число пазов ротора больше статорных. Это делается для того, чтобы ограничить чрезмерно большой ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки.

Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\cdot\delta, \text{ мм.}$$

Длина ротора рассчитывается относительно h, если $h > 250$ мм, то:

$$l_2 = l_1 + 5, \text{ мм.}$$

Если $l_2 > 300$ мм, то сердечник разбивается на пакеты.

Зубцовое деление:

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2}, \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр сердечника ротора D_j равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал без промежуточной втулки

$$D_j = D_B \approx k_B \cdot D_A, \text{ м,}$$

где k_B – значение коэффициента для расчета диаметра вала асинхронных двигателей, полученное по [1, табл. 9.19].

Если сердечник ротора насажен на втулку или оребренный вал, то высота

ярма ротора h_j и внутренний диаметр сердечника ротора определяются по формулам:

$$h_j \approx \frac{\Phi}{2B_j \cdot l_{ст2} \cdot k_C}; \; D_j = D_2 - 2\left(h_{П2} + h_j\right).$$

В двигателях с высотой оси вращения h = 280 мм выполняют аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике ротора, располагая в одном ряду 12 каналов, диаметром $d_{к2}$ = 20 ÷ 30 мм (каналы, в зависимости от диаметра ротора, могут быль расположены как в одном, так и в двух рядах [1, с. 384]). Радиальные каналы в сердечнике ротора, так же как и в статоре, выполняют лишь при длине сердечника, превышающей 0,3 м.

С учетом принятых для короткозамкнутой обмотки числа пазов ротора рассчитывают коэффициент приведения токов [1, формула (9.66)]:

$$\nu_i \approx \frac{m_1 \cdot W_1 \cdot k_{об1}}{m_2 \cdot W_2 \cdot k_{об2}}.$$

Тогда ток в стержне можно определить по формуле:

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot \nu_i, \text{ А},$$

где $k_i = 0{,}2 + 0{,}8 \cdot \cos\varphi$ − коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на отношение I_1 / I_2.

Площадь поперечного сечения стержня q_C рассчитывается по [1, формула (9.68)]. В короткозамкнутых роторах двигателей с $h \geq 208$ мм выполняют закрытые пазы, следовательно $J_2 = \left(2{,}5 \div 3{,}5\right) \cdot 10^6$ А/м^2, причем меньшее значение J_2 соответствует более мощному двигателю (для машин меньшей мощности $J_2 = \left(4{,}0 \div 8{,}0\right) \cdot 10^6$, А/м^2). Тогда площадь поперечного сечения стержня

$$q_C = \frac{I_2}{J_2}, \text{ м}^2.$$

Площадь поперечного сечения замыкающих колец [1, формула (9.72)]:

$$q_{кл} \approx \frac{I_{кл}}{J_{кл}}, \text{ м}^2,$$

где $I_{кл}$ – токи в замыкающем кольце:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{I_2}{2\sin(\pi \cdot p/Z_2)}, \text{ А};$$

$J_{кл}$ – плотность тока в замыкающих кольцах, которая берется в среднем на 15 ÷ 20 % меньше, чем в стержнях, таким образом:

$$J_{кл} = 0{,}85 \cdot J_2, \text{ А/м}^2.$$

Расчетное сечение замыкающих колец литой обмотки принимают:

$$q_{кл} = a_{кл} \cdot b_{кл},$$

где $b_{кл} \approx 1{,}25 \cdot h_{П2}$, м; $a_{кл} \approx \frac{q_{кл}}{b_{кл}}$, м.

В двигателях с высотой оси вращения h < 250 выполняют грушевидные пазы и литую обмотку; с высотой оси вращения $h \geq 280 \div 355$ мм выполняют закрытые пазы ротора и при $2p \geq 4$ сужающимися в верхней части (при $2p$ = 2 – лопаточные).

По допустимой индукции определяют ширину зубца ротора

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{z2} \cdot l_\delta}{B_{z2} \cdot l_{ст2} \cdot K_c}.$$

После чего, рассчитывают размеры паза, показанного на [1, рис. 9.40] по [1, формулы (9.76), (9.77) и (9.78)] и уточняют площадь сечения стержня [1, формула (9.79)].

Для расчета размеров трапецеидальных пазов, сужающихся в верхней части [1, рис. 9.41] используют графический метод. После построения зубцовой зоны ротора определяют ширину зубца в нижней и верхней части и расчетную высоту зубца:

$$b_{z2\max} = \pi \cdot \frac{D_2 - (2 \cdot h'_ш + b_1)}{Z_2} - b_1 \text{ м};$$

$$b_{z2\min} = \pi \cdot \frac{D_2 - (2 \cdot h_П - b_2)}{Z_2} - b_2 \text{ м},$$

где $h'_ш$ – высота перемычки над пазом.

Расчетная высота зубца

$$h_{z2} = h_П - 0{,}1 b_2, \text{ м}.$$

3.5. Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводится для двигателя в режиме холостого хода, при котором для асинхронных машин характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора. Насыщение зубцовых зон приводит к уплощению кривой поля в воздушном зазоре.

Найдем индукцию в зубцах статора и ротора:

$$B_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{b_{z1} \cdot l_1 \cdot k_C}, \text{Тл};$$

$$B_{z2\max} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{b_{z2\max} \cdot l_2 \cdot k_C}, \text{ Тл};$$

$$B_{z2\min} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{b_{z2\min} \cdot l_2 \cdot k_C}, \text{ Тл}.$$

Находят расчетную высоту ярма статора h'_a [1, формула (9.118)] и индукцию в ярме статора B_a [1, формула (9.117)]:

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{П1} - \frac{2}{3} \cdot d_{к1} \cdot m_{к1} = \frac{D_a - D}{2} - h_{П1}, \text{ м},$$

где $d_{к1}$ и $m_{к1}$ – диаметр и число рядов аксиальных вентиляционных каналов в статоре;

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_a \cdot l_{ст1} \cdot k_C}, \text{ Тл}.$$

Определяют индукцию в ярме ротора B_j [1, формула (9.122)]:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_2 \cdot k_C}, \text{Тл}.$$

Расчетная высота ярма ротора h'_j:

− при посадке сердечника на втулку или оребренный вал (крупные асинхронные машины), так же при непосредственной посадке на вал с $2p \geq 6$:

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{П2} - \frac{2}{3} \cdot d_{к2} \cdot m_{к2};$$

− при посадке сердечника непосредственно на вал при $2p = 2 \div 4$.

$$h'_j = \frac{2+p}{3{,}2 \cdot p}\left(\frac{D_2}{2} - h_{П2}\right) - \frac{2}{3} \cdot d_{к2} \cdot m_{к2}, \text{ м},$$

где $d_{к2}$ и $m_{к2}$ – диаметр и число аксиальных каналов ротора.

Магнитное напряжение воздушного зазора рассчитывается по [1, формула (9.103)]:

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

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$ – результирующий коэффициент воздушного зазора машины, равный произведению частичных коэффициентов, т. е.

$$k_{\delta 1(2)} = \frac{t}{t - \gamma \cdot \delta'}, \text{ где } \gamma = \frac{(b_ш/\delta)^2}{5 + (b_ш/\delta)};$$

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \left(\frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + (b_{ш1}/\delta)} \cdot \delta\right)}.$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора рассчитывается по [1, формула (9.104)]:

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

где h_{z1} – расчетная высота зубца статора; H_{z1} – значение напряженности поля в зубцах, которое находится в соответствии с индукцией B_{z1} по кривой намагничивания для принятой марки стали по приложению, А/м.

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора рассчитывается по [1, формула (9.108)]:

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

где h_{z2} – расчетная высота зубца ротора; H_{z2} – значение напряженности поля в зубцах, которое находится в соответствии с индукцией B_{z2} по кривой намагничивания для принятой марки стали по приложению [1, П2], А/м.

Рассчитывают коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}.$$

Полученное значение k_z должно находиться в допустимых пределах: $1{,}2 \le k_z \le 1{,}5 \div 1{,}6$.

Полученное значение k_z позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений зубцовой зоны и обмоточных данных проектируемой машины.

Магнитное напряжение ярма статора [1, формула (9.116)]:

$$F_a = L_a \cdot H_a, \text{ А},$$

где H_a – напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма [1, П1], А/м; L_a – длина средней магнитной линии ярма статора:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p}, \text{ м}.$$

Магнитное напряжение ярма ротора:

$$F_j = L_j \cdot H_j, \text{ А},$$

где H_j – напряженность поля при индукции B_j по кривой намагничивания для ярма, А/м; h_j – высота спинки ротора:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{П2}, \text{ м};$$

L_j – длина средней магнитной линии ярма статора [1, формула (9.127)]:

$$L_j = \frac{\pi(D_в + h_j)}{2p}, \text{ м}.$$

Суммарное магнитное напряжение и коэффициент насыщения магнитной цепи машины рассчитываются по [1, формулы (9.128), (9.129)]:

$$F_ц = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j, \text{ А}.$$

Намагничивающий ток [1, формула (9.130)]:

$$I_\mu \approx \frac{p \cdot F_ц}{0{,}9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot k_{об1}}, \text{ А}.$$

Относительное значение намагничивающего тока

$$I_{\mu*} = \frac{I_{\mu}}{I_{1н}}.$$

Относительное значение $I_{\mu*}$ служит определительным критерием правильности произведенного выбора, расчета размеров зубцовой зоны и обмотки двигателя.

Коэффициент должен попадать в диапазон $0{,}2 < I_{\mu*} < 0{,}35$. Если $I_{\mu*} < 0{,}2$, то это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и cos φ, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большую массу и габариты. Если $I_{\mu*} > 0{,}35$, то это означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и cos φ. В небольших двигателях мощностью менее 2 – 3 кВт $I_{\mu*}$ может достигать значения 0,5 ÷ 0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности.

3.6. Расчет параметров асинхронной машины для номинального режима

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

Физические процессы в асинхронной машине более наглядно отражает схема, изображенная на рис. 1, а. Но для расчета удобнее преобразовать ее в схему, показанную на рис. 1, б.

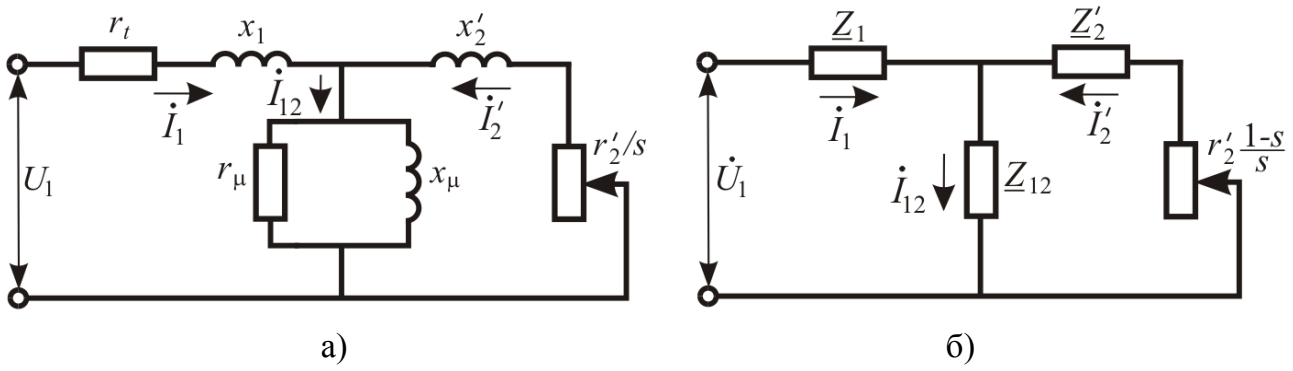


Рис. 1. Схема замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины

Параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины:

– с увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x_2;

– увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r_2 и x_2.

Рассмотрим расчет параметров схемы замещения для номинального режима асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.

Активное сопротивление фазы обмотки статора двигателя рассчитывается по [1, формула (9.132)]:

$$r_1 = k_r \cdot \rho_\vartheta \cdot \frac{L}{q_{эф} \cdot a}, \text{ Ом},$$

где $q_{эф} = q_{эл} \cdot n_{эл}$ – сечение эффективного проводника; $q_{эл}$, $n_{эл}$ и a – сечение элементарного проводника, число элементарных проводников в одном эффективном и число параллельных ветвей обмотки; ρ_ϑ – удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре (табл. 6).

Таблица 6

Удельное электрическое сопротивление материала проводников обмоток

Тип обмотки	Материал	Удельное электрическое сопротивление при ряде температур, $\times 10^{-6}$, °С		
		20	75	115
Обмотки из медных проводников или неизолированной шинной меди	Медь	1/57	1/47	1/41
Короткозамкнутые роторы асинхронных машин	Алюминиевые шины	1/35	1/28	1/26
	Алюминий литой	1/30	1/14	1/22

Для выбранного класса нагревостойкости изоляции находим расчетную температуру $\vartheta_{расч}$ (табл. 7).

Таблица 7

Нагревостойкость электроизоляционных материалов

Класс нагревостойкости	Температура	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
Y	90	Не пропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнисные материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
A	105	Пропитанные и погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнисные материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
E	120	Некоторые синтетические органические пленки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
C	более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или элементоорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

Тогда удельное сопротивление для медной обмотки будет равно $\rho_{\vartheta(расч)}$, Ом · м; k_r – коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока (в расчетах, как правило, принимают k_r = 1); L – общая длина эффективных проводников фазы обмотки, которая находится по [1, формула (9.134)]:

$$L = l_{ср} \cdot W_1, \text{ м},$$

где W_1 – число витков фазы; $l_{ср}$ – средняя длина витка обмотки [1, формула (9.135)]:

$$l_{ср} = 2(l_П + l_Л), \text{ м},$$

где $l_П$ – длина пазовой части, м; $l_Л = K_Л \cdot b_{кт} + 2 \cdot B$ – длина лобовой части витка [1, формула (9.136)], м; $l_{выл} = K_{выл} \cdot b_{кт} + B$ – длина вылета лобовой части обмотки [1, формула (9.137)], м; $b_{кт}$ – средняя ширина катушки [1, формула (9.138)]:

$$b_{кт} = \frac{\pi(D + h_П)}{2p} \cdot \beta_1, \text{ м},$$

β_1 – относительное укорочение шага обмотки статора; B – длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, м. Для всыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус B = 0,01 м. $K_Л$ и $K_{выл}$ – коэффициенты, значения которых принимаются по соответствующей табл. 8.

Таблица 8

2*p*	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	$K_Л$	$K_{выл}$	$K_Л$	$K_{выл}$
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,5	0,5
6	1,4	0,5	1,75	0,62
>> 8	1,5	0,5	1,9	0,72

Определяют относительное значение активного сопротивления обмоток статора:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_н}, \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора:

$$r_2 = r_C + 2\frac{r_{кл}}{\Delta^2}, \text{ Ом},$$

где r_C – сопротивление стержня: $r_C = \rho_C \cdot \frac{l_C}{q_C} \cdot k_r$, Ом ($l_C$ – полная длина стержня, м); ρ_C – удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, для выбранного класса нагревостойкости изоляции.

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями:

$$r_{кл} = \rho_{кл} \cdot \frac{\pi D_{кл,ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}}, \text{ Ом};$$

где $D_{кл,ср}$ = D_2 – $b_{кл}$ – средний диаметр замыкающих колец, м; $\rho_{кл} = \rho_C$ – удельное сопротивление замыкающих колец.

Сопротивление r_2 для дальнейших расчетов должно быть приведено к числу витков первичной обмотки. Тогда получаем:

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4m_1 \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2}, \text{ Ом}.$$

Относительное значение приведенного активного сопротивления обмоток ротора:

$$r_{2*}' = r_2' \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}}, \text{ Ом}.$$

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора близки друг к другу и обычно $r_{1*} \approx r_{2*}' \approx 0{,}02 \div 0{,}03$.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя рассчитывается по [1, формула (9.152)]:

$$x_1 = 15{,}8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{W_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_\delta'}{p \cdot q} \cdot \sum \lambda_1,$$

где $l_\delta' = l_\delta - 0{,}5 \cdot n_к \cdot b_к$ – условная длина поля рассеяния, которая учитывает ослабление поля в зазоре над радиальными вентиляционными каналами;

$\sum\lambda_1 = \lambda_{П1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{Д1}$ – сумма коэффициентов магнитной проводимости, которые рассчитываются по методике, изложенной в [1, с. 402–404].

Относительное значение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора:

$$x_1^* = x_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}}, \text{ Ом.}$$

Полученное значение должно лежать в допустимых пределах: $0{,}08 < x_1^* < 0{,}14$ Ом.

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора определяют по формуле:

$$x_2 = 7{,}9 \cdot f_1 \cdot l'_\delta \cdot 10^{-6} \cdot \sum\lambda_2,$$

где $l'_\delta = l_\delta - 0{,}5 \cdot n_к \cdot b_к$ – условная длина поля рассеяния, которая учитывает ослабление поля в зазоре над радиальными вентиляционными каналами, м; $\sum\lambda_2 = \lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}$ – сумма коэффициентов магнитной проводимости, которые рассчитываются по методике, изложенной в [1, с. 407–409].

Приведенное к числу витков первичной обмотки индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора:

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2}{104}, \text{ Ом.}$$

Относительное значение приведенного индуктивного сопротивления обмоток ротора:

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}}, \text{ Ом.}$$

Полученное значение должно быть в пределах $0{,}1 < x'_{2*} < 0{,}16$.

3.7. Потери и КПД

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

Основные потери в стали рассчитывают только в сердечнике статора [1, формула (9.187)]:

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

где β = 1,3…1,5 и $p_{1,0/50}$ – показатель степени и удельные потери; $k_{да}$, $k_{дz}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участка магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью менее 250 кВт: $k_{да}$ = 1,6, $k_{дz}$ = 1,8; для машин большей мощности – $k_{да}$ = 1,4, $k_{дz}$ = 1,7; B_a и B_{z1} – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора; $\gamma_C = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3 – удельная масса стали для расчетов; m_a и m_{z1} – масса стали ярма [1, формула (9.188)] и зубцов статора [1, формула (9.189)]:

$$m_a = \pi\left(D_a - h_a\right) \cdot h_a \cdot l_{ст1} \cdot k_{C1} \cdot \gamma_C, \text{ кг}; \; m_{z1} = h_z \cdot b_{z1ср} \cdot Z_1 \cdot l_{ст1} \cdot k_{C1} \cdot \gamma_C, \text{ кг},$$

где $b_{z1ср} = \dfrac{b_{z1\max} + b_{z2\min}}{2}$ – средняя ширина зубца статора; h_z – расчетная высота зубца статора, м.

Добавочные потери в стали, возникающие при холостом ходе, подразделяют на поверхностные и пульсационные потери.

Для определения поверхностных потерь вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора B_{01} и B_{02} [1, с. 413] .

Удельные поверхностные потери для статора и ротора [1, формулы (9.191) и (9.192)]:

$$p_{пов1} = 0{,}5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_1}{10000}\right)^{1,5} \cdot \left(B_{01} \cdot t_2 \cdot 10^3\right)^2, \text{ Вт/м}^2;$$

$$p_{пов2} = 0{,}5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000}\right)^{1,5} \cdot \left(B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3\right)^2, \text{ Вт/м}^2.$$

В этих выражениях $k_{01(2)}$ – коэффициент, учитывающих влияние обмотки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери [1, с. 413].

Полные поверхностные потери статора и ротора [1, формулы (9.193) и (9.194)]:

$$P_{пов1} = p_{пов1} \cdot \left(t_1 - b_{ш1}\right) \cdot Z_1 \cdot l_{ст1}, \text{ Вт};$$
$$P_{пов2} = p_{пов2} \cdot \left(t_2 - b_{ш2}\right) \cdot Z_2 \cdot l_{ст2}, \text{ Вт}.$$

Для определения пульсационных потерь в зубцах статора и ротора [1, формулы (9.195) и (9.196)] вначале находим амплитуды пульсаций индукций в

среднем сечении зубцов:

$$B_{z2ср} = \frac{B_{z2\max} + B_{z2\min}}{2}, \text{ Тл – средняя индукция в зубцах ротора;}$$

$$\left.\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + (b_{ш1}/\delta)} \\ \gamma_2 &= \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + (b_{ш2}/\delta)} \end{aligned}\right\} \text{[1, (9.197)];}$$

$$B_{пул1} \approx \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2t_1} \cdot B_{z1}, \text{ Тл;}$$

$$B_{пул2} \approx \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2t_2} \cdot B_{z2ср}, \text{ Тл;}$$

$$P_{пул1} = 0{,}11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{пул1}\right)^2 \cdot m_{z1}, \text{ Вт;}$$

$$m_{z2} = h_z \cdot b_{z1ср} \cdot Z_2 \cdot l_{ст2} \cdot k_{C2} \cdot \gamma_C, \text{ кг – масса стали зубцов ротора;}$$

$$P_{пул2} = 0{,}11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{пул2}\right)^2 \cdot m_{z2}, \text{ Вт.}$$

Таким образом, добавочные потери в стали можно определить [1, формула (9.202)]:

$$P_{ст.доб} = P_{пов1} + P_{пов2} + P_{пул1} + P_{пул2}, \text{ Вт,}$$

а общие потери в стали асинхронной машины рассчитываются по формуле [1, формула (9.203)]:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{\text{ст.доб}}, \text{ Вт.}$$

Электрические потери рассчитываются раздельно в обмотках статора и ротора [1, формулы (9.204) и (9.206)]:

$$P_{э1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \text{ Вт; } P_{э2} = Z_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2, \text{ Вт.}$$

Далее рассчитываются механические и вентиляционные потери $P_{мех}$ [1, с. 415].

Добавочные потери при номинальном режиме:

$$P_{доб.н} = 0{,}005 \cdot P_{1н} = 0{,}005 \cdot \frac{P_2}{\eta}, \text{ Вт.}$$

Определяют активную и реактивную составляющие тока статора, а также ток холостого хода двигателя [1, формулы (9.218), (9.220) и (9.217)]:

$P_{э1хх} = m \cdot I_{\mu}^{2} \cdot r_1$, Вт – электрические потери в статоре при холостом ходе [1, формула (9.219)];

$$I_{хха} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1хх}}{m \cdot U_{н}}, \text{ А; } I_{ххр} \approx I_{\mu}, \text{ А, } I_{хх} = \sqrt{I_{хха}^{2} + I_{ххр}^{2}}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos\varphi_{хх} = \frac{I_{хха}}{I_{хх}}.$$

3.8. Расчет рабочих характеристик

Рабочие характеристики представляют собой зависимости P_1, I_1, $\cos\varphi_1$, η, $s = f(P_2)$. Методика расчета характеристик основывается на системе уравнений напряжений и токов Г-образной схемы замещения [1, с. 418–422].

Сопротивления схемы замещения r_{12} и x_{12}:

$$r_{12} \approx \frac{P_{ст.осн}}{m \cdot I_{\mu}^{2}}, \text{ Ом;}$$

$$x_{12} \cong \frac{U_{н}}{I_{\mu}} - x_1, \text{ Ом.}$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2…3 кВт коэффициент c_1 рассчитывают по формуле [1, (9.223)]:

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}.$$

При меньших мощностях коэффициент рассчитывают, определяя и активную и реактивную его составляющие:

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^{2} + c_{1p}^{2}};\ c_{1a} = \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}{r_{12}^{2} + x_{12}^{2}};\ c_{1p} = \frac{x_1 \cdot r_{12} - r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^{2} + x_{12}^{2}}.$$

Определяют реактивную и активную составляющие тока холостого хода [1, формула (9.226)]:

$$I_{0p} \approx I_{\mu}, \text{А и } I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_н}.$$

Ток синхронного холостого хода:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}, \text{ А.}$$

Определяют расчетные значения величин a, a', b и b' [1, формула (9.227)]:

$$a' = c_1^2;\ b' = 0;\ a = c_1 \cdot r_1;\ b = c_1 \cdot \left(x_1 + c_1 x_2'\right).$$

А при расчетах по уточненным формулам:

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2;\ b' = 2c_{1a} \cdot c_{1p};\ a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' \cdot x_2';\ b = c_{1a} \cdot x_1 + c_{1p} \cdot r_1 + a' \cdot x_2'.$$

Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжения в диапазоне s = (0,1…1,5)$s_{ном}$. Номинальное скольжение предварительно можно взять $s_{ном} \approx r_2'$. Результаты сводятся в таблицу [1, с. 421].

4. УПРОЩЕННЫЕ ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТЫ

Тепловой расчет проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима. Предполагая, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры, то потери в изолированных обмотках статора и ротора несколько увеличиваются по сравнению с расчетными (коэффициент увеличения потерь k_{ρ} по сравнению с полученными для расчетной температуры составит $k_{\rho} = \frac{\rho_{t\max}}{\rho_t}$).

Электрические потери в обмотке статора разделяются на потери в пазовой части $P'_{э.п1}$ и потери в лобовых частях катушек $P'_{э.л1}$ [1, формулы (9.313), (9.314)]:

$$P'_{э.п1} = k_{\rho} \cdot P_{э1} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{ср1}}, \text{ Вт; } P'_{э.л1} = k_{\rho} \cdot P_{э1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л1}}{l_{ср1}}, \text{ Вт.}$$

Повышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины рассчитывается

$$\Delta\vartheta_{пов1} = K \cdot \frac{P'_{э.п1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1}, \text{ °C.}$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности, (Вт / м^2 · °С) определяемый по [1, рис. 9.67, 9.68] в зависимости от исполнения машины; K – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду (принимаем по [1, табл. 9.35]).

Найдем расчетный периметр поперечного сечения паза статора для полузакрытых пазов $П_{П1}$ и перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора [1, формула (9.316)]:

$П_{П1} = 2 \cdot h_П + b_1 + b_2$ – для полузакрытых трапецеидальных пазов, м;

$П_{П1} = 2(h_П + b_П)$ – для прямоугольных открытых и полуоткрытых пазов, м,

$$\vartheta_{из.п1} = \frac{P'_{э.п1}}{Z_1 \cdot П_{П1} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{из}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{экв}} \right), \text{°C},$$

где $h_П$, b_1, b_2 – размеры паза в штампе; $b_{из}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу; $\lambda_{экв}$ – средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции и для классов нагревостойкости B, F и H это значение равно: $\lambda_{экв}$ = 0,16 Вт (м · °С); $\lambda'_{экв}$ – среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки определяется по графику [1, рис. 9.69] (при определении коэффициента мы учитываем значение $d_{эл}$ / $d_{из}$).

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей

$$\Delta\vartheta_{из.л1} = \frac{P'_{э.л1}}{2 \cdot Z_1 \cdot П_{Л1} \cdot l_Л} \cdot \left(\frac{b_{из.Л}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_П}{12 \cdot \lambda'_{экв}} \right), \text{°C},$$

где $П_{Л1} \approx П_{П1}$ - периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки; $b_{из.Л}$ – односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки. При отсутствии изоляции на лобовых частях значение равно нулю.

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины [1, формула (9.320)]:

$$\Delta\vartheta_{пов.л1} = \frac{K \cdot P'_{э.л1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{выл} \cdot \alpha_1}, \text{°C}.$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины рассчитывается по [1, формула (9.321)]:

$$\Delta\vartheta'_1 = \frac{(\Delta\vartheta_{пов1} + \Delta\vartheta_{из.п1}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta\vartheta_{из.л1} + \Delta\vartheta_{пов.л1}) \cdot 2 \cdot l_Л}{l_{ср}}, \text{°C}.$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется по формуле (для двигателя со степенью защиты IP23):

$$\Delta\vartheta_в = \frac{\sum P'_в}{S_{кор} \cdot \alpha_в},$$

где:

для двигателя со степенью защиты IP23

$\sum P'_в = \sum P' - (1-K)\cdot(P'_{э.л1} + P_{ст.осн})$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт;

$\sum P' = \sum P + (k_р - 1)\cdot(P_{э1} + P_{э2})$, Вт;

$S_{кор} = \pi \cdot D_A \cdot (l_1 + 2l_{вып1})$ – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м^2;

для двигателя со степенью защиты IP44;

$\sum P'_в = \sum P' - (1-K)\cdot(P'_{э.л1} + P_{ст.осн}) - 0{,}9P_{мех}$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт;

$\sum P' = \sum P + (k_р - 1)\cdot(P_{э1} + P_{э2})$, Вт;

$S_{кор} = (\pi \cdot D_A + 8П_р)\cdot(l_1 + 2l_{вып1})$ – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м^2;

$П_р$ – условный периметр поперечного сечения станины [1, рис. 9.70)].

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды [1, формула (9.328)]: $\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_в$, °С.

Из-за приближенного характера расчета значение $\Delta\vartheta_1$ должно быть, по крайней мере, на 10–20% меньше, чем допускаемое превышение температуры для принятого класса изоляции.

Для двигателей, спроектированных на базе серии 4А со степенью защиты IP23, требуемый для охлаждения расход воздуха определяют по формуле

$$Q_в = \frac{\sum P'_в}{1100 \cdot \Delta\vartheta'_в}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где $\Delta\vartheta'_в = 2\Delta\vartheta_в$ – превышение температуры выходящего из двигателя воздуха над температурой входящего, °С.

Расход воздуха, который может быть получен при данных размерах двигателя, оценивается по формуле

$$Q'_в = m \cdot (n_к \cdot b_к + 0{,}1)\frac{n}{100} \cdot D_A^2, \text{ м}^3/\text{с},$$

где m = 3,15 – коэффициент, равный 2,6 при $2p$ = 2 и 3,15 при $2p \geq 4$; n – частота вращения двигателя.

Для двигателей, спроектированных на базе серии 4А со степенью защиты IP44, требуемый для охлаждения расход воздуха определяют по [1, формула (9.340)]:

$$Q_в = \frac{k_m \cdot \sum P'_в}{1100 \cdot \Delta\vartheta_в}, \text{ м}^3/\text{с},$$

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

$$k_m = m\sqrt{\frac{n}{100} D_A},$$

где m – коэффициент, равный 2,6 при $2p$=2 ($h \le 132$ мм) и 3,3 ($h \ge 160$ мм); 1,8 при $2p \ge 4$ ($h \le 132$ мм) и 2,5 ($h \ge 160$ мм);

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, оценивается по [1, формула (9.342)]:

$$Q'_в = 0{,}6 D_A^3 \cdot \frac{n}{100}.$$

Расход воздуха, который может быть получен при данных размерах двигателя $Q'_в$, должен быть больше требуемого для охлаждения машины Q_e.

5. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАШИН СЕРИИ 4А и АИ

В зависимости от высоты оси вращения h и исполнения по защите от окружающей среды асинхронные машины серии 4А имеют различное конструктивное исполнение основных узлов. Данные по конструктивному исполнению приведены в [1, с. 314–324] и сведены в табл. 9.

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором серии 4А и с $h \ge 280$ мм ротор выполняется продувным, т. е. по его аксиальным каналам проходит наружный воздух, нагнетаемый наружным вентилятором. Для того чтобы наружный воздух не проникал к обмоткам машины, в аксиальные отверстия ротора вставлены трубки, вторые концы которых закреплены в отверстиях дисков, насаженных на вал ротора. Подшипниковые щиты имеют горизонтальные жалюзи для прохода воздуха к трубкам и выходу его наружу. С внутренней стороны к щитам крепятся направляющие диффузоры, на поверхности соприкосновения которых с вращающимися дисками выполнены уплотнения.

Таблица 9

Конструкция и материалы основных узлов двигателей 4А

<table>
<tr><td rowspan="2">Узел</td><td colspan="4">Высота оси вращения h, мм</td></tr>
<tr><td>50…63</td><td>71…160</td><td>180…250</td><td>280…355</td></tr>
<tr><td>Станина</td><td colspan="2">Цилиндрическая с радиальным оребрением литая из алюминиевого сплава</td><td colspan="2">Цилиндрическая с радиальным оребрением литая из чугуна</td></tr>
<tr><td>Подшипниковые щиты и крышки</td><td>Литые из алюминиевого сплава без крышек</td><td colspan="2">Литые из чугуна</td><td>Литые из чугуна. Передний щит с жалюзи</td></tr>
<tr><td>Вентиляторы</td><td>Только внешний литой из пластмассы</td><td colspan="3">Только внешний литой из алюминиевого сплава</td></tr>
<tr><td>Кожух наружного вентилятора</td><td colspan="4">Штампованный из стального проката</td></tr>
<tr><td>Крепление статора к станине</td><td colspan="2">Приваривается в нескольких точках по внешнему диаметру</td><td colspan="2">Фиксируется стопорными винтами</td></tr>
<tr><td>Крепление ротора к валу</td><td colspan="3">Горячая посадка на вал</td><td>С помощью шпонки. Фиксируется буртиком вала и стопорным кольцом</td></tr>
</table>

На рис. 2 представлен продольный и поперечный разрезы асинхронного двигателя серии 4А с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23.

Серия АИ создавалась на базе асинхронных двигателей серии 4А и во многом повторяет ее конструктивные особенности. Однако исполнение некоторых узлов машин закрытого исполнения (АИР – IP54) отличается от их исполнения в аналогичных машинах предыдущей серии. Особенности конструктивного исполнения приведены в [1, с. 324–337] и частично сведены в табл. 10.

Асинхронные машины с фазным ротором закрытого исполнения АИРФ серийно выпускаются на высоту оси вращения h = 100…355 мм и по конструкции во многом аналогичны машинам серии 4А с короткозамкнутым ротором. Отличием является наличие щеточного узла, который располагается со стороны выходного конца вала внутри корпуса и отделен от активных частей машины перегородкой с лабиринтными уплотнениями [1, рис. 9.14].

На рис. 3 представлен асинхронный двигатель серии АИ со степенью защиты IP54.

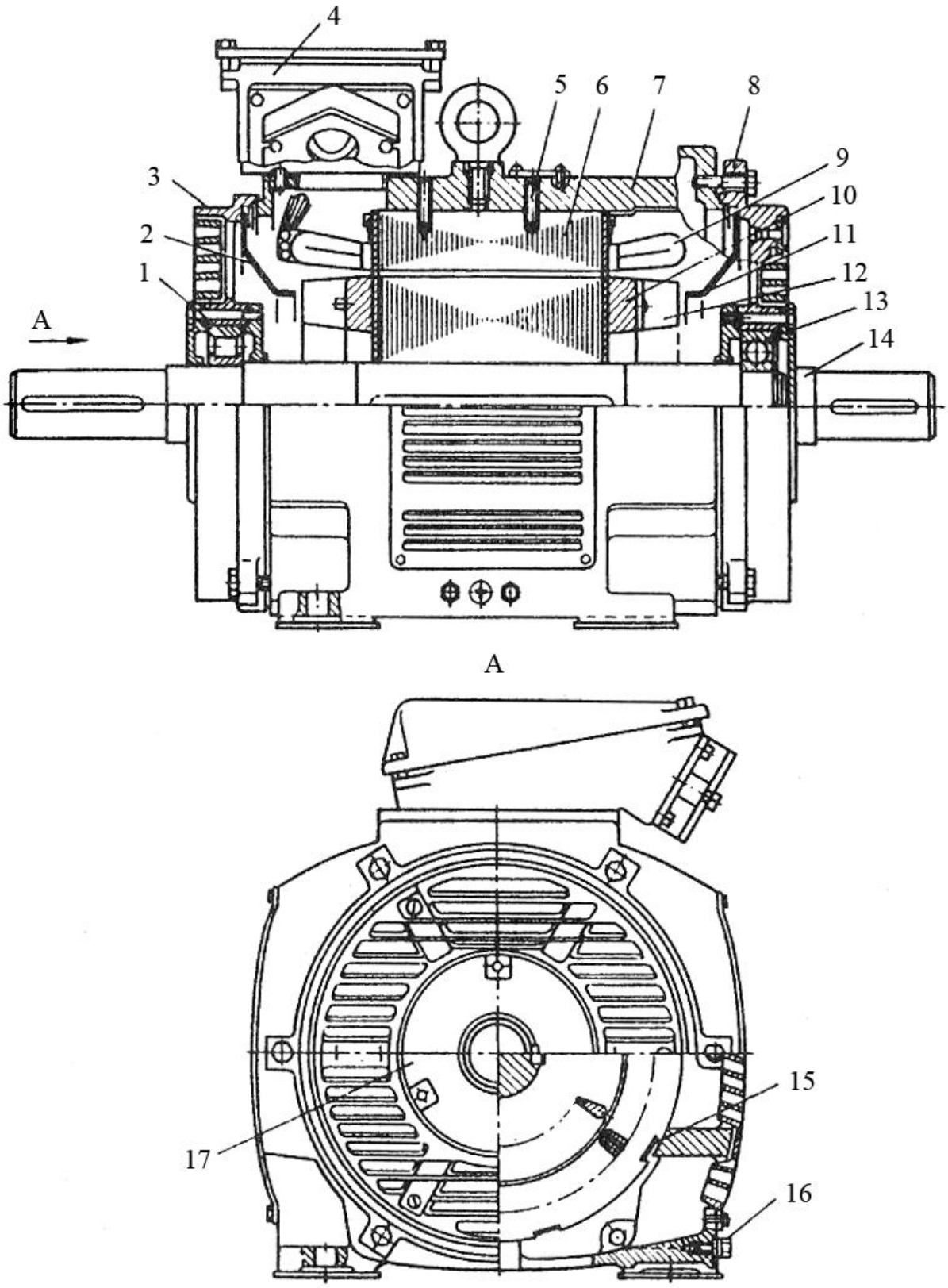


Рис. 2. Двигатель серии 4А:
1, 13 – подшипники; 2, 11 – диффузоры; 3, 8 – подшипниковые щиты; 4 – коробка выводов; 5 – стопорный винт; 6 – сердечник статора; 7 – корпус; 9 – лобовые части обмотки статора; 10 – короткозамыкающее кольцо обмотки ротора; 12 – вентиляционные лопатки; 14 – вал; 15 – скобы крепления сердечника статора; 16 – болт заземления; 17 – подшипниковая крышка

Таблица 10

Конструкция и материалы основных узлов двигателей АИР

<table>
<tr><td rowspan="2">Узел</td><td colspan="5">Высота оси вращения h, мм</td></tr>
<tr><td>45…63</td><td>71…112</td><td>132…180</td><td>200…250</td><td>280…355</td></tr>
<tr><td>Станина</td><td colspan="3">Цилиндрическая с вертикально-горизонтальным оребрением литая из алюминиевого сплава</td><td>Цилиндрическая с радиальным оребрением литая из чугуна</td><td>Цилиндрическая из гофрированной рулонной стали</td></tr>
<tr><td>Подшипниковые щиты и крышки</td><td>Литые из алюминиевого сплава с оребрением без крышек</td><td>Литые из алюминиевого сплава</td><td>Литые из чугуна</td><td>Литые из чугуна с внутренними ребрами для крепления диффузоров</td><td>Литые из чугуна</td></tr>
<tr><td>Вентиляторы</td><td colspan="2">Только внешний литой из пластмассы, в т.ч. при h = 132 мм</td><td colspan="2">Только внешний литой из алюминиевого сплава</td><td>Литые из алюминиевого сплава</td></tr>
<tr><td>Кожух наружного вентилятора</td><td colspan="2">Литой из пластмассы</td><td colspan="3">Штампованный из стального проката</td></tr>
<tr><td>Крепление статора к станине</td><td colspan="2">Приваривается в нескольких точках по внешнему диаметру</td><td colspan="2">Фиксируется стопорными винтами</td><td>Фиксируется нажимными кольцами</td></tr>
<tr><td>Крепление ротора к валу</td><td colspan="4">Горячая посадка на вал</td><td>С помощью шпонки, анналогично серии 4А</td></tr>
</table>

6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПРОЕКТИРОВАННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эта часть проекта является заключительной. Её целесообразно выполнить в виде таблицы сравнения показателей спроектированного двигателя с требуемыми по ГОСТу 19523 – 81 для двигателя ближайшей стандартной мощности (см. [3] или приложение 2). Ниже следует сделать обобщенный вывод о качестве спроектированного двигателя. Если некоторые его показатели несколько хуже стандартных значений, необходимо проанализировать причины и предложить конкретные меры (что и как изменить при проектировании), которые позволили бы улучшить эти показатели.

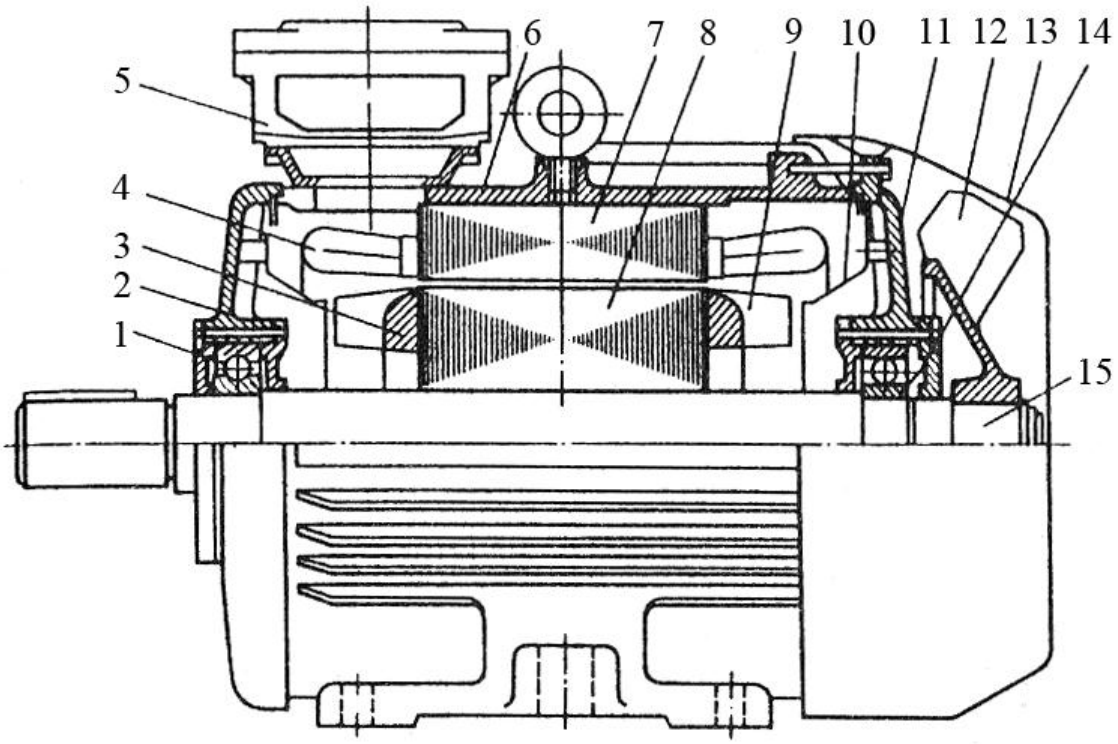


Рис. 3. Двигатель серии АИ:
1, 14 – подшипники; 2, 11 – подшипниковые щиты; 3 – короткозамыкающее кольцо обмотки ротора; 4 – лобовые части обмотки статора; 5 – коробка выводов; 6 – корпус; 7 – сердечник статора; 8 – сердечник ротора; 9 – вентиляционные лопатки ротора; 10 – диффузор; 12 – вентилятор; 13 – кожух вентилятора; 15 – вал

Если у проектируемого асинхронного двигателя есть серийно выпускаемый аналог, то заполняется таблица сравнения некоторых параметров. В рассмотренном ниже примере приведена подобная таблица (табл. 12). По результатам сравнения необходимо определить различия и произвести анализ причин несоответствия. Если аналога не существует, приводятся только характеристики спроектированного двигателя.

Таблица 11

Сравнение показателей спроектированного двигателя с требованиями ГОСТа 19523 – 81.

n_1 = … об/мин, исполнение IP…

Показатель	P_{2H}, кВт	Скольжение $S_н$, %	КПД $\eta_н$, %	cosφ	$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{M_П}{M_Н}$	$\frac{I_{1П}}{I_{1Н}}$
Спроектированный двигатель							
По стандарту							

Пример. Приводим таблицу сравнения характеристик серийно выпускаемого трехфазного асинхронного электродвигателя и спроектированного согласно техническому заданию на проектирование (табл. 12).

Таблица 12

Сравнение характеристик двигателей

Тип двигателя	P_H, кВт	n_H, об/мин	η_H, о. е.	$\cos\varphi_H$, о. е.	$\frac{M_{пуск}}{M_н}$	$\frac{M_{max}}{M_н}$	$\frac{I_{пуск}}{I_н}$
Спроектированный двигатель	1,1	1417	0,74	0,83	2,03	2,18	4,76
4А80А4У3	1,1	1420	0,75	0,81	2,0	2,2	5

Согласно табл. 12 провести сравнительный анализ параметров спроектированного двигателя и серийно выпускаемого.

Анализируя данные табл. 12 можно отметить, что двигатель, спроектированный в соответствии с техническим заданием, по сравнению с аналогом имеет меньшую кратность пускового тока, меньший коэффициент полезного действия и увеличенное значение коэффициента мощности в номинальном режиме работы.

Это может быть объяснено выбором меньшего сечения проводников обмотки статора по сравнению с сечением, применяемым, вероятнее всего (нет точных данных), в серийно выпускаемом двигателе. Как следствие – обмотка статора имеет большее активное сопротивление.

При протекании номинального тока в обмотке статора имеет место увеличение тепловых потерь, что снижает КПД двигателя. Этим же объясняется и уменьшение кратности пускового тока – общее сопротивление электродвигателя в режиме пуска (короткого замыкания) больше.

В свою очередь, поскольку обмотка статора занимает меньшую площадь, уменьшается величина магнитной индукции в зубцах статора, что непременно снижает общее магнитное сопротивление магнитопровода и величину тока намагничивания (по сравнению с аналогом при тех же размерах магнитопровода). Как следствие – увеличивается коэффициент мощности в режиме холостого хода и номинальном режиме работы.

7. ПРИМЕРНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. Каков принцип действия асинхронного двигателя? От чего зависит величина и направление вращения магнитного поля обмотки статора, а также частота ЭДС и тока обмотки ротора? Как связаны скольжение и частоты вращения поля и ротора? Как устроен асинхронный двигатель?

2. Укажите назначение элементов его конструкции?

3. Какие материалы используют для изготовления обмоток и магнитопровода?

4. Как различаются по конструкции и как охлаждаются асинхронные двигатели со степенями защиты IP23 и IP44?

5. Как выбирают размеры провода для обмотки статора?

6. Какие потери мощности возникают в асинхронном двигателе, от каких факторов и как они зависят и где выделяются?

7. Почему необходимо снижать потери мощности в машинах?

8. От каких факторов и как зависят коэффициент мощности и КПД асинхронного двигателя?

9. С какой целью укорачивают шаг обмотки статора и распределяют её по пазам? Как рассчитывают шаг обмотки?

10. Покажите на схеме обмотки статора полюсное деление, катушку, её шаг, катушечную группу, параллельную ветвь, фазную обмотку.

11. Как обеспечивается необходимый пространственный сдвиг фаз на схеме обмотки?

12. Что представляет собой катушка и катушечная группа? Сколько катушечных групп в фазе спроектированного двигателя и как они соединены?

13. Сколько витков в катушке, катушечной группе, в параллельной ветви и в фазе обмотки спроектированного двигателя?

14. Как замыкается магнитное поле асинхронного двигателя? Какие участки обычно рассматривают в магнитной цепи асинхронного двигателя? Размер какого участка сильно влияет на коэффициент мощности двигателя?

15. В каких частях асинхронного двигателя проявляется эффект вытеснения тока и насыщение магнитной цепи при пуске? Как эти факторы влияют на параметры (активные и индуктивные сопротивления) обмоток и на пусковые свойства двигателя (пусковой момент и ток, максимальный момент)?

16. В каком случае и как обмотку статора спроектированного двигателя следует соединить в звезду или треугольник? Изменяются ли при этом номинальные значения мощностей, частоты вращения, фазных и линейных токов и напряжений?

17. Как вычислить скорость вращения ротора (рад/с) и момент на валу (Н · м) спроектированного двигателя?

18. Как можно построить механическую характеристику спроектированного двигателя, используя результаты расчёта рабочих характеристик?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.

2. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учебник для вузов / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко; под ред. О.Д. Гольдберга. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.

3. ГОСТ 19523 – 81. Двигатели трёхфазные асинхронные короткозамкнутые серии 4А с высотой оси вращения от 50 до 355 мм. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 50 с.

4. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Таблица П1

Исходные данные для курсового проектирования

Номер варианта	Напряжение (В) и схемы соединения обмоток статора	Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	Исполнение по степени защиты	Ориентировочная высота оси вращения, мм
1	220/380	22	1000	IP 44	200
2	220/380	15	3000	IP 44	160
3	220/380	15	1000	IP 44	160
4	220/380	22	1500	IP 23	160
5	220/-	11	1000	IP 44	160
6	220/380	75	1500	IP 23	225
7	220/380	45	750	IP 44	250
8	220/380	45	1500	IP 44	200
9	220/380	18,5	750	IP 23	180
10	-/380	4	1000	IP 44	112
11	220/380	55	1000	IP 44	250
12	220/380	75	3000	IP 23	200
13	220/380	55	500	IP 23	315
14	220/380	55	500	IP 44	315
15	220/380	45	3000	IP 44	200
16	220/380	37	3000	IP 23	180
17	220/-	11	3000	IP 44	132
18	-/380	5,5	3000	IP 44	100
19	-/380	4	1500	IP 44	100
20	220/-	1,5	1000	IP 44	90
21	220/380	30	1500	IP 23	180
22	-/380	2,2	1000	IP 44	100
23	220/380	30	3000	IP 23	160
24	-/380	3	1500	IP 44	100
25	220/-	7,5	750	IP 44	160
26	220/380	45	600	IP 44	280
27	-/380	5,5	1500	IP 44	112
28	220/380	90	1500	IP 44	250
29	220/380	37	750	IP 23	225
30	220/380	90	3000	IP 23	225

Приложение 2

Таблица П2

Основные параметры трёхфазных асинхронных корокозамкнутых двигателей серии 4А по ГОСТу 19523 – 81

Мощность $P_н$, кВт	Скольжение $S_н$, %	КПД $\eta_н$, %	$\cos \varphi_н$	$M_{max} / M_н$	$M_п / M_н$	$I_{1п} / I_{1н}$
Закрытое обдуваемое исполнение, степень защиты IP 44						
Синхронная частота вращения 3000 об/мин						
15,0	2,1	88,0	0,91	2,2	1,4	7,5
18,5	2,1	88,5	0,92	2,2	1,4	7,5
22,0	2,0	88,5	0,91	2,2	1,4	7,5
30,0	1,9	90,5	0,90	2,2	1,4	7,5
37,0	1,9	90,0	0,89	2,2	1,4	7,5
45,0	1,8	91,0	0,90	2,2	1,4	7,5
55,0	1,8	91,0	0,92	2,2	1,2	7,5
75,0	1,4	91,0	0,89	2,2	1,2	7,5
90,0	1,4	92,0	0,90	2,2	1,2	7,5
110,0	2,0	91,0	0,89	2,2	1,2	7,0
Синхронная частота вращения 1500 об/мин						
15,0	2,3	88,5	0,88	2,2	1,4	7,0
18,5	2,2	90,0	0,88	2,2	1,4	7,0
22,0	2,0	90,0	0,90	2,2	1,4	7,0
30,0	1,9	91,0	0,89	2,2	1,4	7,0
37,0	1,7	91,0	0,90	2,2	1,4	7,0
45,0	1,6	92,0	0,90	2,2	1,4	7,0
55,0	1,4	92,5	0,90	2,2	1,2	7,0
75,0	1,2	93,0	0,90	2,2	1,2	7,0
90,0	1,3	93,0	0,91	2,2	1,2	7,0
110,0	2,3	92,5	0,90	2,0	1,2	7,0
Синхронная частота вращения 1000 об/мин						
15,0	2,6	87,5	0,87	2,0	1,2	6,0
18,5	2,7	88,0	0,87	2,0	1,2	6,0
22,0	2,3	90,0	0,90	2,0	1,2	6,5
30,0	2,1	90,5	0,90	2,0	1,2	6,5
37,0	1,8	91,0	0,89	2,0	1,2	6,5
45,0	1,4	91,5	0,89	2,0	1,2	7,0
55,0	1,3	91,5	0,89	2,0	1,2	7,0
75,0	2,0	92,0	0,89	1,9	1,2	7,0
90,0	2,0	92,5	0,89	1,9	1,2	7,0
110,0	2,0	93,0	0,90	1,9	1,0	7,0
Синхронная частота вращения 750 об/мин						
15,0	2,6	87,0	0,82	2,0	1,2	6,0
18,5	2,3	88,5	0,84	2,0	1,2	6,0
22,0	2,7	83,5	0,84	2,0	1,2	6,0

Продолжение табл. П2

Мощность $P_н$, кВт	Скольжение $S_н$, %	КПД $\eta_н$, %	$\cos\varphi_н$	$M_{max} / M_н$	$M_п / M_н$	$I_{1п} / I_{1н}$
30,0	1,8	90,0	0,81	2,0	1,2	6,0
37,0	1,6	90,0	0,83	2,0	1,2	6,0
45,0	1,4	91,0	0,84	2,0	1,2	6,0
55,0	2,2	92,0	0,84	1,9	1,2	6,5
75,0	2,2	92,5	0,85	1,9	1,2	6,5
90,0	2,0	93,0	0,85	1,9	1,0	6,5
110,0	2,0	93,0	0,85	1,9	1,0	6,5
Защищённое исполнение, степень защиты IP 23						
Синхронная частота вращения 3000 об/мин						
22,0	2,8	88,0	0,88	2,2	1,3	7,0
30,0	2,9	90,0	0,91	2,2	1,3	7,0
37,0	1,8	91,0	0,91	2,2	1,2	7,0
45,0	1,9	91,0	0,91	2,2	1,3	7,0
55,0	2,0	91,0	0,90	2,2	1,3	7,0
75,0	2,0	92,0	0,90	2,2	1,3	7,0
90,0	1,9	92,0	0,88	2,2	1,2	7,0
110,0	1,6	93,0	0,86	2,2	1,2	7,0
Синхронная частота вращения 1500 об/мин						
18,5	3,2	88,5	0,87	2,1	1,3	6,5
22,0	2,9	90,0	0,88	2,1	1,3	6,5
30,0	2,3	90,0	0,84	2,2	1,2	6,5
37,0	2,1	90,5	0,89	2,2	1,2	6,5
45,0	1,8	91,0	0,89	2,2	1,4	6,5
55,0	1,7	92,0	0,89	2,2	1,2	6,5
75,0	1,6	92,5	0,89	2,2	1,2	6,5
90,0	1,4	93,5	0,89	2,2	1,2	6,5
110,0	1,5	93,5	0,89	2,2	1,2	6,5
Синхронная частота вращения 1000 об/мин						
18,5	2,5	87,0	0,85	2,0	1,2	6,0
22,0	2,4	88,5	0,87	2,0	1,2	6,0
30,0	2,3	90,0	0,88	2,0	1,2	6,0
37,0	1,9	90,5	0,88	2,0	1,2	6,5
45,0	2,0	91,0	0,87	2,0	1,2	6,5
55,0	1,3	92,5	0,87	2,0	1,2	6,5
75,0	1,2	93,0	0,87	2,0	1,2	7,0
90,0	2,2	92,5	0,89	2,0	1,2	6,0
110,0	2,2	92,5	0,89	2,0	1,2	6,0
Синхронная частота вращения 750 об/мин						
15,0	2,6	86,0	0,80	1,9	1,2	5,5
18,5	2,7	87,5	0,80	1,9	1,2	5,5
22,0	2,6	89,0	0,84	1,9	1,2	5,5
30,0	2,3	89,5	0,82	1,9	1,2	5,5

Окончание табл. П2

Мощность $P_н$, кВт	Скольжение $S_н$, %	КПД $\eta_н$, %	$\cos \varphi_н$	$M_{max} / M_н$	$M_п / M_н$	$I_{1п} / I_{1н}$
37,0	2,0	90,0	0,81	1,9	1,2	5,5
45,0	1,5	91,0	0,81	1,9	1,2	5,5
55,0	1,6	92,0	0,81	1,9	1,2	5,5
75,0	2,5	92,0	0,85	1,9	1,2	5,5
90,0	2,5	92,5	0,86	1,9	1,2	5,5
110,0	2,0	93,0	0,86	1,9	1,2	5,5

Приложение 3

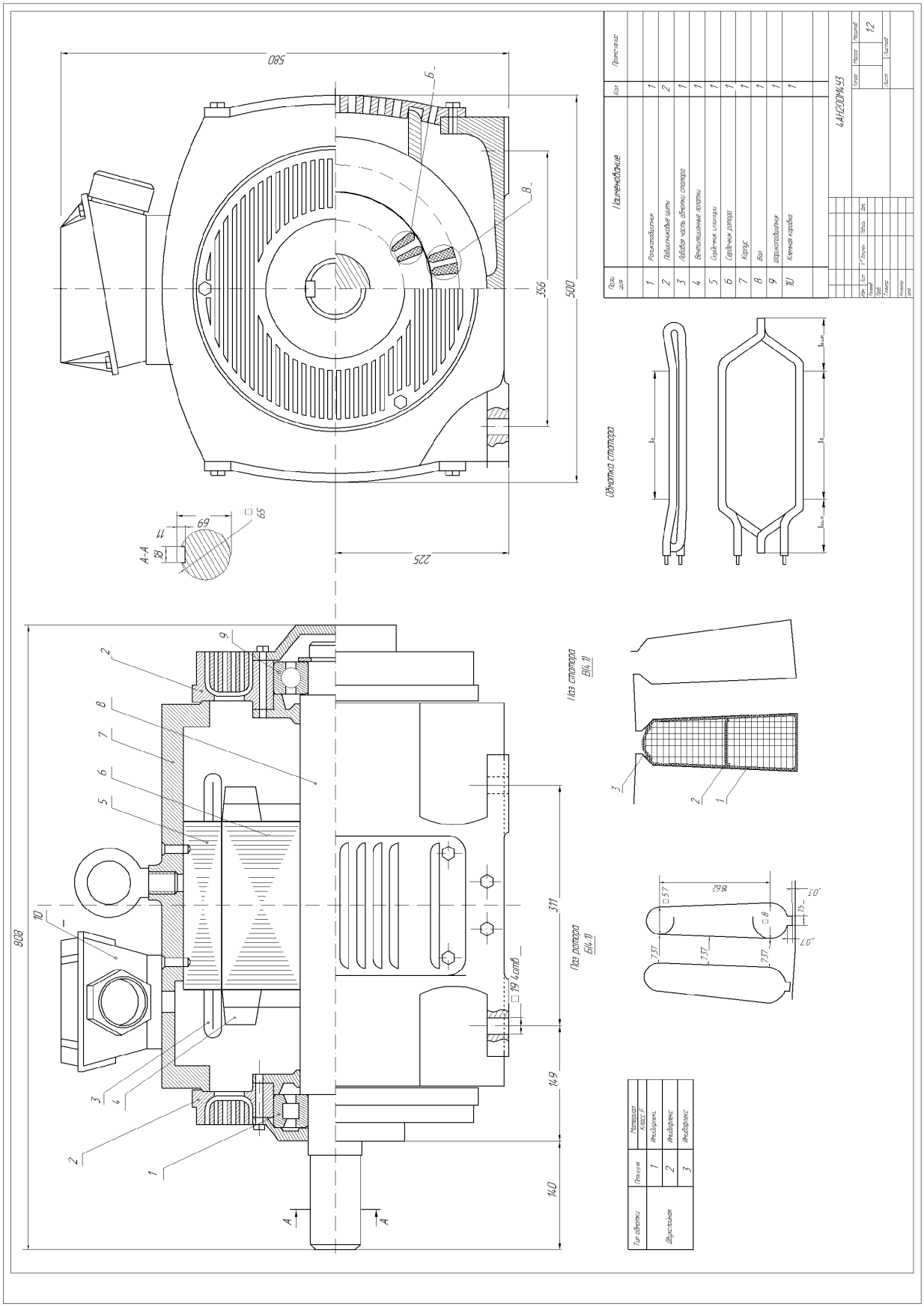


Рис. П1. Пример оформления чертежа

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение…….…… 3
1. Содержание курсового проекта…….. 4
2. Техническое задание…… 5
3. Электромагнитный расчет проектируемого двигателя…… 5
3.1. Выбор главных размеров электродвигателя…….. 5
3.2. Расчет размеров зубцовой зоны и обмотки статора…….. 8
3.3. Выбор воздушного зазора…… 15
3.4. Расчет короткозамкнутого ротора……... 16
3.5. Расчет магнитной цепи……. 19
3.6. Расчет параметров асинхронной машины для номинального режима……... 22
3.7. Потери и КПД…… 27
3.8. Расчет рабочих характеристик……. 30
4. Упрощенные тепловой и вентиляционный расчеты……. 31
5. Конструктивные особенности машин серии 4А и АИ……. 34
6. Сравнительный анализ спроектированного асинхронного двигателя…… 37
7. Примерные контрольные вопросы к защите курсового проекта…… 39
Библиографический список…… 41
Приложения…….. 42