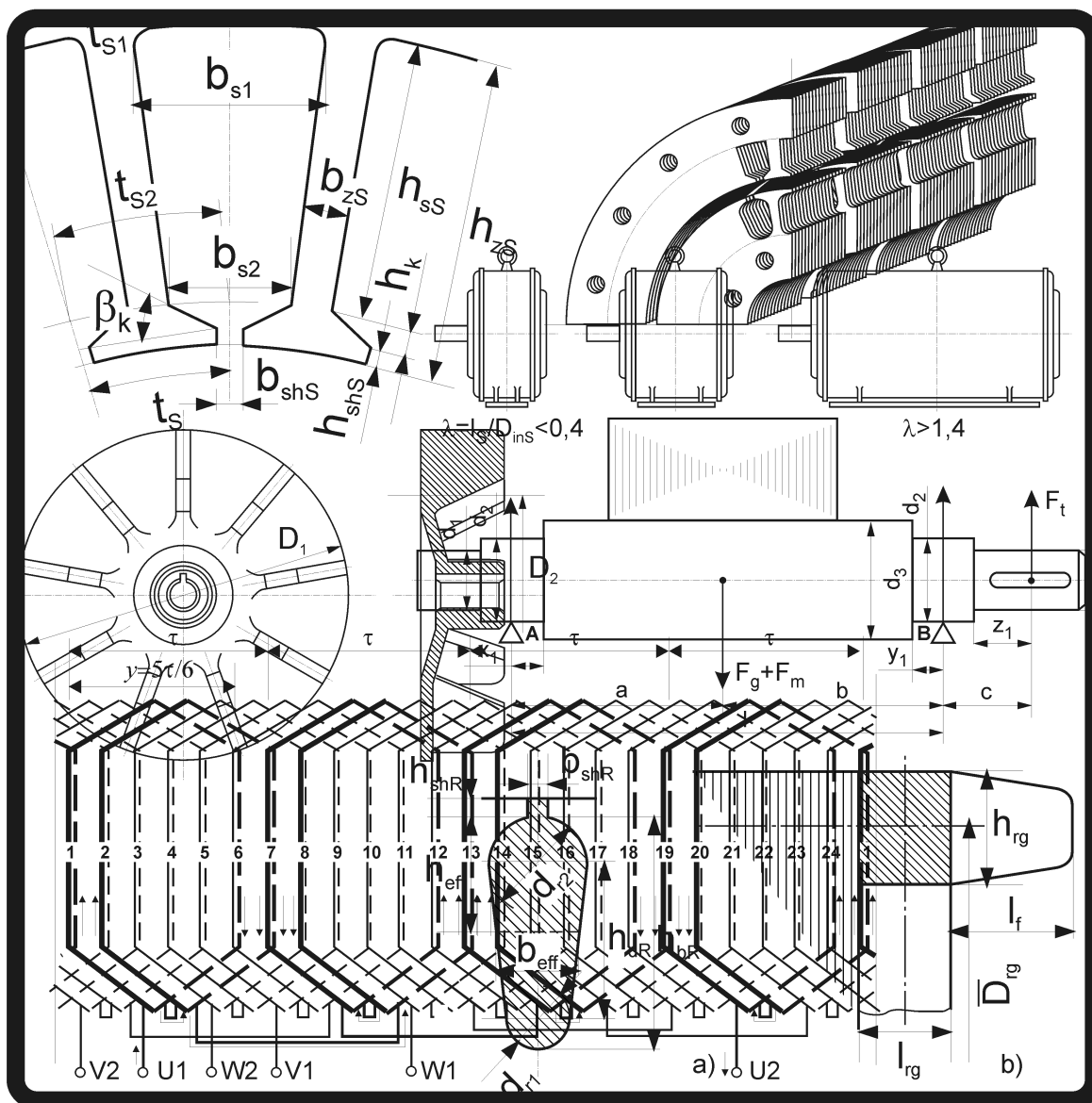


А.А. Усольцев, В.С. Томасов, К.М. Денисов
 Г.Л. Демидова, Н.А. Поляков

РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЁХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**А.А. Усольцев, В.С. Томасов, К.М. Денисов
Г.Л. Демидова, Н.А. Поляков**

**РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ
РОТОРОМ**

Учебное пособие

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлениям подготовки 13.03.02 и 13.04.02 – Электроэнергетика и
электротехника в качестве учебного пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
бакалавриата и магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2021

Усольцев А.А., Томасов В.С., Денисов К.М., Демидова Г.Л., Поляков Н.А. Расчёт характеристик трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором/Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2021, – 51 с.

Рецензент:

Лукичев Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

Пособие по курсовому проектированию содержит методику расчёта основных размеров конструкции трёхфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя, электрической и магнитной цепи, теплового и вентиляционного расчёта. В качестве исходных данных для расчёта используются: мощность двигателя, число пар полюсов магнитного поля, высота оси вращения, номинальное напряжение и частота питания, тип обмотки статора, способ охлаждения, режим работы и класс изоляции. Результатом расчёта являются параметры схемы замещения двигателя и основные рабочие характеристики, которые должны быть сопоставлены с характеристиками двигателей серии 5А.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© А.А. Усольцев, В.С. Томасов, К.М. Денисов,
Г.Л. Демидова, Н.А. Поляков, 2021

Введение

Современная техника характеризуется не только бурным развитием областей традиционного применения электропривода, таких как системы автоматизации и робототехника, но также значительным расширением его применения в приводе движения автомобилей, судов и летательных аппаратов. Это требует развития и совершенствования электрических машин, так как изделия общего применения часто не позволяют решить поставленные задачи.

Особенностью современного состояния технологии производства электрических машин является возможность изготовления прототипов изделий с помощью универсальной оснастки и создания магнитопроводов путём лазерной или гидроабразивной резки пластин вместо штамповки. Это открывает широкие возможности оптимизации изделий, а также изготовления мелких партий машин, предназначенных для узкоспециализированных задач.

Очевидно, что всякому производству предшествует этап проектирования. Современные математические пакеты автоматизированного проектирования электрических машин, такие как Infolytica/MotorSolve, ANSYS/MotorCAD и др., позволяют получить техническое решение на основе конечно-элементного анализа электромагнитных и тепловых процессов, а также силовых нагрузок на различные части машины. Однако, как всякое численное решение, они не позволяют обобщить полученный результат на более широкий класс изделий. Кроме того, они не могут сформировать у студента представления об особенностях физических явлений, связанных с применяемыми активными материалами и режимами работы двигателя, а также о путях и методах оптимизации решения поставленной задачи.

Асинхронные двигатели выбраны в качестве изучаемого объекта, так как они составляют в электроприводе более 90% суммарной мощности и количества изделий. Это связано с их высокой надёжностью, технологичностью и низкой стоимостью. Причём, по мере развития вычислительной техники и силовой электроники, область применения асинхронных двигателей расширяется, так как при этом реализуются алгоритмы векторного управления, обеспечивающие высокое качество регулирования координат движения.

Проектирование электрических машин является заключительным разделом их изучения. Здесь рассматриваются вопросы электромагнитного, теплового и конструктивного расчёта, обеспечивающего заданные характеристики машины. Материал пособия предназначен для выполнения курсового проектирования в рамках дисциплины «Проектирование электротехнических устройств», но будет полезен и частично включён в блок профессиональных дисциплин студентов и магистрантов направлений 13.03.02 и 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» образовательных программ «Цифровые системы управления» и «Электроинженерия» для более глубокого понимания дисциплин «Электрические машины», «Современный электропривод переменного тока», «Асинхронный электропривод электротехнических комплексов» и «Электрические машины устройств автоматизации».

1. Выбор электромагнитных нагрузок и определение главных размеров двигателя

Главными размерами машин переменного тока являются внутренний диаметр сердечника статора D_{inS} и его длина l_s . Это связано с тем, что при прочих равных условиях они определяют электромагнитную мощность машины, а также её технико-экономические показатели.

Действительно, электромагнитная мощность равна

$$P_{em} = m_s E_s I_s \quad (1.1)$$

где: m_s, E_s, I_s – число фаз, фазная ЭДС основного магнитного потока и фазный ток статора, соответственно.

Действующее значение фазной ЭДС можно представить как

$$E_s = 2\pi f_1 k_{ws1} w_s \Phi_\delta / \sqrt{2} = 4k_\Phi f_1 k_{ws1} w_s \Phi_\delta, \quad (1.2)$$

где: Φ_δ – магнитный поток в воздушном зазоре, определяемый по действительной кривой поля как

$$\begin{aligned} \Phi_\delta &= \alpha \tau l_s B_\delta 10^{-6} \text{ Вб}; \\ \alpha &= \bar{B}_\delta / B_\delta \end{aligned} \quad (1.3)$$

– коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению среднего значения индукции в зазоре \bar{B}_δ к её амплитудному значению B_δ (для асинхронных двигателей принимается $\alpha \approx 2/\pi$);

$$\tau = \pi D_{inS} / (2z_p) \text{ мм} \quad (1.4)$$

– полюсное деление машины с внутренним диаметром сердечника статора D_{inS} , мм, и числом пар полюсов магнитного поля z_p ;

l_s – длина сердечника статора в мм;

$$f_1 = z_p n_1 / 60 \text{ Гц} \quad (1.5)$$

– частота сети, соответствующая синхронной скорости вращения n_1 , об/мин;

$$k_{ws1} = k_{ks1} k_{rs1} \quad (1.6)$$

– обмоточный коэффициент для основной гармоники ЭДС;

$$k_{ks1} = \sin(\beta\pi/2) \quad (1.7)$$

– коэффициент укорочения шага обмотки статора;

$$\beta = y/\tau \quad (1.8)$$

– относительный шаг обмотки;

$$k_{rs1} = \frac{\sin[\pi/(2m_s)]}{q_s \sin[\pi/(2q_s m_s)]} \quad (1.9)$$

– коэффициент распределения обмотки;

$$q_s = Z_s / (2z_p m_s) \quad (1.10)$$

– число пазов на полюс и фазу;

Z_s – число пазов сердечника статора;

w_S – число последовательно соединённых витков фазной обмотки.

В выражении (1.2) $k_\Phi = \pi/(2\sqrt{2}) = 1,11(1)$ – коэффициент формы синусоиды.

Полный ток, протекающий в $N_S = 2m_S w_S$ последовательно соединённых проводниках, находящихся в пазах сердечника статора, равен

$$I_S N_S = I_S 2m_S w_S \text{ А.} \quad (1.11)$$

Тогда величина тока, приходящегося на единицу длины окружности воздушного зазора,

$$A_S = I_S 2m_S w_S 10^3 / (\pi D_{inS}) \text{ А/м.} \quad (1.12)$$

Эта величина называется *линейной нагрузкой* машины, А/м. Из выражения (1.12) ток можно представить как

$$I_S = \pi D_{inS} A_S 10^{-3} / (2m_S w_S) \text{ А.} \quad (1.13)$$

Подставляя в (1.1) выражения (1.2) и (1.13) с учётом (1.3) и (1.4), получим

$$P_{em} = k_\Phi k_{wS1} n_1 \alpha l_S D_{inS}^2 B_\delta A_S / (6,1 \cdot 10^{12}) \text{ кВА} \quad (1.14)$$

или

$$\frac{D_{inS}^2 l_S n_1}{P_{em}} = C_A = \frac{6,1 \cdot 10^{12}}{k_\Phi k_{wS1} \alpha B_\delta A_S} \text{ мм}^3 / (\text{кВА} \cdot \text{мин}). \quad (1.15)$$

Выражение (1.15) называется *основным расчётным уравнением машины*, а величина C_A – *машинной постоянной Арнольда*. Обратная величина $1/C_A = K_A$ называется *коэффициентом использования* или коэффициентом Эссона. Это связано с тем, что отношение $P_{em} / n_1 \equiv M_{em}$ пропорционально электромагнитному моменту, а $D_{inS}^2 l_S = V_{inS}$ представляет собой активный объём машины, поэтому машинная постоянная C_A соответствует расходу активных материалов на единицу электромагнитного момента, а обратная величина – эффективности их использования.

Преобразовав (1.15), получим

$$D_{inS}^2 l_S = V_{inS} = \frac{6,1 \cdot 10^{12} P_{em}}{k_\Phi k_{wS1} n_1 \alpha B_\delta A_S} \text{ мм}^3. \quad (1.16)$$

Это выражение позволяет проследить характерные соотношения параметров машин. При прочих равных условиях машины с более высокой скоростью вращения обладают меньшим объёмом активных материалов, т.е. лучшими массогабаритными показателями.

При заданной мощности и скорости вращения расход материалов определяется магнитной (B_δ) и электрической нагрузкой (A_S). Увеличение этих нагрузок улучшает массогабаритные показатели, но снижает КПД, так как при этом увеличиваются магнитные и электрические потери энергии, что приводит к увеличению тепловой нагрузки и, соответственно, снижению срока службы машины. Снижение электромагнитных нагрузок приводит к

обратным эффектам, но увеличивает массу, габариты и стоимость изделия. Однако магнитные и электрические нагрузки можно перераспределять между собой, что часто позволяет оптимизировать расход активных материалов и при этом снизить общие потери энергии. Кроме того, можно, например, совершенствуя технологию изготовления сердечника, уменьшить воздушный зазор машины, что приведёт к снижению тока намагничивания и, соответственно, к снижению потерь в обмотке статора. Таким образом, в процессе проектирования машины всегда осуществляется поиск решения, обеспечивающего выполнение противоречивых требований – минимизации расхода активных материалов и минимизации магнитных и электрических потерь. Основными направлениями оптимизации являются использование высокоэффективных активных материалов, а также совершенствование конструкции и технологии изготовления машины.

Вариацией схемы обмотки и выбором электромагнитных нагрузок можно минимизировать объём

$$V_{inS} = D_{inS}^2 l_S, \tag{1.17}$$

однако для одного и того же объёма существует теоретически бесконечное множество значений диаметров и длин сердечника. При разных соотношениях этих величин машина может иметь различную форму, т.е. быть «короткой», «средней» или «длинной» (рис. 1). У «длинных» машин лучше использование активных материалов и меньше момент инерции ротора, что улучшает динамику привода. Однако увеличение длины вала увеличивает его

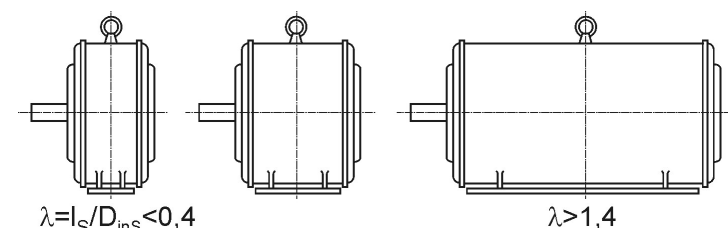


Рис. 1

прогиб и ухудшает охлаждение машины.

Из выражения (1.14) с учётом принятых значений коэффициентов полюсного перекрытия и формы длину пакета сердечника статора можно определить как

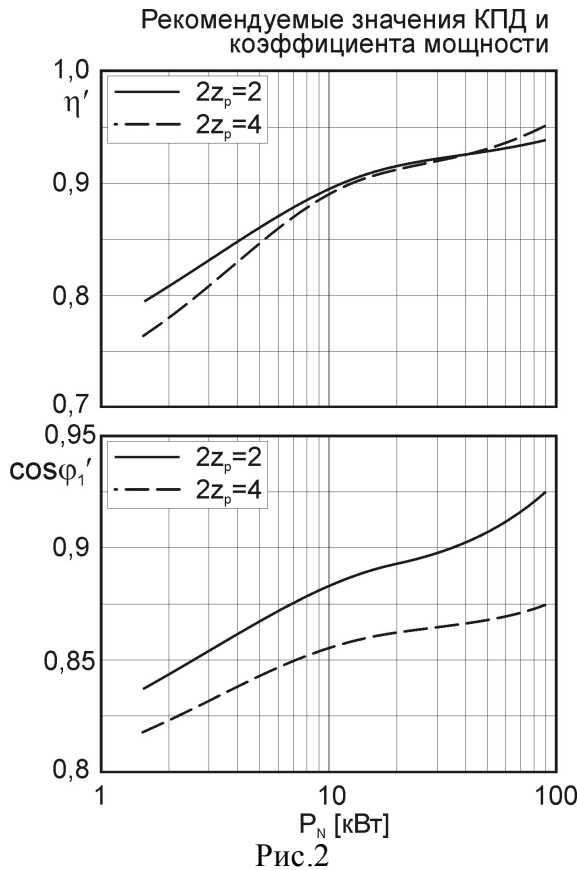
$$l_S = \frac{8,66 \cdot 10^{12} P'}{k_{wS1} n_1 D_{inS}^2 B'_\delta A'_S}, \text{ мм.} \tag{1.18}$$

Здесь

$$P' = m_S E_S I_{SN} = m_S k_E U_N I_{SN} = \frac{k_E P_N}{\eta' \cos \varphi'}, \text{ кВА} - \tag{1.19}$$

расчётная мощность двигателя, определяемая заданной номинальной мощностью на валу P_N , кВт, расчётными значениями КПД η' и коэффициента мощности $\cos \varphi'$, а также соотношением ЭДС и фазного напряжения

$$k_E = E_S / U_N < 1,0. \tag{1.20}$$



число пазов сердечников статора и ротора (Z_S и Z_R). Эти данные для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором сведены в таблицу 1.

Расчётные значения максимальной индукции B'_δ , линейной нагрузки A'_s и воздушного зазора δ также определяются по существующим рекомендациям (см. кривые на рис.3).

Предварительное значение обмоточного коэффициента для однослойной обмотки статора принимают равным $k_{ws1} = 0,96$.

По известному внутреннему диаметру сердечника статора D_{inS} и воздушному зазору δ не составляет труда определить наружный диаметр сердечника ротора

Величина k_E определяется падением напряжения на импедансе обмотки статора и находится в пределах $0,96 < k_E < 0,98$, причём большие значения соответствуют двигателям с меньшим числом полюсов.

Предварительные расчётные значения КПД и коэффициента мощности выбирают по кривым на рис. 2, соответствующим двигателям, обладающим на сегодняшний день наиболее высокими технико-экономическими показателями.

Обычно при проектировании задаётся высота оси вращения h , мм, что позволяет при заданной мощности P_N и синхронной скорости вращения n_1 выбрать по существующим рекомендациям внутренний D_{inS} и внешний диаметр D_{exS} сердечника статора, а также

Таблица 1

Рекомендуемые размеры для асинхронных двигателей

№	h[мм]	2z _p	P _N [кВт]	D _{exS} [мм]	D _{inS} [мм]	Z _S	Z _R
1	80	2	1,5	131	74	24	20
2	80	4	1,1	131	84	36	28
3	90	2	3,0	149	84	24	20
4	90	4	3,0	149	95	36	28
5	100	2	4,0	168	95	24	20
6	100	4	3,0	168	105	36	28
7	112	2	7,5	191	110	24	22
8	112	4	5,5	191	126	36	34
9	132	2	7,5	225	130	24	19
10	132	4	7,5	225	145	36	34
11	160	2	15,0	272	155	36	28
12	160	4	15,0	272	185	48	38
13	180	2	22,0	313	171	36	28
14	180	4	22,0	313	211	48	38
15	200	2	37,0	349	194	36	28
16	200	4	37,0	349	238	48	38
17	225	2	55,0	392	208	36	28
18	225	4	55,0	392	254	48	38
19	250	2	75,0	437	232	48	40
20	250	4	75,0	437	290	60	50

$$D_{exR} = D_{inS} - 2\delta, \quad (1.21)$$

после чего предварительно можно принять величину внутреннего диаметра сердечника статора равной 1/3 от величины наружного диаметра, т.е.

$$D_{inR} = 0,33 \cdot D_{exR}. \quad (1.22)$$

В дальнейшем, при расчёте вала на жёсткость, эту величину следует уточнить.

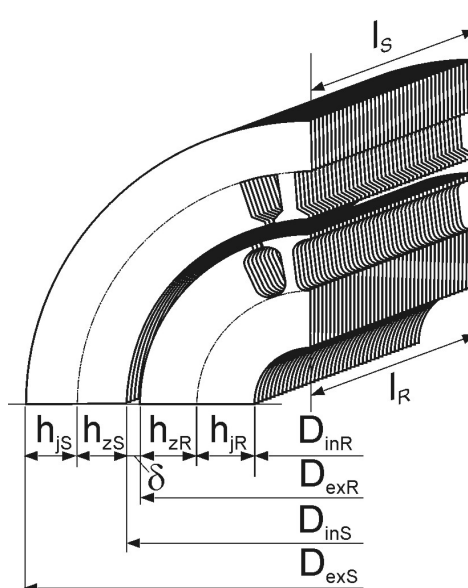
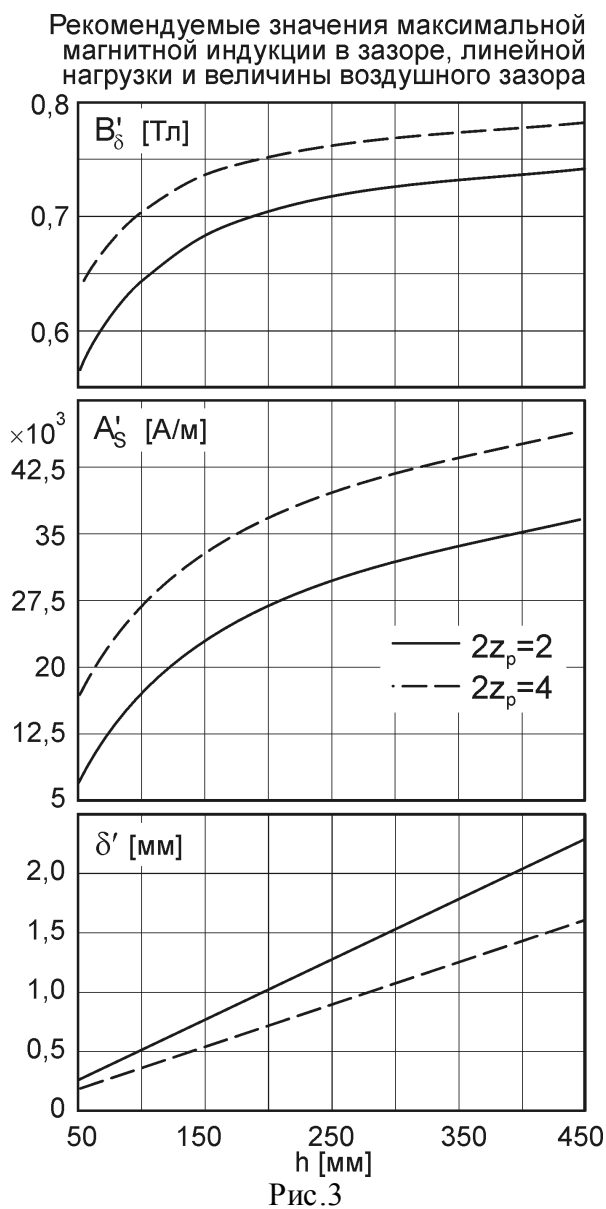


Рис.4

В двигателях с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм длину сердечника ротора l_R принимают равной длине сердечника статора l_S . В двигателях с большей высотой оси вращения для компенсации неточностей сборки машины длину сердечника ротора увеличивают на 5 мм.

Сердечники статора и ротора набирают из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 4). В зависимости от высоты оси вращения или, что практически то же самое, в зависимости от мощности двигателя

используют разные марки стали и разные способы изоляции листов пакета. В двигателях с короткозамкнутым ротором и высотой оси $h \leq 250$ применяется сталь 2013, и листы обоих сердечников изолируют оксидированием. В двигателях с большей высотой оси применяют сталь 2312, а листы сердечника статора изолируют лаком. В двигателях с фазным ротором оба пакета изолируют лаком. Способ изоляции определяет толщину немагнитно-

го слоя и влияет на коэффициент заполнения сердечника сталью k_{Fe} . При оксидировании $k_{Fe} = 0,98$, а при лакировке $k_{Fe} = 0,95$.

2. Определение размеров активной части двигателя

Пазы статора. Наибольшее распространение в машинах малой и средней мощности со вспятыми обмотками из проводов круглого сечения получили полузакрытые пазы трапецеидальной формы (рис. 5).

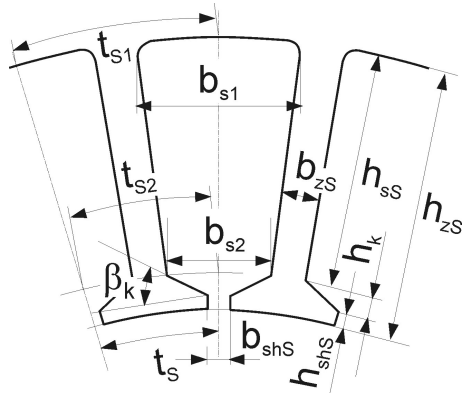


Рис. 5

Главными достоинствами пазов трапецеидальной формы являются постоянная ширина зубцов по всей высоте паза, обеспечивающая постоянство магнитной индукции в зубце, и малое раскрытие паза, способствующее уменьшению пульсаций индукции в воздушном зазоре.

Ширина зубца выбирается в соответствии с условием обеспечения в нём рекомендуемого значения магнитной индукции B_{zs} (см. таблицу 2), величина которой пропорциональна части магнитного потока воздушного зазора, проходящего через зубцовое деление

$$t_s = \pi D_{inS} / Z_S \text{ мм}, \quad (2.1)$$

Таблица 2

Рекомендуемые значения магнитной индукции в зубцах и в спинке сердечника [Тл]

h [мм]	Статор		Ротор	
	B_{zs}	B_{js}	B_{zR}	B_{jR}
50-132	1,75-1,95	1,50-1,65	1,75-1,95	1,35-1,55
160	1,75-2,00	1,45-1,70	1,75-1,95	
180-250	1,70-1,90	1,45-1,65	1,70-1,90	

которое представляет собой длину дуги между осями соседних пазов или зубцов, измеренную по внутреннему диаметру сердечника статора, т.е. ширина зубца:

$$b_{zs} = t_s B'_\delta / (k_{Fe} B_{zs}) \text{ мм}. \quad (2.2)$$

Для определения высоты зубца h_{zs} необходимо вычислить высоту ярма или спинки сердечника h_{js} , обеспечивающую рекомендуемую величину индукции B_{js} (см. таблицу 3).

Магнитный поток в спинке

$$\Phi_{js} = B_{js} h_{js} l_s 10^{-6} \text{ Вб} \quad (2.3)$$

составляет половину магнитного потока в зазоре

$$\Phi_\delta = \alpha B'_\delta \tau l_s 10^{-6} \text{ Вб}, \quad (2.4)$$

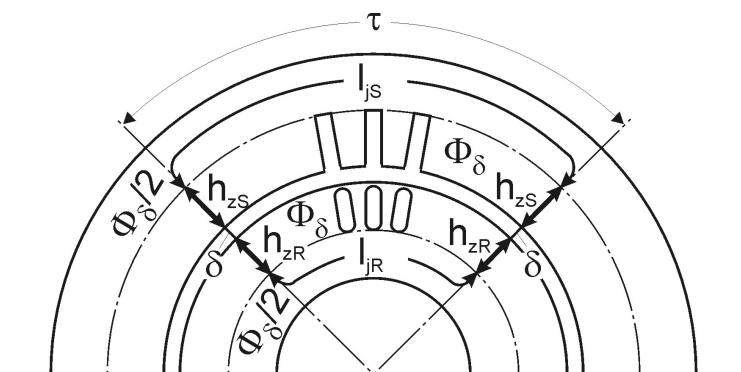


Рис. 6

так как в этой части магнитной цепи он разветвляется надвое (рис. 6). Отсюда с учётом коэффициента заполнения сталью высота спинки –

$$h_{jS} = \frac{\alpha B'_8 \tau}{2k_{Fe} B_{jS}} \text{ мм} \quad (2.5)$$

и высота зубца –

$$h_{zS} = \frac{D_{exS} - D_{inS}}{2} - h_{jS} \text{ мм} \quad (2.6)$$

Зубцовое деление t_{S1} , соответствующее дуге окружности, проходящей по наружной части паза (рис. 5), равно

$$t_{S1} = \pi(D_{inS} + 2h_{zS}) / Z_S \text{ мм.} \quad (2.7)$$

Отсюда бóльшая ширина паза

$$b_{s1} = t_{S1} - b_{zS} \text{ мм.} \quad (2.8)$$

Зубцовое деление t_{S2} , соответствующее дуге окружности внутренней части паза (рис. 5) при условии, что угол $\beta_k = 45^\circ$, приближённо можно определить как

$$t_{S2} = \pi(D_{inS} + 0,2h_{zS}) / Z_S \text{ мм.} \quad (2.9)$$

Тогда меньшая ширина паза

$$b_{s2} = t_{S2} - b_{zS} \text{ мм.} \quad (2.10)$$

Ширина шлица паза b_{shS} (рис. 5) должна обеспечивать возможность последовательной укладки проводов катушек обмотки по одному с учётом толщины пазовой изоляции b_p , т.е. $b_{shS} > d_{cp} + 2b_p$. Обычно диаметр изолированного провода $d_{cp} < 1,76$ мм и $b_{shS} < 4,0$ мм. В начале расчёта можно принять ширину шлица $b_{shS} = 3,0$ с последующим уточнением после определения диаметра провода.

Для пазов с углом $\beta_k = 45^\circ$ высота клиновидной части паза равна

$$h_k = (b_{s2} - b_{shS}) / 2 \text{ мм.} \quad (2.11)$$

Высота шлица обычно находится в пределах $h_{shS} = 0,8 \dots 1,2$ мм. На начальном этапе проектирования её можно принять равной 1,0 мм.

Полученные размеры паза позволяют определить его площадь «в штампе», т.е. без учёта площади, занимаемой изоляцией,

$$S_{sS} = \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} h_{sS} + \frac{b_{s2} + b_{shS}}{2} h_k + b_{shS} h_{shS} \text{ мм}^2, \quad (2.12)$$

где $h_{sS} = h_{zS} - h_k - h_{shS}$.

Пазы ротора. В двигателях малой и средней мощности обычно используют полузакрытые и закрытые пазы овальной формы (рис. 7). В таких пазах ширина зубца постоянна, постоянна также и магнитная индукция.

Зубцовое деление по наружному диаметру ротора равно

$$t_R = \pi D_{exR} / Z_R \text{ мм.} \quad (2.13)$$

Тогда ширина зубца, обеспечивающая рекомендуемую величину индукции B_{zR} (см. таблицу 2),

$$b_{zR} = t_R B'_\delta / (k_{Fe} B_{zR}) \text{ мм.} \quad (2.14)$$

Высота спинки сердечника ротора определяется рекомендуемой величиной индукции B_{jR} (см. таблицу 2) по выражению

$$h_{jR} = \frac{\alpha B'_\delta \tau}{2 k_{Fe} B_{jR}} \text{ мм,} \quad (2.15)$$

полученному аналогично выражению (2.5).

Отсюда можно найти высоту зубца

$$h_{zR} = \frac{D_{exR} - D_{inR}}{2} - h_{jR} \text{ мм.} \quad (2.16)$$

Диаметры верхней и нижней части паза, обеспечивающие параллельность стенок зубцов, определяют в соответствии с выражениями

$$d_{r2} = \frac{\pi(D_{exR} - 2h_{shR}) - Z_R b_{zR}}{Z_R + \pi} \text{ мм,} \quad (2.17)$$

$$d_{r1} = \frac{\pi(D_{exR} - 2h_{zR}) - Z_R b_{zR}}{Z_R - \pi} \text{ мм,} \quad (2.18)$$

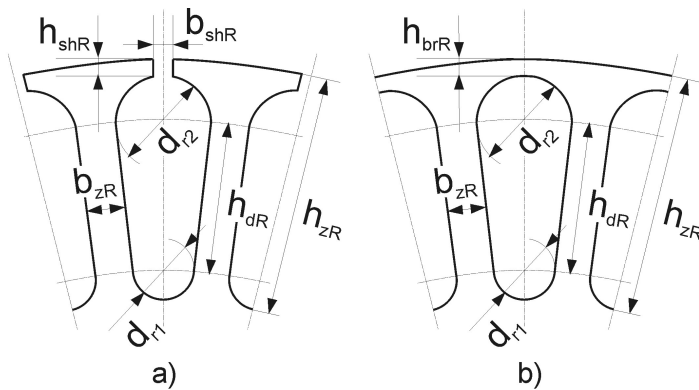


Рис. 7

где $h_{shR} = 0,5 \dots 0,7$ мм – высота шлица при ширине $b_{shR} = 1,0 \dots 1,5$ мм. Для закрытых пазов (рис. 7, б) в выражения (2.17) и (2.18) вместо высоты шлица следует подставить высоту мостика $h_{brR} = 0,5 \dots 1,0$ мм. Диаметр нижней части паза должен быть не менее 2 мм у машин

с высотой оси менее 160 мм и не менее 3,5 мм у остальных машин.

Расстояние между центрами окружностей паза

$$h_{dR} = h_{zR} - h_{shR} - (d_{r1} + d_{r2}) / 2 \text{ мм,} \quad (2.19)$$

Площадь паза «в штампе» можно определить как

$$S_{sR} = \pi(d_{r1}^2 + d_{r2}^2) / 4 + h_{dR} (d_{r1} + d_{r2}) / 2 \text{ мм}^2. \quad (2.20)$$

3. Обмотки двигателя

Обмотка статора. Наиболее распространённым типом обмотки статора у двигателей малой и средней мощности является однослойная концентрическая обмотка (рис. 8).

Катушки однослойной обмотки имеют разный шаг, но средний шаг катушечной группы всегда диаметральный (полный). Это ухудшает рабочие показатели машины. Кроме того, у таких обмоток больше расход меди, так как они имеют больший вылет лобовых частей. Однако эта конструкция позволяет механизировать сборку обмотки статора, что существенно снижает трудоёмкость и стоимость изготовления двигателя.

Одним из важных расчётных параметров обмотки является число пазов на полюс и фазу $q_s = Z_s / (2z_p m_s)$, т.е. число соседних пазов, занимаемых одной катушечной группой. Эти пазы образуют фазную зону, величину которой принято определять в угловых единицах

$$\alpha_s = 2\pi z_p q_s / Z_s = \pi / m_s. \quad (3.1)$$

Для трёхфазной машины ($m_s = 3$) угол фазной зоны составляет 60° . Существуют трёхфазные обмотки с углом фазной зоны 120° , но они находят ограниченное применение.

Обмоточный коэффициент основной гармоники k_{ws1} существенным образом

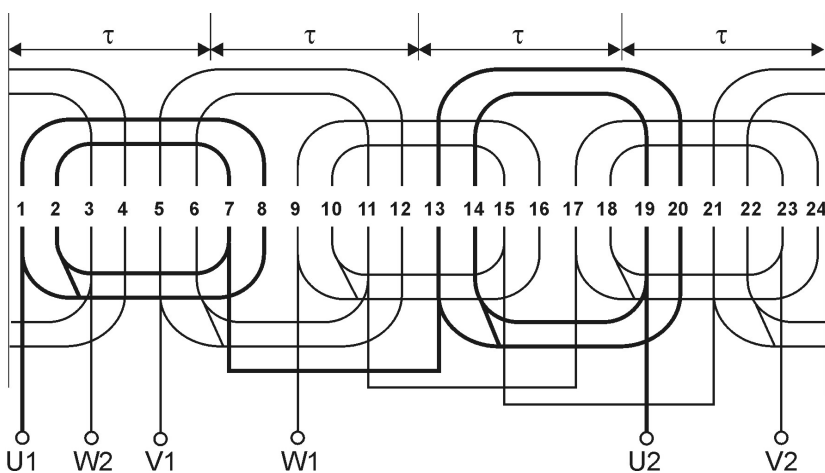


Рис. 8

влияет на характеристики машины. Он представляет собой произведение коэффициента укорочения шага обмотки k_{ks1} и коэффициента распределения k_{rs1} .

Так как однослойные обмотки всегда имеют диаметральный шаг, то для них $k_{ks1} = 1,0$, поэтому обмоточный коэффициент определяется только коэффициентом распределения (1.9), который, в свою очередь, является функцией q_s . Для шестизонных обмоток

$$k_{rs1} = k_{ws1} = \frac{\sin[\alpha/2]}{q_s \sin[\alpha/(2q_s)]} = \frac{\sin[\pi/6]}{q_s \sin[\pi/(6q_s)]}. \quad (3.2)$$

Расчётный номинальный ток статора равен

$$I'_{SN} = \frac{P_N 10^3}{m_s U_N \eta' \cos \varphi'} \text{ А.} \quad (3.3)$$

Отсюда число эффективных проводников в пазу при заданной линейной нагрузке A'_s

$$N_s = \text{round}(10^{-3} A'_s t_s a_s / I'_{SN}), \quad (3.4)$$

где a_s – число параллельных ветвей обмотки. При последовательном соединении катушечных групп $a_s = 1$, при параллельном соединении число ветвей равно числу полюсов $2z_p$. Возможно также смешанное (последовательно-параллельное) соединение катушечных групп, когда $1 < a_s < 2z_p$.

Число последовательных витков фазной обмотки статора равно

$$w_s = z_p q_s N_s / a_s \tag{3.5}$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника

$$s_{eff} = I'_{SN} / (a_s j'_s) \text{ мм}^2, \tag{3.6}$$

где j'_s – плотность тока в проводнике в А/мм².

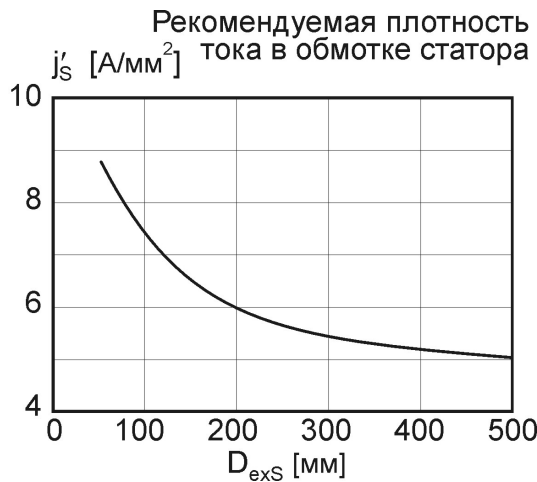


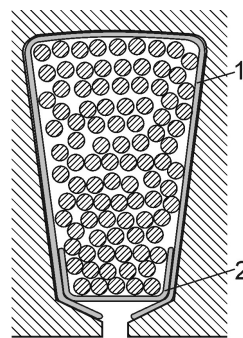
Рис. 9

Плотность тока является очень важным параметром, при выборе которого следует учитывать, что увеличение плотности позволяет снизить расход меди, но при этом возрастает активное сопротивление обмотки, и, следовательно, увеличиваются электрические потери и температура машины, что приводит к снижению КПД.

При выборе j'_s следует руководствоваться рекомендациями, основанными на современном опыте разработки электрических машин (см. рис. 9).

Полученное в (3.6) значение позволяет выбрать провод с ближайшим большим сечением медной жилы (см. табл. 1 приложения). При выборе необходимо учитывать,

что при ручной укладке обмотки диаметр провода не должен превышать $d_{cp} \leq 1,76$ мм. В случае если расчётное значение превышает максимально допустимую площадь сечения ($s_{max} = 2,011$ мм² см. таблицу 3),



1 - пазовая коробка
2 - пазовая крышка

эффективный проводник выполняют из нескольких элементарных проводников так, чтобы суммарная площадь поперечного сечения была не меньше расчётной, т.е.

$$n_{el} \cdot s_{el} \geq s_{eff} \tag{3.7}$$

Таблица 3.

Пазовая изоляция обмотки статора		
Наименование детали	h [мм]	Толщина [мм]
Коробка пазовая	80-132	0,25
	160-250	0,40
Крышка пазовая	80-132	0,35
	160-250	0,50

где n_{el} – количество элементарных проводников с площадью поперечного сечения $s_{el} \leq s_{max}$ мм². При этом n_{el} должно быть минимально возможным.

В таблице 3 показана конструкция пазовой изоляции однослойной всыпной обмотки. Пространство паза занимают проводники обмотки и пазовая изоляция. Не уточняя материал изоляции, можно принять, что среднее значение толщины изоляции для машин с высотой оси вращения $h < 160$ мм составляет $b_p = 0,3$ мм, а для машин с $h = 160 \dots 250$ – $b_p = 0,45$ мм.

С достаточной для практики точностью площадь поперечного сечения пазовой изоляции можно вычислить как

$$S_p = b_p(2h_{zs} + b_{s1} + b_{s2}) \text{ мм}^2. \quad (3.8)$$

Тогда площадь поперечного сечения паза, занимаемая непосредственно проводниками обмотки, или площадь «в свету» составляет

$$S'_{sS} = \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} h_{sS} - S_p \text{ мм}^2. \quad (3.9)$$

Одним из показателей использования активного материала машины является коэффициент заполнения паза, представляющий собой отношение площади сечения проводников обмотки, находящихся в пазу, к площади сечения паза «в свету»:

$$k_{Cu} = \frac{N_S n_{el} \pi d_{cp}^2}{4S'_{sS}} = 0,7 \dots 0,75, \quad (3.10)$$

где d_{cp} – диаметр изолированного провода в мм.

После выбора обмоточного провода необходимо уточнить плотность тока в обмотке

$$j_S = \frac{I'_{SN}}{n_{el} s_{el} a_S} \approx j'_S \text{ А/мм}^2, \quad (3.11)$$

величина которой не должно существенно отличаться от рекомендуемого значения.

Далее нужно проверить значения электромагнитных нагрузок:

$$A_S = \frac{I'_{SN} N_S Z_S}{10^{-3} \pi D_{inS} a_S} \approx A'_S \text{ А/м}; \quad (3.12)$$

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha \tau l_s 10^{-6}} \approx B'_\delta \text{ Тл}, \quad (3.13)$$

где $\Phi_\delta = \frac{k_E U_N}{4k_\Phi f_1 w_S k_{wS1}}$ – основной магнитный поток машины в Вб. Эти величины также не должны существенно отличаться от рекомендуемых.

На следующем этапе проектирования необходимо определить линейные размеры катушек обмотки.

Зубцовое деление, соответствующее середине высоты паза, равно

$$t_{sm} = \pi(D_{inS} + h_{zs}) / Z_S \text{ мм}, \quad (3.14)$$

а средняя ширина катушки –

$$b_{wm} = t_{sm} y_m = t_{sm} Z_S / (2z_p) \text{ мм}, \quad (3.15)$$

где $y_m = Z_S / (2z_p)$ – средний шаг concentрической обмотки по пазам, равный полюсному делению.

Средняя длина лобовой части катушки

$$\bar{l}_{ow} = (1,16 + 0,14z_p) b_{wm} + 15 \text{ мм}. \quad (3.16)$$

Длина вылета лобовой части обмотки для машин $h < 160$ мм

$$l_o = (0,19 + 0,1z_p) b_{wm} + 10 \text{ мм} \quad (3.17)$$

и для машин $h \geq 160$ мм

$$l_o = (0,12 + 0,15z_p) b_{wm} + 10 \text{ мм}. \quad (3.18)$$

Отсюда средняя длина витка обмотки

$$\bar{l}_w = 2(l_s + \bar{l}_{ow}) \text{ мм}. \quad (3.19)$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора при рабочей температуре равно

$$r_s = \frac{\rho_{Cu} w_s \bar{l}_w 10^3}{n_{el} s_{el} a_s} \text{ Ом}. \quad (3.20)$$

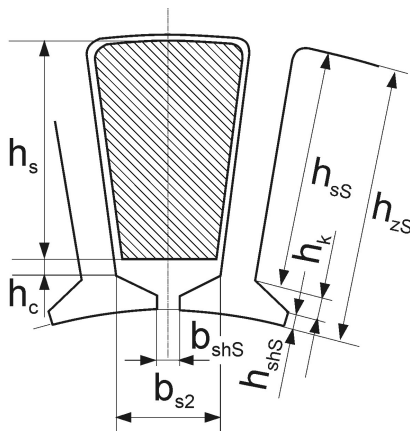


Рис. 10

коэффициент пазового рассеяния при трапецидальном полузакрытом пазе равен

$$\lambda_{sS} = \frac{h_s}{3b_{s2}} k_\beta + \left(\frac{h_c}{b_{s2}} + \frac{3h_k}{b_{s2} + 2b_{shS}} + \frac{h_{shS}}{b_{shS}} \right) k'_\beta \quad (3.21)$$

где: k_β, k'_β – коэффициенты, учитывающие укорочение шага обмотки (для однослойных обмоток

где $\rho_{Cu} = 2,44 \cdot 10^{-8}$ Ом·мм²/м – удельное сопротивление меди при температуре 115°С.

Индуктивное сопротивление обмотки статора связано с магнитным полем рассеяния, условно состоящим из трёх частей: пазового рассеяния, лобового рассеяния и дифференциального рассеяния.

Магнитный поток пазового рассеяния проходит поперёк паза и сцепляется с находящимися в пазу проводниками. Коэффициент магнитной про-

Таблица 4.

Коэффициенты демпфирования токов высших гармоник (k_{dh}) и дифференциального рассеяния обмотки статора (k_{ds})

q _s	k _{ds}	Z _R /z _p			
		10	15	20	25
3	0,0141	0,98	0,93	0,88	0,85
4	0,0089		0,90	0,84	0,80
5	0,0065				0,75
6	0,0052				0,70

Примечание: Величину k_{dh} для промежуточных значений Z_R/z_p следует определять интерполяцией

$$k_{\beta} = k'_{\beta} = 1,0);$$

$h_s = h_{sS} - 2b_p$ мм – высота паза, занимаемая обмоткой;

b_p мм – толщина пазовой изоляции.

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки

$$\lambda_{oS} = 0,34 \frac{q_S}{l_S} (\bar{l}_{ow} - 0,64\beta\tau). \quad (3.22)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{dS} = 0,9t_S (q_S k_{wS1})^2 \frac{k_{dh} k_{ds} k_{sh}}{\delta k_{\delta}}, \quad (3.23)$$

где: k_{dh} – коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наводимых высшими гармониками в короткозамкнутой обмотке ротора (см. таблицу 4);

k_{ds} – коэффициент дифференциального рассеяния (см. таблицу 4);

$$k_{sh} = 1 - 0,033 \frac{b_{shS}^2}{t_S \delta} \quad (3.24)$$

– коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов на проводимость дифференциального рассеяния;

$$k_{\delta} = k_{\delta S} k_{\delta R} \quad (3.25)$$

– коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние зубчатости статора и ротора;

$$k_{\delta S} = 1 + \frac{b_{shS}}{t_S - b_{shS} + 5\delta t_S / b_{shS}}, \quad (3.26)$$

$$k_{\delta R} = 1 + \frac{b_{shR}}{t_R - b_{shR} + 5\delta t_R / b_{shR}} \quad (3.27)$$

– коэффициенты воздушного зазора полузакрытых пазов статора и ротора (для закрытого паза сердечника ротора $b_{shR} \Rightarrow k_{\delta R} = 1$; $k_{\delta} = k_{\delta S}$).

Полный коэффициент магнитной проводимости обмотки статора

$$\lambda_S = \lambda_{sS} + \lambda_{oS} + \lambda_{dS} \quad (3.28)$$

и индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки

$$x_S = \frac{\mu_0 f_1 l_S w_S^2}{8z_p q_S} \lambda_S = \frac{\pi f_1 l_S w_S^2 10^{-8}}{2z_p q_S} \lambda_S \text{ Ом.} \quad (3.29)$$

Короткозамкнутая обмотка ротора. Короткозамкнутая обмотка выполняется путём заливки сердечника ротора алюминием, поэтому размеры и форма стержней обмотки определяется размерами и формой пазов пакета ротора (рис. 11 а).

Приведённый номинальный фазный ток обмотки ротора определяется как

$$I_{RN} = 1,1 I_{SN} \frac{m_S w_S k_{wS1}}{m_R w_R k_{wR1}} \cos \varphi' \quad (3.30)$$

В случае короткозамкнутой обмотки $m_R = Z_R; w_R = 0,5; k_{wR1} = 1,0$, отсюда номинальный ток в стержне обмотки трёхфазного двигателя

$$I_{stN} = I_{RN} = 1,1 I_{SN} \frac{6 w_S k_{wS1}}{Z_R} \cos \varphi' \quad (3.31)$$

Плотность тока в стержне

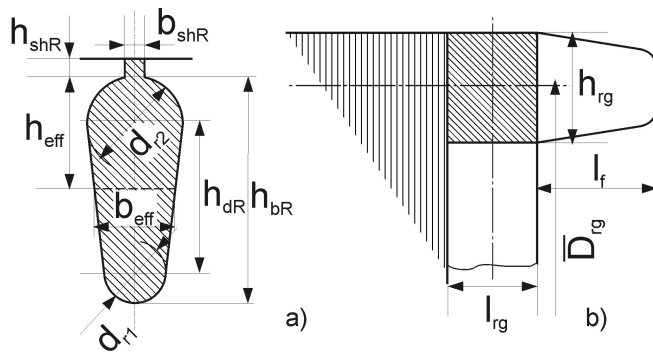


Рис. 11

$$j_R = I_{RN} / S_{sR} < 2,5 \dots 3,5 \text{ А/мм}^2 \quad (3.32)$$

По сравнению с обмоткой статора она существенно меньше, что связано с худшими условиями охлаждения ротора.

Размеры короткозамыкающего кольца клетки ротора (рис. 11 b) определяются следующими выражениями:

поперечное сечение

$$S_{rg} = (0,35 \dots 0,45) Z_R S_{sR} / (2z_p) \text{ мм}^2; \quad (3.33)$$

высота

$$h_{rg} = (1,10 \dots 1,25) h_{zR} \text{ мм}; \quad (3.34)$$

длина

$$l_{rg} = S_{rg} / h_{rg} \text{ мм}; \quad (3.35)$$

средний диаметр

$$\bar{D}_{rg} = D_{exR} - h_{rg} \text{ мм}. \quad (3.36)$$

Сопротивление стержня ротора при рабочей температуре

$$r_b = \rho_{Al} l_R 10^3 / S_{sR} \text{ Ом}. \quad (3.37)$$

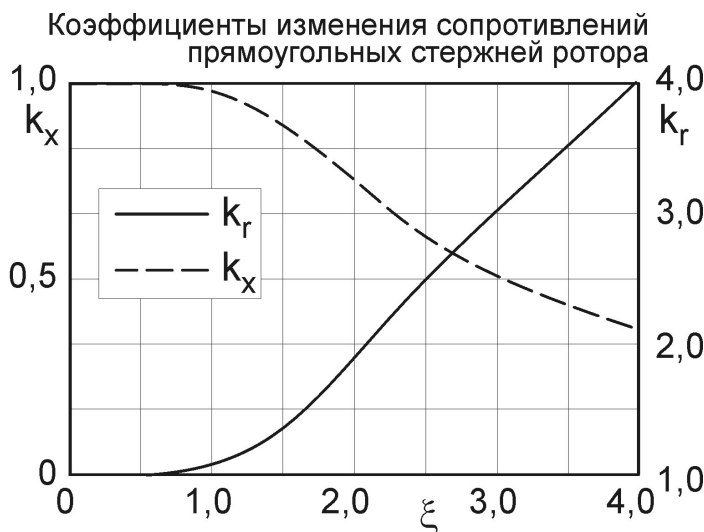


Рис. 12

При пуске ток в стержнях ротора вытесняется в верхнюю часть. При этом эффективная высота паза уменьшается. В результате активное сопротивление стержня увеличивается, а индуктивное уменьшается. Это явление для прямоугольного стержня описывается коэффициентами изменения сопротивлений

$$k_r(s) = \xi \frac{\text{sh } 2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi}; \quad (3.38)$$

$$k_x(s) = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\text{sh } 2\xi - \sin 2\xi}{\text{ch } 2\xi - \cos 2\xi} \quad (3.39)$$

$$\text{где } \xi = h_{bR} \sqrt{s 2\pi f_1 \mu_0 / \rho_{Al}} = h_{bR} c \sqrt{s} \quad (3.40)$$

безразмерная величина, которую можно назвать относительной глубиной паза и равная отношению действительной глубины паза h_{bR} к эффективной глубине $h_{eff} = 1/(c\sqrt{s})$; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума; $\rho_{Al} = 9,08 \cdot 10^{-8}$ Ом·м/мм² – удельное сопротивление материала стержней при рабочей температуре; $c = 0,067$ мм⁻¹ – постоянный коэффициент.

При пуске $s = 1 \Rightarrow \xi_{st} = 0,067 \cdot h_{bR}$ и по кривой $k_r(\xi)$ можно определить относительную величину активного сопротивления стержня $k_r(\xi_{st})$, которая при прямоугольной форме паза обратно пропорциональна эффективной глубине h_{eff} , полагая это справедливым и для овальной формы паза, получим

$$h_{eff} = h_{bR} / k_r(\xi_{st}) \text{ мм.} \quad (3.41)$$

Тогда ширина стержня на глубине h_{eff} (см. рис.11 а)

$$b_{eff} = d_{r2} - \frac{dr_2 - dr_1}{h_{dR}} \left(h_{eff} - \frac{dr_2}{2} \right) \text{ мм,} \quad (3.42)$$

а эффективная площадь поперечного сечения при пуске:

$$S_{b_{eff}} = 0,393 \cdot d_{r2}^2 + \frac{(dr_2 + b_{eff})(h_{eff} - d_{r2}/2)}{2} \text{ мм}^2. \quad (3.43)$$

Таким образом, при овальной форме паза коэффициент увеличения активного сопротивления при пуске составляет

$$k_{rst} = S_{sR} / S_{b_{eff}}. \quad (3.44)$$

Активное сопротивление сегмента замыкающего кольца между стержнями

$$r_{rg} = 2\pi \bar{D}_{rg} \rho_{Al} 10^3 / (Z_R S_{rg}) \text{ Ом.} \quad (3.45)$$

Активное сопротивление сегмента кольца, приведённое к току стержня

$$r'_{rg} = r_{rg} / k_b \text{ Ом,} \quad (3.46)$$

где k_b – коэффициент приведения, равный

при $Z_R / (2z_p) < 6$

$$k_b = 2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2z_p}{Z_R} \right); \quad (3.47)$$

при $Z_R / (2z_p) \geq 6$

$$k_b \approx \pi \frac{2z_p}{Z_R}. \quad (3.48)$$

Коэффициент скоса пазов на n зубцовых делений статора t_s

$$k_{sh} = 2 \sin(\gamma/2) / \gamma. \quad (3.49)$$

определяется углом

$$\gamma = \frac{2\pi z_p}{Z_R} \beta_{sh} \approx \frac{2\pi z_p}{Z_S} n, \quad (3.50)$$

где $\beta_{sh} = nt_S / t_R$ – скос пазов в долях зубцового деления ротора t_R .

Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к параметрам обмотки статора,

$$r'_R = k_{RS} (r_b + r'_{rg}) \text{ Ом}, \quad (3.51)$$

где

$$k_{RS} = 4 \frac{m_S}{Z_R} \cdot \left(\frac{w_S k_{wS1}}{k_{shR}} \right)^2 \quad (3.52)$$

коэффициент приведения.

Магнитное поле рассеяния обмотки ротора и, соответственно, индуктивное сопротивление рассеяния можно разделить на четыре составляющие: пазовое, лобовое, дифференциальное и скоса пазов.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния овального полузакрытого паза (рис. 11 а)

$$\lambda_{sR} = C_\lambda + h_{shR} / b_{shR} \quad (3.53)$$

и овального закрытого паза (рис. 7 б)

$$\lambda_{sR} = C_\lambda + 0,3 + (1,12 \cdot h_{brR} 10^3 / I_{RN}), \quad (3.54)$$

где

$$C_\lambda = k_{xst} \left[\frac{h_{dR} + 0,4d_{r1}}{3d_{r2}} \left(1 - \frac{\pi d_{r2}^2}{8S_{sR}} \right) + 0,66 - \frac{b_{shR}}{2d_{r2}} \right]. \quad (3.55)$$

Коэффициент k_{xst} определяется для пускового режима по кривой $k_x(\xi)$ рис. 12 для $\xi \equiv k_{r,st}$ (см. 3.42). В номинальном режиме работы $k_{xst} = 1,0$.

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния замыкающих колец (лобовое рассеяние)

$$\lambda_{rgR} = \frac{2,3\bar{D}_{rg}}{Z_R l_R k_b^2} \lg \frac{4,7\bar{D}_{rg}}{2(h_{rg} + l_{rg})} \quad (3.56)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{dR} = 0,9 t_R k_{ds} \left(\frac{Z_R}{6z_p} \right)^2 \frac{1}{\delta k_\delta}, \quad (3.57)$$

где k_{ds} – коэффициент дифференциального рассеяния ротора, определяемый по кривой рис. 13 для соотношения:

$$q_R = \frac{Z_R}{6z_p}, \quad (3.58)$$

Коэффициент магнитной прово-

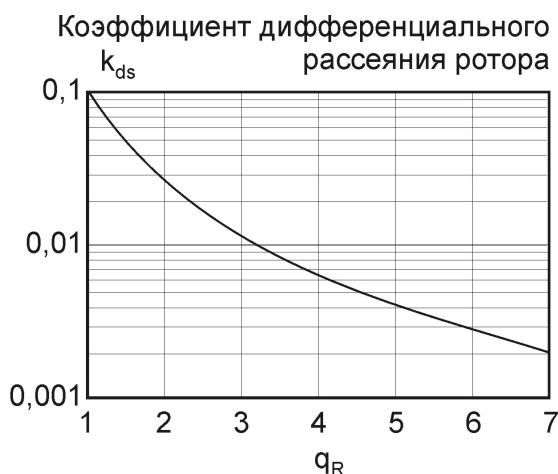


Рис. 13

димости рассеяния скоса пазов

$$\lambda_{shR} = \frac{t_R \beta_{sh}^2}{9,5 \delta k_\delta k'_\mu}, \quad (3.59)$$

где $k'_\mu = 1, 2 \dots 1, 4$ – предварительное значение коэффициента насыщения магнитной цепи машины.

Коэффициент магнитной проводимости обмотки ротора в целом

$$\lambda_R = \lambda_{sR} + \lambda_{rgR} + \lambda_{dR} + \lambda_{shR}. \quad (3.60)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведённое к параметрам обмотки статора

$$x_R = k_{RS} \cdot 7,9 f_1 l_R \lambda_R 10^{-9} \text{ Ом}. \quad (3.61)$$

4. Магнитная цепь машины

Расчёт магнитной цепи производится с целью определения намагничивающего тока. Магнитная цепь машины с двумя парами полюсов показана на рис. 6. Она симметрична, поэтому расчёт достаточно провести для одной пары полюсов, показанных на рисунке.

Контур магнитного потока Φ_δ замыкается по пяти участкам: воздушному зазору δ , зубцовым слоям статора h_{zS} и ротора h_{zR} , а также по спинкам статора l_{jS} и ротора l_{jR} .

Воздушный зазор. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8 B_\delta \delta k_\delta 10^3 \text{ А}, \quad (4.1)$$

где B_δ – уточненное значение индукции в зазоре по (3.13); k_δ – коэффициент воздушного зазора по (3.25).

Зубцовый слой статора. При трапецеидальной форме зубцов магнитная индукция в зубце одинакова по всей высоте зубца:

$$B_{zS} = \frac{B_\delta t_S}{k_{Fe} b_{zS}} \text{ Тл}. \quad (4.2)$$

Напряженность магнитного поля в зубце статора H_{zS} определяют по таблице намагничивания (см. табл. 3 приложения) в соответствии с B_{zS} .

Магнитное напряжение зубцового слоя статора

$$F_{zS} = H_{zS} h_{zS} 10^{-3} \text{ А}. \quad (4.3)$$

Зубцовый слой ротора. При овальных закрытых и полузакрытых пазах зубцы имеют параллельные стенки и магнитная индукция в зубце

$$B_{zR} = \frac{B_\delta t_R}{k_{Fe} b_{zR}} \text{ Тл}. \quad (4.4)$$

Напряженность магнитного поля в зубце ротора H_{zR} определяют по таблице намагничивания аналогично напряжённости поля в зубце статора.

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора

$$F_{zR} = H_{zR} (h_{zS} - 0,4 d_{r1}) 10^{-3} \text{ А}, \quad (4.5)$$

где d_{r1} – диаметр малой окружности (см. рис. 11).

Спинка статора. Магнитная индукция в спинке статора

$$B_{jS} = \frac{\alpha \tau B_{\delta}}{2k_{Fe} h_{jS}} \text{ Тл.} \quad (4.6)$$

Напряженность магнитного поля в спинке статора H_{jS} определяют по таблице намагничивания (см. табл. 2 приложения) в соответствии с B_{jS} .

Магнитное напряжение спинки статора

$$F_{jS} = H_{jS} \bar{l}_{jS} 10^{-3} \text{ А,} \quad (4.7)$$

где
$$\bar{l}_{jS} = \frac{\pi(D_{exS} - h_{jS})}{2z_p} \text{ мм} - \quad (4.8)$$

длина средней линии спинки.

Спинка ротора. Магнитная индукция в спинке ротора

$$B_{jR} = \frac{\alpha \tau B_{\delta}}{2k_{Fe} h_{jR}} \text{ Тл.} \quad (4.9)$$

Напряженность магнитного поля в спинке ротора H_{jR} определяют в соответствии с B_{jR} по таблице намагничивания аналогично напряженности поля в спинке статора.

Магнитное напряжение спинки статора

$$F_{jR} = H_{jR} \bar{l}_{jR} 10^{-3} \text{ А,} \quad (4.10)$$

где
$$\bar{l}_{jR} = \frac{\pi(D_{exR} - 2h_{zR} - h_{jS})}{2z_p} + h_{jR} \text{ мм} - \quad (4.11)$$

длина средней линии спинки.

Суммарное магнитное напряжение контура магнитной цепи

$$F_{\Sigma} = 2F_{\delta} + 2F_{zS} + 2F_{zR} + F_{jS} + F_{jR} \text{ А} \quad (4.12)$$

и коэффициент насыщения

$$k_{\mu} = F_{\Sigma} / (2F_{\delta}). \quad (4.13)$$

Намагничивающий ток

$$I_{\mu} = \frac{z_p F_{\Sigma}}{0,9 m_S w_S k_{wS1}} \text{ А.} \quad (4.14)$$

Главное индуктивное сопротивление машины

$$x_m = k_E U_N / I_{\mu} \text{ Ом.} \quad (4.15)$$

Коэффициент магнитного рассеяния обмотки статора

$$\sigma_{\mu} = x_S / x_m. \quad (4.16)$$

5. Потери и КПД

Магнитные потери. Магнитные потери, т.е. потери энергии в магнитопроводе машины, связаны с явлениями переметания стали сердечника

и возбуждения в ней вихревых токов. Потери в первом приближении пропорциональны квадрату частоты изменения магнитного потока. В сердечнике магнитный поток изменяется с частотой скольжения, величина которой в номинальном режиме составляет доли процента от частоты сети, поэтому магнитные потери в роторе ничтожны и обычно не учитываются.

Расчёт магнитных потерь производится на основе известной для материала сердечника удельной мощности, измеренной при частоте 50 Гц и магнитной индукции 1,0 Тл. Кроме того, для материала указывается показатель степени β , в которую следует возводить относительную частоту, для которой определяются потери. Для стали марки 2013 удельная мощность потерь составляет $P_{1,0/50} = 3,5$ Вт/кг, а $\beta_p = 1,5$.

Основные магнитные потери в спинке статора

$$P_{FejS} = 1,7P_{1,0/50}(f_1/50)^{\beta_p} B_{jS}^2 G_{jS} \text{ Вт} \quad (5.1)$$

и в зубцовом слое
$$P_{Fesz} = 1,7P_{1,0/50}(f_1/50)^{\beta_p} B_{zS}^2 G_{zS} \text{ Вт.} \quad (5.2)$$

Для номинального режима работы ($f_1 = 50$ Гц)

$$P_{FejS} = 1,7P_{1,0/50} B_{jS}^2 G_{jS} \text{ Вт;} \quad (5.3)$$

$$P_{Fesz} = 1,7P_{1,0/50} B_{zS}^2 G_{zS} \text{ Вт.} \quad (5.4)$$

Расчётные массы стали определяют по формулам:

$$G_{jS} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_S k_{Fe} h_{jS} \pi (D_{exS} - h_{jS}) \text{ кг;} \quad (5.5)$$

$$G_{zS} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_S k_{Fe} [h_{zS} \pi (D_{inS} + h_{zS}) - S_{SS} Z_S] \text{ кг.} \quad (5.6)$$

Общие магнитные потери являются суммой

$$P_{Fe} = P_{FejS} + P_{Fesz} \text{ Вт.} \quad (5.7)$$

Величина магнитных потерь позволяет определить активное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения машины

$$r_m \approx \frac{P_{Fe}}{m_S I_\mu^2} \text{ Ом.} \quad (5.8)$$

Электрические потери. Электрические потери связаны с выделением тепла при протекании электрического тока по проводнику.

Электрические потери в обмотке статора

$$P_{CuS} = m_S I_S^2 r_S \text{ Вт} \quad (5.9)$$

и в обмотке ротора

$$P_{CuR} = m_S I_R^2 r_R \text{ Вт}^* \quad (5.10)$$

Механические потери. Механические потери обусловлены выделением тепла при трении в опорах вала и о воздух в результате вращения ротора. Для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 их можно определить как

* Здесь величина активного сопротивления и тока ротора приведены к параметрам обмотки статора

$$P_{mc} = k_t (n_1 \cdot 10^{-3})^2 (D_{exS} 10^{-2})^4 \text{ Вт}, \quad (5.11)$$

где $k_t = 1,3(1 - D_{exS} 10^{-3})$ при $z_p = 1$ и $k_t = 1,0$ при $z_p > 1$.

Добавочные потери. Добавочные потери возникают из-за наличия высших гармоник магнитного поля, полей рассеяния обмоток, пульсаций магнитного поля, вытеснения тока в проводниках и других электромагнитных процессов, влияние которых практически невозможно учесть. Поэтому в соответствии с ГОСТ 11828-75 их принимают равными 0,5% от номинальной потребляемой мощности

$$P_1 = m_S I_{SN} U_S \cos \varphi_N \text{ Вт}, \quad (5.12)$$

т.е.

$$P_z = 0,005 P_1 \text{ Вт}, \quad (5.13)$$

Коэффициент полезного действия представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой двигателем нагрузке, к затраченной мощности:

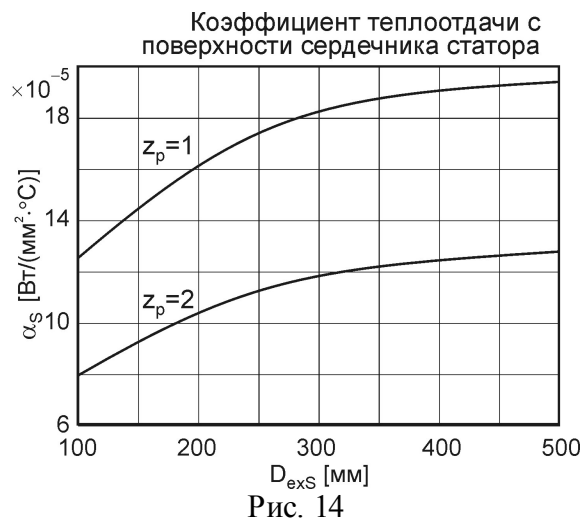
$$\eta = 1 - \Sigma P / P_1, \quad (5.14)$$

где

$$\Sigma P = P_{Fe} + P_{CuS} + P_{CuR} + P_{mc} + P_z \quad (5.15)$$

– суммарные потери мощности в двигателе.

6. Упрощённый тепловой расчёт



Тепловой расчёт двигателя производится после выполнения электромагнитных расчётов для определения ожидаемого превышения температуры обмоток и соответствия его допускам для использованных материалов.

Физическая картина тепловых процессов в электрической машине очень сложная, и точное определение распределения температуры по частям машины практически невозможно. Поэтому при проектировании ограничиваются приближённым тепловым расчётом, основанным на ряде допущений и коэффициентов, значения которых установлены экспериментально при исследовании большого числа различных машин.

Таблица 5.

Предельно допустимые температуры по ГОСТ 183-74

Класс термостойкости изоляции	B	F	H
Предельно допустимая температура изоляционных материалов °C	130	155	180
Предельно допустимая температура обмоток машин °C	120	140	165
Предельно допустимое превышение температуры обмоток машин °C	80	100	125

Основными допущениями, принимаемыми при тепловом расчёте, являются:

1. температура обмоток и стали сердечников во всём их объёме одинакова;
2. потери, выделяющиеся в активной

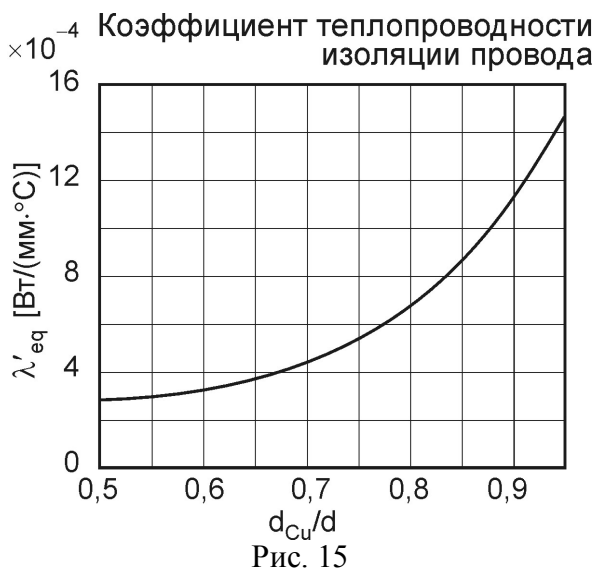
части статора и ротора, отводятся через цилиндрическую поверхность сердечников;

3. потери в лобовых частях обмоток отводятся через цилиндрическую поверхность этих частей.

Перепад температуры в изоляции обмотки прямо пропорционален толщине изоляции b_p и обратно пропорционален площади её сечения S_p в направлении, перпендикулярном направлению теплового потока:

$$\Theta_p = \frac{Q_p b_p}{\lambda_p S_p} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.1)$$

где Q_p – тепловой поток или количества теплоты, проходящей через изоляцию в единицу времени Вт; λ_p – коэффициент теплопроводности изоляции Вт/(мм·°C).



Отвод теплоты с поверхности нагретого тела производится лучеиспусканием и конвекцией, обусловленной движением воздуха. Превышение температуры поверхности относительно температуры охлаждающего воздуха с учетом обоих видов теплоотдачи

$$\Theta_f = \frac{Q_f}{\alpha_f S_f} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.2)$$

где Q_f – количества теплоты, проходящей через поверхность в единицу времени Вт; α_f – коэффициент теплоотдачи с поверхности Вт/(мм²·°C); S_f – площадь охлаждаемой поверхности мм².

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Theta_{ka} = \frac{k_a k_\Theta P_{CuS} (2l_s / \bar{l}_w) + P_{Fe}}{\alpha_k \pi D_{inS} l_s} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.3)$$

где: α_k – коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора (см. рис. 14); k_a – коэффициент, учитывающий долю потерь, передаваемых воздуху внутри двигателя ($k_a = 0,22$ и $k_a = 0,20$ для двигателей IP44 с двумя и с четырьмя полюсами); k_Θ – коэффициент, определяемый соотношением удельной электрической проводимости меди при расчётной и при максимально допустимой температуре (для изоляции класса F $k_\Theta = 1,07$).

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора

$$\Theta_{sp} = \frac{k_{\Theta} P_{CuS} (2\bar{l}_S / \bar{l}_w)}{Z_S \Pi_S l_S} \left(\frac{b_p}{\lambda_{eq}} + \frac{b_{s1} + b_{s2}}{16\lambda'_{eq}} \right) \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.4)$$

где: Π_S – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения

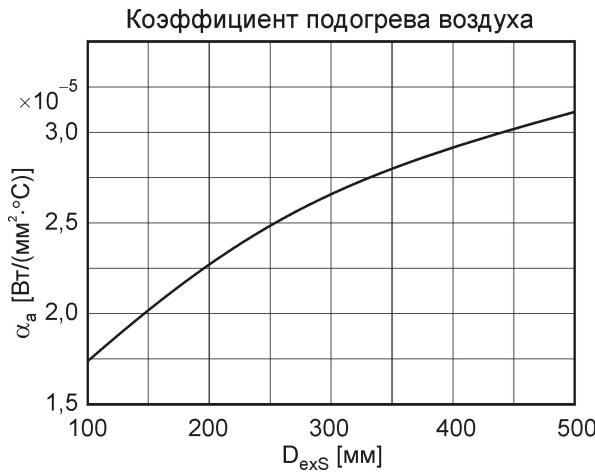


Рис. 16

паза статора мм (для трапецидальной формы паза $\Pi_S = 2h_{sS} + b_{s1} + b_{s2}$); λ_{eq} – эквивалентный коэффициент теплопроводности пазовой изоляции, учитывающий воздушные прослойки (для изоляции класса F $\lambda_{eq} = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Вт/(мм·°С)); λ'_{eq} – эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции провода (см. рис. 15)

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Theta_{oa} = \frac{k_a k_{\Theta} P_{CuS} (2\bar{l}_{ow} / \bar{l}_w)}{\alpha_k 2\pi D_{inS} l_o} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6.5)$$

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора

$$\Theta_{op} = \frac{k_{\Theta} P_{CuS} (2\bar{l}_{ow} / \bar{l}_w)}{2Z_S \Pi_o \bar{l}_{ow}} \left(\frac{h_{sS}}{16\lambda'_{eq}} \right) \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.6)$$

где $\Pi_o \approx \Pi_S$.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\bar{\Theta}_{wa} = (\Theta_{ka} + \Theta_{sp}) \frac{2l_S}{\bar{l}_w} + (\Theta_{oa} + \Theta_{op}) \frac{2\bar{l}_{ow}}{\bar{l}_w} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6.7)$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды

$$\bar{\Theta}_a = \frac{\Sigma P_a}{\alpha_a S_m} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.8)$$

где

$$\Sigma P_a = \Sigma P - (k_{\Theta} - 1)(P_{CuS} + P_{CuR}) - (1 - k_a)(P_{CuSl} + P_{Fe}) - 0,9P_{mc} \text{ Вт} \quad (6.9)$$

– суммарные потери, отводимые в воздух внутри двигателя;

$$P_{CuSl} = k_{\Theta} P_{CuS} 2l_S / \bar{l}_w \text{ Вт} \quad (6.10)$$

– электрические потери в лобовой части обмотки статора;

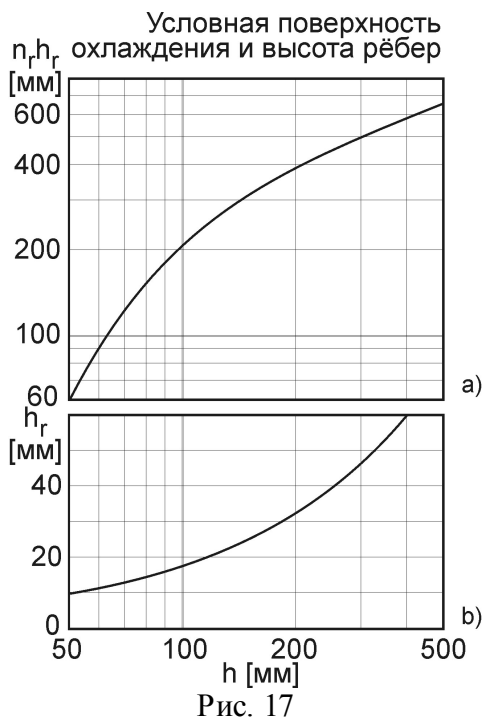
α_a – коэффициент подогрева воздуха (см. рис. 16);

$$S_m = \pi D_{exS} (l_S + 2l_o) \text{ мм}^2 \quad (6.11)$$

– условная поверхность охлаждения двигателя без охлаждающих рёбер;

$$S_m = (\pi D_{exS} + 8n_r h_r)(l_s + 2l_o) \text{ мм}^2; \quad (6.12))$$

– условная поверхность охлаждения двигателя с n_r охлаждающими рёбрами высотой h_r .



Необходимое количество рёбер охлаждения n_r у двигателей исполнения IP44 можно определить, предварительно задавшись их условной поверхностью $n_r h_r$ в соответствии с высотой оси вращения (см. рис. 17, а). Условная поверхность рёбер $n_r h_r$ представляет собой произведение числа рёбер n_r , приходящихся на $1/4$ окружности статорной, на их высоту h_r . Определив высоту рёбер по рис. 17, б, получим число рёбер

$$n_r = (n_r h_r) / h_r. \quad (6.13)$$

Таким образом, среднее превышение температуры обмотки статора над температура

турой окружающей среды

$$\bar{\Theta}_w = \bar{\Theta}_{wa} + \bar{\Theta}_a < \Theta_{\max} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.14)$$

где Θ_{\max} – допустимое превышение температуры для соответствующего класса термостойкости изоляции (см. табл. 5)

7. Пример расчёта трёхфазного асинхронного двигателя

Задание:

Расчитать параметры и построить механическую, скоростную и моментную характеристики в режиме двигателя, а также рабочие характеристики трёхфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя. Выполнить тепловой расчёт.

Исходные данные:

Номинальная мощность

$$P_N = 22 \text{ кВт};$$

Частота сети

$$f_1 = 50 \text{ Гц};$$

Число полюсов

$$2z_p = 4;$$

Высота оси вращения

$$h = 180 \text{ мм};$$

Номинальное напряжение сети

$$U_N = 660/380 \text{ В};$$

Обмотка статора однослойная концентрическая,

число параллельных ветвей

$$a_s = 2;$$

Обмотка ротора со скосом пазов на одно

зубцовое деление статора;	
Паза сердечника статора трапецеидальные полузакрытые;	
Паза сердечника ротора овальные закрытые;	
Исполнение двигателя по степени защиты	IP44;
Способ охлаждения	IC0141;
Режим работы	S1;
Класс термостойкости изоляции	F.

7.1. Главные размеры двигателя

7.1.1. Наружный и внутренний диаметры сердечника статора выбираем по таблице 1 для $h = 180$ мм и $2z_p = 4$ –

$$D_{exS} = 313 \text{ мм}; D_{inS} = 211 \text{ мм}.$$

7.1.2. Предварительные значения КПД и коэффициента мощности по рис. 2 для $P_N = 22$ кВт и $2z_p = 4$ –

$$\eta' = 0,91; \cos \varphi' = 0,86.$$

7.1.3. Расчётная мощность (1.19)

$$P' = \frac{k_E P_N}{\eta' \cos \varphi'} = \frac{0,96 \cdot 22}{0,91 \cdot 0,86} = 26,9 \text{ кВА},$$

где $k_E = 0,96$.

7.1.4. Предварительные значения магнитной индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки для $h = 180$ мм и $2z_p = 4$ по рис. 3 –

$$B'_\delta = 0,747 \text{ Тл}; A'_S = 35,7 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

7.1.5. Предварительное значение обмоточного коэффициента для однослойной обмотки принимаем $k'_{wS1} = 0,96$.

7.1.6. Расчётная длина сердечника статора (1.18)

$$l_S = \frac{8,66 \cdot 10^{12} P'}{k'_{wS1} n_1 D_{inS}^2 B'_\delta A'_S} = \frac{6,1 \cdot 10^{-12} \cdot 26,9}{0,96 \cdot 1500 \cdot 211^2 \cdot 0,747 \cdot 35,7 \cdot 10^3} = 136,11 \text{ мм},$$

принимаем $l_S = 140$ мм.

7.2. Размеры активной части двигателя

7.2.1. Воздушный зазор для $h = 180$ мм и $2z_p = 4$ по рис. 3 принимаем $\delta' = 0,65$ мм.

7.2.2. Наружный диаметр сердечника ротора (1.21)

$$D_{exR} = D_{inS} - 2\delta' = 211 - 2 \cdot 0,65 = 209,7 \text{ мм}$$

округляем до $D_{exR} = 210$ мм и уточняем величину зазора

$$\delta = (D_{exR} - D_{inS}) / 2 = (211 - 210) / 2 = 0,5 \text{ мм}$$

7.2.3. Внутренний диаметр сердечника ротора (1.22)

$$D_{inR} = 0,33 \cdot D_{exR} = \text{round}(0,33 \cdot 210) = 70 \text{ мм}$$

7.2.4. Длина сердечника статора

$$l_R = l_S = 140,0 \text{ мм.}$$

7.2.5. Число пазов сердечников статора и ротора для $h = 180$ мм и $2z_p = 4$ по таблице 1

$$Z_S = 48; Z_R = 38.$$

7.2.6. Размеры паза статора:

зубцовое деление (2.1)

$$t_S = \pi D_{inS} / Z_S = \pi \cdot 211 / 48 = 13,8 \text{ мм;}$$

ширина зубца (2.2)

$$b_{zS} = t_S B'_8 / (k_{Fe} B_{zS}) = 13,8 \cdot 0,745 / (0,98 \cdot 1,9) = 5,6 \text{ мм,}$$

где $B_{zS} = 1,9$ Тл по табл. 2 для $h = 180$ мм, а $k_{Fe} = 0,98$ для оксидированных листов сердечника;

высота спинки статора (2.5)

$$h_{jS} = \frac{\alpha B'_8 \tau}{2 k_{Fe} B_{jS}} = \frac{0,637 \cdot 0,745 \cdot 165,7}{2 \cdot 0,98 \cdot 1,6} = 25,4 \text{ мм,}$$

где полюсное деление $\tau = \frac{\pi D_{inS}}{2z_p} = \frac{\pi \cdot 211}{2 \cdot 2} = 165,7$ мм;

высота зубца (2.6)

$$h_{zS} = \frac{D_{exS} - D_{inS}}{2} - h_{jS} = \frac{313 - 211}{2} - 25,4 = 25,6 \text{ мм;}$$

бóльшая ширина паза (2.8)

$$b_{s1} = t_{s1} - b_{zS} = 17,16 - 5,60 = 11,57 \text{ мм,}$$

где $t_{s1} = \pi (D_{inS} + 2h_{zS}) / Z_S = \pi (211 + 2 \cdot 25,6) / 48 = 17,16$ мм;

меньшая ширина паза (2.10)

$$b_{s2} = t_{s2} - b_{zS} = 14,14 - 5,60 = 8,55 \text{ мм,}$$

где $t_{s2} = \pi (D_{inS} + 0,2h_{zS}) / Z_S = \pi (211 + 0,2 \cdot 25,6) / 48 = 14,14$ мм;

принимая ширину шлица $b_{shS} = 3,0$ мм, высоту шлица $h_{shS} = 1,0$ мм, угол $\beta_k = 45^\circ$;

высота клиновой части (2.11)

$$h_k = (b_{s2} - b_{shS}) / 2 = (8,55 - 3,0) / 2 = 2,77 \text{ мм;}$$

высота паза, занимаемая обмоткой,

$$h_{sS} = h_{zS} - h_k - h_{shS} = 25,6 - 2,77 - 1,0 = 21,84 \text{ мм;}$$

площадь паза «в штампе» (2.12)

$$\begin{aligned} S_{sS} &= \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} h_{sS} + \frac{b_{s2} + b_{shS}}{2} h_k + b_{shS} h_{shS} = \\ &= \frac{11,57 + 8,55}{2} 21,84 + \frac{11,57 + 3,0}{2} 2,77 + 3,0 \cdot 1,0 = 242,8 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

7.2.7. Размеры паза ротора:

зубцовое деление (2.13)

$$t_R = \pi D_{exR} / Z_R = \pi \cdot 210 / 38 = 17,36 \text{ мм};$$

ширина зубца (2.14)

$$b_{zR} = t_R B'_\delta / (k_{Fe} B_{zR}) = 17,36 \cdot 0,745 / (0,98 \cdot 1,7) = 7,86 \text{ мм},$$

где $B_{zR} = 1,7$ Тл по табл. 2 для $h = 180$ мм, а $k_{Fe} = 0,98$ для оксидированных листов сердечника;

высота спинки ротора (2.15)

$$h_{jR} = \frac{\alpha B'_\delta \tau}{2k_{Fe} B_{jR}} = \frac{0,637 \cdot 0,745 \cdot 165,7}{2 \cdot 0,98 \cdot 1,55} = 26,2 \text{ мм};$$

высота зубца (2.16)

$$h_{zR} = \frac{D_{exR} - D_{inR}}{2} - h_{jR} = \frac{210 - 70}{2} - 26,2 = 44,3 \text{ мм};$$

диаметр верхней части паза (2.17)

$$d_{r2} = \frac{\pi(D_{exR} - 2h_{brR}) - Z_R b_{zR}}{Z_R + \pi} = \frac{\pi(210 - 2 \cdot 0,7) - 38 \cdot 7,86}{38 + \pi} = 8,66 \text{ мм},$$

где высота мостика $h_{brR} = 0,7$ мм;

диаметр нижней части паза (2.18)

$$d_{r1} = \frac{\pi(D_{exR} - 2h_{zR}) - Z_R b_{zR}}{Z_R - \pi} = \frac{\pi(210 - 2 \cdot 43,8) - 38 \cdot 7,86}{38 - \pi} = 2,37 \text{ мм},$$

принимаем $d_{r1} = 3,5$ мм;

расстояние между центрами окружностей (2.19)

$$h_{dR} = h_{zR} - h_{brR} - (d_{r1} + d_{r2}) / 2 = 44,3 - 0,7 - (8,66 + 3,5) / 2 = 37,5 \text{ мм};$$

площадь паза «в штампе» (2.20)

$$S_{sR} = \pi(d_{r1}^2 + d_{r2}^2) / 4 + h_{dR} (d_{r1} + d_{r2}) / 2 = \\ = \pi(8,66^2 + 3,5^2) / 4 + 37,5(8,66 + 3,5) / 2 = 296,8 \text{ мм}^2$$

7.3. Обмотка статора

7.3.1. Число пазов на полюс и фазу (1.10)

$$q_S = Z_S / (2z_p m_S) = 48 / (2 \cdot 2 \cdot 3) = 4.$$

7.3.2. Обмоточный коэффициент (3.2)

$$k_{wS1} = k_{rS1} = \frac{\sin[\pi/6]}{q_S \sin[\pi/(6q_S)]} = 0,958.$$

7.3.3. Расчётный номинальный ток статора (3.3)

$$I'_{SN} = \frac{P_N 10^3}{m_S U_N \eta'_N \cos \varphi'_N} = \frac{22,0 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,91 \cdot 0,86} = 24,5 \text{ А}.$$

7.3.4. Число эффективных проводников в пазу (3.4)

$$N_S = \text{round}(10^{-3} A'_S t_S a_S / I'_{SN}) = \text{round}(10^{-3} \cdot 35,7 \cdot 10^3 \cdot 13,8 \cdot 2 / 24,5) = 40.$$

7.3.5. Число последовательных проводников в фазной обмотке (3.5)

$$w_S = z_p q_S N_S / a_S = 2 \cdot 4 \cdot 40 / 2 = 160.$$

7.3.6. Плотность тока принимаем для $D_{exS} = 313$ по рис. 9

$$j'_S = 5,4 \text{ А/мм}^2.$$

7.3.7. Площадь поперечного сечения эффективного проводника (3.6)

$$s_{eff} = I'_{SN} / (a_S j'_S) = 24,5 / (2 \cdot 5,4) = 2,29 \text{ мм}^2.$$

7.3.8. Так как диаметр одиночного провода с ближайшим сечением ($2,27 \text{ мм}^2$) превышает допустимый диаметр ($1,76 \text{ мм}$), то по табл. 1 приложения выбираем два провода ($n_{el} = 2$) сечением $s_{el} = 1,227 \text{ мм}^2$ и диаметром в изоляции $d_{el} = 1,33 \text{ мм}$.

7.3.9. Толщину пазовой изоляции в соответствии с табл. 4 выбираем равной в среднем $b_p = 0,45 \text{ мм}$.

7.3.10. Площадь пазовой изоляции (3.8)

$$S_p = b_p (2h_{zS} + b_{s1} + b_{s2}) = 0,45(2 \cdot 25,6 + 11,57 + 8,55) = 39,9 \text{ мм}^2.$$

7.3.11. Площадь паза «в свету» (3.8)

$$S'_{sS} = \frac{b_{s1} + b_{s2}}{2} h_{sS} - S_p = \frac{11,57 + 8,55}{2} 21,84 - 39,9 = 179,8 \text{ мм}^2.$$

7.3.12. Уточнённая плотность тока (3.11)

$$j_S = \frac{I'_{SN}}{n_{el} s_{el} a_S} = \frac{24,5}{2 \cdot 1,227 \cdot 2} = 5,0 \text{ А/мм}^2.$$

7.3.13. Уточнённые значения электромагнитных нагрузок (3.12) и (3.13)

$$A_S = \frac{I'_{SN} N_S Z_S}{10^{-3} \pi D_{inS} a_S} = \frac{24,5 \cdot 40 \cdot 48}{10^{-3} \pi \cdot 211 \cdot 2} = 35,56 \cdot 10^3 \text{ А/м},$$

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha \tau l_S 10^{-6}} = \frac{0,011}{0,637 \cdot 165,7 \cdot 140 \cdot 10^{-6}} = 0,726 \text{ Тл},$$

$$\text{где } \Phi_\delta = \frac{k_E U_N}{4 k_\Phi f_1 w_S k_{ws1}} = \frac{0,96 \cdot 380}{4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot 140 \cdot 0,958} = 0,011 \text{ Вб} - \text{основной магнитный}$$

поток.

7.3.14. Размеры катушек обмотки:

среднее зубцовое деление (3.14)

$$t_{Sm} = \pi (D_{inS} + h_{zS}) / Z_S = \pi (211 + 25,6) / 48 = 15,49 \text{ мм};$$

средняя ширина катушки (3.15)

$$b_{wm} = t_{Sm} y_m = t_{Sm} Z_S / (2z_p) = 15,49 \cdot 48 / (2 \cdot 2) = 185,8 \text{ мм};$$

средняя длина лобовой части (3.16)

$$\bar{l}_{ow} = (1,16 + 0,14z_p) b_{wm} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 2) 185,8 + 15 = 282,6 \text{ мм};$$

длина вылета лобовой части (3.18)

$$l_o = (0,12 + 0,15z_p) b_{wm} + 10 = (0,12 + 0,15 \cdot 2) 185,8 + 10 = 88,05 \text{ мм};$$

средняя длина витка (3.19)

$$\bar{l}_w = 2(l_s + \bar{l}_{ow}) = 2(140 + 282,6) = 845,2 \text{ мм};$$

7.3.15. Активное сопротивление фазы обмотки статора при рабочей температуре (3.20)

$$r_s = \frac{\rho_{Cu} w_s \bar{l}_w 10^3}{n_{el} s_{el} a_s} = \frac{2,44 \cdot 10^{-8} \cdot 160 \cdot 845,2}{2 \cdot 1,227 \cdot 2} = 0,672 \text{ Ом}.$$

7.3.16. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния (3.21)

$$\lambda_{ss} = \frac{h_s}{3b_{s2}} k_\beta + \left(\frac{h_c}{b_{s2}} + \frac{3h_k}{b_{s2} + 2b_{shS}} + \frac{h_{shS}}{b_{shS}} \right) k'_\beta =$$

$$= \frac{20,94}{3 \cdot 8,55} + \frac{0,5}{8,55} + \frac{3 \cdot 2,77}{8,55 + 2 \cdot 3,0} + \frac{1,0}{3,0} = 1,78$$

где $k_\beta = k'_\beta = 1,0$, так как обмотка с диаметральной шагом, $h_c = 0,5$ мм, $h_s = h_{sS} - 2b_p = 21,84 - 2 \cdot 0,45 = 20,94$ мм.

7.3.17. Коэффициент магнитной проводимости лобовых частей (3.22)

$$\lambda_{oS} = 0,34 \frac{q_s}{l_s} (\bar{l}_{ow} - 0,64\beta\tau) = 0,34 \frac{4}{140} (282,6 - 0,64 \cdot 1,0 \cdot 165,7) = 1,71.$$

7.3.18. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния (3.23)

$$\lambda_{dS} = 0,9t_s (q_s k_{ws1})^2 \frac{k_{dh} k_{ds} k_{sh}}{\delta k_\delta} = 0,9 \cdot 13,8 (4 \cdot 0,958)^2 \frac{0,852 \cdot 0,0089 \cdot 0,957}{0,5 \cdot 1,134} = 2,33,$$

где: $k_{dh} = 0,852$ – коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наводимых высшими гармониками в короткозамкнутой обмотке ротора по табл. 4 для $Z_R / z_p = 19$;

$k_{ds} = 0,0089$ – коэффициент дифференциального рассеяния по табл.4 для $q_s = 4$;

$$k_{sh} = 1 - 0,033 \frac{b_{shS}^2}{t_s \delta} = 1 - 0,033 \cdot \frac{3,0^2}{13,8 \cdot 0,5} = 0,957 \text{ – коэффициент, учиты-}$$

вающий влияние раскрытия пазов;

$$k_\delta = k_{\delta S} = 1 + \frac{b_{shS}}{t_s - b_{shS} + 5\delta t_s / b_{shS}} = 1 + \frac{3,0}{13,8 - 3,0 + 5 \cdot 0,5 \cdot 13,8 / 3,0} = 1,134 \text{ –}$$

коэффициент воздушного зазора, равный коэффициенту воздушного зазора статора $k_{\delta S}$, так как ротор имеет закрытые пазы.

7.3.19. Коэффициент магнитной проводимости обмотки статора

$$\lambda_s = \lambda_{ss} + \lambda_{oS} + \lambda_{dS} = 1,78 + 1,71 + 2,33 = 5,83.$$

7.3.20. Индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки (3.29)

$$x_s = \frac{\pi f l_s w_s^2 10^{-8}}{2 z_p q_s} \lambda_s = \frac{\pi 50,0 \cdot 140 \cdot 160^2 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 2 \cdot 4} 5,83 = 2,05 \text{ Ом.}$$

7.4. Обмотка ротора

7.4.1. Номинальный фазный ток (ток в стержне) (3.31)

$$I_{stN} = I_{RN} = 1,1 I_{SN} \frac{6 w_s k_{ws1}}{Z_R} \cos \varphi' = 1,1 \cdot 24,5 \frac{6 \cdot 160 \cdot 0,958}{38} 0,86 = 563,5 \text{ А}$$

7.4.2. Плотность тока в стержне (3.32)

$$j_R = I_{RN} / S_{sR} = 563,5 / 296,8 = 1,9 \text{ А/мм}^2.$$

7.4.3. Размеры короткозамыкающего кольца:

поперечное сечение (3.33)

$$S_{rg} = 0,35 Z_R S_{sR} / (2 z_p) = 0,35 \cdot 38 \cdot 296,8 / (2 \cdot 2) = 986,8 \text{ мм}^2;$$

высота (3.34)

$$h_{rg} = 1,15 h_{zR} = 1,15 \cdot 43,8 = 50,1 \text{ мм};$$

длина (3.35)

$$l_{rg} = S_{rg} / h_{rg} = 986,8 / 50,3 = 19,7 \text{ мм};$$

средний диаметр (3.36)

$$\bar{D}_{rg} = D_{exR} - h_{rg} = 210 - 50,3 = 159,9 \text{ мм.}$$

7.4.4. Активное сопротивление стержня при номинальной скорости вращения и рабочей температуре (3.37)

$$r_b = \rho_{Al} l_R 10^3 / S_{sR} = 9,08 \cdot 10^{-8} \cdot 140,0 \cdot 10^3 / 296,8 = 4,283 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

7.4.5. Коэффициент эффективной глубины паза при пуске

$$\xi_{st} = 0,067 \cdot h_{bR} = 0,067 \cdot 43,1 = 2,92$$

7.4.6. Коэффициент изменения активного сопротивления стержня при пуске $k_r(\xi_{st}) = 2,9$ по кривой рис. 12.

7.4.7. Эффективная глубина паза при пуске (3.41)

$$h_{eff} = h_{bR} / k_r(\xi_{st}) = 43,1 / 2,9 = 14,9 \text{ мм.}$$

7.4.8. Ширина паза на эффективной глубине (3.42)

$$b_{eff} = d_{r2} - \frac{dr_2 - dr_1}{h_{dR}} \left(h_{eff} - \frac{dr_2}{2} \right) = 8,66 - \frac{8,66 - 2,46}{37,0} (14,9 - 8,66 / 2) = 7,19 \text{ мм.}$$

7.4.9. Эффективная площадь поперечного сечения стержня при пуске (3.43)

$$\begin{aligned} S_{b_{eff}} &= 0,393 \cdot d_{r2}^2 + \frac{(d_{r2} + b_{eff})(h_{eff} - d_{r2} / 2)}{2} = \\ &= 0,393 \cdot 8,66^2 + \frac{(8,66 + 7,19)(14,9 - 8,66 / 2)}{2} = 113,23 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

7.4.10. Относительное увеличение сопротивления стержня при пуске (3.44)

$$k_{r_{st}} = S_{sR} / S_{b_{eff}} = 2,62.$$

7.4.11. Активное сопротивление сегмента замыкающего кольца между стержнями (3.45)

$$r_{rg} = 2\pi \bar{D}_{rg} \rho_{Al} 10^3 / (Z_R S_{rg}) = 2\pi \cdot 159,7 \cdot 9,08 \cdot 10^{-8} 10^3 / (38 \cdot 976,8) = 2,433 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

7.4.12. Активное сопротивление сегмента кольца, приведённое к току стержня (3.46)

$$r'_{rg} = r_{rg} / k_b = 2,433 \cdot 10^{-6} / 0,331 = 7,357 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

где $k_b = \pi 2z_p / Z_R = \pi 2 \cdot 2 / 38 = 0,331$ – коэффициент приведения для $Z_R / (2z_p) = 38 / (2 \cdot 2) = 9,5 \geq 6$.

7.4.13. Коэффициент скоса пазов на одно зубцовое деление статора t_s (3.49)

$$k_{sh} = 2 \sin(\gamma / 2) / \gamma = 2 \sin(0,263 / 2) / 0,263 = 0,997,$$

где $\gamma \approx 2\pi z_p / Z_s = 2\pi 2 / 38 = 0,263$ – угол скоса.

7.4.14. Активное сопротивление обмотки ротора, приведённое к параметрам обмотки статора,

$$r_R = k_{RS} (r_b + r'_{rg}) = 7,46 \cdot 10^3 (2,45 \cdot 10^{-6} + 7,35 \cdot 10^{-6}) = 0,374 \text{ Ом,}$$

где $k_{RS} = 4 \frac{m_s}{Z_R} \cdot \left(\frac{w_s k_{wS1}}{k_{shR}} \right)^2 = 4 \frac{3}{38} \left(\frac{160 \cdot 0,958}{0,997} \right)^2 = 7,46 \cdot 10^3$ – коэффициент приведения.

7.4.15. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния овального закрытого паза (3.54)

$$\lambda_{sR} = C_\lambda + 0,3 + (1,12 \cdot h_{brR} 10^3 / I_{RN}) = 1,85 + 0,3 + (1,12 \cdot 0,7 \cdot 10^3 / 563,5) = 3,56,$$

где

$$C_\lambda = \frac{h_{dR} + 0,4d_{r1}}{3d_{r2}} \left(1 - \frac{\pi d_{r2}^2}{8S_{sR}} \right) + 0,66 = \frac{37,0 + 0,4 \cdot 3,5}{3 \cdot 8,66} \left(1 - \frac{\pi 8,66^2}{8 \cdot 293,8} \right) + 0,66 = 1,089.$$

7.4.16. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния замыкающих колец (3.56)

$$\lambda_{rgR} = \frac{2,3\bar{D}_{rg}}{Z_R l_R k_b^2} \lg \frac{4,7\bar{D}_{rg}}{2(h_{rg} + l_{rg})} = \frac{2,3 \cdot 159,6}{38 \cdot 140,0 \cdot 0,331^2} \lg \frac{4,7 \cdot 159,6}{2(50,37 + 19,4)} = 0,46$$

7.4.17. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния (3.57)

$$\lambda_{dR} = 0,9 t_R k_{ds} \left(\frac{Z_R}{6z_p} \right)^2 \frac{1}{\delta k_\delta} = 0,9 \cdot 17,36 \cdot 0,01 \left(\frac{38}{6 \cdot 2} \right)^2 \frac{1}{0,5 \cdot 1,13} = 2,48,$$

где k_{ds} – коэффициент дифференциального рассеяния ротора по кривой рис. 13 для $q_R = Z_R / (6z_p) = 38 / (6 \cdot 2) = 3,17$.

7.4.18. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния скоса пазов

$$\lambda_{shR} = \frac{t_R \beta_{sh}^2}{9,5 \delta k_\delta k'_\mu} = \frac{17,36 \cdot 0,795^2}{9,5 \cdot 0,5 \cdot 1,13 \cdot 1,3} = 1,57,$$

где $\beta_{sh} = t_s / t_R = 0,795$ – скос пазов в долях зубцового деления ротора; принимаем коэффициент насыщения $k'_\mu = 1,3$.

7.4.19. Суммарный коэффициент магнитной проводимости обмотки ротора (3.60)

$$\lambda_R = \lambda_{sR} + \lambda_{rgR} + \lambda_{dR} + \lambda_{shR} = 3,56 + 0,46 + 2,48 + 1,57 = 8,08.$$

7.4.20. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведённое к параметрам обмотки статора (3.61)

$$x_R = k_{rs} \cdot 7,9 f l_R \lambda_R 10^{-9} = 7,457 \cdot 10^3 \cdot 7,9 \cdot 50 \cdot 140 \cdot 8,35 \cdot 10^{-9} = 3,33 \text{ Ом}$$

7.5. Магнитная цепь

7.5.1. Магнитное напряжение воздушного зазора (4.1)

$$F_\delta = 0,8 B_\delta \delta k_\delta 10^3 = 0,8 \cdot 0,726 \cdot 0,5 \cdot 1,13 \cdot 10^3 = 329,3 \text{ А},$$

где $B_\delta = 0,726$ Тл – уточнённое значение магнитной индукции в зазоре.

7.5.2. Магнитная индукция в зубце статора (4.2)

$$B_{zs} = \frac{B_\delta t_s}{k_{Fe} b_{zs}} = \frac{0,726 \cdot 13,8}{0,98 \cdot 5,6} = 1,84 \text{ Тл}.$$

7.5.3. Напряженность магнитного поля в зубце статора определяют по табл. 3 приложения в соответствии с B_{zs} : $H_{zs} = 1,72 \cdot 10^3$ А/м.

7.5.4. Магнитное напряжение зубцового слоя статора (4.3)

$$F_{zs} = H_{zs} h_{zs} 10^{-3} = 1,72 \cdot 10^3 \cdot 25,6 \cdot 10^{-3} = 44,06 \text{ А}.$$

7.5.5. Магнитная индукция в зубце ротора (4.4)

$$B_{zR} = \frac{B_\delta t_R}{k_{Fe} b_{zR}} = \frac{0,726 \cdot 17,36}{0,98 \cdot 7,86} = 1,65 \text{ Тл}.$$

7.5.6. Напряженность магнитного поля в зубце ротора определяют по табл. 3 приложения в соответствии с B_{zR} : $H_{zR} = 990$ А/м.

7.5.7. Магнитное напряжение зубцового слоя ротора (4.5)

$$F_{zR} = (H_{zR} h_{zR} - 0,4 d_{r1}) 10^{-3} = (990 \cdot 43,8 - 0,4 \cdot 3,5) \cdot 10^{-3} = 42,47 \text{ А}.$$

7.5.8. Магнитная индукция в спинке статора (4.6)

$$B_{jS} = \frac{\alpha \tau B_\delta}{2 k_{Fe} h_{jS}} = \frac{0,637 \cdot 165,72 \cdot 0,726}{2 \cdot 0,98 \cdot 25,38} = 1,55 \text{ Тл}.$$

7.5.9. Напряженность магнитного поля в спинке статора определяют по табл. 2 приложения в соответствии с B_{jS} : $H_{jS} = 630$ А/м.

7.5.10. Длина средней линии спинки статора (4.8)

$$\bar{l}_{jS} = \frac{\pi(D_{exS} - h_{jS})}{2z_p} = \frac{\pi(313 - 25,38)}{2 \cdot 2} = 225,9 \text{ мм}.$$

7.5.11. Магнитное напряжение спинки статора (4.7)

$$F_{jS} = H_{jS} \bar{l}_{jS} 10^{-3} = 630 \cdot 225,9 \cdot 10^{-3} = 142,3 \text{ А.}$$

7.5.12. Магнитная индукция в спинке ротора (4.9)

$$B_{jR} = \frac{\alpha \tau B_{\delta}}{2k_{Fe} h_{jR}} = \frac{0,637 \cdot 165,72 \cdot 0,726}{2 \cdot 0,98 \cdot 26,2} = 1,51 \text{ Тл.}$$

7.5.13. Напряженность магнитного поля в спинке ротора определяют по табл. 2 приложения в соответствии с B_{jR} : $H_{jR} = 520 \text{ А/м.}$

7.5.14. Длина средней линии спинки ротора (4.11)

$$\bar{l}_{jR} = \frac{\pi(D_{exR} - 2h_{zR} - h_{jS})}{2z_p} + h_{jR} = \frac{\pi(210 - 2 \cdot 43,8 - 26,2)}{2 \cdot 2} = 162,7 \text{ мм}$$

7.5.15. Магнитное напряжение спинки ротора (4.10)

$$F_{jR} = H_{jR} \bar{l}_{jR} 10^{-3} = 586 \cdot 162,7 \cdot 10^{-3} = 84,6 \text{ А.}$$

7.5.16. Суммарная МДС на пару полюсов (4.12)

$$F_{\Sigma} = 2F_{\delta} + 2F_{zS} + 2F_{zR} + F_{jS} + F_{jR} = \\ = 2 \cdot 329,3 + 2 \cdot 44,06 + 2 \cdot 42,47 + 142,3 + 84,6 = 1059,0 \text{ А}$$

7.5.17. Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя (4.13)

$$k_{\mu} = F_{\Sigma} / (2F_{\delta}) = 1059,0 / (2 \cdot 329,3) = 1,61.$$

7.5.18. Намагничивающий ток (4.14)

$$I_{\mu} = \frac{z_p F_{\Sigma}}{0,9 m_S w_S k_{ws1}} = \frac{2 \cdot 1059,0}{0,9 \cdot 3 \cdot 160 \cdot 0,958} = 5,12 \text{ А.}$$

7.5.19. Главное индуктивное сопротивление двигателя (4.15)

$$x_m = k_E U_N / I_{\mu} = 0,96 \cdot 380 / 5,12 = 71,29 \text{ Ом.}$$

7.6. Магнитные потери

7.6.1. Основные магнитные потери в спинке статора в номинальном режиме работы (4.19)

$$P_{FejS} = 1,7 P_{1,0/50} B_{jS}^2 G_{jS} = 1,7 \cdot 3,5 \cdot 1,55^2 \cdot 24,3 = 249,5 \text{ Вт,}$$

где $P_{1,0/50} = 3,5 \text{ Вт/кг;}$

$$G_{jS} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_S k_{Fe} h_{jS} \pi (D_{exS} - h_{jS}) = \\ = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 0,98 \cdot 25,4 \pi (210 - 25,4) = 24,3 \text{ кг}$$

7.6.2. Основные магнитные потери в зубцовом слое статора в номинальном режиме работы (4.20)

$$P_{FezS} = 1,7 P_{1,0/50} B_{zS}^2 G_{zS} = 1,7 \cdot 3,5 \cdot 1,65^2 \cdot 8,0 = 116,36 \text{ Вт,}$$

где

$$G_{zS} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_S k_{Fe} [h_{zS} \pi (D_{inS} + h_{zS}) - S_{sS} Z_S] = \\ = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 0,98 [25,6 \pi (211 + 25,6) - 238,7 \cdot 48] = 8,0 \text{ кг}$$

7.6.3. Общие магнитные потери (4.23)

$$P_{Fe} = P_{FejS} + P_{FezS} = 249,5 + 116,36 = 365,89 \text{ Вт.}$$

7.6.4. Активное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения двигателя (4.24)

$$r_m \approx \frac{P_{Fe}}{m_s I_\mu^2} = \frac{365,89}{3 \cdot 5,12^2} = 4,66 \text{ Ом.}$$

Таким образом, в результате расчёта получены параметры схемы замещения двигателя (рис. 18):

$$r_s = 0,672 \text{ Ом; } x_s = 2,05 \text{ Ом; } r_R = 0,374 \text{ Ом; } x_R = 3,33 \text{ Ом;}$$

$$r_m = 4,66 \text{ Ом; } x_m = 71,29 \text{ Ом; } k_{rst} = 2,62 = k_r(1,0).$$

7.7. Характеристики двигателя

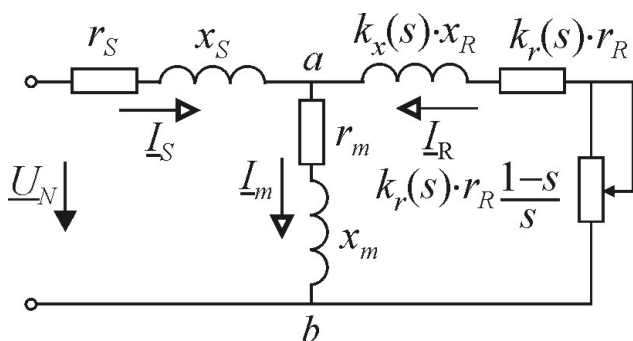


Рис. 18

Характеристики двигателя рассчитывают с помощью какого-либо математического пакета, предварительно создав описание параметров схемы замещения в виде функций от скольжения $0 \leq s \leq 1,0$.

7.7.1. Комплексное сопротивление статора

$$z_s = 0,672 + j2,05 \text{ Ом.}$$

7.7.2. Комплексное сопротивление ветви намагничивания

$$z_m = 4,66 + j71,29 \text{ Ом.}$$

7.7.3. Комплексное сопротивление ветви ротора

$$z_R(s) = r_R(s) + jx_R(s) = k_r(s) \cdot 0,374/s + j \cdot k_x(s) \cdot 3,33 \text{ Ом,}$$

где $k_r(s)$ и $k_x(s)$ соответствуют выражениям (3.38) и (3.39), в которых

$$\xi(s) = k_{rst} \sqrt{s} = 2,56\sqrt{s}.$$

7.7.4. Комплексное сопротивление параллельных ветвей

$$z_{ab}(s) = \frac{z_m z_R(s)}{z_m + z_R(s)} \text{ Ом.}$$

7.7.5. Комплексное входное сопротивление схемы замещения

$$Z(s) = z_s + z_{ab}(s) \text{ Ом.}$$

7.7.6. Комплексный ток статора

$$\underline{I}_s(s) = U_N / Z(s) \text{ А.}$$

7.7.7. Действующее значение тока статора

$$I_s(s) = |\underline{I}_s(s)| \text{ А.}$$

7.7.8. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi(s) = \cos[\arg(\underline{I}_s(s))].$$

7.7.9. Комплексный ток ротора

$$\underline{I}_R(s) = \underline{I}_R(s) \frac{z_m}{z_m + z_R(s)} \text{ А.}$$

7.7.10. Механическая мощность

$$P_m(s) = m_s |I_R(s)|^2 r_R(s) / s \text{ Вт.}$$

7.7.11. Потребляемая активная мощность

$$P_1(s) = m_s U_N I_S(s) \cos \varphi(s) \text{ Вт.}$$

7.7.12. Электромагнитный момент

$$M(s) = P_m(s) z_p / (2\pi f_1) = P_m(s) / 157,08 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

7.7.13. Номинальное скольжение определяется численным решением уравнения $(1 - s) \cdot P_m(s) - P_N = 0$ относительно переменной s . Например,

в пакете Mathcad – $s_N = \text{root}[(1 - s) \cdot P_m(s) - P_N = 0, s]$ и

в пакете Matlab – $s_N = \text{fzero}[(1 - s) \cdot P_m(s) - P_N = 0, s]$.

7.7.14. Максимальный момент и соответствующее ему критическое скольжение находят численным определением максимума функции

$$M(s) = \max = M_m = 216,4 \text{ Н}\cdot\text{м}; s_m = 0,065.$$

7.7.15. Пусковой момент

$$M_{st} = M(1, 0) = 140,6 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

7.7.16. Пусковой ток

$$I_{st} = I_S(1, 0) = 89,26 \text{ А.}$$

7.7.17. Номинальные данные двигателя:

скорость вращения $n_N = (1 - s_N)n_1 = 1462$ об/мин;

электромагнитный момент $M_N = M(s_N) = 143,6$ Н·м;

ток статора $I_N = I_S(s_N) = 24,25$ А;

кратность максимального момента $k_M = 1,5$;

кратность пускового момента $k_{st} = 0,98$;

кратность пускового тока $k_I = 3,68$;

коэффициент мощности $\cos \varphi_N = \cos \varphi(s_N) = 0,871$.

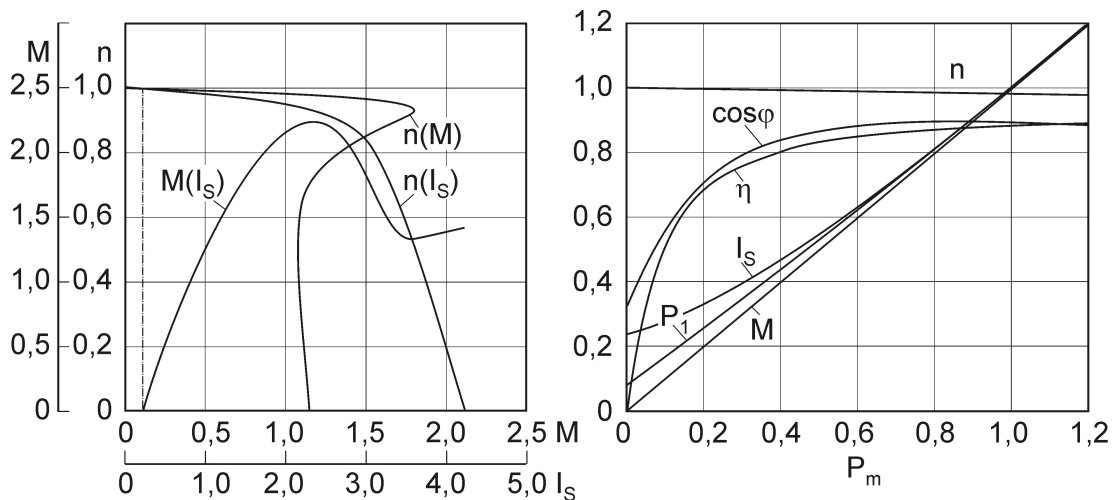


Рис. 19

На рис. 19 показаны характеристики двигателя, построенные в соответствии с выражениями 7.1–7.15. В качестве базовых величин для момента, тока статора и мощности выбраны номинальные значения, а для скорости вращения синхронная скорость.

7.8. Потери и КПД

7.8.1. Электрические потери в обмотке статора (5.9)

$$P_{CuS} = m_S I_N^2 r_S = 3 \cdot 24,55^2 \cdot 0,672 = 1187 \text{ Вт.}$$

7.8.2. Электрические потери в обмотке ротора (5.10)

$$P_{CuR} = m_S I_{RN}^2 r_R = 3 \cdot 22,46^2 \cdot 0,333 = 568 \text{ Вт.}$$

7.8.3. Механические потери (5.11)

$$P_{mc} = k_t (n_1 \cdot 10^{-3})^2 (D_{exS} 10^{-2})^4 = (1500 \cdot 10^{-3})^2 (313 \cdot 10^{-2})^4 = 215,9 \text{ Вт,}$$

где $k_t = 1,0$, так как $z_p > 1$.

7.8.4. Мощность, подводимая к двигателю (5.12)

$$P_1 = m_S I_{SN} U_S \cos \varphi_N = 3 \cdot 24,55 \cdot 380 \cdot 0,898 = 23847 \text{ Вт}$$

7.8.5. Дополнительные потери (5.13)

$$P_z = 0,005 P_1 = 0,005 \cdot 23847 = 130,82 \text{ Вт}$$

7.8.6. Суммарные потери (5.15)

$$\begin{aligned} \Sigma P &= P_{Fe} + P_{CuS} + P_{CuR} + P_{mc} + P_z = \\ &= 365,9 + 1187,0 + 568,0 + 215,90 + 130,82 = 2424 \text{ Вт} \end{aligned}$$

7.8.7. КПД двигателя (5.14)

$$\eta = 1 - \Sigma P / P_1 = 1 - 2424 / 23847 = 0,898$$

7.9. Упрощённый тепловой расчёт

7.9.1. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя (6.3)

$$\Theta_{ka} = \frac{k_a k_{\Theta} P_{CuS} (2l_S / \bar{l}_w) + P_{Fe}}{\pi D_{inS} l_S \alpha_k} = \frac{0,2 \cdot 1,07 \cdot 1187 (2 \cdot 140 / 845,2) + 365,9}{\pi 313 \cdot 190 \cdot 1,064 \cdot 10^{-4}} = 45,58^\circ \text{C},$$

где $\alpha_k = 1,064 \cdot 10^{-4}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора из рис. 14 для $D_{inS} = 211$ мм и $z_p = 2$.

7.9.2. Превышение температуры в изоляции пазовой части обмотки статора (6.4)

$$\begin{aligned} \Theta_{sp} &= \frac{k_{\Theta} P_{CuS} (2l_S / \bar{l}_w)}{Z_S \Pi_S l_S} \left(\frac{b_p}{\lambda_{eq}} + \frac{b_{s1} + b_{s2}}{16 \lambda'_{eq}} \right) = \\ &= \frac{1,07 \cdot 1187 (2 \cdot 140 / 845,2)}{48 \cdot 63,89 \cdot 140} \left(\frac{0,45}{1,6 \cdot 10^{-4}} + \frac{11,57 + 8,55}{16 \cdot 13,3 \cdot 10^{-4}} \right) = 3,28^\circ \text{C} \end{aligned}$$

где $\Pi_S = 2h_{sS} + b_{s1} + b_{s2} = 2 \cdot 21,84 + 11,57 + 8,55 = 63,89$ мм – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза статора;

$\lambda_{eq} = 1,6 \cdot 10^{-4}$ Вт/(мм·°C); $\lambda'_{eq} = 13,3 \cdot 10^{-4}$ Вт/(мм·°C) из рис. 15 для $d_{Cu} / d_{cp} = 0,93$.

7.9.3. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя (6.5)

$$\Theta_{oa} = \frac{k_a k_{\Theta} P_{CuS} (2\bar{l}_{ow} / \bar{l}_w)}{2\pi D_{inS} l_o \alpha_k} = \frac{0,2 \cdot 1,07 \cdot 1187 (2 \cdot 282,6 / 845,2)}{2\pi \cdot 211 \cdot 88,05 \cdot 1,064 \cdot 10^{-4}} = 27,35^{\circ}\text{C}$$

7.9.4. Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора (6.6)

$$\begin{aligned} \Theta_{op} &= \frac{k_{\Theta} P_{CuS} (2\bar{l}_{ow} / \bar{l}_w)}{2Z_S \Pi_o \bar{l}_{ow}} \left(\frac{h_{sS}}{16\lambda'_{eq}} \right) = \\ &= \frac{1,07 \cdot 1187 (2 \cdot 282,6 / 845,2)}{2 \cdot 48 \cdot 63,89 \cdot 282,6} \left(\frac{21,84}{16 \cdot 13,3 \cdot 10^{-4}} \right) = 0,5^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

7.9.5. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя (6.7)

$$\bar{\Theta}_{wa} = (\Theta_{ka} + \Theta_{sp}) \frac{2l_S}{\bar{l}_w} + (\Theta_{oa} + \Theta_{op}) \frac{2\bar{l}_{ow}}{\bar{l}_w} =$$

$$= (45,58 + 3,28) 2 \cdot 140 / 845,2 + (27,35 + 0,5) 2 \cdot 282,6 / 845,2 = 34,81^{\circ}\text{C}$$

7.9.6. Суммарные потери, отводимые в воздух внутри двигателя (6.9)

$$\Sigma P_a = \Sigma P - (k_{\Theta} - 1)(P_{CuS} + P_{CuR}) - (1 - k_a)(P_{Cusl} + P_{Fe}) - 0,9P_{mc} =$$

$$= 2424 - (1,07 - 1)(1187 + 568) - (1 - 0,2)(420,6 + 365,9) - 0,9 \cdot 215,9 = 1477 \text{ Вт}$$

где $P_{Cusl} = k_{\Theta} P_{CuS} 2l_S / \bar{l}_w = 1,07 \cdot 890 \cdot 2 \cdot 140 / 845,2 = 289,5$ Вт.

7.9.7. Условная поверхность охлаждения двигателя без охлаждающих рёбер (6.11)

$$S_m = \pi D_{exS} (l_S + 2l_o) = \pi 313 (190 + 2 \cdot 88) = 3,6 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

7.9.8. Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды (6.8)

$$\bar{\Theta}_a = \frac{\Sigma P_a}{\alpha_a S_m} = \frac{1477}{2,68 \cdot 10^{-5} 3,6 \cdot 10^5} = 177,07^{\circ}\text{C},$$

где $\alpha_a = 2,68 \cdot 10^{-5}$ Вт/(мм²·°C) коэффициент подогрева воздуха из рис. 16 для $D_{exS} = 313$ мм.

Полученное значение существенно превосходит допустимое превышение температуры для машины с изоляцией класса *F*. Следовательно, внешняя поверхность станины должна иметь развитую с помощью рёбер охлаждающую поверхность.

В соответствии с рис. 17, *a* условная поверхность охлаждения рёбер равна $n_r h_r = 360$ мм. Тогда условная поверхность охлаждения двигателя в соответствии с (6.12) будет равной

$$S_m = (\pi D_{exs} + 8n_r h_r)(l_s + 2l_o) = (\pi 313 + 8 \cdot 360)(140 + 2 \cdot 88) = 12,18 \cdot 10^5 \text{ мм}^2.$$

Тогда среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды

$$\bar{\Theta}_a = \frac{\Sigma P_a}{\alpha_a S_m} = \frac{1477}{2,68 \cdot 10^{-5} 12,18 \cdot 10^5} = 45,17^\circ\text{C},$$

а среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды составит (6.14)

$$\bar{\Theta}_w = \bar{\Theta}_{wa} + \bar{\Theta}_a = 34,71 + 45,17 = 79,98^\circ\text{C} < 100^\circ\text{C}.$$

Таким образом, полученные в результате расчёта параметры двигателя с достаточным запасом обеспечивают температурный режим в пределах допуска для заданного класса термостойкости изоляции.

Список литературы

1. Гольдберг О. Д., Макаров Л. Н., Хелемская С. П. Инженерное проектирование электрических машин: учебник : для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Электроэнергетика и электротехника" / О.Д. Гольдберг, Л.Н. Макаров, С.П. Хелемская. - Москва : Бастет, 2016. - 526 с.
2. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров: для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов / [Копылов Игорь Петрович, Клоков Борис Константинович, Морозкин Виктор Павлович, Токарев Борис Федорович] ; Под ред. проф. И.П. Копылова. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Юрайт, 2012. - 766, [с.
3. Коробков Ю. С. Обмотки электрических машин переменного тока с целым и дробным числом пазов на полюс и фазу : учебное пособие по курсам "Электрические машины" и "Проектирование электрических машин" для студентов, обучающихся по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / Ю.С. Коробков ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исслед. ун-т "МЭИ". - Москва : Изд-во МЭИ, 2016. - 146 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ.

Таблица 1.

Площадь поперечного сечения и диаметры медного провода марки ПЭТВ, ПЭТ-155

s_{Cu} [мм ²]	d_{Cu} [мм]	d [мм]	s_{Cu} [мм ²]	d_{Cu} [мм]	d [мм]	s_{Cu} [мм ²]	d_{Cu} [мм]	d [мм]
0,00283	0,06	0,080	0,1134	0,38	0,420	0,785	1,00	1,080
0,00385	0,07	0,090	0,1320	0,41	0,450	0,849	1,04	1,120
0,00503	0,08	0,100	0,1521	0,44	0,480	0,916	1,08	1,160
0,00636	0,09	0,110	0,1735	0,47	0,510	0,985	1,12	1,200
0,00785	0,10	0,122	0,1886	0,49	0,530	1,057	1,16	1,240
0,00950	0,11	0,132	0,204	0,51	0,565	1,131	1,20	1,280
0,01131	0,12	0,142	0,221	0,53	0,585	1,227	1,25	1,330
0,01327	0,13	0,152	0,238	0,55	0,605	1,327	1,30	1,385
0,01539	0,14	0,162	0,255	0,57	0,625	1,431	1,35	1,435
0,01767	0,15	0,180	0,273	0,59	0,645	1,539	1,40	1,485
0,0201	0,16	0,190	0,302	0,62	0,675	1,651	1,45	1,535
0,0227	0,17	0,200	0,322	0,64	0,700	1,767	1,50	1,585
0,0255	0,18	0,210	0,353	0,67	0,730	1,911	1,56	1,645
0,0284	0,19	0,220	0,374	0,69	0,750	2,06	1,62	1,705
0,0314	0,20	0,230	0,407	0,72	0,780	2,22	1,68	1,765
0,0346	0,21	0,240	0,430	0,74	0,805	2,38	1,74	1,825
0,0415	0,23	0,265	0,466	0,77	0,835	2,57	1,81	1,905
0,0491	0,25	0,285	0,503	0,80	0,865	2,78	1,88	1,975
0,0573	0,27	0,305	0,541	0,83	0,895	2,99	1,95	2,045
0,0661	0,29	0,325	0,581	0,86	0,925	3,20	2,02	2,115
0,0755	0,31	0,345	0,636	0,90	0,965	3,46	2,10	2,200
0,0855	0,33	0,365	0,679	0,93	0,995	4,01	2,26	2,360
0,0962	0,35	0,390	0,724	0,96	1,025	4,68	2,44	2,540

Таблица 2.

Таблица намагничивания для спинки асинхронных двигателей

В [Тл]	Сталь 2013									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H [A/m]									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2860	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица 3.

Таблица намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

B [Тл]	Сталь 2013									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H [A/m]									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4620	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Таблица 4.

Основная таблица намагничивания

B [Тл]	Сталь 2013									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H [A/m]									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11200	11800	12400
1,9	13000	13600	14200	14800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2,0	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	109000	116000	123000
2,2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Таблица 5.

Технические данные двигателей основного исполнения, степень защиты IP54, класс термостойкости изоляции "F"

	Тип двигателя	P [кВт]	n [об/мин]	КПД	cosφ	I [А]	M [Нм]	M _{max} /M	M _{ст} /M	I _{ст} /I
1	5A80MA2	1,5	2850	83,0%	0,82	3,4	5,0	2,5	2,4	6,5
2	5A80MB2	2,2	2850	81,0%	0,83	4,9	7,4	2,8	2,7	6,5
3	5AM112M2	7,5	2895	87,5%	0,89	14,6	24,7	3,3	2,9	7,5
4	АИРМ132М2	11,0	2915	88,5%	0,90	21,0	36,0	3,3	2,5	8,0
5	5A160S2	15,0	2920	90,0%	0,89	28,5	49,0	3,0	2,2	6,8
6	5A160M2	18,5	2920	90,5%	0,88	34,9	60,5	3,0	2,2	7,0
7	АИР180S2	22,0	2930	90,5%	0,88	41,5	72,0	2,9	2,0	6,8
8	АИР180M2	30,0	2940	91,5%	0,89	56,3	97,0	3,3	2,4	8,0
9	5A200M2	37,0	2940	93,0%	0,90	67,0	120,0	3,0	2,3	7,4
10	5A200L2	45,0	2940	93,4%	0,90	81,5	146,0	3,0	2,4	7,4
11	5A225M2	55,0	2950	93,4%	0,91	98,5	178,0	2,8	2,3	7,5
12	5A250S2	75,0	2960	93,6%	0,92	133,0	242,0	3,0	2,0	7,5
13	5A250M2	90,0	2955	93,5%	0,93	157,0	290,0	2,7	1,8	7,0
14	5AM280S2	110,0	2965	93,5%	0,92	195,0	354,0	2,3	1,6	6,5
15	5AM280M2	132,0	2965	94,5%	0,92	232,0	425,0	2,5	1,8	7,2
16	5AM315S2	160,0	2970	94,0%	0,93	278,0	515,0	2,5	1,7	7,0
17	5AM315MA2	200,0	2970	95,0%	0,93	344,0	643,0	2,7	1,8	8,0
18	5AM315MB2	250,0	2975	95,7%	0,93	427,0	802,0	2,7	2,0	8,5
19	5A80MA4	1,1	1410	73,0%	0,79	2,9	7,5	2,3	2,0	4,8
20	5A80MB4	1,5	1410	75,0%	0,81	3,8	10,0	2,2	1,9	5,5
21	5AM112M4	5,5	1440	86,0%	0,83	11,7	36,5	2,9	2,6	6,7
22	АИРМ132S4	7,5	1450	87,5%	0,85	15,4	49,4	2,8	2,1	7,0
23	АИРМ132M4	11,0	1455	89,0%	0,85	22,1	72,2	3,0	2,2	7,3
24	5A160S4	15,0	1450	89,5%	0,86	29,6	99,0	2,6	2,2	6,1
25	5A160M4	18,5	1450	90,0%	0,86	36,3	122,0	2,6	2,2	6,5
26	АИР180S4	22,0	1465	90,5%	0,84	44,0	143,0	2,6	1,7	6,8
27	АИР180M4	30,0	1470	91,5%	0,87	57,5	195,0	2,6	1,7	7,0
28	5A200M4	37,0	1470	92,0%	0,85	72,0	240,0	2,5	2,4	6,7
29	5A200L4	45,0	1470	92,5%	0,85	87,0	292,0	2,8	2,8	7,1
30	5A225M4	55,0	1475	93,0%	0,86	105,0	356,0	2,2	2,2	6,5
31	5AM250S4	75,0	1485	94,3%	0,85	142,0	482,0	2,3	2,2	7,2
32	5AM250M4	90,0	1485	95,0%	0,88	164,0	578,0	2,3	2,2	7,3
33	5AM280S4e	110,0	1485	95,1%	0,87	202,0	707,0	2,0	2,1	6,4
34	5AM280M4e	132,0	1485	95,8%	0,88	238,0	848,0	2,2	2,3	7,5
35	5AM315S4e	160,0	1485	95,3%	0,89	287,0	1028,0	2,2	1,9	6,2
36	5AM315M4e	200,0	1485	95,6%	0,89	358,0	1285,0	2,0	1,9	6,5

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Во всех обозначениях:

- символы S и R в индексах соответствуют параметрам, относящимся к статору и к ротору;
- символ N в индексах соответствует номинальным значениям;
- апостроф ` соответствует расчётному значению параметра;
- черта поверх символа означает среднее значение параметра.

A_S – линейная нагрузка

$B_{zS}; B_{zR}; B_{jS}; B_{jR}$ – магнитная индукция в зубцах и в спинке сердечников статора и ротора

$\overline{B}_\delta; B_\delta$ – среднее и амплитудное значение индукции в зазоре

C_A – машинная постоянная Арнольда

C_λ – составляющая коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния овального паза

$D_{exS}; D_{inS}; D_{exR}; D_{inR}$ – внешний (ex) и внутренний (in) диаметры сердечников статора и ротора

\overline{D}_{rg} – средний диаметр короткозамыкающего кольца клетки ротора

E_S – ЭДС основного магнитного потока обмотки статора

$F_\delta; F_{zS}; F_{zR}; F_{jS}; F_{jR}; F_\Sigma$ – магнитное напряжение воздушного зазора, зубцовых слоёв статора и ротора; спинки статора и ротора и суммарное напряжение контура магнитного потока

$G_{jS}; G_{zS}$ – масса спинки и зубцового слоя

$H_{zS}; H_{zR}; H_{jS}; H_{jR}$ – напряжённость магнитного поля в зубцах и в спинке сердечников статора и ротора

$I_S; I_{SN}$ – фазный и номинальный фазный ток обмотки статора

$I_{RN}; I_{stN}$ – номинальный фазный ток и ток в стержне обмотки ротора

I_μ – намагничивающий ток

K_A – коэффициент использования машины

M_{em} – электромагнитный момент

N_S – число последовательно соединённых проводников в пазах статора

- $P'; P_N$ – расчётная и номинальная мощность двигателя
 P_{CuS} – электрические потери в обмотки статора
 P_{em} – электромагнитная мощность двигателя
 $P_{FejS}; P_{FezS}; P_{Fe}$ – основные магнитные потери в спинке, в зубцовом слое и суммарные потери в сердечнике статора
 $Q_p; Q_f$ – количество теплоты, проходящей через изоляцию и через произвольную поверхность в единицу времени
 $P_{1,0/50}$ – удельная мощность магнитных потерь
 S_{beff} – эффективная площадь поперечного сечения стержня при пуске
 S_f – площадь охлаждаемой поверхности
 S_p – площадь поперечного сечения пазовой изоляции
 $S_{sS}; S_{rS}$ – площадь поперечного сечения паза статора и ротора «в штампе»
 S_{rg} – площадь поперечного сечения короткозамыкающего кольца
 U_N – номинальное фазное напряжение
 V_{inS} – внутренний объём машины
 $Z_S; Z_R$ – число пазов сердечников статора и ротора
 a_S – число параллельных ветвей обмотки статора
 b_p – толщина пазовой изоляции
 $b_{zS}; b_{zR}$ – ширина зубцов сердечников статора и ротора
 $b_{shS}; b_{shR}$ – ширина шлицов пазов статора и ротора
 $b_{s1}; b_{s2}$ – большая и меньшая ширина трапецеидального паза
 b_{wm} – средняя ширина катушки обмотки статора
 $\cos \varphi$ – коэффициент мощности двигателя
 d_{cp} – диаметр изолированного обмоточного провода
 $d_{r1}; d_{r2}$ – диаметры нижней и верхней части овального паза
 f_1 – частота питающей сети

- h – высота оси вращения
 $h_{bR}; h_{eff}$ – реальная и эффективная глубина паза сердечника ротора
 h_{dR} – расстояние между центрами окружностей овального паза
 $h_{zS}; h_{zR}$ – высота зубцов сердечников статора и ротора
 $h_{jS}; h_{jR}$ – высота спинки сердечников статора и ротора
 $h_{shS}; h_k$ – высота шлица и высота клиновой части трапецеидального паза статора
 h_{rg} – высота короткозамыкающего кольца
 h_r – высота охлаждающих рёбер станины
 h_s – высота трапецеидального паза, занимаемая обмоткой
 $j_S; j_R$ – плотность тока в проводниках обмотки статора и в стержнях обмотки ротора
 k_a – коэффициент, учитывающий долю потерь, передаваемых воздуху двигателя
 k_b – коэффициент приведения активного сопротивления сегмента кольца к току стержня
 k_{Cu} – коэффициент заполнения паза
 k_{Fe} – коэффициент заполнения сердечника сталью
 k_E – относительное значение ЭДС основного потока
 k_{RS} – коэффициент приведения параметров обмотки ротора к параметрам обмотки статора
 $k_{kS1}; k_{rS1}; k_{wS1}; k_{wR1}$ – коэффициенты укорочения шага, распределения и обмоточный коэффициент для основной гармоники обмотки статора; обмоточный коэффициент для основной гармоники обмотки ротора
 $k_r; k_x$ – коэффициенты изменения активного и индуктивного сопротивления обмотки ротора в результате вытеснения тока в стержнях

- $k_{rst}; k_{xst}$ – коэффициенты изменения активного и индуктивного сопротивления стержня обмотки ротора при пуске
 k_{sh} – коэффициент скоса пазов
 k_{Φ} – коэффициент формы синусоиды
 $k_{\beta}; k'_{\beta}; k_{dh}; k_{ds}; k_{sh}$ – коэффициенты, учитывающие укорочение шага обмотки, демпфирующую реакцию якоря, дифференциальное рассеяние и открытие пазов при расчёта коэффициентов магнитной проводимости обмотки
 $k_{\delta S}; k_{\delta R}; k_{\delta}$ – коэффициенты воздушного зазора статора, ротора и общий коэффициент
 k_{Θ} – коэффициент, определяемый соотношением удельной электрической проводимости меди расчётной и при максимально допустимой температуре
 k_{μ} – коэффициент насыщения магнитопровода
 $l_S; l_R$ – длина сердечников статора и ротора
 $\bar{l}_{jS}; \bar{l}_{jR}$ – средняя длина спинки сердечников статора и ротора
 $\bar{l}_{ow}; \bar{l}_w$ – средняя длина лобовой части катушки и средняя длина витка обмотки статора
 l_o – длина вылета лобовой части обмотки статора
 l_{rg} – длина короткозамыкающего кольца
 $m_S; m_R$ – число фаз обмотки статора и ротора
 n_{el} – число элементарных проводников в одном эффективном
 n_r – число охлаждающих рёбер станины
 n_1 – синхронная скорость вращения
 z_p – число пар полюсов магнитного поля
 y – шаг обмотки статора
 $q_S; q_R$ – число пазов на полюс и фазу обмотки статора и ротора
 $r_S; r_R; r_m$ – активное сопротивление фазы обмотки статора и ротора и ветви намагничивания схемы замещения

- r_b, r_{rg} – активное сопротивление стержня обмотки ротора и сегмента короткозамыкающего кольца между стержнями
- s – скольжение
- $S_{eff}; S_{el}$ – площадь поперечного сечения эффективного и элементарного проводника обмотки статора
- $t_S; t_R$ – зубцовые деления статора и ротора
- $t_{S1}; t_{S2}; t_{Sm}$ – зубцовые деления по наружной, внутренней и средней дуге паза статора
- $w_S; w_R$ – число витков фазной обмотки статора и ротора
- $x_S; x_R; x_m$ – индуктивные сопротивления рассеяния одной фазы обмоток статора и ротора и главное индуктивное сопротивление
- y_m – средний шаг обмотки статора по пазам
- Φ_δ – магнитный поток в воздушном зазоре
- Φ_{jS} – магнитный поток в спинке сердечника статора
- $\Pi_S; \Pi_o$ – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза статора и лобовой части обмотки
- $\Theta_p; \Theta_f; \Theta_{ka}; \Theta_{sp}; \Theta_{oa}; \Theta_{op}; \Theta_{max}$ – превышение (перепад) температуры в пазовой изоляции, произвольной поверхности относительно охлаждающего воздуха, внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя, изоляции пазовой части обмотки статора, наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, изоляции лобовой части обмотки статора, допустимое превышение температуры
- $\bar{\Theta}_{wa}; \bar{\Theta}_a; \bar{\Theta}_w$ – среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды и температуры обмотки статора над температурой окружающей среды

- α – коэффициент полюсного перекрытия
 $\alpha_f; \alpha_k$ – коэффициент теплоотдачи с произвольной поверхности и с поверхности сердечника
 α_s – угол фазной зоны обмотки статора
 β – относительный шаг обмотки статора
 β_k – угол клиновой части трапецеидального паза
 β_p – показатель степени относительной частоты перемещения сердечника
 β_{sh} – скос пазов в долях зубцового деления ротора
 γ – угол скоса пазов
 δ – величина воздушного зазора
 η – КПД двигателя
 $\lambda_{eq}; \lambda'_{eq}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности пазовой изоляции и изоляции провода
 $\lambda_{sS}; \lambda_{sR}; \lambda_{oS}; \lambda_{rgR}; \lambda_{dS}; \lambda_{dR}; \lambda_{shR}$ – коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеяния статора и ротора, лобового рассеяния статора и рассеяния короткозамыкающих колец ротора, дифференциального рассеяния статора и ротора, рассеяния скоса пазов ротора
 λ_p – коэффициент теплопроводности изоляции
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума
 σ_μ – коэффициент магнитного рассеяния обмотки статора
 τ – полюсное деление
 $\rho_{Cu}; \rho_{Al}$ – удельное сопротивление меди и алюминия
 ξ – относительная глубина паза сердечника ротора

Задания на проектирование

Рассчитать параметры и построить механическую, скоростную и моментную характеристики в режиме двигателя, а также рабочие характеристики трёхфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя. Выполнить тепловой расчёт.

Сравнить полученные характеристики с данными двигателей серии 5А (таблица 5 приложения) и оптимизировать параметры из условия приближения к этим данным.

Исходные данные:

Частота сети	$f_1 = 50$ Гц;
Номинальное напряжение сети	$U_N = 660/380$ В;
Обмотка статора однослойная концентрическая;	
Число параллельных ветвей	$a_s = 2$;
Обмотка ротора со скосом пазов на одно зубцовое деление статора;	
Пазы сердечника статора трапецеидальные полузакрытые;	
Пазы сердечника ротора овальные закрытые;	
Исполнение двигателя по степени защиты	IP44;
Способ охлаждения	IC0141;
Режим работы	S1;
Класс термостойкости изоляции	F.

Вариант	Высота оси [мм]	Мощность [кВт]	Число полюсов	Вариант	Высота оси [мм]	Мощность [кВт]	Число полюсов
1	80,0	1,5	2	11	160,0	15,0	2
2	80,0	1,1	4	12	160,0	15,0	4
3	90,0	3,0	2	13	180,0	22,0	2
4	90,0	3,0	4	14	180,0	22,0	4
5	100,0	4,0	2	15	200,0	37,0	2
6	100,0	3,0	4	16	200,0	37,0	4
7	112,0	7,5	2	17	225,0	55,0	2
8	112,0	5,5	4	18	225,0	55,0	4
9	132,0	7,5	2	19	250,0	75,0	2
10	132,0	7,5	4	20	250,0	75,0	4

Содержание

Введение	3
1. Выбор электромагнитных нагрузок и определение главных размеров двигателя	4
2. Определение размеров активной части двигателя	9
Пазы статора	9
Пазы ротора	10
3. Обмотки двигателя	11
Обмотка статора	11
Короткозамкнутая обмотка ротора	16
4. Магнитная цепь машины	20
Воздушный зазор	20
Зубцовый слой статора	20
Зубцовый слой ротора	20
Спинка статора	21
Спинка ротора	21
5. Потери и КПД	21
Магнитные потери	21
Электрические потери	22
Механические потери	22
Добавочные потери	23
Коэффициент полезного действия	23
6. Упрощённый тепловой расчёт	23
7. Пример расчёта трёхфазного асинхронного двигателя	26
Список литературы	40
Приложения	41
Задания на проектирование	50

Усольцев Александр Анатольевич
Томасов Валентин Сергеевич
Денисов Константин Михайлович
Демидова Галина Львовна
Поляков Николай Александрович

РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЁХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. редакционно-издательским отделом

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе.

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А