

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ИНСТИТУТ ДИСТАНЦИОННОГО ОБРАЗОВАНИЯ

---

**РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

Методические указания к выполнению курсового проекта  
по дисциплине «Электрические машины»  
для студентов ИДО ТПУ

**Издательство  
Томского политехнического университета  
Томск 2009**

УДК 621.313

Р 24

Р 24

**Расчет асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:** методические указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Электрические машины»/ сост. В. М. Игнатович, В. В. Големгрейн, А. И. Верхотуров, Ш. С. Ройз. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 64 с.

Методические указания используют результаты многолетнего опыта авторов по руководству курсовым и дипломным проектированием асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. По всем разделам расчетов даются очень подробные пояснения, помогающие принимать квалифицированные решения, расходовать минимум времени на поиск необходимых таблиц, рисунков, рекомендаций. Наиболее трудные разделы дополнительно содержат блок-схемы алгоритмов принятия решений.

Для самостоятельной подготовки к защите курсового проекта сформированы пораздельно контрольные вопросы. Изложены требования к оформлению пояснительной записки и сборочного чертежа – технической документации курсового проекта.

Методические указания подготовлены для студентов Института дистанционного образования ТПУ специальностей «Электромеханика», «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов», выполняющих курсовой проект по дисциплине «Электрические машины», и выпускную квалификационную работу.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры «Электрические машины и аппараты» ТПУ «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Зав. кафедрой ЭМА

доцент, к. т. н.

\_\_\_\_\_  
О. Л. Рапопорт

## Введение

Асинхронный двигатель – электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой меньше частоты вращения поля, и зависит от нагрузки. Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором является наиболее широко применяемой, простой по конструкции и надёжной в эксплуатации электрической машиной.

Выполнение курсового проекта на тему «Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором» формирует у студента навыки инженерного проектирования, помогает понять и осознать материал лекционных и лабораторных занятий. Расчеты, проводимые при курсовом проектировании, дают достоверные ответы на многочисленные вопросы пытливого студенту, приучают анализировать и обосновывать принимаемые решения.

В методических указаниях даны рекомендации по выбору основных размеров электрической машины, числа пазов и витков обмотки статора, допустимой величины коэффициента заполнения паза статора, намагничивающего тока, теплового состояния двигателя, результирующего прогиба вала и т. д. Приведенные блок-схемы позволяют студенту обосновать выбор главных размеров машины, основных электромагнитных нагрузок, размеров зубцовой зоны. Также блок-схемы ориентируют на действия, необходимые для корректировки коэффициента заполнения обмотки статора и пусковых характеристик машины.

Для активизации познавательной деятельности студентов каждый раздел расчётов снабжён вопросами, концентрирующими внимание на основных положениях данного раздела.

В указаниях приведён банк данных, содержащий 261 вариант, что исключает возможность повторения одинаковых заданий.

Методические указания излагаются в последовательности, соответствующей методике расчётов, представленной в [1, с. 306–474]. Кроме соблюдения правильной последовательности расчётов, методика ориентирует на предварительное изучение конкретных глав и параграфов. При выполнении проекта важным является осмысление решений, принятых в примерах расчёта. Пользуясь таблицами и рисунками, обратите внимание на примечания, где указаны степень защиты двигателя, тип обмотки статора и число её полюсов, высота оси вращения. Пример расчета двигателя приведен в [1, с. 456–474].

## **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ**

Курсовой проект – учебная работа, содержащая результаты выполнения задачи, сформулированной по учебной дисциплине, состоит из текстовой документации (пояснительной записки) и графического материала (сборочного чертежа асинхронного двигателя).

Пояснительная записка – научно-технический документ, содержащий систематизированные данные о выполненной студентом проектной работе, описывающий процесс ее выполнения и полученные результаты в виде текста и необходимых иллюстраций.

Пояснительная записка должна включать в указанной ниже последовательности:

- титульный лист (приложение 1);
- бланк задания (приложение 2);
- содержание;
- введение;
- основную часть;
- заключение;
- перечень использованных источников;
- приложения.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4, желательно с одной стороны листа.

Содержание должно отражать все материалы работы, представляемые к защите. Слово «Содержание» записывают в виде заголовка, симметрично тексту, прописными буквами. В содержании перечисляют заголовки разделов, подразделов, указывают список литературы, каждое приложение и номера листов (страниц), на которых они начинаются. В конце содержания перечисляют графический материал, представляемый к защите, с указанием «На отдельных листах».

Введение содержит краткое изложение назначения и роли асинхронных двигателей в современных электроприводах, общие и технические требования государственных стандартов.

Основная часть содержит электромагнитный, тепловой, вентиляционный и механический расчёты.

Заключение должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы, оценку полноты решения поставленных задач, рекомендации по конкретному использованию результатов работы, ее экономическую, научную и социальную значимость. Заголовок «Заключение» пишут с абзаца прописными буквами.

Перечень использованных источников содержит все источники, на которые имеются ссылки в пояснительной записке. Источники в списке нумеруют в порядке их упоминания в тексте пояснительной записки арабскими цифрами без точки. Заголовок «Перечень использованных источников» записывают симметрично тексту прописными буквами.

Приложения рекомендуется формировать из материалов иллюстрационного и вспомогательного характера, в частности: таблицы и рисунки большого формата; дополнительные расчеты; самостоятельные материалы и документы конструкторского, технологического и прикладного характера. Материалы, содержащие дополнительные текстовые конструкторские документы (спецификацию), следует помещать в приложение в последнюю очередь.

Сборочный чертеж асинхронного двигателя – общий вид двигателя в двух проекциях с вырезами и сечениями, позволяющими наиболее полно представить конструкцию двигателя. Проставляются габаритные и установочно-присоединительные размеры, позиции сборочных единиц, деталей, стандартных изделий. Записываются основные технические требования.

## 1 ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Внешний диаметр сердечника статора  $D_a$  принимается по таблице 9.8 [1, с. 344], по заданной высоте оси вращения  $h$ . Обратите внимание:  $D_a = f(h)$  рекомендуется в виде диапазона. Укажите рекомендуемый диапазон для  $D_a$  и примите конкретное предварительное значение. Коррекция предварительного значения  $D_a$  (при необходимости) возможна только в рамках рекомендуемого диапазона.

Внутренний диаметр сердечника статора  $D$  рассчитывается, используя соотношение его с внешним диаметром  $D_a$ , по формуле  $D = K_D \cdot D_a$ . Коэффициент  $K_D = f(2p)$  принимается по таблице 9.9 [1, с. 344] по заданному числу полюсов обмотки статора. Причем  $K_D = f(2p)$  рекомендуется в виде диапазона. Укажите рекомендуемый диапазон для  $K_D$  и примите конкретное предварительное значение. Коррекция предварительного значения  $K_D$  (при необходимости) возможна только в рамках рекомендуемого диапазона.

Полюсное деление  $\tau$  рассчитывается по формуле 9.3 [1] и является на данном этапе расчета предварительным.

Расчетная мощность двигателя  $P'$  рассчитывается по формуле 9.4 [1]. Коэффициент  $k_E = f(D_a, 2p)$  – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, приближенно определяется по рисунку 9.20 [1, с. 345].

Предварительные значения энергетических показателей: коэффициента полезного действия  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi$  принимаются по рисунку 9.21 [1, с. 345]. На этом рисунке  $\eta, \cos \varphi = f(IP, P_{2n}, 2p)$ .

Предварительные значения электромагнитных нагрузок: линейной нагрузки  $A$ , индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  выбираются по рисунку 9.22 [1, с. 346] (для  $IP44$ ). Рекомендуемые значения электромагнитных нагрузок  $A, B_\delta = f(IP, D_a, 2p)$  получаются в виде диапазонов. Укажите рекомендуемый диапазон по каждой из электромагнитных нагрузок и примите конкретное предварительное значение. Коррекция предварительных значений  $A, B_\delta$  (при необходимости) возможна не только в рамках рекомендуемого диапазона. Уточненные значения  $A, B_\delta$  могут выходить за пределы рекомендуемых диапазонов, но не более чем на 5 %.

Выбор электромагнитных нагрузок очень важен в расчетах двигателя. Расчетная длина сердечника статора обратно пропорциональна произве-

дению  $A \cdot B_\delta$ , рабочие и пусковые характеристики двигателя существенно зависят от соотношения между  $A$  и  $B_\delta$ . При варьировании величинами электромагнитных нагрузок можно увеличивать или уменьшать массу стали и проводниковых материалов. Так, при увеличении  $B_\delta$  и уменьшении  $A$ , при неизменных габаритах машины, увеличивается требуемый объем и масса магнитных материалов и уменьшается проводниковых.

Предварительное значение обмоточного коэффициента обмотки статора  $k_{об1}$  зависит, во-первых, от типа этой обмотки по числу ее слоев [1, с. 77]. Во-вторых, от числа полюсов (только у двухслойных и однодвухслойных). Рекомендуемые предварительные значения  $k_{об1}$  даны в виде диапазонов [1, с. 348]. Укажите рекомендуемый диапазон для  $k_{об1}$  и примите конкретное предварительное значение. В дальнейшем  $k_{об1}$  будет уточняться.

Предварительная расчетная длина сердечника статора  $l_\delta$  определяется по формуле 9.6 [1]. Коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_\delta$  и коэффициент формы поля  $k_B$  зависят от насыщения зубцов сердечников статора и ротора. Предварительные значения этих коэффициентов принимаются равными:

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

Критерием правильности выбора главных размеров двигателя  $D$  и  $l_\delta$  служит отношение  $\lambda = l_\delta / \tau$ . Рекомендуемые значения  $\lambda = f(IP, 2p)$  определяются по рисунку 9.25 [1, с. 348], в виде диапазона. Расчетное значение  $\lambda$  обычно находится в рекомендуемом диапазоне.

Если расчетное значение  $\lambda$  превышает наибольшее значение рекомендуемого диапазона, то уменьшение  $\lambda$  возможно: увеличением электромагнитных нагрузок  $A$  и  $B_\delta$  (в рамках рекомендуемых диапазонов, в крайнем случае – в рамках допустимых); увеличением внутреннего диаметра сердечника статора (в рамках рекомендуемых диапазонов внешнего диаметра сердечника статора  $D_a$  и коэффициента  $K_D$ ).

Если расчетное значение  $\lambda$  менее наименьшего значения рекомендуемого диапазона, то увеличение  $\lambda$  возможно противоположными воздействиями на выше перечисленные  $A$ ,  $B_\delta$ ,  $D_a$ ,  $K_D$ .

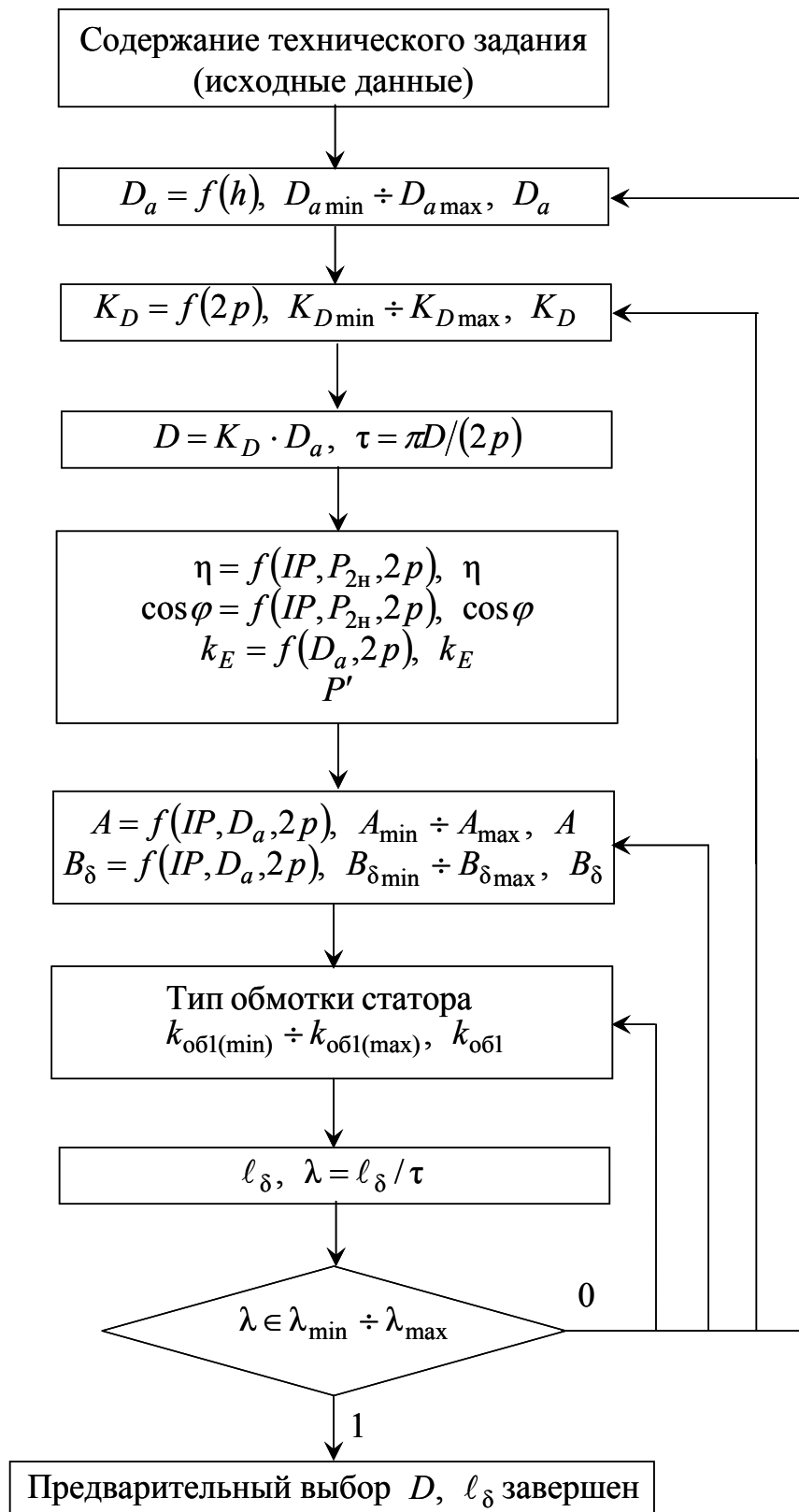


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма выбора главных размеров двигателя

двигателя



Если расчетное значение  $\lambda$  все-таки не попадает в рекомендуемый диапазон, то это должно быть аргументированно подтверждено. В этом случае  $\lambda$  должно быть максимально приближено к границам рекомендуемого диапазона.

На этом предварительный выбор главных размеров двигателя заканчивается и их величины округляют до миллиметра.

## 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ $Z_1$ , $W_1$ И ВЫБОР ПРОВОДА ОБМОТКИ СТАТОРА

В электрических машинах с номинальным напряжением до 660 В и мощностью до 100 кВт обмотки выполняются из круглого обмоточного провода, укладываемого в трапецеидальные полузакрытые пазы. Наибольший диаметр провода, применяемый для насыпных обмоток, не превышает 1,8 мм, так как провода большего диаметра имеют слишком большую жесткость и плохо уплотняются в пазах во время укладки. Нужное сечение эффективного проводника обеспечивается выполнением обмотки из нескольких элементарных проводников.

Зубцовое деление сердечника статора  $t_{Z1}$  выбирается по рисунку 9.26 [1, с. 351]. Рекомендуемые значения зубцового деления  $t_{z1} = f(\tau, 2p)$  получаются в виде диапазона  $t_{z1\min} \div t_{z1\max}$ .

Число пазов сердечника статора  $Z_1$  определяется по формуле 9.16 [1, с. 351], так же в виде диапазона возможных значений. Окончательное число пазов сердечника статора следует выбирать из диапазона, руководствуясь налагаемыми требованиями симметрии обмотки и желательным значением числа пазов на полюс и фазу  $q_1$ . Поэтому число пазов сердечника статора должно быть кратно числу фаз его обмотки. Число пазов на полюс и фазу  $q_1$  в двигателях с однослойными обмотками и в большинстве двигателей с двухслойными обмотками (за исключением многополюсных) должно быть целым.

Окончательное значение зубцового деления сердечника статора не должно выходить за рекомендуемый диапазон более чем на 10 %. В любом случае  $t_{z1} \geq 6 \div 7$  мм, исходя из механических (прочностных) соображений.

Предварительное число эффективных проводников в пазу сердечника статора  $U'_\Pi$  вначале определяют при условии, что параллельные ветви в обмотке статора отсутствуют ( $a=1$ ), по формуле 9.17 [1, с. 352].

Окончательное число эффективных проводников в пазу  $U_\Pi$  должно быть обязательно целым, а в двухслойной обмотке – еще и желательно четным. Взаимосвязь между окончательным и предварительным числом эффективных проводников в пазу определяется формулой 9.19 [1, с. 352] и позволяет подобрать такое число параллельных ветвей обмотки из возможных, чтобы обеспечить, без грубых округлений, целое или четное  $U_\Pi$ . Возможные значения числа параллельных ветвей обмотки зависят от ее типа и числа полюсов. Максимальное число парал-

лельных ветвей двухслойной обмотки статора равно числу ее полюсов, однослойной – числу пар полюсов.

Отсутствие грубых округлений в уточненном значении  $U_{\Pi}$  будет в дальнейшем подтверждено получением уточненных значений электромагнитных нагрузок в рамках рекомендуемых или, в крайнем случае, допустимых диапазонов.

Принятое на данном этапе расчетов число параллельных ветвей обмотки в дальнейшем, при выборе ее провода, может потребовать изменения.

Уточненное окончательное значение линейной нагрузки  $A$  рассчитывается по формуле 9.21 [1, с. 353] и сравнивается с рекомендуемым пределом.

Уточненное окончательное значение индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  рассчитывается по формуле 9.23 [1, с. 353] и сравнивается с рекомендуемым пределом. При этом используется уточненное значение потока  $\Phi$ , вследствие уточнения обмоточного коэффициента  $k_{об1}$ . Обмоточный коэффициент – произведение коэффициентов распределения  $k_{p1}$  и укорочения  $k_{y1}$ . Коэффициент распределения обмотки определяется для первой гармоники с учетом обеспеченного  $q_1$  по таблице 3.16 [1, с. 112]. Коэффициент укорочения (только для двухслойных обмоток) рассчитывается для первой гармоники по формуле 3.6 [1, с. 108], принимая во внимание реальное значение относительного шага обмотки  $\beta$ . Для однослойных обмоток  $k_{y1} = 1$ .

Уточненные значения электромагнитных нагрузок могут выходить за рекомендуемые пределы, но не более чем на 5 %. Если это требование не выполнено, то следует принять другое значение числа эффективных проводников в пазу и повторить расчет.

Предварительная плотность тока в обмотке статора определяется по формуле 9.25 [1, с. 354], где  $A$  – уточненное значение линейной нагрузки;  $AJ_1 = f(IP, h, D_a, 2p)$  – произведение линейной нагрузки и плотности тока определяется по рисунку 9.27, [1, с. 355] в виде диапазона. Укажите рекомендуемый диапазон и примите конкретное предварительное значение.

При выборе предварительного значения  $AJ_1$  из диапазона необходимо принимать во внимание, что выбор наибольшего значения вызовет, во-первых, увеличение предварительной плотности тока. То есть будет ориентировать на повышенное использование обмоточного провода как одного из активных материалов. Во-вторых, вызовет повышение

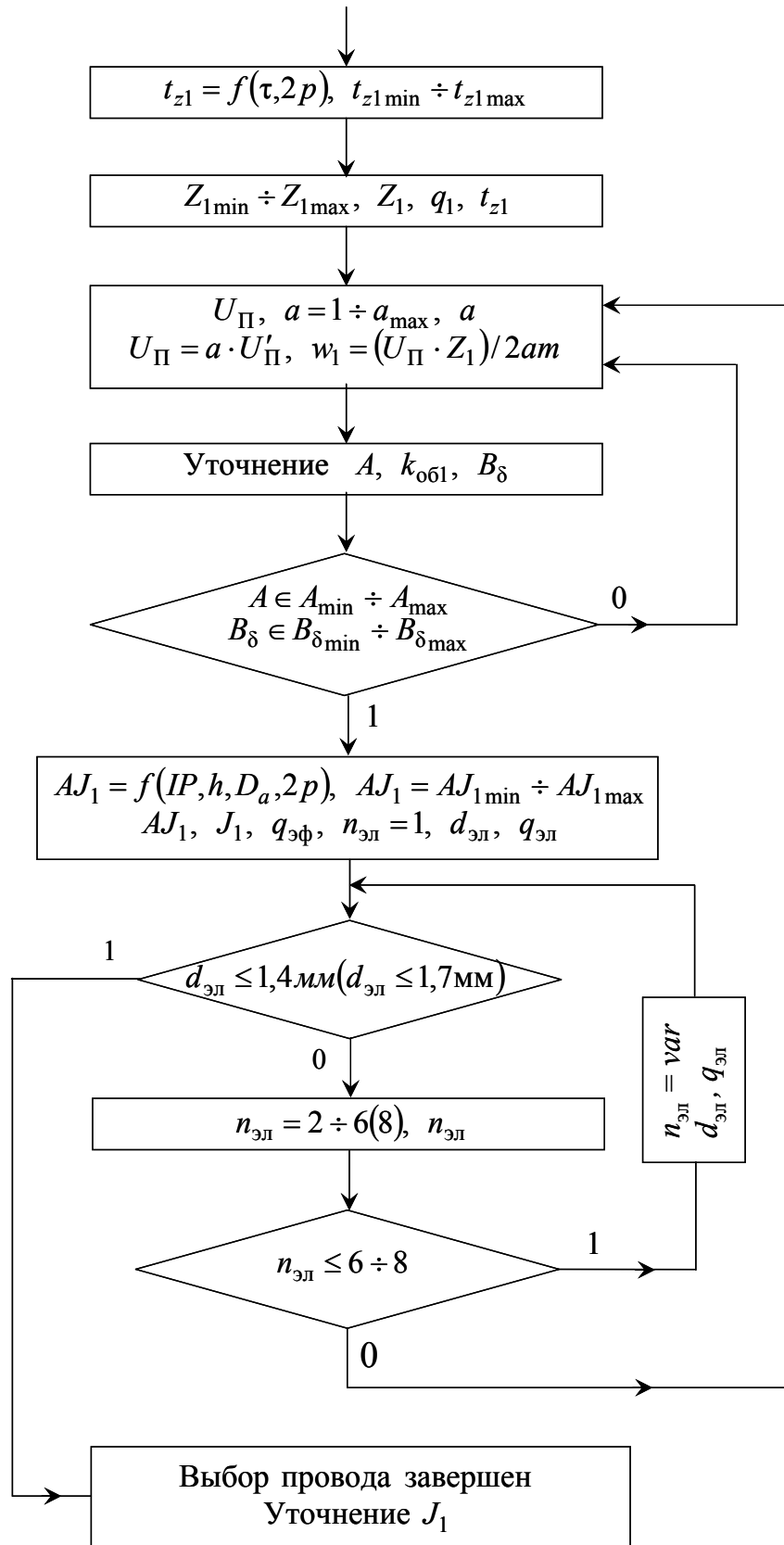


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма определения  $Z_1, w_1$  и выбора провода обмотки статора

температуры обмотки и снижение КПД. Причем, в асинхронных двигателях общего назначения, вследствие принятой в них системе косвенного охлаждения, влияние плотности тока на нагрев обмотки более существенно, чем на КПД.

Предварительная площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки рассчитывается по формуле 9.24 [1, с. 353], а уточнение площади поперечного сечения насыпных обмоток проводится с использованием таблицы ПЗ.1 [1, с. 713].

В обмотках, предназначенных для механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке – не более 1,7 мм. Для обеспечения названных требований к диаметру изолированного провода сечение эффективного проводника формируют из нескольких одинаковых элементарных проводников правильно выбранного диаметра. Суммарная площадь сечения этих элементарных проводников должна быть близка к предварительному сечению эффективного проводника.

Во насыпных обмотках число элементарных проводников в одном эффективном не должно превышать  $6 \div 8$ , чтобы не создавать технологические трудности намотки катушек. Обеспечение этого требования может вызвать увеличение числа параллельных ветвей обмотки статора. В этом случае возникнет необходимость скорректировать ранее принятое решение.

Марки проводов, приведенные в таблице ПЗ.1 [1, с. 713], соответствуют классу нагревостойкости  $F$  (ТИ 155). По своим электроизоляционным свойствам они идентичны. Но провода марки ПЭТ имеют повышенную стойкость к действию теплового удара по сравнению с ПЭТ-155. Тип эмалевой изоляции – высокопрочная эмаль на полиэфироимидной основе.

После окончательного выбора числа элементарных проводников  $n_{эл}$ , их сечения  $q_{эл}$ , числа параллельных ветвей  $a$  уточняется плотность тока в обмотке по формуле 9.27 [1, с. 356].

### 3 РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА

Всыпную обмотку статора укладывают в полузакрытые пазы одной из трех конфигураций, представленных на рисунке 9.29 [1, с. 361], обеспечивая параллельность боковых граней зубцов. Магнитное напряжение таких зубцов будет наименьшим по сравнению с трапецеидальными зубцами при одном и том же среднем значении индукции в них.

В большинстве отечественных асинхронных двигателей выполняют трапецеидальные пазы, т. е. первой и второй конфигураций, изображенных на рисунке 9.29 [1, с. 361]. Угол наклона клиновой части пазов первой конфигурации при  $h \leq 250$  мм обычно равен  $45^\circ$ , при большей высоте оси вращения  $30^\circ$ .

Рекомендуемые значения индукций в зубцах  $B_{z1}$  и ярме  $B_a$  сердечника статора определяются по таблице 9.12 [1, с. 356].  $B_{z1}$ ,  $B_a = f(IP, 2p)$  представлены в виде диапазонов. Укажите эти диапазоны и примите конкретные предварительные значения  $B_{z1}$ ,  $B_a$ .

Марка электротехнической стали выбирается в зависимости от  $h$ , [1, с. 386]. Способ изолирования листов и коэффициент заполнения стальной сердечников статора и ротора с номинальным напряжением до 660 В указаны в таблице 9.13 [1, с. 358].

Предварительные значения ширины зубца сердечника статора  $b_{z1}$  рассчитываются по формуле 9.37 [1, с. 362], высоты ярма  $h_a$  – по формуле 9.28 [1, с. 356].

Предварительные размеры паза сердечника статора в штампе учитывают следующие рекомендации. Ширина шлица паза сердечника статора  $b_{ш}$  зависит от способа укладки обмотки в пазы сердечника. При укладке вручную она минимальная и составляет:  $b_{ш} = d_{из} + (1,5 \div 2)$  мм, где  $d_{из}$  – диаметр изолированного обмоточного провода, мм. При механизированной укладке ширина шлица выполняется несколько большей:  $b_{ш} = d_{из} + (1,8 \div 2,3)$  мм – при совмещенном методе укладки, а при раздельном методе  $b_{ш}$  еще более увеличивают. Кроме вышеназванных рекомендаций по выбору размеров  $b_{ш}$  можно использовать таблицу 9.16 [1, с. 363], где представлены средние значения  $b_{ш}$  при различных  $h$  и  $2p$ .

Высота шлица  $h_{ш}$  паза сердечника статора обычно в двигателях с  $h \leq 132$  мм принимается  $h_{ш} = 0,5$  мм, в двигателях с  $h \geq 160$  мм  $h_{ш} = 1$  мм. Высота шлица должна быть достаточной для обеспечения механической прочности кромок зубцов, удерживающих в уплотненном со-

стоянии проводники паза после заклиновки пазов. Увеличение  $h_{\text{ш}}$  приводит к возрастанию потока рассеяния паза, что в большинстве случаев нежелательно.

При определении размеров паза в штампе первой конфигурации используются расчетные формулы 9.38–9.41 [1]. В числителе формулы 9.39 [1], к сожалению, упущено значение  $\pi$ . Для других конфигураций паза статора формулы легко получаются при условии сохранения постоянства ширины зубцов.

Высота клиновой части паза  $h_{\text{к}}$  рассчитывается по формуле 9.45 [1, с. 365], учитывая угол наклона клиновой части.

Высота паза ниже клиновой части  $h_{\text{п.к}}$  рассчитывается по формуле 9.44 [1], но без учета припусков на шихтовку сердечника.

Предварительные размеры паза сердечника статора в свету учитывают припуски на шихтовку, они меньше предварительных размеров паза в штампе. Величины припусков по ширине и высоте паза зависят от высоты оси вращения двигателя и приведены в таблице 9.14 [1, с. 360].

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся свободной для размещения проводников обмотки  $S'_{\text{п}}$ , рассчитывается по формуле 9.48 [1, с. 365]. Площадь поперечного сечения корпусной изоляции  $S_{\text{из}}$  – по формуле 9.46 [1], где односторонняя толщина и наименование изоляции в пазу определяются по таблице 3.1 [1, с. 77], при  $h \leq 250$  мм и напряжении обмотки до 660 В. При больших высотах оси вращения – по таблице 3.2 [1, с. 78].

Площадь, занимаемая прокладками в пазу  $S_{\text{пр}}$  (между слоями обмотки – в двухслойной обмотке, под клином и на дне паза – при  $h \geq 280$  мм), рассчитывается по формуле 9.47 [1, с. 365], принимая во внимание высоту оси вращения и размеры паза в штампе  $b_1$ ,  $b_2$ . В однослойных обмотках  $S_{\text{пр}}=0$ .

Коэффициент заполнения паза  $k_3$  оценивает плотность укладки проводников обмотки в площадь поперечного сечения паза  $S'_{\text{п}}$ , свободную от изоляции. Он рассчитывается по формуле 3.2 [1, с. 101] и должен находиться в пределах  $k_3=0,69 \div 0,71$  для двухполюсных двигателей,  $k_3=0,72 \div 0,74$  для двигателей с  $2p \geq 4$ , [1, с. 366].

Если полученное значение  $k_3$  ниже названных пределов, то причинами этого могут быть: слишком большая площадь  $S'_{\text{п}}$  или малая площадь  $(d_{\text{из}}^2 \cdot n_{\text{эл}} \cdot U_{\text{п}})$ . Уменьшить площадь  $S'_{\text{п}}$  можно за счет увеличения  $h_a$  или  $b_{z1}$  (или обоих размеров одновременно), уменьшая ранее принятые

предварительные значения индукций  $B_a$ ,  $B_{z1}$ . Если при этом индукция в зубцах и ярме уменьшится ниже рекомендуемых для них пределов, то главные размеры двигателя завышены и электротехническая сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника статора  $l_\delta$ , принимая решение, что и как будет корректироваться из  $A$ ,  $B_\delta$ ,  $K_D$ ,  $D_a$ . Увеличить площадь  $(d_{из}^2 \cdot n_{эл} \cdot U_{II})$  возможно увеличением числа элементарных проводников  $n_{эл}$  при одновременном пропорциональном уменьшении площади поперечного сечения  $q_{эл}$  или увеличении числа параллельных ветвей обмотки так, чтобы плотность тока осталась практически неизменной. Кроме того, увеличить площадь  $(d_{из}^2 \cdot n_{эл} \cdot U_{II})$  возможно вышеназванными воздействиями при уменьшении плотности тока за счет выбора меньшей величины  $(AJ_I)$  из рекомендуемого интервала.

Если полученное значение  $k_3$  выше названных пределов, то причинами этого могут являться: слишком малая площадь  $S'_{II}$  или большая площадь  $(d_{из}^2 \cdot n_{эл} \cdot U_{II})$ . Увеличить площадь  $S'_{II}$  возможно за счет уменьшения  $h_a$  или  $b_{z1}$  (или обоих размеров одновременно), увеличивая ранее принятые предварительные значения индукций  $B_a$ ,  $B_{z1}$ . Если при этом понадобится увеличить индукции в зубцах и ярме выше рекомендуемых для них пределов, то главные размеры двигателя занижены и электротехническая сталь недопустимо загружена. В этом случае следует увеличить длину сердечника  $l_\delta$ , принимая решение, что и как будет корректироваться из  $A$ ,  $B_\delta$ ,  $K_D$ ,  $D_a$ . Уменьшить площадь  $(d_{из}^2 \cdot n_{эл} \cdot U_{II})$  возможно уменьшением числа элементарных проводников  $n_{эл}$  при одновременном пропорциональном увеличении площади поперечного сечения  $q_{эл}$  или уменьшении числа параллельных ветвей обмотки так, чтобы плотность тока осталась неизменной. Кроме того, уменьшить площадь  $(d_{из}^2 \cdot n_{эл} \cdot U_{II})$  возможно вышеназванными воздействиями при некотором увеличении плотности тока за счет выбора большей величины  $(AJ_I)$  из рекомендуемого интервала.

После обеспечения коэффициента заполнения паза необходимо уточнить ширину зубца и высоту паза по формулам таблицы 9.17 [1, с. 366]. Проверяется параллельность граней зубца. При небольшом



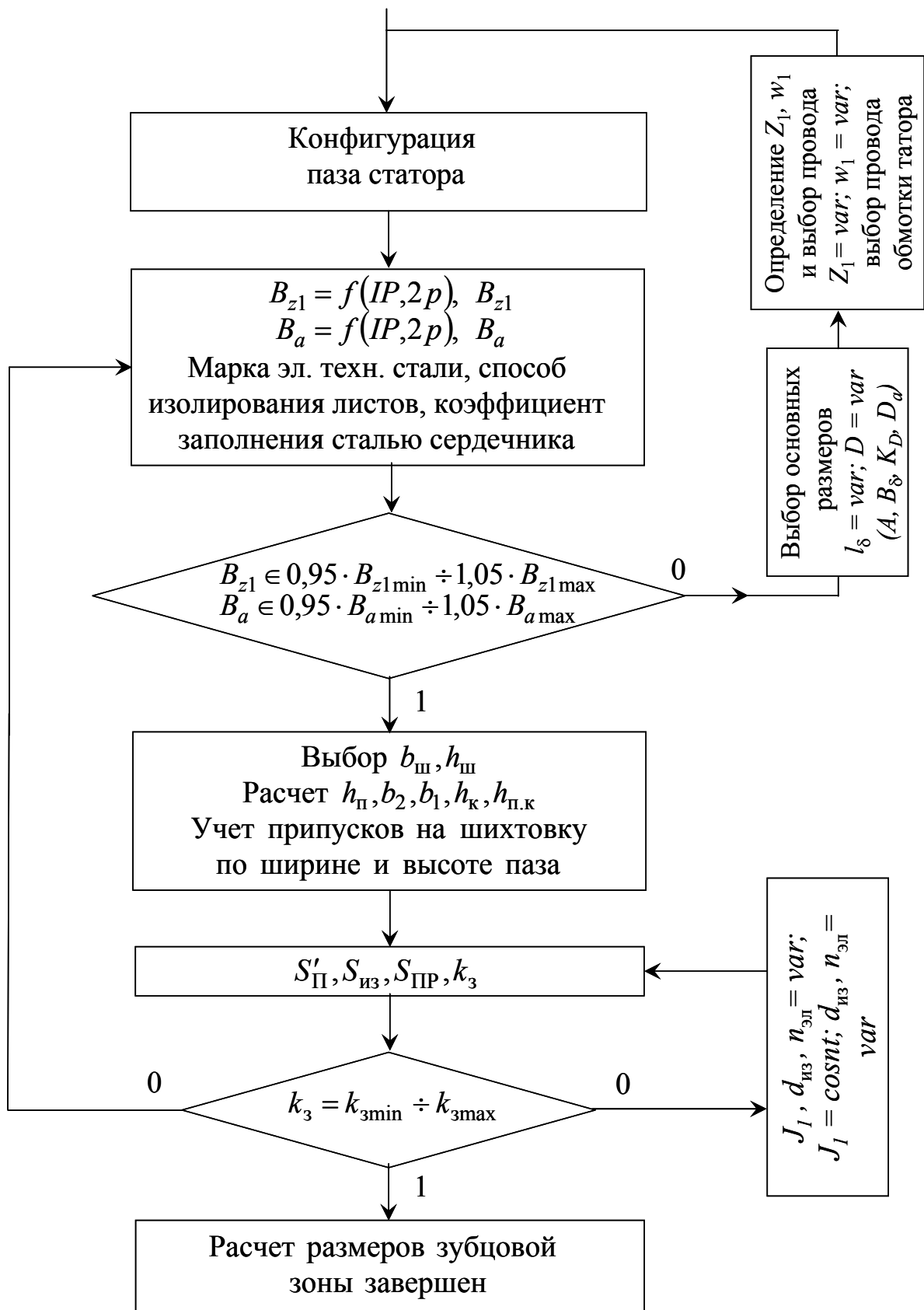


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма расчета размеров зубцовой зоны сердечника статора

расхождении  $b'_{z1}$  и  $b''_{z1}$ , не более 0,5 мм, необходимо для дальнейших расчетов взять их среднюю расчетную ширину. При больших расхождениях, более 0,5 мм, следует изменить соотношения размеров паза. Размеры зубцовой зоны сердечника статора округляют до десятых долей миллиметра.

#### 4 ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА И РАСЧЕТ РОТОРА

Величина воздушного зазора  $\delta$  во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Увеличение  $\delta$  приводит: к возрастанию намагничивающего тока и, как следствие этого, к снижению  $\cos \varphi$ ; к увеличению электрических потерь в обмотке статора и, как следствие этого, к снижению  $\eta$  двигателя. Однако чрезмерное уменьшение  $\delta$  приводит к такому возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре, что увеличение поверхностных и пульсационных потерь преобладает над уменьшением электрических потерь. Поэтому  $\eta$  двигателей с очень малыми  $\delta$  не улучшается, а часто даже становится меньше.

Величину  $\delta$  можно определить по формулам 9.49–9.51 [1, с. 367], в зависимости от номинальной мощности двигателя и числа полюсов обмотки статора, либо по рисунку 9.31 [1, с. 367], где  $\delta = f(D, h, 2p)$ . Выбранный  $\delta$  следует округлять до 0,05 мм при  $\delta < 0,5$  мм и до 0,1 мм при  $\delta \geq 0,5$  мм.

Выбору числа пазов сердечника ротора  $Z_2$  следует уделить особое внимание, т. к. при неблагоприятном соотношении  $Z_1$  и  $Z_2$  может существенно ухудшиться механическая характеристика двигателя  $M = f(s)$  и его виброакустические характеристики (шум и вибрация).

Рекомендации по выбору  $Z_2$  сведены в таблицу 9.18 [1, с. 373–374], в виде  $Z_2 = f(2p, Z_1)$  при наличии или отсутствии скоса пазов ротора. Выбор делается из нескольких возможных вариантов. Необходимо учесть, что в двигателях малой мощности обычно выполняют  $Z_2 < Z_1$ , а в более мощных двигателях иногда выполняют  $Z_2 > Z_1$ .

Для выполняемых позже расчетов магнитной цепи, параметров схемы замещения двигателя, необходимо определить конструктивную длину и длину стали сердечников статора ( $l_1$  и  $l_{ст1}$ ), ротора ( $l_2$  и  $l_{ст2}$ ).

В сердечниках, длина которых не превышает 250÷300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции  $l_1 = l_{ст1} = l_\delta$ . Более длинные сердечники сформируют из отдельных пакетов длиной 40÷60 мм, разделенных между собой радиальными вентиляционными каналами.

Конструктивную длину сердечника ротора в двигателях с  $h < 250$  мм берут равной конструктивной длине сердечника статора, т. е.  $l_2 = l_1$ .

Сердечники роторов при  $D_2 < 990$  мм выполняют с непосредственной посадкой на вал. Если высота оси вращения  $h \leq 250$  мм, то применяют

посадку сердечников на гладкий вал без шпонки. В двигателях больших габаритов сердечники крепят на валу с помощью шпонки.

Внутренний диаметр сердечника ротора  $D_j$  при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала  $D_B$  и определяется по формуле 9.102 [1, с. 385]. Значения коэффициента  $k_B$  даны в таблице 9.19 [1, с. 385] в виде  $k_B = f(h, 2p)$ .

Предварительное значение тока в стержне короткозамкнутой обмотки ротора  $I_2$  рассчитывается по формуле 9.57 [1, с. 370], как произведение предварительного значения номинального тока фазы обмотки статора на коэффициенты  $k_i$  и  $v_i$ .

Приближенное значение коэффициента  $k_i$ , учитывающего влияние тока намагничивания на отношение  $I_1/I_2$ , определяется по формуле 9.58 [1, с. 370] с учетом предварительного значения номинального  $\cos\varphi$  двигателя.

Коэффициент приведения токов  $v_i$  определяется по формуле 9.66 [1, с. 374], учитывает принятые для короткозамкнутой обмотки числа фаз и витков в фазе, влияние коэффициента скоса пазов  $k_{ск}$  сердечника ротора.

Коэффициент скоса  $k_{ск}=1$ , если пазы сердечника ротора выполняются без скоса. При наличии скоса пазов  $k_{ск}$  рассчитывается по формуле 9.67 [1, с. 374].

Как правило, наибольший эффект снижения шума дает скос пазов на 0,8–1,5 зубцового деления. При этом в случае  $Z_1 < Z_2$  рекомендуется скашивать на зубцовое деление сердечника статора, а при  $Z_1 > Z_2$  – на зубцовое деление сердечника ротора [3].

Предварительное значение площади поперечного сечения стержня обмотки ротора рассчитывается по формуле 9.68 [1, с. 375]. Плотность тока в стержнях  $J_2$  при заливке пазов алюминием для исполнения двигателя по степени защиты IP44 выбирается в пределах 2,5÷3,5 МА/м<sup>2</sup>. Примите конкретное предварительное значение  $J_2$ .

Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым и рабочим характеристикам двигателя и его мощностью. Конфигурация паза ротора с  $h \leq 250$  мм выбирается из двух предложенных на рисунке 9.40 [1, с. 380], обеспечивая параллельность боковых граней зубцов. В двигателях с  $h < 160$  мм пазы грушевидные полузакрытые, имеют узкую прорезь. В двигателях с

$h=160\div 250$  мм пазы грушевидные закрытые, высота перемычки над пазом зависит от числа полюсов обмотки статора.

Предварительное значение ширины зубца сердечника ротора рассчитывается по формуле 9.75 [1, с. 380], используя рекомендации по предельным значениям рекомендуемого и допустимого значений индукции  $B_{z2} = f(IP, 2p)$  в таблице 9.12 [1, с. 357].

Размеры паза ротора  $b_1, b_2, h_1$  рассчитываются по формулам 9.76–9.78 [1, с. 380] и округляются до десятых долей миллиметра. Диаметр закругления нижней части паза должен гарантировать выполнение условия высококачественной заливки пазов алюминием:  $b_2 \geq 1,5 \div 2,0$  мм в двигателях с  $h \leq 132$  мм,  $b_2 \geq 2,5 \div 3,0$  мм – с  $h \geq 160$  мм.

Так же, как при расчете зубцов сердечника статора, необходимо проверить параллельность граней зубцов сердечника ротора. При небольшом расхождении  $b'_{z2}$  и  $b''_{z2}$ , не более 0,5 мм, в расчете магнитной цепи используется их средняя ширина, а при заметном расхождении – магнитное напряжение зубцов ротора определяется, как для трапециевидных зубцов. В формуле 9.81 [1, с. 381] для расчета  $b''_{z2}$ , к сожалению, упущен множитель  $\pi$  перед дробью.

Уточненная площадь сечения стержня равна уточненному сечению паза ротора и рассчитывается по формуле 9.79 [1, с. 380]. Это позволяет уточнить плотность тока в стержне.

Короткозамыкающие кольца литой обмотки отливают одновременно с заливкой пазов. Поперечное сечение колец – неправильная трапеция, прилегающая плотно своим большим основанием к торцу сердечника.

Предварительная площадь поперечного сечения кольца рассчитывается по формуле 9.72 [1, с. 376]. Для этого определяют ток в кольце по формуле 9.70 [1], плотность тока выбирают в среднем на 15÷20 % меньше, чем в стержнях.

Размеры короткозамыкающих колец рассчитывают приближенно, исходя из конфигурации их поперечного сечения. Высоту сечения кольца выбирают  $h_{кл} \geq 1,2h_{п2}$ . Ширину кольца рассчитывают по предварительной площади поперечного сечения и выбранной  $h_{кл}$  по формуле 9.73 [1]. Расчетное сечение короткозамыкающего кольца принимают равным  $q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл}$ , не учитывая утолщения в местах примыкания вентиляционных лопаток. Средний диаметр колец рассчитывают по формуле 9.74 [1].

## 5 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Магнитная цепь асинхронного двигателя состоит из пяти участков (воздушный зазор, зубцовые зоны и ярма сердечников статора и ротора) и рассчитывается для режима холостого хода на два полюса.

Магнитное напряжение воздушного зазора рассчитывается по формуле 9.103 [1, с. 386], используя уточненное значение индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$ . Коэффициент воздушного зазора рассчитывается по формуле 4.15 [1, с. 174], если одна поверхность зазора гладкая, а другая зубчатая, т. е. при закрытых пазах сердечника ротора. Для двигателя с полузакрытыми пазами сердечника ротора обе поверхности зазора зубчатые, не гладкие, и рассчитывают результирующий коэффициент воздушного зазора, как произведение двух частичных коэффициентов, определенных по формулам 4.17 и 4.18 [1].

Магнитное напряжение зубцовой зоны сердечника статора рассчитывается по формуле 9.104 [1, с. 387], принимая расчетную высоту зубца равной высоте паза  $h_{z1} = h_{\Pi 1}$ . Расчетная индукция в зубце определяется по формуле 9.105 [1, с. 387], где расчетная ширина зубца при параллельных гранях зубцов  $b_{z1} = b'_{z1} = b''_{z1}$ , а при различии не более 0,5 мм  $b_{z1} = 0,5(b'_{z1} + b''_{z1})$ .

В зубцах с параллельными гранями при индукции выше 1,8 Тл необходимо учесть ответвление части потока зубцового деления в паз. Это приводит к уменьшению действительной индукции в зубце по сравнению с расчетной. Коэффициент  $k_{\Pi X}$  равен отношению площадей поперечных сечений паза и электротехнической стали зубца на середине высоты зубца. По значению  $k_{\Pi X}$  и расчетной индукции определяют действительную индукцию  $B'_{z1}$  по формуле 4.32 [1, с. 179], используемую для нахождения напряженности поля в зубце по приложению 1 [1, с. 698, 701].

Если индукция в зубцах не превышает 1,8 Тл, то напряженность поля в зубце находится по приложению 1 [1, с. 698, 701] в зависимости от расчетной индукции  $B_{z1}$ .

Магнитное напряжение зубцовой зоны сердечника ротора рассчитывается по формуле 9.108 [1, с. 388], принимая расчетную высоту зубца  $h_{z2}$  несколько меньше полной высоты паза ротора  $h_{z2} = h_{\Pi 2} - 0,1b_2$ . Расчетная индукция в зубце определяется по формуле 9.109 [1, с. 390]. Все дальнейшее, имеющее отношение к расчетной ширине зубца и определе-

нию напряженности поля в зубце, ранее сказано применительно к зубцовой зоне сердечника статора.

Магнитное напряжение ярма сердечника статора рассчитывается по формуле 9.116 [1, с. 394]. Длина средней магнитной силовой линии в ярме и его высота определяются по формулам 9.119, 9.120 [1]. Напряженность поля ярма определяется по индукции  $B_a$  по кривым намагничивания ярм приложения 1, [1, с. 697, 700].

Магнитное напряжение ярма сердечника ротора рассчитывается по формуле 9.121 [1, с. 395]. Длина средней магнитной силовой линии в ярме двигателей с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал при  $2p = 2$  определяется по формуле 9.125, при  $2p > 2$  по формуле 9.127 [1]. Индукция в ярме сердечника ротора рассчитывается по формуле 9.122 [1], принимая во внимание расчетную высоту ярма. В двигателях с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал при  $2p = 2$  или 4 учитывают, что часть магнитных силовых линий замыкается через вал. Поэтому в двухполюсных двигателях расчетную высоту ярма определяют по формуле 9.124 [1]. В четырехполюсных двигателях при размерных соотношениях  $0,75\left(\frac{D_2}{2} - h_{П2}\right) < D_B$  расчетную высоту ярма определяют по формуле 9.124, при других размерных соотношениях – по формуле 9.126 [1]. Напряженность поля ярма сердечника ротора определяется по индукции  $B_j$  по вышеназванным кривым намагничивания ярм.

На этом расчет магнитных напряжений участков магнитной цепи двигателя заканчивается.

Предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных двигателя нужно следующим образом. Во-первых, рассчитывается коэффициент насыщения зубцовой зоны  $k_z$  по формуле 9.115 [1, с. 391]. Если  $k_z > 1,5 \div 1,6$ , то насыщение зубцовой зоны чрезмерное; если  $k_z < 1,2$ , то зубцовая зона недоиспользована или воздушный зазор выбран слишком большим. Оба случая требуют внесения в расчет коррективов.

Во-вторых, рассчитывается намагничивающий ток  $I_\mu^*$  в долях номинального тока двигателя по формуле 9.131 [1, с. 396]. Если у четырехполюсного двигателя средней мощности  $I_\mu^* < 0,2 \div 0,18$ , то в большинстве случаев это означает, что размеры двигателя выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие энергетические показатели, но плохие показатели расхода мате-

риалов на единицу мощности вследствие больших значений массы и габаритов.

Если же в аналогичном двигателе  $I_{\mu}^* > 0,3 \div 0,4$ , то это в большинстве случаев означает, что либо его габариты взяты заниженными, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Такой двигатель будет иметь низкие энергетические показатели.

Необходимо учесть, что в двигателях номинальной мощностью менее 2÷3 кВт значение  $I_{\mu}^*$  может достигать 0,5÷0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Подобное увеличение  $I_{\mu}^*$  возможно и в двигателях с  $2p > 4$ .



## 6 ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕГО РЕЖИМА

Параметрами асинхронного двигателя чаще всего называют параметры схем замещения фазы, рисунок 9.47 [1, с. 397]: активное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора  $r_1$ ,  $x_1$ , приведенные к числу ее витков сопротивления фазы обмотки ротора  $r'_2$ ,  $x'_2$ , сопротивления ветви намагничивания  $r_{12}$ ,  $x_{12}$ .

Параметры схемы замещения не остаются неизменными как при пуске двигателя, так и при изменении нагрузки на валу. При расчете рабочих характеристик в пределах от холостого хода до номинальной нагрузки эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают.

Активное сопротивление фазы обмотки статора рассчитывается по формуле 9.132 [1, с. 397], где  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление материала обмотки, соответствует расчетной температуре принятого класса нагревостойкости изоляционных материалов, представлено в таблице 5.1 [1, с. 187]. Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток, предельно допустимые превышения температур которых соответствуют классу нагревостойкости  $B$ , расчетная температура принимается равной  $75^\circ\text{C}$ , а для класса нагревостойкости  $F$  –  $115^\circ\text{C}$ .

Эффект вытеснения тока во вспыхивающих обмотках проявляется незначительно, поэтому принимают  $k_R = 1$ .

Общую длину эффективных проводников фазы обмотки статора рассчитывают по формуле 9.134 [1, с. 398], где среднюю длину витка  $l_{\text{ср}}$  определяют как сумму пазовых и лобовых частей катушки по формуле 9.135 [1]. Длина пазовой части  $l_{\text{п}}$  равна конструктивной длине сердечника статора  $l_{\text{п}} = l_1$ . Длина лобовой части катушки вспыхивающей обмотки рассчитывается по формуле 9.136, где средняя ширина катушки  $b_{\text{КТ}}$  определяется по формуле 9.138 [1, с. 399], принимая во внимание укорочение шага обмотки статора  $\beta$  в двухслойных обмотках. В однослойных обмотках  $\beta = 1$ . Коэффициент  $K_{\text{л}} = f(2p)$ , выбираемый по таблице 9.23 [1, с. 399], возрастает с увеличением числа полюсов и равен для неизолированных лобовых частей  $1,2 \div 1,5$ , для изолированных лентой –  $1,45 \div 1,90$ . Вылет прямолинейной части катушки из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части  $B$  для обмоток, укладываемых в пазы до запрессовки сердечника статора в станину, берут равным  $0,010$  м. Для обмоток, которые укладываются после запрессовки сердечника в станину,  $B = 0,015$  м.

Длина вылета лобовой части катушки рассчитывается для всыпных обмоток по формуле 9.137 [1, с. 398]. Коэффициент  $K_{\text{выл}} = f(2p)$ , выбираемый по таблице 9.23 [1, с. 399], возрастает с увеличением числа полюсов и равен для неизолированных лобовых частей  $0,26 \div 0,50$ , для изолированных лентой –  $0,44 \div 0,72$ .

Активное сопротивление фазы короткозамкнутой обмотки ротора рассчитывается по формуле 9.168 [1, с. 406]. За фазу короткозамкнутой обмотки принимают один стержень и два участка замыкающих колец, рисунок 9.35 [1, с. 372]. Токи в стержнях и замыкающих кольцах различны, поэтому их сопротивления при расчете активного сопротивления фазы должны быть приведены к одному току, что и сделано при получении расчетной формулы.

Активные сопротивления стержня  $r_c$  и участка замыкающего кольца  $r_{\text{кл}}$  рассчитываются по формулам 9.169 и 9.170 [1]. В этих формулах  $l_c$  – полная длина стержня, равная конструктивной длине сердечника ротора  $l_2$ ;  $D_{\text{кл.ср}}$  – средний диаметр замыкающих колец. Удельное электрическое сопротивление материала стержня и замыкающих колец соответствует расчетной температуре принятого класса нагревостойкости изоляционных материалов и представлено в приложении к таблице 5.1 [1, с. 187].

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора рассчитывается по формуле 9.152 [1, с. 402].

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния  $\lambda_{\text{пп}}$  определяется по формуле, приведенной в таблице 9.26 [1, с. 403], в зависимости от конфигурации паза сердечника статора и типа обмотки (по числу слоев). Для первой конфигурации паза, рисунок 9.29а [1, с. 361],  $\lambda_{\text{пп}}$  рассчитывается по формуле, соответствующей рисунку 9.50е [1, с. 402]. Для второй конфигурации паза, рисунок 9.29б [1], – по формуле, соответствующей рисунку 9.50г [1]. Для третьей конфигурации паза, рисунок 9.29в [1] – по формуле, соответствующей рисунку 9.50в [1].

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния  $\lambda_{\text{лп}}$  рассчитывается по формуле 9.159 [1, с. 403], где  $\beta$  – относительное укорочение шага обмотки;  $\beta = 1$  для однослойных обмоток, эквивалентных обмоткам с полным, диаметральный, шагом.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния  $\lambda_{\text{дп}}$  рассчитывается по формуле 9.174а [1, с. 407]. Значение коэффициента  $\xi$  определяется при полузакрытых пазах сердечника статора с учетом скоса пазов по формуле 9.176 [1]. В этой

формуле  $k'_{\text{ск}} = f(t_{z2}/t_{z1}, \beta_{\text{ск}})$  определяется по рисунку 9.51д [1, с. 405] (при отсутствии скоса по кривой  $\beta_{\text{ск}} = 0$ );  $k_{\beta}$  при укороченном шаге рассчитывается по формуле 9.158 [1], при полном шаге  $k_{\beta} = 1$ .

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы короткозамкнутой обмотки ротора рассчитывается по формуле 9.177 [1, с. 407].

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния  $\lambda_{\text{п2}}$  определяется по формуле, приведенной в таблице 9.27 [1], в зависимости от конфигурации паза сердечника ротора. Для полужакрытого грушевидного паза, рисунок 9.40а [1, с. 380],  $\lambda_{\text{п2}}$  рассчитывается по формуле, соответствующей рисунку 9.52а [1, с. 408]. Для закрытого грушевидного паза, со шлицем и перемычкой над пазом, в этой формуле необходимо добавить слагаемое  $(1,12 \cdot 10^6 h_{\text{ш}} / I_2)$ , где  $h_{\text{ш}}$  - толщина ферромагнитной перемычки над пазом, м;  $I_2$  - фазный ток обмотки ротора, А.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния  $\lambda_{\text{л2}}$  для литой обмотки определяется по формуле 9.178 [1, с. 409].

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния  $\lambda_{\text{д2}}$  определяется по формуле 9.180 [1], где коэффициент  $\xi$  - по формуле 9.181 [1], в которой для полужакрытого паза  $\Delta_z = f(b_{\text{ш2}}/t_{z2}, b_{\text{ш2}}/\delta)$  - по рисунку 9.51а [1, с. 405]. При  $Z_2/p \geq 10$  без заметной погрешности можно принять коэффициент  $\xi=1$ . При закрытых пазах  $\Delta_z \approx 0$ .

Коэффициент проводимости скоса, учитывающий влияние на ЭДС обмотки ротора скоса пазов, определяется по формуле 9.182 [1], в знаменателе которой упущен, к сожалению, множитель  $\delta$ .

Приведенные к числу витков фазы обмотки статора значения сопротивлений фазы короткозамкнутой обмотки ротора  $r'_2$ ,  $x'_2$  рассчитывают умножая  $r_2$ ,  $x_2$  на коэффициент приведения, определяемый по формуле 9.172 [1, с. 406]. Значения параметров двигателя, выраженные в относительных единицах, рассчитывают по формуле 9.168 [1, с. 411], и они находятся, как правило, в пределах:

$$x_1^* = 0,08 \div 0,14; \quad x_2'^* = 0,1 \div 0,16; \quad r_1^* = r_2'^* = 0,02 \div 0,03$$

(за исключением малых двигателей).

## 7 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ

Потери в асинхронном двигателе подразделяют на потери в электротехнической стали (основные и добавочные), электрические, вентиляционные, механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в электротехнической стали рассчитывают только в сердечнике статора по формуле 9.187 [1, с. 412], которую можно упростить, учитывая, что  $f_1 = 50$  Гц.

Потерями в сердечнике ротора, вследствие их малости, пренебрегают. Причина этого – незначительная частота перемагничивания сердечника ротора во всем диапазоне изменения нагрузки на валу, несмотря на довольно-таки близкие значения индукций в зубцах и ярме двух сердечников.

Удельные потери в применяемых марках электротехнической стали толщиной 0,5 мм при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц представлены в таблице 9.28 [1, с. 412]. Для двигателей номинальной мощностью менее 250 кВт приближенно можно принять коэффициенты  $k_{\text{Да}} = 1,6$  и  $k_{\text{Дз}} = 1,8$ , учитывающие увеличение потерь в стали от неравномерности распределения потока по сечениям зубцов, ярма и от технологических факторов.

Добавочные потери в электротехнической стали подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов сердечников статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре) и пульсационные (потери в стали зубцов от пульсации в них индукции).

Поверхностные и пульсационные потери в сердечниках статоров двигателей с короткозамкнутыми роторами обычно малы, т. к. в полузакрытых пазах таких роторов ширина шлица  $b_{\text{Ш}2}$  так мала, что пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов сердечника статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в сердечниках статоров двигателей не проводят.

Поверхностные потери в зубцах сердечника ротора рассчитывают по формуле 9.194 [1, с. 414]. Удельные поверхностные потери – по формуле 9.192 [1, с. 413]. Амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре  $B_{02}$  над коронками зубцов ротора – по формуле 9.190, где  $\beta_{02} = f(b_{\text{Ш}1}/\delta)$  – по рисунку 9.53б [1].

Пульсационные потери в зубцах сердечника ротора рассчитывают по формуле 9.200 [1, с. 414]. Амплитуда пульсации индукции в среднем сечении зубцов  $B_{\text{Пул}2}$  – по формуле 9.196 [1].

Механические потери асинхронных двигателей с внешним обдувом ( $0,1 \leq D_a \leq 0,5\text{м}$ ) рассчитывают по формуле 9.210 [1, с. 416].

## 8 РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости  $P_1$ ,  $I_1$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta$ ,  $s = f(P_2)$  для диапазона изменения  $P_2 = 0 \div 1,2P_{2\text{ном}}$  при  $U_1 = U_{1\text{н}}$ ,  $f_1 = f_{1\text{н}}$ .

Расчет проводится аналитическим методом по системе уравнений токов и напряжений Г-образной схемы замещения, представленной на рисунке 9.55 [1, с. 418]. Формулы для расчета приведены в таблице 9.30 [1, с. 421], где в 15-й нужно использовать квадрат приведенного тока фазы обмотки ротора; по 16-й расчет не проводится, т. к. ротор короткозамкнутый; в 18-й предпоследнее слагаемое принимается равным нулю. При выполнении расчетов задаются 5–6 значениями скольжений примерно через равные интервалы в диапазоне  $s \approx (0,2 \div 1,5)s_{\text{ном}}$ . Предварительное значение номинального скольжения  $s_{\text{ном}}$  берется равным  $r'_{2*}$ .

Если  $|\gamma| \leq 1^\circ$  (как правило, у двигателей номинальной мощностью более 2÷3 кВт), то можно использовать приближенный метод, и  $a'$ ,  $a$ ,  $b'$ ,  $b$  рассчитывают по формуле 9.227,  $c_1$  по формуле 9.223 [1]. При уточненном методе  $a'$ ,  $a$ ,  $b'$ ,  $b$  рассчитывают по формуле 9.228 [1].

Если после окончания расчетов характеристик для 5–6 значений скольжения, в строке таблицы, где записаны значения полезной мощности, отсутствует  $P_{2\text{ном}}$ , то необходимо уточнить  $s_{\text{ном}}$ . Для этого строится зависимость  $s = f(P_2)$ , графически уточняется номинальное скольжение и приводится результат расчета для этого значения, как последний столбец в таблице.

Рабочие характеристики обычно строят в одних осях координат, обязательно выделяя  $P_{2\text{ном}}$ .

## 9 РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Пусковыми характеристиками асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором называют зависимости  $M^* = f(s)$  и  $I^* = f(s)$  для диапазона изменения скольжения, соответствующего двигательному режиму работы асинхронной машины, при  $U_1 = U_{1н}$ ,  $f_1 = f_{1н}$ .

При расчете пусковых характеристик учитывают изменения параметров схемы замещения двигателя, вызванные эффектом вытеснения тока в стержнях обмотки ротора и насыщением зубцовых зон магнитной цепи от полей рассеяния, т. к. в начале пуска токи в обмотках могут превышать свои номинальные значения в  $7 \div 7,5$  раз, таблица 9.31 [1, с. 436].

Для упрощения проводимых расчетов принято:

–индуктивное сопротивление взаимной индукции, возрастающее с уменьшением насыщения магнитопровода, при пуске (для  $s \geq 0,1 \div 0,15$ )

рассчитывается по формуле  $X_{12П} \approx X_{12} \frac{F_{ц}}{F_{\delta}} = k_{\mu} \cdot X_{12}$ ;

–активное сопротивление ветви намагничивания  $r_{12}$  не учитывается, т. к. при токах, заметно превышающих номинальный, электрические потери в обмотках многократно превышают потери в электротехнической стали.

Расчет пусковых характеристик проводится в последовательности, представленной в таблице 9.32 [1, с. 438] (с учетом эффекта вытеснения тока) и в таблице 9.33 [1, с. 440] (с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения магнитопровода от полей рассеяния), для диапазона скольжения  $s = 1 \div s_{кр}$ . В этом диапазоне выбирают пять-шесть значений скольжения примерно через равные интервалы. Предварительное значение критического скольжения рассчитывают по формуле 9.286 [1, с. 439].

При наличии эффекта вытеснения тока активное сопротивление фазы обмотки ротора увеличивается, а индуктивное сопротивление рассеяния фазы уменьшается. Если приведенная высота стержня обмотки ротора, рассчитанная по формуле 9.244 или 9.245 [1],  $\xi \leq 1$ , то эффект вытеснения тока практически не влияет на сопротивления стержней. В тексте рисунка 9.57 [1, с. 428], необходимо ввести поправку и читать:  $\varphi = 0,089 \cdot \xi^4$  при  $\xi < 1$ .

При пуске двигателя поля рассеяния увеличивают насыщение коронок зубцов сердечников статора и ротора. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается и

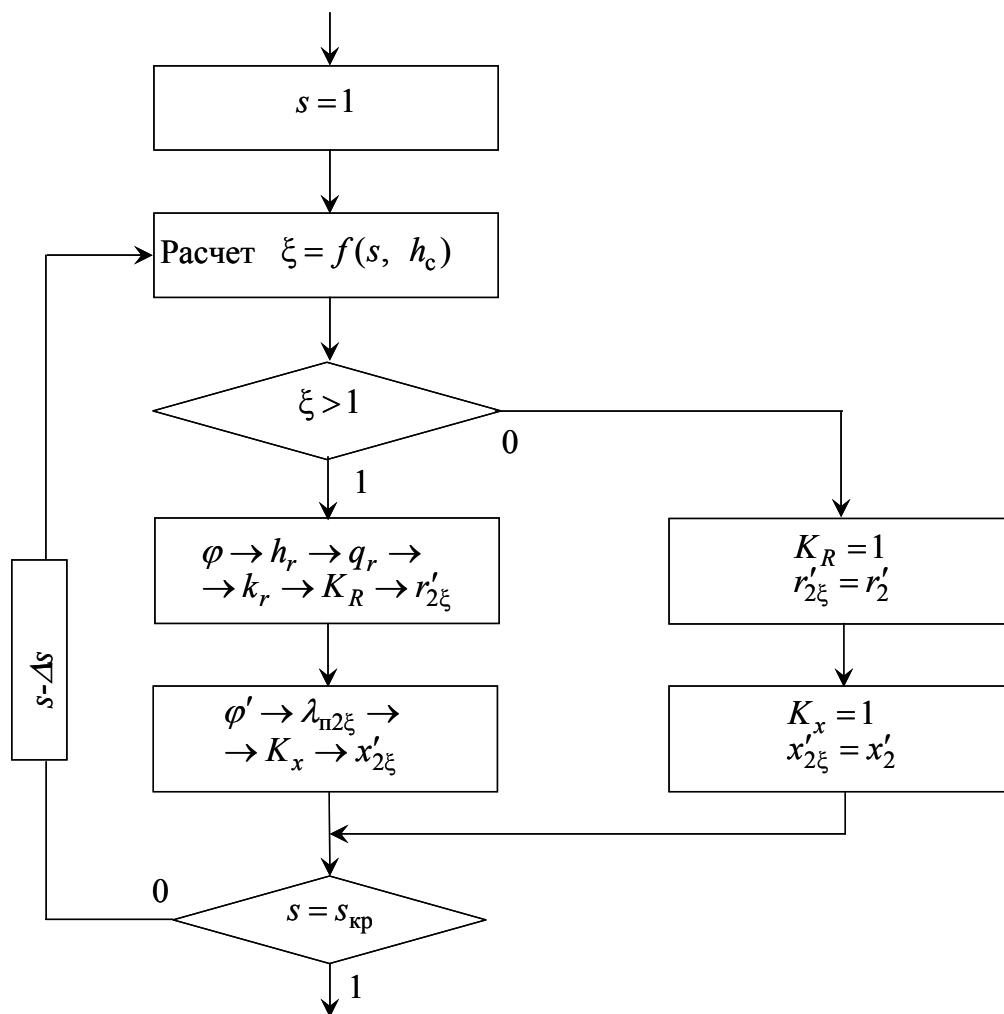


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма расчета пусковых характеристик с учетом эффекта вытеснения тока

несколько снижается магнитная проводимость дифференциального рассеяния. Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния остается неизменным.

После завершения расчета пусковых характеристик уточняют значения  $s_{кр}$  и  $M_{\max*}$ .

Государственные стандарты на асинхронные двигатели устанавливают наименьшие допустимые относительные значения моментов и наибольшее относительное значение пускового тока в зависимости от их номинальной мощности, исполнения по степени защиты и числа полюсов.

Если получено недостаточное значение  $M_{П*}$  при  $s = 1$ , то возможны, в частности, следующие коррективы в ранее выполненных расчетах.



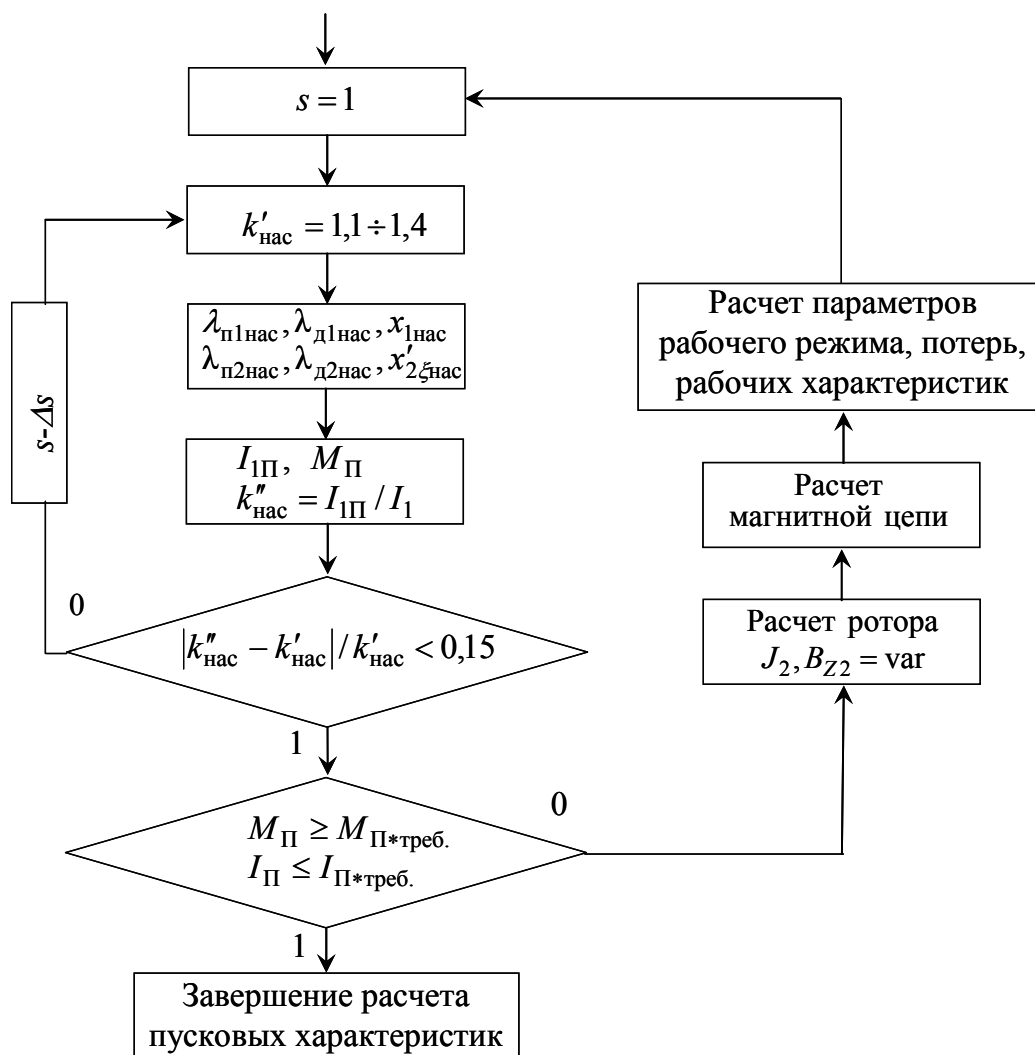


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма расчета пусковых характеристик с учетом насыщения участков путей потоков рассеяния

Во-первых, не изменяя ширины зубца сердечника ротора, увеличить плотность тока в стержне обмотки ротора в рамках диапазона рекомендуемых значений. В результате уменьшатся высота паза ротора и замыкающих колец, уменьшатся сечения стержней и замыкающих колец. Активное сопротивление фазы обмотки ротора возрастет. Вследствие уменьшения высоты паза ротора уменьшится индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора. В итоге возрастет  $M_{П*}$  и уменьшится  $I_{П*}$  при  $s = 1$ . Так как высота зубца сердечника ротора уменьшилась, то произойдет уменьшение коэффициента насыщения зубцовой зоны магнитной цепи  $k_z$ , который нужно обеспечить в рекомендуемом диапазоне.

Во-вторых, увеличить ширину зубца сердечника ротора, если возможно уменьшение  $B_{z2}$  и обеспечивается требование к  $k_z$ . В результате, не корректируя плотность тока в стержне обмотки ротора, остается неизменным сечение стержня, но увеличивается высота паза ротора, если не нарушается требование к размеру  $b_2$  нижней части паза. Действие эффекта вытеснения тока усиливается, в большей мере возрастает активное сопротивление стержня и уменьшается индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора. Это благоприятно скажется на  $M_{\Pi*}$  и  $I_{\Pi*}$ .

В - третьих, увеличить ширину зубца сердечника ротора и плотность тока в обмотке ротора, контролируя  $k_z$ ,  $b_2$ . И тогда эффективность воздействия на  $M_{\Pi*}$  и  $I_{\Pi*}$  будет наибольшей.

## 10 ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТЫ

Для получения достаточно достоверной оценки теплового состояния двигателя используется приближенный метод теплового расчета. Основу этого метода образуют упрощенные представления о характере тепловых связей между элементами конструкции. Поэтому используются средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции, характерные для определенной конструкции и технологии производства асинхронных двигателей.

Расчет нагрева проводят, используя значения потерь, полученных для  $P_2 = P_{2н}$ . Потери в обмотке статора несколько увеличивают, предполагая, что она может быть нагрета до предельно допустимой температуры: при классе нагревостойкости  $B$  до  $120^\circ\text{C}$ , при классе нагревостойкости  $F$  до  $140^\circ\text{C}$ . Коэффициент увеличения потерь  $k_p$  для класса нагревостойкости  $B$  составляет 1,15, для класса нагревостойкости  $F$  – 1,07.

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя рассчитывают по формуле 9.315 [1, с. 449]. Коэффициент теплоотдачи с поверхности, для исполнения  $IP44$ , определяется по рисунку 9.67 [1], где  $\alpha_1 = f(h, D_a, 2p)$ . Коэффициент  $K$ , учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду, принимается по таблице 9.35 [1, с. 450],  $K = f(IP, 2p)$ . Значение коэффициента  $K$  с уменьшением частоты вращения ротора уменьшается, т. к. уменьшается интенсивность наружного обдува станины.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора рассчитывают по формуле 9.316 [1, с. 450]. Расчетный периметр поперечного сечения паза, рисунок 9.29  $a, б$  [1] определяется по формуле 9.317 [1, с. 451], используя размеры паза в штампе. Расчетный периметр поперечного сечения паза, рисунок 9.29  $в$ , определяется тоже по формуле 9.317 [1], но вместо  $b_2$  подставляется значение  $0,5 \cdot \pi \cdot b_2$ . Средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции  $\lambda_{э\text{КВ}}$  для классов нагревостойкости  $B$  и  $F$  одинакова,  $\lambda_{э\text{КВ}} = 0,16 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$ . Среднее значение коэффициента теплопроводности  $\lambda'_{э\text{КВ}}$  внутренней (витковой) изоляции всыпной обмотки из эмалированных проводников (с учетом их неплотного прилегания друг к другу) принимается по рисунку 9.69 [1, с. 453],  $\lambda'_{э\text{КВ}} = f(d/d_{\text{из}})$ .

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей обмотки статора рассчитывают по формуле 9.319 [1, с. 452]. Электрические потери в лобовых частях катушек  $P'_{э,л1}$  рассчитывают по формуле 9.314 [1, с. 449]. Периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки принимается равным расчетному периметру поперечного сечения паза из ранее выполненного расчета по формуле 9.317 [1, с. 451]. При наличии изоляции лобовых частей катушек ее односторонняя толщина принимается по таблице 3.1 [1, с. 77], а при отсутствии – равной нулю.

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя рассчитывается по формуле 9.320 [1, с. 452].

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя рассчитывают по формуле 9.321 [1, с. 452].

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды определяется по формуле 9.322 [1, с. 452] в предположении, что температура корпуса (оболочки) равна температуре воздуха внутри двигателя. Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя  $\Sigma P'_B$ , для степени защиты IP44 определяется по формуле 9.326 [1, с. 453]. Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса  $S_{кор}$  определяется по формуле 9.327 [1, с. 453], а условный периметр поперечного сечения ребер  $\Pi_p$  принимается по рисунку 9.70 [1], где  $\Pi_p = f(h)$ . Коэффициент подогрева воздуха  $\alpha_v$ , учитывающий теплоотдающую способность корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри двигателя, определяется для степени защиты IP44 по рисунку 9.67 [1, с. 450],  $\alpha_v = f(h, D_a, 2p)$ .

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды  $\Delta \vartheta_1$  рассчитывают по формуле 9.328 [1, с. 453]. Из-за приблизительного характера расчета значение  $\Delta \vartheta_1$  должно быть не менее чем на 20 % меньше допускаемого превышения температуры для принятого класса нагревостойкости.

При температуре газообразной охлаждающей среды + 40 °С и высоте над уровнем моря не более 1000 м по ГОСТ 183-74 допускаемое превышение температуры обмотки статора рассчитывают следующим образом. Для класса нагревостойкости изоляции В температурный индекс (ТИ130) равен 130 °С. При этой температуре срок службы изоляционного материала равен 20 тыс. ч. Вычитая из 130 °С температуру охлажда-

ющей среды, получаем допускаемое превышение температуры  $90^{\circ}\text{C}$ , тогда  $\Delta\vartheta_1 \leq 0,8 \cdot 90 = 72^{\circ}\text{C}$ .

Для класса нагревостойкости  $F$  (ТИ155) допускаемое превышение температуры обмотки статора составляет  $115^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\vartheta_1 \leq 0,8 \cdot 115 = 92^{\circ}\text{C}$ .

Вентиляционный расчет двигателя, так же как тепловой, выполняется с использованием приближенного метода. При этом сопоставляются расход воздуха, необходимый для охлаждения двигателя, и расход, который может быть получен при заданной конструкции и окончательных размерах двигателя.

Необходимый расход воздуха рассчитывают по формуле 9.340 [1, с. 456]. Коэффициент  $k_m$ , учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором, определяют по формуле 9.341 [1], где  $m' = f(2p, h)$ .

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, рассчитывают по формуле 9.342 [1]. Он должен быть больше расхода, необходимого для охлаждения двигателя.

## 11 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВАЛА

Вал асинхронного двигателя конструктивного исполнения по способу монтажа *М1001* испытывает одновременно несколько воздействий:

- силы тяжести ротора;
- вращающего момента двигателя;
- изгибающей силы передачи;
- силы магнитного притяжения;
- силы небаланса ротора;
- силы крутильных колебаний.

Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным (выдерживать все действующие на него нагрузки без проявления остаточных деформаций), достаточно жестким (при работе двигателя ротор не должен задевать о сердечник статора), критическая частота вращения вала должна быть значительно больше его рабочих частот вращения.

Материал валов – углеродистые стали, преимущественно марки 45, подвергаемые термической обработке для повышения механических свойств.

Вал двигателя имеет ступенчатую цилиндрическую форму. Предварительные размеры вала определяют при разработке эскиза его конструкции. Минимальное число ступеней вала зависит от количества узлов, деталей машины, размещаемых на нем (короткозамкнутый ротор, подшипники, вентилятор). Самый большой диаметр имеет средняя ступень, на которой размещается сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой. Величина этого диаметра равна внутреннему диаметру сердечника ротора. Две ступени вала для размещения подшипников имеют одинаковый диаметр, который равен ближайшему меньшему, относительно средней ступени, стандартному диаметру внутреннего кольца  $d$ , таблицы П5.1–П5.3 [1, с. 733-737]. Длина ступеней вала для размещения подшипников выбирается в диапазоне  $(1,5 \div 2,0) B$ , где  $B$  – ширина наружного и внутреннего колец подшипника.

При переходе с одного диаметра вала на другой для предупреждения недопустимой концентрации механических напряжений не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3. Обеспечение этого требования может вызвать увеличение числа ступеней вала.

Размеры выступающего конца вала (диаметр и длина) стандартные, таблица 8.1 [1, с. 244]. Диаметр – ближайший меньший относительно диаметра  $d$ . Концы валов предусматриваются двух исполнений – длинные и короткие. В таблице П6.4 [1, с. 740] для длинных выступающих

концов вала указан наибольший момент вращения, что необходимо принять во внимание.

Вал разбивают на три участка:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Получение размеров  $a$ ,  $b$  поясняет нижеприведенный рисунок 5. При расчете вала на жесткость нужно взять за основу систему обозначений, принятую на рисунке 8.14 [1, с. 245], и структуру, аналогичную таблице 8.3 [1, с. 248, 249].

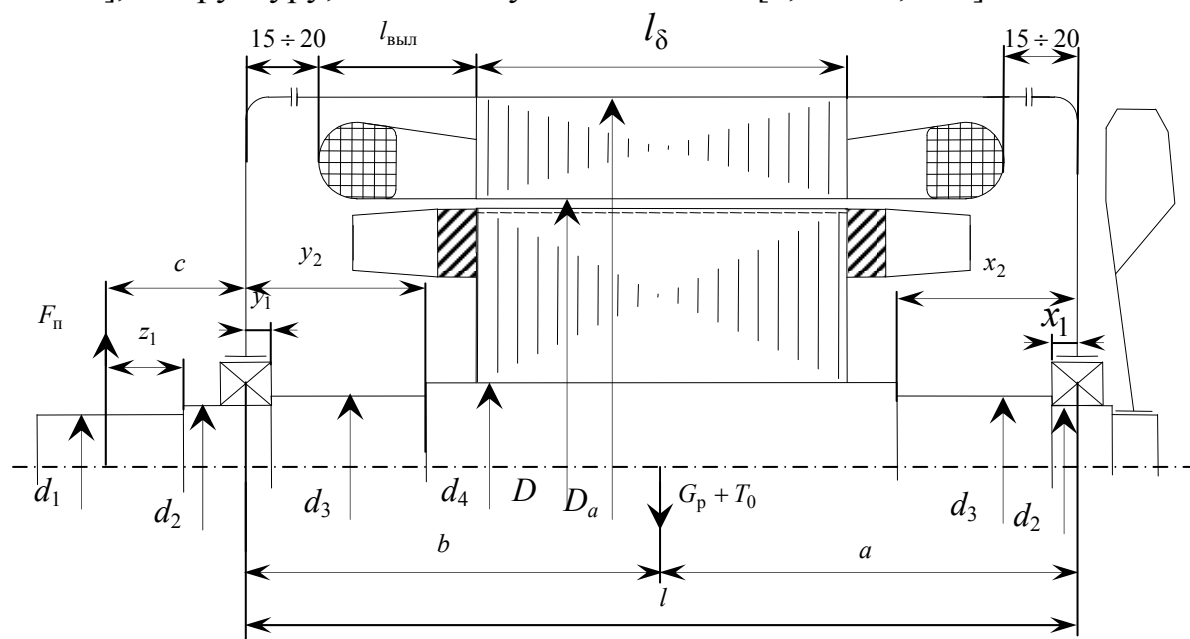


Рисунок 5 – К механическому расчету вала

Прогиб вала  $f_G$  от действия силы тяжести ротора под серединой магнитопровода рассчитывают по формуле 8.15 [1, с. 245].

Прогиб вала  $f_{\Pi}$  от изгибающей силы передачи (поперечной силы  $F_{\Pi}$  рассчитывают по формуле 8.19 [1, с. 246]. При оценке сочленения асинхронного двигателя с исполнительным механизмом через ременную передачу или через упругую муфту понадобится значение  $R$  – радиус окружности шкива или радиус по центрам пальцев муфты [2; приложения 37,38, с. 415, 416].

Прогиб вала от силы одностороннего магнитного притяжения, вызванной смещением ротора из центрального положения относительно внутренней поверхности сердечника статора, рассчитывают по формуле 8.23 [1, с. 247]. Первоначальное смещение ротора происходит от неточной механической обработки, износа подшипников и прогиба вала под действием сил  $G_p$ ,  $F_{\Pi}$  и рассчитывается по формуле 8.21 [1, с. 247]. Эта сила вызывает дополнительный прогиб вала, пропорциональный прогибу от силы тяжести ротора, и рассчитывается по формуле 8.22 [1, с. 247].

Результирующий прогиб вала  $f$  определяется для наихудшего случая, когда три составляющие прогибов суммируются.

В процентах от величины воздушного зазора  $\delta$  результирующий прогиб вала асинхронного двигателя не должен превышать 10 % для всех способов сочленения с исполнительным механизмом.

При критической частоте вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту равную частоте собственных поперечных колебаний вала. Наступает явление резонанса, при котором резко увеличиваются прогиб вала и вибрация двигателя. Приблизительное значение критической частоты вращения рассчитывают по формуле 8.25 [1, с. 248], которое должно отличаться от рабочей частоты не менее чем на 30 %.

Расчет вала на прочность заключается в определении механических напряжений  $\sigma_{\text{ПР}}$  в сечении каждой его ступени от совместного действия напряжений изгиба и кручения. Для этого определяют по формулам 8.31 – 8.33 для каждой ступени изгибающий момент с учетом перегрузки  $M_{\text{И}}$  и момент сопротивления при изгибе  $W$  по формуле 8.30 [1]. Коэффициент перегрузки  $k$  принимается равным  $M_{\text{max}*}$  из результатов расчета пусковых характеристик. Расчетное значение  $\sigma_{\text{ПР}}$  не должно превышать 0,7 предела текучести  $\sigma_{\text{T}}$  материала вала. Для стали 45  $\sigma_{\text{T}} = 360$  МПа.



## 12 ВЫБОР ПОДШИПНИКОВ

По конструктивным признакам подшипники подразделяют на подшипники качения (роликовые и шариковые) и подшипники скольжения.

В двигателях с горизонтальным расположением вала в основном применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Роликоподшипники применяют для больших нагрузок, чем это допустимо для шарикоподшипников.

В двигателях небольшой мощности при  $h \leq 200$  мм чаще всего оба подшипника выбираются шариковыми. У двигателей средней и большой мощности подшипник со стороны привода, воспринимающий большую нагрузку, выбирается роликовым, а с противоположной стороны – шариковым.

В общем случае на подшипник действуют радиальная и осевая нагрузки. Для двигателей с горизонтальным расположением вала в большинстве случаев можно не учитывать осевую нагрузку. При определении радиальной нагрузки на подшипники исходят из наихудшего случая и рассчитывают  $R_B$  и  $R_A$  по формулам 8.36, 8.37 [1, с. 257].

Основной характеристикой подшипника является динамическая грузоподъемность  $C$ , рассчитываемая по формуле 8.38 для шарикоподшипников, по формуле 8.38а для роликоподшипников. Приведенная динамическая нагрузка для однорядных шарикоподшипников определяется по формуле 8.35а [1, с. 256], с учетом коэффициента  $K_H$  - характера нагрузки. Для двигателей общего назначения в большинстве случаев  $K_H = 1,5 \div 2,0$ . Срок службы подшипника, если не задан, выбирают не менее  $(15 \div 20) \cdot 10^3$  ч.

По расчетной динамической грузоподъемности  $C$ , таблицы П5.1–П5.3 [1, с. 733-737], выбирают подшипник и его габаритные размеры. Расчетное значение  $C$  должно быть меньшим или равным табличному значению. Если расчетное значение  $C$  получилось больше табличного, а срок службы нельзя уменьшить, то следует выбрать подшипник из другой, соответствующей заданным параметрам серии. Выбор подшипников рекомендуется производить, начиная с легкой серии.

## 13 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### Выбор главных размеров

- 1 Перечислите главные размеры асинхронного двигателя.
- 2 Как принимается предварительное значение внешнего диаметра сердечника статора?
- 3 Что такое «высота оси вращения» асинхронного двигателя?
- 4 Как принимается предварительное значение внутреннего диаметра сердечника статора?
- 5 Что такое «полюсное деление»?
- 6 Что такое «расчетная мощность»?
- 7 Что характеризует коэффициент  $k_E$ ?
- 8 Что называют энергетическими показателями асинхронного двигателя?
- 9 От чего зависят предварительные значения энергетических показателей?
- 10 Поясните, что такое «электромагнитные нагрузки» и назовите их размерности.
- 11 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться при выборе предварительного значения каждой электромагнитной нагрузки.
- 12 От чего зависят рекомендуемые диапазоны электромагнитных нагрузок?
- 13 Когда обмотка статора выбирается однослойной?
- 14 Перечислите преимущества и недостатки однослойных обмоток.
- 15 Когда обмотка статора выбирается двухслойной?
- 16 Перечислите преимущества и недостатки двухслойных обмоток.
- 17 Как принимается предварительное значение обмоточного коэффициента обмотки статора?
- 18 Как зависит обмоточный коэффициент обмотки статора от числа ее слоев?
- 19 От чего зависит предварительная длина сердечника статора?
- 20 Как зависит длина сердечника статора от расчетной мощности двигателя?
- 21 Как зависит длина сердечника статора от внутреннего диаметра сердечника статора?
- 22 Как зависит длина сердечника статора от обмоточного коэффициента его обмотки?
- 23 Как зависит длина сердечника статора от электромагнитных нагрузок?

- 24 Как зависит длина сердечника статора от синхронной угловой частоты ротора двигателя?
- 25 От чего зависит синхронная угловая частота двигателя?
- 26 Что учитывает коэффициент формы поля  $k_B$ ?
- 27 Как проверяется правильность выбора главных размеров двигателя?
- 28 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться при уменьшении значения критерия правильности выбора главных размеров двигателя.
- 29 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться при увеличении значения критерия правильности выбора главных размеров двигателя.
- 30 Какие факторы накладывают ограничение на коэффициент  $\lambda$ ?
- 31 Поясните конструкцию сердечника статора.
- 32 Для чего сердечник статора выполняется шихтованным?

### **Определение $Z_1$ , $w_1$ и выбор провода обмотки статора**

- 1 Какие факторы обуславливают выбор числа пазов статора?
- 2 От чего зависит диапазон рекомендуемого значения зубцового деления сердечника статора всыпной обмотки?
- 3 От чего зависит диапазон рекомендуемых значений числа пазов сердечника статора?
- 4 Какими соображениями руководствуются при выборе окончательного числа пазов сердечника статора?
- 5 Что такое «число пазов на полюс и фазу»?
- 6 Перечислите требования, предъявляемые к окончательному значению зубцового деления сердечника статора.
- 7 Поясните, что такое параллельная ветвь обмотки статора?
- 8 Какие значения числа параллельных ветвей возможны в выбранной обмотке статора?
- 9 Что такое «эффективный проводник»?
- 10 Каким должно быть окончательное число эффективных проводников в пазу двухслойной обмотки?
- 11 Каким должно быть окончательное число эффективных проводников в пазу однослойной обмотки?
- 12 От чего зависит предварительное значение номинального тока фазы обмотки статора?
- 13 От чего зависит число витков фазы обмотки статора?
- 14 От чего зависит амплитуда основного магнитного потока?

- 15 От чего зависит уточненное значение индукции в воздушном зазоре?
- 16 Что такое «распределенная обмотка статора»?
- 17 Почему обмотка статора выполняется распределенной?
- 18 С какой целью выполняют укорочение шага обмотки?
- 19 Что такое «шаг обмотки» (полный, укороченный)?
- 20 Что такое «относительный шаг» обмотки  $\beta$ ?
- 21 Назовите физический смысл обмоточного коэффициента обмотки статора.
- 22 Назовите физический смысл коэффициента распределения обмотки статора.
- 23 Назовите физический смысл коэффициента укорочения обмотки статора.
- 24 Назовите причины необходимости уточнения обмоточного коэффициента обмотки статора.
- 25 Перечислите требования, предъявляемые к уточненным значениям электромагнитных нагрузок.
- 26 Поясните возможные действия, если значение линейной нагрузки не входит в требуемый диапазон значений.
- 27 От чего зависит предварительное значение плотности тока в обмотке статора?
- 28 Какими соображениями руководствуются при выборе предварительного значения произведения  $AJ_1$  из рекомендуемого диапазона?
- 29 От чего зависит предварительная площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки статора?
- 30 Назовите предельное значение диаметра изолированного провода при механизированной укладке обмотки.
- 31 Назовите предельное значение диаметра изолированного провода при ручной укладке обмотки.
- 32 Назовите причину формирования сечения эффективного проводника из нескольких элементарных проводников.
- 33 Назовите предельное значение числа элементарных проводников в одном эффективном.
- 34 Назовите возможную причину увеличения предварительного значения числа параллельных ветвей обмотки статора, появившуюся при выборе провода.
- 35 Назовите марку выбранного обмоточного провода и дайте необходимые пояснения.
- 36 Назовите класс нагревостойкости выбранного обмоточного провода и поясните, что означает его температурный индекс?

- 37 Назовите причину уточнения плотности тока обмотки статора.
- 38 Назовите последствия увеличения (уменьшения) уточненной плотности тока обмотки статора.

### **Расчет размеров зубцовой зоны сердечника статора**

- 1 Поясните возможные конфигурации полузакрытых пазов сердечника статора для укладки насыпных обмоток.
- 2 Почему необходимо обеспечивать параллельность боковых граней зубцов сердечника статора?
- 3 От чего зависят рекомендуемые диапазоны индукции в зубцах  $B_{Z1}$  и ярме  $B_a$  сердечника статора?
- 4 От чего зависит марка электротехнической стали рекомендуемая для изготовления сердечника статора?
- 5 Охарактеризуйте марку электротехнической стали, примененную для спроектированного двигателя.
- 6 Зачем и как изолируют листы электротехнической стали сердечников асинхронных двигателей?
- 7 Что такое «коэффициент заполнения сталью сердечника»?
- 8 От чего зависит ширина зубца сердечника статора?
- 9 От чего зависит высота ярма сердечника статора?
- 10 Какими соображениями руководствуются, принимая значение ширины шлица паза сердечника статора?
- 11 Какими соображениями руководствуются, принимая значение высоты шлица паза сердечника статора?
- 12 От чего зависит высота паза сердечника статора?
- 13 Поясните, что такое размеры паза сердечника статора в штампе?
- 14 Поясните, что такое размеры паза сердечника статора в свету?
- 15 Почему размеры паза сердечника статора в штампе больше, чем в свету?
- 16 Зачем и как проверяется параллельность боковых граней зубца сердечника статора?
- 17 Какое значение ширины зубца берется для дальнейших расчетов, если результат проверки непараллельности боковых граней зубца сердечника статора не превышает предельного значения?
- 18 Какое значение ширины зубца берется для дальнейших расчетов, если результат проверки непараллельности боковых граней зубца сердечника статора превышает предельное значение?
- 19 Назовите материал пазовой изоляции и класс его нагревостойкости.

20 От чего зависит площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки?

21 От чего зависит коэффициент заполнения паза?

22 Что оценивает значение коэффициента заполнения паза?

23 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться при недопустимо малом коэффициенте заполнения паза.

24 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться при недопустимо большом коэффициенте заполнения паза.

25 Когда при уменьшении площади паза, отводимой для размещения проводников обмотки, делается вывод, что главные размеры двигателя завышены?

26 Почему при завышенных главных размерах двигателя электротехническая сталь сердечника статора будет недоиспользована?

27 Когда при увеличении площади паза, отводимой для размещения проводников обмотки, делается вывод, что главные размеры двигателя занижены?

28 Почему при заниженных главных размерах двигателя электротехническая сталь сердечника статора недопустимо загружена?

### **Выбор воздушного зазора и расчет ротора**

1 Как влияет величина воздушного зазора на  $\cos \varphi$  двигателя?

2 Как влияет величина воздушного зазора на  $\eta$  двигателя?

3 От чего зависит величина воздушного зазора?

4 От чего зависит число пазов сердечника ротора?

5 Поясните, что такое скос пазов сердечника ротора и для чего он выполняется?

6 Поясните, что такое конструктивная длина сердечника?

7 Какой выбирается длина сердечника ротора?

8 От чего зависит внешний диаметр ротора?

9 От чего зависит внутренний диаметр сердечника ротора при непосредственной посадке на вал?

10 Как крепится на валу сердечник ротора?

11 От чего зависит предварительное значение тока в стержне короткозамкнутой обмотки ротора?

12 От чего зависит значение тока в кольце короткозамкнутой обмотки ротора?

13 От чего зависит значение коэффициента приведения токов для двигателя с короткозамкнутым ротором?

14 Назовите число фаз короткозамкнутой обмотки ротора.

15 Назовите число витков фазы короткозамкнутой обмотки ротора.

16 Поясните физический смысл коэффициента скоса пазов сердечника ротора.

17 От чего зависит коэффициент скоса пазов сердечника ротора?

18 От чего зависит предварительное значение площади поперечного сечения стержня обмотки ротора?

19 Назовите диапазон рекомендуемых значений плотности тока в стержнях литой обмотки ротора для исполнения двигателя по степени защиты *IP44*.

20 Изложите соображения, которыми руководствуются при выборе предварительного значения плотности тока в стержне обмотки ротора.

21 Поясните конфигурации пазов сердечников роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутой литой обмоткой.

22 Почему необходимо обеспечивать параллельность боковых граней зубцов сердечника ротора?

23 От чего зависят рекомендуемые диапазоны индукций в зубцах  $B_{z2}$  и ярме  $B_J$  сердечника ротора?

24 От чего зависит выбор конфигурации паза сердечника ротора?

25 От чего зависит предварительное значение ширины зубца сердечника ротора?

26 Как гарантируется выполнение условия высококачественной заливки пазов алюминием?

27 Зачем и как проверяется параллельность боковых граней зубца сердечника ротора?

28 Какое значение ширины зубца берется для дальнейших расчетов, если непараллельность боковых граней зубца сердечника ротора не превышает 0,5 мм?

29 Какое значение ширины зубца берется для дальнейших расчетов, если непараллельность боковых граней зубца сердечника ротора превысила 0,5 мм?

30 Назовите форму поперечного сечения короткозамыкающего кольца литой обмотки ротора.

31 Как расположено поперечное сечение короткозамыкающего кольца литой обмотки относительно торца сердечника ротора?

32 Почему рекомендуется меньшее значение плотности тока в короткозамыкающем кольце, чем в стержне?

33 От чего зависит высота короткозамыкающего кольца?

34 От чего зависит средний диаметр короткозамыкающих колец?

## Расчет магнитной цепи

- 1 Для чего рассчитывают магнитную цепь двигателя?
- 2 Почему магнитную цепь асинхронного двигателя рассчитывают для режима холостого хода?
- 3 Перечислите участки магнитной цепи асинхронного двигателя.
- 4 Почему магнитная цепь асинхронного двигателя разделяется на участки?
- 5 От чего зависит магнитное напряжение воздушного зазора?
- 6 Когда учитывается наличие зубцов у сердечников статора и ротора при расчете магнитного напряжения воздушного зазора?
- 7 Почему при расчете магнитной цепи используют разные кривые намагничивания для зубцов и ярм?
- 8 От чего зависит магнитное напряжение участка магнитной цепи двигателя?
- 9 Как рассчитывается магнитное напряжение зубцовой зоны при непараллельных гранях зубцов?
- 10 От чего зависит индукция в участках магнитной цепи двигателя?
- 11 Почему при индукции свыше 1,8 Тл в зубце сердечника статора необходимо найти действительную индукцию?
- 12 От чего зависит значение коэффициента  $k_{\text{пх}}$ ?
- 13 У каких асинхронных двигателей необходимо учесть, что часть магнитного потока замыкается через вал?
- 14 От чего зависит коэффициент насыщения зубцовой зоны магнитной цепи?
- 15 Перечислите возможные причины чрезмерного насыщения зубцовой зоны магнитной цепи.
- 16 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться при устранении чрезмерного насыщения зубцовой зоны магнитной цепи.
- 17 Перечислите возможные причины недоиспользования зубцовой зоны магнитной цепи.
- 18 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться при устранении недоиспользования зубцовой зоны магнитной цепи.
- 19 От чего зависит коэффициент насыщения магнитной цепи?
- 20 Как повлияет увеличение (уменьшение) коэффициента насыщения магнитной цепи на энергетические показатели двигателя?
- 21 Почему устанавливается диапазон для намагничивающего тока в относительных единицах?
- 22 Поясните действия, необходимые для увеличения (уменьшения) намагничивающего тока.



23 Каким образом и почему влияет величина воздушного зазора на значение намагничивающего тока?

### Параметры рабочего режима

1 Изобразите любую схему замещения асинхронного двигателя и дайте необходимые пояснения.

2 Для чего приводят сопротивления обмотки ротора к сопротивлениям обмотки статора?

3 Сколько фаз у приведенной короткозамкнутой обмотки ротора?

4 От чего зависит активное сопротивление фазы обмотки статора?

5 Назовите расчетную температуру, при которой определяют активное сопротивление фазы обмотки статора, для классов нагревостойкости изоляционных материалов  $B$ ,  $F$ .

6 Почему не учитывают эффект вытеснения тока во вспянных обмотках статора при расчете активного сопротивления фазы?

7 От чего зависит общая длина эффективных проводников фазы обмотки статора?

8 От чего зависит средняя длина витка обмотки статора?

9 От чего зависит длина пазовой части катушки обмотки статора?

10 От чего зависит длина лобовой части катушки обмотки статора?

11 Поясните, что такое вылет лобовой части обмотки статора?

12 От чего зависит вылет лобовой части обмотки статора?

13 От чего зависит средняя ширина катушки обмотки статора?

14 Как рассчитывают сопротивления схемы замещения в относительных единицах?

15 Какие участки короткозамкнутой обмотки ротора принимают за фазу?

16 От чего зависит активное сопротивление фазы короткозамкнутой обмотки ротора?

17 От чего зависит активное сопротивление стержня короткозамкнутой обмотки ротора?

18 Почему не учитывают эффект вытеснения тока в стержне при расчете активного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора для рабочего режима?

19 От чего зависит активное сопротивление участка короткозамыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями?

20 Почему не учитывают эффект вытеснения тока в короткозамыкающем кольце обмотки ротора для рабочего режима?

21 Чем обусловлено индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора?

22 Укажите пути потоков пазового, лобового, дифференциального рассеяния.

23 От чего зависит индуктивное сопротивление рассеяния фазы выпн-ной обмотки статора?

24 От чего зависит коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния выпннй обмотки статора?

25 От чего зависит коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния выпннй обмотки статора?

26 От чего зависит коэффициент магнитной проводимости дифферен-циального рассеяния выпннй обмотки статора?

27 Какие показатели двигателя и как зависят от параметров схемы за-мещения?

28 От чего зависит индуктивное сопротивление рассеяния фазы корот-козамкнутой обмотки ротора?

29 Какая проводимость рассеяния изменится, если паз ротора будет закрытым?

30 От чего зависит коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора?

31 От чего зависит коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора?

32 От чего зависит коэффициент магнитной проводимости дифферен-циального рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора?

33 От чего зависит коэффициент магнитной проводимости ско-роткозамкнутой обмотки ротора?

34 На какие параметры схемы замещения и как оказывает влияние у-корочение шага обмотки статора?

35 Укажите пределы в относительных единицах активных и индук-тивных сопротивлений фаз обмоток двигателя.

### **Расчет потерь**

1 Чем вызываются основные потери в двигателе?

2 Перечислите основные потери в асинхронном двигателе.

3 Перечислите добавочные потери в асинхронном двигателе.

4 Почему возникают потери в электротехнической стали сердечника статора?

5 От чего зависят потери в электротехнической стали сердечника ста-тора?

6 Что такое удельные потери в электротехнической стали?

7 Назовите величину частоты перемагничивания электротехнической стали сердечника статора.

- 8 Почему пренебрегают основными потерями в сердечнике ротора?
- 9 Какие потери в электротехнической стали двигателя называют добавочными и чем они вызваны?
- 10 Почему поверхностные и пульсационные потери рассчитывают только в сердечнике ротора?
- 11 Как влияет величина воздушного зазора на поверхностные и пульсационные потери в зубцах сердечника ротора?
- 12 От чего зависит амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре?
- 13 Почему просходит пульсация индукции магнитного потока в воздушном зазоре двигателя
- 14 Почему уменьшение воздушного зазора приводит к увеличению поверхностных и пульсационных потерь в зубцах сердечника ротора?
- 15 Как зависит амплитуда пульсаций индукции магнитного потока в воздушном зазоре от ширины шлицов зубцов статора и ротора?
- 16 От чего зависят удельные поверхностные потери в электротехнической стали зубцов сердечника ротора?
- 17 От чего зависит частота пульсаций индукции в воздушном зазоре?
- 18 От чего зависят поверхностные потери в электротехнической стали зубцов сердечника ротора?
- 19 От чего зависят пульсационные потери в электротехнической стали зубцов сердечника ротора?
- 20 От чего зависит амплитуда пульсаций индукции в зубцах сердечника ротора?
- 21 От чего зависят механические потери двигателя?
- 22 Перечислите составляющие механических потерь двигателей с внешним обдувом.
- 23 Как определяют величину средних расчетных добавочных потерь в асинхронном двигателе при нагрузке?

### **Расчет рабочих характеристик**

- 1 Какие зависимости называют рабочими характеристиками асинхронного двигателя?
- 2 Назовите диапазон скольжений используемый при расчете рабочих характеристик аналитическим методом.
- 3 От чего зависит величина сопротивления  $r_{12}$  схемы замещения асинхронного двигателя?
- 4 Какие потери в асинхронном двигателе относят к постоянным, переменным?

5 Изобразите зависимость  $P_1 = f(P_2)$ , перечислите условия, которым она соответствует, объясните ее поведение.

6 Изобразите зависимость  $I_1 = f(P_2)$ , перечислите условия, которым она соответствует, объясните ее поведение.

7 От чего зависят активная и реактивная составляющие тока холостого хода?

8 Изобразите зависимость  $\cos \varphi = f(P_2)$ , перечислите условия, которым она соответствует, объясните ее поведение.

9 Почему  $\cos \varphi$  на холостом ходу не равен нулю?

10 Изобразите зависимость  $\eta = f(P_2)$ , перечислите условия, которым она соответствует, объясните ее поведение.

11 Перечислите составляющие активной мощности, потребляемой на холостом ходу.

12 Изобразите зависимость  $s = f(P_2)$ , перечислите условия, которым она соответствует, объясните ее поведение.

13 Что такое номинальные значения рабочих характеристик?

### **Расчет пусковых характеристик**

1 Назовите пусковые характеристики и условия при которых их рассчитывают.

2 Назовите диапазон скольжений, используемый при расчете пусковых характеристик, и значение скольжения в первый момент пуска.

3 Почему и как при пуске асинхронного двигателя изменяется индуктивное сопротивление взаимной индукции?

4 Почему при расчете пусковых характеристик пренебрегают активным сопротивлением ветви намагничивания  $r_{12}$ ?

5 Где и почему может происходить эффект вытеснения тока при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?

6 Где и почему происходит изменение насыщения магнитопровода при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?

7 Почему приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора в первое мгновение пуска самое большое, а затем начинает уменьшаться до величины  $r'_2$ ?

8 Почему только активное сопротивление стержня как одно из слагаемых активного сопротивления фазы обмотки ротора изменяется при пуске?

9 Почему приведенное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора в первое мгновение пуска самое малое, а затем начинает увеличиваться до  $x'_2$ ?

10 Для чего используется введение дополнительного раскрытия пазов сердечников статора и ротора?

11 Почему индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора в первое мгновение пуска самое малое, а затем начинает увеличиваться до  $x_1$ ?

12 Почему не все коэффициенты магнитных проводимостей рассеяний фаз обмоток статора и ротора изменяются при пуске?

13 К чему приводит эффект вытеснения тока в короткозамкнутой обмотке ротора, какое влияние он оказывает на пусковые момент и ток двигателя?

14 Какие параметры асинхронного двигателя и каким образом изменяются в процессе пуска?

15 Как оцениваются пусковые характеристики асинхронного двигателя?

16 Что такое перегрузочная способность двигателя и критическое скольжение?

17 Поясните соображения при выходе из ситуации, когда не обеспечена кратность начального пускового вращающего момента  $M_{п*}$ .

18 Поясните соображения при выходе из ситуации, когда не обеспечена кратность начального пускового тока  $I_{п*}$ .

19 Изобразите зависимость  $M_* = f(s)$  и дайте необходимые пояснения.

20 Изобразите зависимость  $I_* = f(s)$  и дайте необходимые пояснения.

21 Почему токи ротора и статора в первое мгновение пуска имеют наибольшее значение?

### **Тепловой и вентиляционный расчеты**

1 Для чего и при какой нагрузке проводится тепловой расчет двигателя?

2 Назовите источники тепловыделения в асинхронном двигателе, способы передачи тепла и пути его распространения.

3 С какой целью станина выполняется с оребренной поверхностью?

4 От чего зависит превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины?

5 От чего зависит перепад температуры в изоляции обмотки статора?

6 От чего зависит превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины?

7 Поясните исполнение по способу охлаждения *ISO141*.

8 От чего зависит среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины?

9 От чего зависит превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды?

10 От чего зависит среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды?

11 Обоснуйте предельную величину допускаемого среднего превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды.

12 Изложите соображения, которыми целесообразно руководствоваться, если превышена предельная величина допускаемого среднего превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды.

13 Для чего проводится вентиляционный расчет двигателя?

14 От чего зависит требуемый расход воздуха для двигателя со степенью защиты *IP44*?

15 От чего зависит расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором?

16 Почему в задачу теплового расчета не входит определение превышения температуры обмотки ротора над температурой окружающей среды?

### **Механический расчет вала и выбор подшипников**

1 Перечислите воздействия, которые одновременно испытывает вал двигателя конструктивного исполнения по способу монтажа *IM1001*.

2 Что такое «правильно сконструированный» вал?

3 Какую форму имеет вал?

4 От чего зависит число ступеней вала?

5 Как выбирают самый большой диаметр вала?

6 Как выбирают диаметры ступеней вала для размещения подшипников?

7 Как выбирают размеры выступающего конца вала?

8 Почему ограничивают соотношение диаметров соседних ступеней вала?

9 От чего зависит длина вала между серединами подшипников?

10 От чего зависит длина ступени вала для размещения подшипника?

11 Как оценивается жесткость вала?

12 Что такое «критическая» частота вращения вала?

13 Каким должно быть соотношение рабочей и критической частот вращения вала?

14 От чего зависит результирующий прогиб вала?

15 Что такое «установившийся» прогиб вала под действием силы магнитного напряжения?

16 Как оценивается прочность вала?

17 Назовите предел текучести для стали марки 45.

18 Что необходимо учесть при выборе подшипника?

19 Как называют основную характеристику подшипника?

20 Какую величину срока службы подшипника необходимо обеспечить?

21 Что необходимо предпринять, если расчетное значение динамической грузоподъемности подшипника больше табличного?

# 14 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором

Таблица

№ пп	$P_{2н}$ кВт	$2p$	$h$ мм	№пп	$P_{2н}$ кВт	$2p$	$h$ мм
1	0,09	2	50	36	24	2	180
2	0,12	2	50	37	26	2	180
3	0,18	2	56	38	28	2	180
4	0,25	2	56	39	30	2	180
5	0,37	2	63	40	32	2	180
6	0,55	2	63	41	34	2	180
7	0,75	2	71	42	36	2	200
8	1,0	2	71	43	37	2	200
9	1,1	2	71	44	39	2	200
10	1,5	2	80	45	41	2	200
11	1,8	2	80	46	43	2	200
12	2,0	2	80	47	45	2	200
13	2,2	2	80	48	48	2	250
14	2,7	2	90	49	50	2	250
15	3,0	2	90	50	52	2	250
16	3,5	2	90	51	54	2	250
17	4,0	2	100	52	55	2	250
18	5,0	2	100	53	75	2	250
19	5,5	2	100	54	80	2	250
20	6,0	2	112	55	85	2	250
21	7,0	2	112	56	90	2	250
22	7,5	2	112	57	0,06	4	50
23	8,0	2	112	58	0,09	4	50
24	10	2	132	59	0,12	4	56
25	11	2	132	60	0,18	4	56
26	12	2	132	61	0,25	4	63
27	13,0	2	160	62	0,37	4	63
28	14,0	2	160	63	0,55	4	71
29	15,0	2	160	64	0,75	4	71
30	16	2	160	65	0,8	4	71
31	17	2	160	66	1,0	4	80
32	18,5	2	160	67	1,1	4	80
33	20	2	180	68	1,3	4	80
34	21	2	180	69	1,4	4	80
35	22	2	180	70	1,5	4	80



Продолжение табл.

№ пп	$P_{2H}$ кВт	$2p$	$h$ мм	№пп	$P_{2H}$ кВт	$2p$	$h$ мм
71	2,0	4	90	105	23	4	180
72	2,2	4	90	106	24	4	180
73	2,4	4	90	107	26	4	180
74	2,6	4	90	108	28	4	180
75	2,8	4	90	109	30	4	180
76	2,9	4	100	110	32	4	200
77	3,0	4	100	111	34	4	200
78	3,2	4	100	112	36	4	200
79	3,4	4	100	113	37	4	200
80	3,5	4	100	114	40	4	200
81	3,8	4	100	115	42	4	200
81	4,0	4	100	116	45	4	200
82	5,2	4	112	117	48	4	225
83	5,5	4	112	118	50	4	225
84	6,0	4	112	119	52	4	225
85	6,5	4	132	120	55	4	225
86	6,8	4	132	121	60	4	250
87	7,0	4	132	122	64	4	250
88	7,5	4	132	123	68	4	250
89	8,0	4	132	124	70	4	250
90	9,0	4	132	125	72	4	250
91	10	4	132	126	75	4	250
92	11	4	132	127	90	4	250
93	12	4	132	128	0,18	6	63
94	13	4	132	129	0,25	6	63
95	14	4	132	130	0,37	6	71
96	15	4	132	131	0,55	6	71
97	15	4	160	132	0,75	6	80
98	16	4	160	133	1,0	6	80
99	17	4	160	134	1,1	6	80
100	18	4	160	135	1,3	6	90
101	18,5	4	160	136	1,4	6	90
102	20	4	160	137	1,5	6	90
103	21	4	180	138	1,7	6	100
104	22	4	180	139	1,9	6	100

Продолжение табл.

№ пп	$P_{2H}$ кВт	$2p$	$h$ мм	№пп	$P_{2H}$ кВт	$2p$	$h$ мм
140	2,0	6	100	175	17	6	180
141	2,2	6	100	176	18,5	6	180
142	2,4	6	112	177	19	6	200
143	2,6	6	112	178	20	6	200
144	2,8	6	112	179	21	6	200
145	3,0	6	112	180	22	6	200
146	3,2	6	112	181	24	6	200
147	3,6	6	112	182	26	6	200
148	3,8	6	112	183	28	6	200
149	4,0	6	112	184	30	6	200
150	4,2	6	132	185	32	6	225
151	4,6	6	132	186	34	6	225
152	4,8	6	132	187	36	6	225
153	5	6	132	188	37	6	225
154	5,2	6	132	189	38	6	250
155	5,5	6	132	190	39	6	250
156	5,7	6	132	191	40	6	250
157	5,9	6	132	192	41	6	250
158	6,1	6	132	193	42	6	250
159	6,5	6	132	194	43	44	250
160	6,8	6	132	195	44	6	250
161	7,1	6	132	196	45	6	250
162	7,3	6	132	197	46	6	250
163	7,5	6	132	198	47	6	250
164	8,1	6	132	199	48	6	250
165	9,0	6	161	200	49	6	250
166	9,5	6	160	201	50	6	250
167	10	6	160	202	51	6	250
168	10,5	6	160	203	52	6	250
169	11	6	160	204	53	6	250
170	12	6	160	205	54	6	250
171	13	6	160	206	55	6	250
172	14	6	160	207	0,25	8	71
173	15	6	160	208	0,37	8	80
174	16	6	180	209	0,55	8	80

Продолжение табл.

№ пп	$P_{2н}$ кВт	$2p$	$h$ мм	№ пп	$P_{2н}$ кВт	$2p$	$h$ мм
210	0,75	8	90	236	14	8	180
211	0,95	8	90	237	15	8	180
212	1,1	8	90	238	16	8	180
213	1,3	8	100	239	17	8	180
214	1,4	8	100	240	18,5	8	200
215	1,5	8	100	241	20	8	200
216	1,8	8	100	242	21	8	200
217	2,0	8	100	243	22	8	200
218	2,2	8	112	244	23	8	225
219	2,4	8	112	245	24	8	225
220	2,5	8	112	246	25	8	225
221	2,7	8	112	247	26	8	225
222	3,0	8	112	248	27	8	225
223	3,2	8	112	249	28	8	225
224	3,4	8	112	250	29	8	225
225	3,5	8	112	251	30	8	225
226	4,0	8	132	252	32	8	250
227	4,5	8	132	253	34	8	250
228	5,0	8	132	254	35	8	250
229	7,5	8	160	255	36	8	250
230	8,0	8	160	256	37	8	250
231	9,0	8	160	257	40	8	250
232	10	8	160	258	45	8	250
233	11	8	160	259	48	8	250
234	12	8	180	260	55	8	250
235	13	8	180				

$P_{2н}$  – номинальная мощность, кВт;

$2p$  – число полюсов обмотки статора;

$h$  – высота оси вращения, мм;

$IP44$  – степень защиты;

$IM1001$  – конструктивное исполнение;

$IC0141$  – система охлаждения;

$U = 220/380$  – номинальное напряжение, В;

$m = 3$  – число фаз обмотки статора;

$f = 50$  – номинальная частота, Гц.

## 15 ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Проектирование электрических машин: учебник для вузов /И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; Под ред. И. П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.: ил.
- 2 Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин: учебник для втузов / под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с., ил.
- 3 Асинхронные двигатели общего назначения / Е. П.Бойко, Ю. В. Гаинцев, Ю. М.Ковалев и др.; под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика.– М.: Энергия, 1980.– 488 с., ил.
- 4 Справочник по электрическим машинам: в 2 т. /Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988.– 456 с., ил.
- 5 Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982.–504 с., ил.
- 6 СТО ТПУ 2.5.01–2006. Стандарт организации. Система образовательных стандартов. Работы выпускные квалификационные, проекты и работы курсовые. Структура и правила оформления.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Форма титульного листа пояснительной записки

### **ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Институт дистанционного образования

Специальность 140601 – «Электромеханика»  
(Специальность 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов»)

Кафедра «Электрические машины и аппараты»

### **ДВИГАТЕЛЬ АСИНХРОННЫЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

Пояснительная записка к курсовому проекту по дисциплине  
«Электрические машины»  
ФЮРА 525000.XXX ПЗ

Студент гр. \_\_\_\_\_  
(номер) (подпись) \_\_\_\_\_ дата \_\_\_\_\_ И. О. Фамилия \_\_\_\_\_

Руководитель

(должность, ученая степень, звание) (подпись) И. О. Фамилия  
дата

Томск – 200 \_\_\_\_\_

ПРИЛОЖЕНИЕ 2  
Форма бланка задания

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт дистанционного образования

Кафедра ЭМА

Группа \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ О.Л. Рапопорт  
«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**З А Д А Н И Е**

*На подготовку курсового проекта  
по дисциплине «Электрические машины»*

**Выдано студенту** \_\_\_\_\_

1. **Тема проекта** «Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором»

2. **Срок сдачи студентом законченного проекта** \_\_\_\_\_

3. **Исходные данные к проекту**

Ном. мощность  $P_{2н}$  = \_\_\_\_\_ кВт, Ном. напряжение  $U = 220/380$  В; Ном. частота  $f = 50$  Гц;

Число фаз  $m_1 = 3$ ; Число полюсов  $2p =$  \_\_\_\_\_; высота оси вращения  $h =$  \_\_\_\_\_ м;

Степень защиты **IP 44**; Конструктивное исполнение **IM1001**; Система охлаждения **IC0141**. Си-

4. **Содержание пояснительной записки:**

- Титульный лист
- Задание на проектирование
- Содержание
- Введение
- Электромагнитный расчет
- Тепловой и вентиляционный расчеты
- Механический расчет вала
- Выбор подшипников
- Заключение
- Перечень использованных источников
- Приложения
- Спецификация к сборочному чертежу двигателя

5. **Перечень графического материала:**

Продольный и поперечный разрез машины (сборочный чертеж двигателя)

6. **Перечень обязательного графического материала в пояснительной записке:**  
эскизы пазов ротора и статора в штампе с размерами; паз статора с заполнением;  
схема-развертка обмотки статора; рабочие и пусковые характеристики двигателя;  
эскиз к механическому расчету вала.

7. **Дата выдачи задания** \_\_\_\_\_

Руководитель проекта \_\_\_\_\_ (подпись)

Фамилия, Имя, Отчество

Задание к выполнению принял \_\_\_\_\_ (подпись студента)

## СОДЕРЖАНИЕ

с.

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ .....</b>	<b>6</b>
<b>2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ <math>Z_1</math>, <math>W_1</math> И ВЫБОР ПРОВОДА ОБМОТКИ СТАТОРА</b>	<b>10</b>
<b>3 РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА</b>	<b>14</b>
<b>4 ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА И РАСЧЕТ РОТОРА .....</b>	<b>19</b>
<b>5 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ.....</b>	<b>22</b>
<b>6 ПАРАМЕТРЫ РАБОЧЕГО РЕЖИМА .....</b>	<b>25</b>
<b>7 РАСЧЕТ ПОТЕРЬ .....</b>	<b>28</b>
<b>8 РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....</b>	<b>30</b>
<b>9 РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК</b>	<b>31</b>
<b>10 ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТЫ</b>	<b>35</b>
<b>11 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВАЛА</b>	<b>38</b>
<b>12 ВЫБОР ПОДШИПНИКОВ</b>	<b>41</b>
<b>13 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ</b>	<b>42</b>
<b>14 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ .....</b>	<b>56</b>
<b>15 ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>60</b>
<b>Приложение 1. ФОРМА ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА</b>	
<b>ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ.....</b>	<b>61</b>
<b>Приложение 2. ФОРМА БЛАНКА ЗАДАНИЯ.....</b>	<b>62</b>

# РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Методические указания к выполнению курсового проекта

Составители

Виктор Михайлович Игнатович  
Виктор Владимирович Големгрейн  
Анатолий Иванович Верхотуров  
Шмиль Симхович Ройз

Редактор

Цыганкова А. А.

Подписано к печати . Формат 60х84/16.

Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. 3,02. Уч.-изд.л. 2,74.

Заказ . Тираж экз.


---

Томский политехнический университет

Система менеджмента качества

Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.