

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Мусьял Александр Вячеславович
Должность: Ректор
Дата подписания: 22.07.2025 14:38:22
Уникальный программный ключ:
297fef716e5ece559822a236feffc4d8a43d0cf1

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курский аграрный университет имени И.И. Иванова»

**Методические указания по выполнению курсовой работы по
дисциплине
«Электрические машины»**

Направление подготовки: *35.03.06 Агроинженерия*

Профиль: *«Электрооборудование и электротехнологии в АПК»*

Факультет: *инженерный*

Форма обучения: *очная*

Курск 2025

Цели задачи курсовой работы

Важнейшим компонентом образовательного процесса является подготовка и защита курсовой работы, цель которой заключается в закреплении теоретических знаний и приобретение различных типов электрических машин общего применения, трансформаторах, а также специальных машинах, обучение навыкам самостоятельной работы при решении теоретических и практических задач по применению электрических машин.

- изучение общих вопросов использования электрических машин;
- изучение принципов действия и конструктивное исполнение электрических машин для проектно-конструкторской деятельности;
- изучение технических характеристик определяющих эксплуатационные свойства электрических машин для производственно-технологической деятельности;
- сформировать практические навыки применения электрических машин в организационно-управленческой деятельности.

В результате изучения дисциплины «Электрические машины» студенты должны **знать**:

- значение электрических машин для электрификации и автоматизации производства;
- - основы теории электромеханического преобразования энергии и физические основы работы электрических машин;
- - виды электрических машин и их основные характеристики;
- - конструктивные исполнения, параметры и режимы работы электрических машин, основные характеристики электрических двигателей, генераторов и преобразователей;
- - эксплуатационные требования к различным видам электрических машин;
- - характеристики и регулировочные свойства электроприводов с двигателями постоянного и переменного тока;
- - тенденции развития электрических машин.
- - основы обеспечения безопасности жизнедеятельности;

уметь:

- - подключать и испытывать электрические машины и трансформаторы;
- - рассчитывать, измерять и анализировать параметры и основные характеристики электрических машин и трансформаторов применительно к потребностям агропромышленного комплекса.
- - применять, эксплуатировать и производить выбор машин, электрического привода, электроэнергетических систем и сетей, систем электроснабжения;
- - формировать законченное представление о принятых решениях и полученных результатах в виде научно-технического отчета с его публичной защитой.

владеть:

- -расчета и выбора электрических машин и трансформаторов для реализации технологий производства;
 - - методами расчета, проектирования и конструирования электроэнергетического и электротехнического оборудования и систем;
 - -методами анализа режимов работы электроэнергетического и электротехнического оборудования и систем;
 - - методами расчета параметров электроэнергетических устройств и электроустановок, электроэнергетических сетей и систем, систем электроснабжения, релейной защиты и автоматики;
 - -навыками исследовательской работы;
- навыками проведения стандартных испытаний электроэнергетического и электротехнического оборудования и систем.
- При подготовке, написании и защиты курсовой работы по дисциплине «Электрические машины» у студентов формируются следующие компетенции:

| Код | Наименование компетенции |
|------------|---|
| УК-1.1 | Выполняет поиск необходимой информации |
| УК-1.2 | Критически анализирует информацию и обобщает результаты анализа для решения поставленной задачи |
| УК-1.3 | Применяет системный подход для решения поставленных задач |
| УК-2.1 | Формулирует в рамках поставленной цели совокупность задач, обеспечивающих ее достижение |
| УК-2.2 | Выбирает оптимальные способы решения задач, обеспечивающих достижение цели |
| УК-2.3 | Применяет действующие правовые нормы и учитывает имеющиеся условия, ресурсы и ограничения при решении задач, обеспечивающих достижение цели |
| ПК-3.1 | Демонстрирует знания энергетического, электротехнического оборудования и передового опыта в области эксплуатации энергетического и электротехнического оборудования, машин и установок в сельскохозяйственном производстве. |
| ПК-3.2 | Вносит предложения и выполняет работы по повышению эффективности эксплуатации энергетического и электротехнического оборудования, машин и установок. |

1 Техническое задание

Задание на курсовую работу содержит основные данные проектируемой машины, указания о конструктивном исполнении, виде защиты от окружающей среды. Помимо этого могут быть также заданы дополнительные требования, например, наименьшие допустимые значения кратности пускового и максимального моментов, предельные значения пускового тока и т.д. Варианты курсового проекта выдаются преподавателем во время проведения установочных лекций. Образец бланка задания приведен в приложении 1.

В отношении требований, неговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТам. При работе над проектом, если нет специальных указаний руководителя, следует ориентироваться на конструктивное исполнение, принятое в машинах единой серии 4А.

Задание для очной формы обучения выбирается согласно утвержденной тематике курсовых проектов.

Задание для заочной формы обучения выбирается согласно последней цифре зачетной книжки.

Задания для курсовой работы

| Величины | Варианты | | | | | | | | | |
|--|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Масса груза, кг*10 ³ | 8 | 7 | 5 | 3 | 10 | 12 | 7 | 4 | 11 | 1 |
| Скорость подъема, м/с | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,5 |
| Высота подъема h, м | 6 | 5 | 6 | 10 | 6 | 8 | 6 | 4 | 2 | 12 |
| Коэффициент, учитывающий противовес, k | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

| | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| КПД подъемника, η | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Коэффициент увеличения мощности, K_p | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Число полюсов $2p$ | 4 | 4 | 6 | 8 | 4 | 4 | 4 | 2 | 6 | 2 |
| Гармоника ν | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |

2 Содержание курсовой работы

Курсовая работа выполняется на основании технического задания и состоит из разделов, перечисленных в приложении 2, где также указан примерный объем работы, необходимой для выполнения каждого раздела, в процентах ко всему объему проекта. К защите курсовой работы должны быть представлены чертежи спроектированной машины и пояснительная записка.

3 Учебные пособия

Основным учебным пособием при выполнении учебных проектов асинхронных машин является книга «Проектирование электрических машин» [1], в которой рассмотрена конструкция машин и приведена методика их расчета. Для более глубокой проработки материала следует использовать также и другую специальную литературу [2].

4 Указания к выполнению отдельных разделов КР

4.1 Выбор электромагнитных нагрузок и расчет главных размеров

Предварительно электромагнитные нагрузки A и B_δ следует выбирать в пределах, рекомендованных в [1] значений для заданного типоразмера и исполнения двигателя. Так как при проектировании допускается относительно широкое варьирование этими величинами, то при их выборе

необходимо руководствоваться следующим. Выбор больших (по верхним пределам допускаемых областей) значений A и B_δ приводит к уменьшению габаритов машины и ее массных показателей, но одновременно, увеличивает нагрев обмотки и ухудшает энергетические показатели двигателя. При низких значениях A и B_δ размеры машины увеличиваются и объем ее активной части используется не полностью.

Для правильного выбора электромагнитных нагрузок следует, кроме того, учесть, что от соотношения их значений в значительной мере зависят особенности характеристик двигателя, определяемые дополнительными требованиями технического задания или предполагаемыми условиями работы проектируемой машины.

Выбранные значения A и B_δ определяют только необходимый «объем» активной части машины $D^2 l_\delta$ который может быть получен при различных соотношениях главных размеров.

Поэтому в начале проектирования рассчитывают несколько вариантов значений D и l_δ , связанных между собой величиной машинной постоянной. После анализа принимают наиболее удачный из них, т. е. те значения D и l_δ , которые наилучшим образом удовлетворяют условиям, приведенным в расчетной методике. При этом значение наружного диаметра сердечника статора D_2 должно быть увязано с высотой оси вращения h , которая может быть взята только из стандартного ряда высот осей вращения [1,2].

При выполнении этого раздела проекта следует иметь в виду, что дальнейший расчет может показать целесообразность некоторого изменения предварительно выбранных главных размеров двигателя.

4.2 Электромагнитный расчет

4.2.1 Расчет статора

Основной задачей настоящего раздела является расчет, числа витков фазы обмотки, распределение ее в пазах и расчет индукции на участках

магнитопровода статора. Предварительно должен быть решен вопрос о типе обмотки (всыпная, полужесткая, жесткая), которая, в свою очередь, определяет форму паза (полузакрытый, полуоткрытый или открытый). Далее задаются величиной зубцового деления статора [1] и определяют число пазов D_1 при этом число пазов на полюс и фазу q должно быть целым, так как в асинхронных двигателях дробное число q обычно не применяют.

Число эффективных проводников в пазу $u_{\text{п}}$ целесообразно определить по принятой ранее величине линейной нагрузки. Полученное значение $u_{\text{п}}$ округляется в зависимости от особенностей принятого типа обмотки. После этого необходимо рассчитать число витков в фазе, величины линейной нагрузки, потока и индукции в воздушном зазоре.

Вновь полученные величины B_{δ} и A могут несколько отличаться от принятых в начале расчета, но не должны выходить за пределы допустимых значений. При больших расхождениях следует проверить правильность проведенных вычислений. Весь дальнейший расчет проводится на основании полученных в этом разделе значений A и B_{δ} не ранее принятых их величин.

Переходя к расчету размеров зубцов и пазов статора, следует иметь в виду, что в статорах, имеющих насыпную обмотку из круглого провода, как правило, применяют трапецеидальные или грушевидные пазы, причем их размеры должны быть такими, чтобы зубцы имели параллельные стенки. Наиболее простым способом определения размеров паза, удовлетворяющих этому условию, является следующий. На вычерченном в масштабе зубцовом делении листа статора отмечают зоны зубцов и спинки, размеры которых определяются допустимым уровнем индукции в них. В оставшейся свободной области пазового деления размещается паз.

При выборе материалов и конструкции изоляции обмотки необходимо руководствоваться данными, приведенными в [1].

Окончательные размеры пазов и зубцов статора в штампе определяются после выбора размеров обмоточного провода, расчета коэффициента

заполнения паза и индукций в спинке и в зубцах статора с учетом припуска па штамповку листов и шихтовку сердечника.

4.2.2 Воздушный зазор

Магнитодвижущая сила воздушного зазора в основном определяет полную МДС машины, поэтому увеличение зазора приводит к возрастанию намагничивающего тока и снижению $\cos\varphi$. Однако чрезмерное уменьшение зазора вызывает резкое возрастание поверхностных и пульсационных потерь, которое может привести к ухудшению к.п.д. двигателя. Поэтому величину воздушного зазора следует выбирать, ориентируясь на заводские исполнения аналогичных по типу и мощности асинхронных двигателей новых серий [1, 2].

4.2.3 Расчет ротора

При расчете *короткозамкнутого ротора* вначале выбирается число пазов ротора в соответствии с рекомендациями о допустимых соотношениях Z_1 и Z_2 . Далее следует принципиально решить вопрос о форме паза ротора с учетом мощности машины и требований к пусковым характеристикам. После этого рассчитываются площади сечения стержней и к.з. колец, размеры пазов и зубцов и определяются индукции в зубцах и ярме ротора.

При *расчете фазного ротора* число витков его обмотки определяется по принятому значению э.д.с. E_2 на ее выводах (на контактных кольцах). Величина E_2 регламентирована в зависимости от мощности и условий работы двигателя. Для обеспечения надежной работы она не должна превышать установленных пределов. Наименьшее значение E_2 при двухслойной обмотке на роторе достигается при двух эффективных проводниках в пазу. В этом случае выполняется стержневая волновая обмотка, в которой, в отличие от петлевой, для машин с $2p > 2$ существенно уменьшается количество межгрупповых соединений.

Расчет индукции в зубцах ротора в некоторых случаях показывает, что максимальная индукция в них превышает рекомендованный методиками предел. Большею частью это является следствием неудачно выбранных размерных соотношений пазов, особенно при применении фигурных пазов (лопаточных, трапецеидальных и т. д.), или чрезмерно глубоких прямоугольных (и в короткозамкнутых и в фазных роторах).

В этих случаях нужно проверить правильность выбора плотности тока и расчета сечения обмотки ротора и, если ошибка не обнаружена, то изменить соотношение размеров паза таким образом, чтобы минимальная ширина зубца возросла. Попытка уменьшить индукцию в зубцах ротора путем уменьшения числа его пазов практически не дает эффекта, особенно в короткозамкнутых роторах.

Если при заданном диаметре ротора не удастся спроектировать его зубцовую зону, не превышая допустимых значений индукции или плотности тока в обмотке, то следует увеличить главные размеры двигателя, что в некоторых случаях требует перехода на большую высоту оси вращения.

В двигателях, сердечники роторов которых насажены непосредственно на вал, часто после расчета зубцовой зоны выясняется, что индукция в ярме ротора существенно ниже допустимых значений. Если при этом на других участках магнитопровода индукция соответствует нормам, то принимать какие-либо искусственные меры для повышения индукции в ярме ротора (установка втулки на валу и т. п.) не следует. Все они приводят к усложнению конструкции и технологии производства двигателя.

4.2.4 Расчет параметров схемы замещения и характеристик двигателя

Параметры схемы замещения рассчитываются для номинального режима двигателя. Их значения принимают постоянными при изменении нагрузки двигателя от холостого хода до номинальной. При скольжениях

больше номинального следует учесть возможные изменения величин ряда параметров, вызванных эффектом вытеснения тока в стержнях обмотки ротора и насыщением зубцовой зоны потоками рассеяния.

Определением параметров схемы замещения для номинального режима завершается основная часть электромагнитного расчета. По их значениям, выраженным в относительных единицах, можно судить о правильности выбранных размерных соотношений в машине и ее обмоточных данных.

Результаты расчета параметров схемы замещения должны быть обязательно обсуждены с руководителями проекта, после чего можно перейти к расчету характеристик двигателя.

4.2.5 Расчет рабочих и пусковых характеристик проводится по величинам параметров для номинального режима

Расчет характеристик проводится аналитическим методом. При постоянстве параметров по согласованию, с руководителем можно использовать метод расчета характеристик по круговой диаграмме, которая в этом случае должна быть построена на листе миллиметровой бумаги в достаточно крупном масштабе.

Для расчета пусковых характеристик следует задаться несколькими

5 Пример расчета

Выбор двигателя по номинальной мощности

Для расчета мощности асинхронного двигателя для подъема груза следует пользоваться формулой:

$$P = kmgv \cdot 0,001/n, \quad (1)$$

где k - коэффициент, учитывающий действие противовеса;

- m - масса груза, кг;
- g - ускорение свободного падения;
- v - скорость подъема груза, м/с;
- n - КПД подъемника.

| | |
|--|-------|
| Масса груза..... | 36734 |
| Коэффициент, учитывающий действие противовеса..... | 0,5 |
| Скорость подъема груза..... | 0,1 |
| КПД подъемника..... | 0,8 |
| Коэффициент увеличения мощности..... | 1,5 |

Расчет мощности двигателя:

$$P = kmgv \cdot 0,001 / (n \cdot K_p), \quad (2)$$

$$P = 0,5 \cdot 36734 \cdot 9,8 \cdot 0,1 \cdot 0,001 / (0,8 \cdot 1,5) = 15 \text{ кВт.}$$

Полученное значение увеличиваем до каталожного значения.

Двигатель выбираем из базы данных. Ближайший по мощности двигатель АИР160S2 (P=15 кВт, n=1500 об/мин.).

Определяем его номинальный момент:

$$M_n = 9550 \cdot P_n / n, \quad (3)$$

$$M_n = 9550 \cdot 15 / 1500 = 95,5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Максимальный момент:

$$M_m = 3M_n = 3 \cdot 95,5 = 286,5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Спроектировать трехфазный асинхронный двигатель со следующими данными:

Ротор короткозамкнутый;

Мощность $P_2 = 15$ кВт;

Напряжение $U = 220/380$ В;

Число полюсов $2p = 4$;

Исполнение по способу защиты на воздействие окружающей среды IP44;

Конструктивное исполнение IM1001.

5.1 Выбор главных размеров

1. Высота оси вращения (предварительно) $h=170$ мм (рисунок 1а Приложение 5).

Выберем $h=160$ мм, $D_a=0,272$ м (таблица 1 Приложение 5).

2. Внутренний диаметр статора:

$$D=K_D \cdot D_a, \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр статора, м;

K_D – коэффициент отношения D/D_a в зависимости от числа полюсов

$K_D=0,68$ (таблица 2 Приложение 5);

D_a – внешний диаметр статора, м.

$$D=0,68 \cdot 0,272=0,185 \text{ м.}$$

3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \quad (2)$$

где τ – внутренний диаметр статора, м;

p – количество полюсов.

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 0,185}{2 \cdot 2} = 0,145 \text{ м.}$$

4. Расчетная мощность:

$$P' = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos\varphi} \quad (3)$$

где P' – расчетная мощность, В·А;

P_2 – мощность асинхронного двигателя, кВт;

η – примерное значение КПД, $\eta=0,88$ (рисунок 3а Приложение 5.)

$\cos\varphi$ – примерное значение $\cos\varphi$ асинхронного двигателя, $\cos\varphi=0,88$ (рисунок 3а Приложение 5.);

k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению,

$k_E = 0,975$ (рисунок 2 Приложение 5).

$$P' = 15 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,975}{0,88 \cdot 0,88} = 18885 \approx 18900 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

5. Электромагнитные нагрузки (предварительно):

$A = 32000 \text{ А/м}$, $B_\delta = 0,75 \text{ Тл}$ (рисунок 6б Приложение 5).

6. Обмоточный коэффициент для однослойной обмотки (предварительно для однослойной обмотки):

$k_{obl} = 0,95$, т.к. $h \leq 160 \text{ мм}$ (при $h > 160 \text{ мм}$ – двухслойная обмотка $k_{obl} = 0,91-0,92$)

7. Расчетная длина воздушного зазора:

$$l^\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{obl} \cdot A \cdot B_\delta}, \quad (4)$$

где l^δ - расчетная длина воздушного зазора, м;

Ω – синхронная угловая частота двигателя, рад/с;

k_B – коэффициент формы поля;

Вычислим Ω по формуле 5;

$$\Omega = \frac{2\pi n_1}{60}, \quad \text{или} \quad \Omega = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (5)$$

где n_1 – синхронная частота вращения, об/мин;

f_1 – частота питания, Гц.

$$\Omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с}.$$

Вычислим k_B по формуле 6:

$$k^B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}, \quad (6)$$

$$k^B = \frac{3,14}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

$$l^\delta = \frac{18900}{1,11 \cdot 0,185^2 \cdot 157 \cdot 0,95 \cdot 3200 \cdot 0,75} = 0,139 \approx 0,14 \text{ м}.$$

8. Значение λ находим из отношения:

$$\lambda = \frac{l^\delta}{\tau}, \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{0,14}{0,145} = 0,97$$

Полученное значение находится в пределах допустимых значений (рисунок 4 Приложение 5).

Определение Z_1 , w_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора

9. Предельные значения диапазона зубцовых делений:

$t_{Z1max}=15\text{мм}$, $t_{Z1min}=12\text{мм}$ (рисунок5 Приложение 5)

10. Число пазов статора:

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1max}}, \quad (8)$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1min}}, \quad (9)$$

где Z_{1min} , Z_{1max} – число пазов статора;

t_{Z1min} , t_{Z1max} – предельные значения диапазона зубцовых делений, мм.

$$Z_{1min} = \frac{3,14 \cdot 0,185}{0,015} = 39$$

$$Z_{1max} = \frac{3,14 \cdot 0,185}{0,012} = 48$$

Число пазов статора Z_1 выбираем, так чтобы q было целым.

Принимаем $Z_1=48$, тогда q_1 будет равно:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \cdot m}, \quad (10)$$

где q_1 – число пазов на полюс и фазу;

m – число фаз;

$$q_1 = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4$$

Обмотка однослойная.

11. Зубцовое деление статора (окончательно):

$$t_{Z1} = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q}, \quad (11)$$

$$t_{Z1} = \frac{3,14 \cdot 0,185}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 12,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

12. Число эффективных проводников в пазу (предварительно, при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют $a=1$)

$$u_n' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{I_{ном}} \cdot Z_1}, \quad (12)$$

где u_n' – число эффективных проводников в пазу;

A – принятое ранее значение линейной нагрузки, А/м;

$I_{I_{ном}}$ – номинальный ток обмотки статора, А.

Вычислим номинальный ток обмотки статора по формуле 13:

$$I_{I_{ном}} = \frac{P_2}{m U_{I_{ном}} \cos \varphi \cdot \eta}, \quad (13)$$

где $U_{I_{ном}}$ – номинальное напряжение, В.

$$I_{I_{ном}} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,88} = 29,3 \text{ А.}$$

$$u_n' = \frac{3,14 \cdot 0,185 \cdot 32000}{29,3 \cdot 48} = 13,2$$

13. Полученное значение по формуле 13 не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмотки a , при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения: принимаем $a=1$, тогда:

$$u_n = a \cdot u_n', \quad (14)$$

где u_n – число эффективных проводников в пазу.

$$u_n = 1 \cdot 13 = 13 \text{ проводников.}$$

14. Окончательные значения:

Окончательное число витков в фазе обмотки:

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m}, \quad (15)$$

$$w_I = \frac{13 \cdot 48}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 104$$

Окончательное значение линейной нагрузки:

$$A = \frac{2 \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot w_I \cdot m}{\pi \cdot D}, \quad (16)$$

$$A = \frac{2 \cdot 29,3 \cdot 104 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,185} = 31,5 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Окончательно уточняем значение магнитного потока:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{\text{НОМ}}}{4 \cdot k_B \cdot w_I \cdot k_{\text{обл}} \cdot f_I}, \quad (17)$$

Для однослойной обмотки с $q=4$ (таблица 19 Приложение 5) $k_{\text{обл}} = k_p = 0,958$.

Для двухслойной обмотки $k_{\text{обл}} = k_{p1} \cdot k_{y1}$, $k_{y1} = \sin \frac{\pi}{2} \beta$, $\beta = \frac{y}{\tau}$, $\tau = \frac{Z_I}{2p}$, укорочение шага $\beta = 0,79 \dots 0,83$.

$$\Phi = \frac{0,975 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 104 \cdot 0,958 \cdot 50} = 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Окончательно уточняем значение индукции в воздушном зазоре:

$$B^\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta}, \quad (18)$$

$$B^\delta = \frac{2 \cdot 9,7 \cdot 10^{-3}}{0,185 \cdot 0,14} = 0,749 \text{ Тл.}$$

Полученные значения A и B^δ находятся в допустимых пределах (рисунок 6 Приложение 5).

15. Плотность тока в обмотке статора (предварительно):

$$J_I = \frac{(A \cdot J)}{A}, \quad (19)$$

где J_I - плотность тока в обмотке статора, А/м²;

J - плотность тока, А/м².

$(A \cdot J) = 180 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3$ (рисунок 7б Приложение 5).

$$J_I = \frac{180 \cdot 10^9}{31500} = 5,71 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

16. Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно) при $a=1$:

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{ном}}}{a \cdot J_1}, \quad (20)$$

где $q_{\text{эф}}$ – площадь поперечного сечения эффективного проводника, мм².

$$q_{\text{эф}} = \frac{29,3}{1 \cdot 5,71 \cdot 10^6} = 5,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 5,13 \text{ мм}^2.$$

17. Сечение эффективного проводника (окончательно):

Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со всыпной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник делят на несколько элементарных. Для этого по таблице 3 Приложение 5 подбираются сечение $q_{\text{эл}}$ и число элементарных проводников $n_{\text{эл}}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы диаметр $d_{\text{эл}}$ элементарных проводников не выходит за указанные пределы, а их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника. В нашем примере принимаем $n_{\text{эл}}=3$ тогда:

$$q_{\text{эл}} = q_{\text{эф}}/n_{\text{эл}} \quad (21)$$

$$q_{\text{эл}} = \frac{5,13}{3} = 1,71 \text{ мм}^2.$$

Принимаем обмоточный провод марки ПЭТВ (таблица 3 Приложение 5):

$$d_{\text{эл}}=1,5 \text{ мм}, q_{\text{эл}}=1,767 \text{ мм}^2, d_{\text{из}}=1,585 \text{ мм}.$$

Тогда по формуле 22 $q_{\text{э.ср}}$ будет равно:

$$q_{\text{э.ср}} = n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}} \quad (22)$$

$$q_{\text{э.ср}} = 3 \cdot 1,767 = 5,3 \text{ мм}^2.$$

18. Плотность тока в статоре (окончательно):

$$J_1 = \frac{I_{\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}}, \quad (23)$$

$$J_1 = \frac{29,3}{1 \cdot 1,71 \cdot 3} = 5,35 \text{ А/мм}^2.$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора определяем с соотношением размеров, обеспечивающим параллельность боковых граней зубцов (рисунок 8 Приложение 5).

19. Принимаем предварительно по таблице 4 Приложение 5 допустимые значения индукции на участках магнитной цепи $B_{z1}=1,9$ Тл, $B_a=1,6$ Тл, тогда ширина зубца будет равна:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c}, \quad (24)$$

где b_{z1} – ширина зубца, мм;

B_{z1} – допустимое значение индукции на участке магнитной цепи, Тл;

l_{cm1} – длина стали сердечника, $l_{cm1}=l_{\delta}$, м;

k_c – коэффициент заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора,

по таблице 5 Приложение 5 $k_c = 0,97$.

$$b_{z1} = \frac{0,749 \cdot 12,1 \cdot 0,14}{1,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 4,9 \text{ мм.}$$

Определяем высоту ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{cm1} k_c}, \quad (25)$$

$$h_a = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,6 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 0,0223 \text{ м.} = 22,3 \text{ мм.}$$

20. Размеры паза в штампе принимаем равными $b_{u1}=3,7$ мм, $h_{u1}=1$ мм, $\beta=45^\circ$ (рисунок 8 Приложение 5), тогда:

Высота паза:

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a, \quad (26)$$

$$h_n = \frac{0,272 - 0,185}{2} - 0,0223 = 0,0212 \text{ м.} = 21,2 \text{ мм.}$$

Ширина шлица паза:

При $\beta=45^\circ$:

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{u1} - b_{u1}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi}, \quad (27)$$

При $\beta=30^\circ$:

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{uu} - b_{uu}/\sqrt{3}) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \pi/\sqrt{3}}, \quad (28)$$

В данном случае $\beta=45^\circ$, то расчет производим по формуле 27:

$$b_1 = \frac{3,14 \cdot (185 + 2 - 3,7) - 48 \cdot 4,9}{48 - 3,14} = 7,59 \approx 7,6 \text{ мм.}$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_n)}{Z_1} - b_{Z1}, \quad (29)$$

$$b_2 = \frac{3,14 \cdot (185 + 2 \cdot 21,2)}{48} - 4,9 = 9,98 \text{ мм.} \approx 10 \text{ мм.}$$

$$h_{n.к} = h_n - \left(h_{uu} + \frac{b^1 - b_{uu}}{2} \right), \quad (30)$$

$$h_{n.к} = 21,2 - \left(1 + \frac{7,6 - 3,7}{2} \right) = 18,25 \text{ мм.} \approx 18,3 \text{ мм.}$$

Паз статора показан на рисунке 1б.

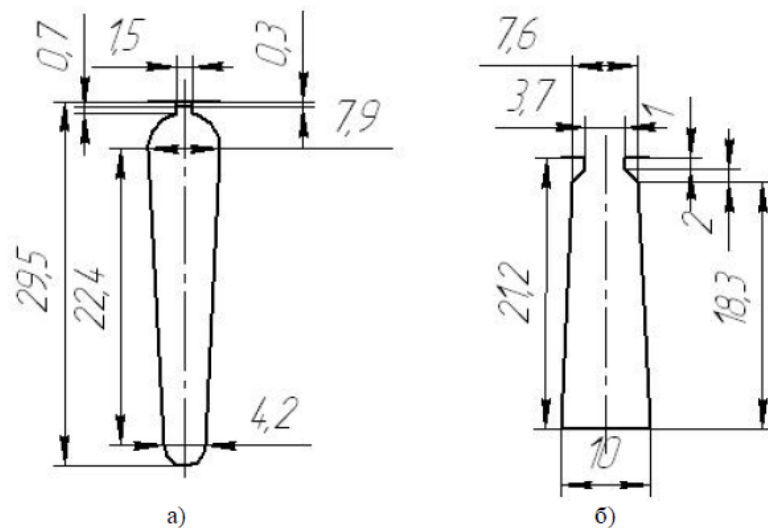


Рис.1. Паза ротора(а) и статора(б).

21. Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку:

$$b_1' = b_1 - \Delta b_n, \quad (31)$$

где Δb_n – припуски по ширине паза, мм.

Выбираем припуски по ширине и высоте паза из таблицы:

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

$$b_1' = 7,6 - 0,2 = 7,4 \text{ мм.}$$

$$b_2' = b_2 - \Delta b_n \quad (32)$$

$$b_2' = 10 - 0,2 = 9,8 \text{ мм.}$$

$$h_{n.k.}' = h_{n.k.} - \Delta h_n \quad (33)$$

где Δh_n – припуски по высоте паза, мм.

$$h_{n.k.}' = 18,3 - 0,2 = 18,1 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки

$$S_n' = \frac{b_1' + b_2'}{2} \cdot h_1' - S_{уз} - S_{np} \quad (34)$$

$$S_n' = \frac{7,4 + 9,8}{2} \cdot 18,1 - 24 = 131,7 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения прокладок $S_{np} = 0$.

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу:

$$S_{уз} = b_{уз} \cdot (2h_n + b_1 + b_2), \quad (35)$$

где $b_{уз}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу, мм; $b_{уз} = 0,4$ по таблице 6

Приложение 5.

$$S_{уз} = 0,4 \cdot (2 \cdot 21,2 + 7,6 + 10) = 24 \text{ мм}^2.$$

22. Коэффициент заполнения паза:

$$k_3 = \frac{d_{уз}^2 u_n n_{эл}}{S_n'} \quad (36)$$

Коэффициент заполнения должен находиться в пределах $k_3 = 0,69 \dots 0,71$ для двигателей с $2p = 2$ и $k_3 = 0,72 \dots 0,74$ для двигателей с $2p \geq 4$.

$$k_3 = \frac{1,585^2 \cdot 13 \cdot 3}{131,7} = 0,74$$

Коэффициент заполнения равен рекомендованному значению для ручной укладки обмоток.

Расчет ротора

23. Воздушный зазор:

$\delta=0,5\text{мм}$ (рисунок 9 Приложение 5).

24. Число пазов ротора:

$Z_2=38$ (таблица 7 Приложение 5).

25. Внешний диаметр ротора:

$$D_2=D-2\delta, \quad (37)$$

$$D_2=0,185-2\cdot 0,5\cdot 10^{-3}=0,184 \text{ м.}$$

26. Длина магнитопровода ротора:

$l_2=l_1=0,14\text{м.}$

27. зубцовое деление ротора:

$$t_{Z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2}, \quad (38)$$

$$t_{Z2} = \frac{3,14 \cdot 0,184}{38} = 0,0152 \text{ м.} = 15,2 \text{ мм.}$$

28. Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал:

$$D_j=D_B=k_B\cdot D_w \quad (39)$$

где k_B – коэффициент для расчета диаметра вала асинхронных двигателей:

$k_B=0,23$ по таблице 8 Приложение 5.

$$D_j=D_B=0,23\cdot 0,272=0,0626 \text{ м.} = 60 \text{ мм.}$$

29. Ток в обмотке ротора:

$$I_2=k_i I_1 v_i \quad (40)$$

где k_i – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания;

v_i – коэффициент приведения токов, для двигателей с фазными роторами.

$$k_i=0,2+0,8 \cos\varphi, \quad (41)$$

$$k_i=0,2+0,8\cdot 0,88=0,904$$

$$v_i = \frac{2m_1 \cdot w_1 \cdot k_{\text{об1}}}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}}, \quad (42)$$

где $k_{\text{ск}}$ – коэффициент скоса, учитывающий уменьшение ЭДС обмотки при скошенных пазах ротора;

m_1 – число фаз; $m_1=3$.

$$k_{ск} = \frac{2 \cdot \sin(\gamma_{ск}/2)}{\gamma_{ск}}, \quad (43)$$

где $\gamma_{ск} = \beta_{ск} \frac{2p}{Z}$; $\beta_{ск} = \frac{b_{ск}}{tz_2}$; $b_{ск}$ - скос пазов, мм.

В данном расчете пазы ротора выполняем без скоса, т.е. $k_{ск}=1$.

$$v_i = \frac{2 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0,958}{38 \cdot 1} = 15,73$$

$$I_2 = 0,904 \cdot 29,3 \cdot 15,73 = 417 \text{ А.}$$

30. Площадь поперечного сечения стержня (предварительно):

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}, \quad (44)$$

где J_2 – плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения, А/м².

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого исполнения при заливке пазов алюминием выбирается в пределах $J_2 = (2,5 \dots 3,5) \cdot 10^6$ А/м², а при защищенном исполнении на 10...15% выше, при этом для машин больших мощностей следует принимать меньшие значения плотности тока.

$$q_c = \frac{417}{2,5 \cdot 10^6} = 166,8 \text{ мм}^2.$$

31. Паз ротора определяем по рисунку 10б Приложение 5. Принимаем

$$b_{uu} = 1,5 \text{ мм}, h_{uu} = 0,7 \text{ мм}, h'_{uu} = 0,3 \text{ мм} (h'_{uu} = 0, \text{ если } h < 160 \text{ мм}).$$

Допустимая ширина зубца:

$$b_{Z2\partial on} = \frac{B_\delta \cdot tz_2 \cdot l_\delta}{B_{Z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c}, \quad (45)$$

где B_{Z2} – допустимое значение индукции на участках магнитной цепи асинхронных двигателей, Тл. Принимаем по таблице 4 Приложение 5 $B_{Z2} = 1,8$ Тл;

l_{cm2} – длина стали ротора, $l_{cm2} = l_\delta$, м;

$$b_{Z2\partial on} = \frac{0,749 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{1,8 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 6,52 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6,5 \text{ мм}.$$

Размеры паза рисунок 10 Приложение 5:

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{uu} - 2h'_{uu}) - Z_2 b_{Z2}}{\pi + Z_2}, \quad (46)$$

$$b_1 = \frac{3,14(184 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 38 \cdot 6,5}{3,14 + 38} = 7,9 \text{ мм.}$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}}, \quad (47)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{7,9^2 \left(\frac{38}{3,14} + \frac{3,14}{2} \right) - 4 \cdot 166,8}{\frac{38}{3,14} - \frac{3,14}{2}}} = 4,2 \text{ мм.}$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi}, \quad (48)$$

$$h_1 = (7,9 - 4,2) \frac{38}{2 \cdot 3,14} = 22,38 \text{ мм.} \approx 22,4 \text{ мм.}$$

32. Уточняем ширину зубцов ротора (рисунок 10 Приложение 5):

$$b'_{Z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{uu} + h'_{uu})b_1}{Z_2} - b_1, \quad (49)$$

$$b'_{Z2} = 3,14 \frac{184 - 2(0,7 + 0,3) \cdot 7,9}{38} - 7,9 = 6,49 \text{ мм.} \approx 6,5 \text{ мм.}$$

$$b''_{Z2} = \pi \frac{D_2 - 2h_n + b_2}{Z_2} - b_2, \quad (50)$$

$$b''_{Z2} = 3,14 \frac{184 - 2 \cdot 29,4 + 4,2}{38} - 4,2 = 6,5 \text{ мм.}$$

$$b'_{Z2} = b''_{Z2} \approx 6,5 \text{ мм.}$$

Принимаем значение паза ротора по рисунку 1а: $b_1=7,9$; $b_2=4,2$; $h_n=22,4$.

Полная высота паза:

$$h_{n2} = h'_{uu} + h_{uu} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2}, \quad (51)$$

$$h_{n2} = 0,3 + 0,7 + \frac{7,9}{2} + 22,4 + \frac{4,2}{2} = 29,5 \text{ мм.}$$

33. Площадь поперечного сечения стержня (уточненная):

$$q_c = \frac{\pi}{8}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{l}{2}(b_1 + b_2) \cdot h_1, \quad (52)$$

$$q_c = \frac{3,14}{8}(7,9^2 + 4,2^2) + 0,5 \cdot (7,9 + 4,2) \cdot 22,4 = 169,96 \text{ мм}^2. \approx 167 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c}, \quad (53)$$

$$J_2 = \frac{417}{167 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}.$$

34. Короткозамыкающие кольца. Площадь поперечного сечения кольца:

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}}, \quad (54)$$

где $J_{кл}$ – плотность тока в замыкающих кольцах, А/м². Плотность тока в замыкающих кольцах $J_{кл}$ выбирают в среднем на 15...20% меньше, чем в стержнях.

$I_{кл}$ – ток в кольцах, А.

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta}, \quad (55)$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha Z}{2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2}, \quad (56)$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{2 \cdot 180}{38} = 0,329$$

$$I_{кл} = \frac{417}{0,329} = 1267 \text{ А}.$$

$$J_{кл} = 0,85 \cdot J_2, \quad (57)$$

$$J_{кл} = 0,85 \cdot 2,5 \cdot 10^6 = 2,13 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

$$q_{кл} = \frac{1267}{2,13 \cdot 10^6} = 595 \text{ мм}^2.$$

Размеры короткозамыкающих колец:

$$h_{кл} = 1,25 \cdot h_{n2}, \quad (58)$$

$$h_{кл} = 1,25 \cdot 29,5 = 37 \text{ мм}.$$

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}}, \quad (59)$$

$$b_{кл} = \frac{595}{37} = 16 \text{ мм.}$$

$$q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл} \quad (60)$$

$$q_{кл} = 37 \cdot 16 = 592 \text{ мм}^2.$$

$$D_{к.ср} = D_2 - h_{кл} \quad (61)$$

$$D_{к.ср} = 184 - 37 = 147 \text{ мм.} = 0,147 \text{ м.}$$

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2013; толщина листов 0,5 мм.

35 Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \quad (62)$$

где B_{δ} – индукция в воздушном зазоре, Тл;

δ – воздушный зазор, м;

k_{δ} – коэффициент воздушного зазора;

μ_0 – магнитная проницаемость, Гн/м: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta}, \quad (63)$$

$$\gamma_1 = \frac{(b_{u1}/\delta)^2}{5 + b_{u1}/\delta}, \quad (64)$$

где b_{u1} – размер паза в штампе; $b_{u1} = b_u = 3,7$ мм.

$$\gamma_1 = \frac{(3,7/0,5)^2}{5 + 3,7/0,5} = 4,42$$

$$k_{\delta} = \frac{12,1}{12,1 - 4,42 \cdot 0,5} = 1,22$$

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,749 \cdot 1,22 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 726,5 \text{ А.}$$

36. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1}, \quad (65)$$

где h_{z1} – расчетная высота зубца статора, м; $h_{z1} = h_n = 21,2$ мм.

H_{Zl} – расчетная напряженность поля в зубце, А/м. Значение расчетной напряженности приведены в таблице 14 Приложение 5.

По таблице 14 $H_{Zl}=2070$ А/м.

$$F_{z1} = 2 \cdot 21,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2070 = 87,8 \text{ А.}$$

Расчетная индукция в зубцах:

$$B'_{Zl} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Zl} \cdot l_{\delta}}{b_{Z2} \cdot l_{cm1} \cdot k_{c1}}, \quad (66)$$

где k_{c1} – коэффициент заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора, по таблице 5 Приложение 5 $k_{c1} = 0,97$.

$$B'_{Zl} = \frac{0,749 \cdot 12,1 \cdot 0,14}{4,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,91 \text{ Тл.}$$

Так как $B'_{Zl} > 1,8$ Тл, необходимо учесть ответвление потока в паз и найти действительную индукцию в зубце B_{Zl} . Коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зубца k_{nx} на высоте $h_{zx}=0,5h_z$:

Коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зубца:

$$k_{nx} = \frac{b_{nx} \cdot l_{\delta}}{b_{Zx} \cdot l_{cm1} \cdot k_{c1}}, \quad (67)$$

где $b_{Zx}=b_{Zl}=4,9$ мм.

$$b_{nx} = \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad (68)$$

$$b_{nx} = \frac{7,6 + 10}{2} = 8,8$$

$$k_{nx} = \frac{8,8 \cdot 0,14}{4,9 \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,85$$

$$B_{Zl} = B'_{Zl} - \mu_0 \cdot H_{Zl} \cdot k_{nx}, \quad (69)$$

Принимаем $B_{Zl}=1,9$ Тл, проверяем соотношение B_{Zl} и B'_{Zl} :

$$1,9 = 1,91 - 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2070 \cdot 1,85 = 1,9$$

37. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$F_{z2} = 2h_{z2} \cdot H_{z2}, \quad (70)$$

где h_{z2} – расчетная высота зубца, м; $h_{z2} = h_{n2} - 0,1 \cdot b_2 = 29,4 - 0,1 \cdot 4,2 = 29$ мм.

H_{z1} – расчетная напряженность поля в зубце ротора, А/м. Значение расчетной напряженности приведены в таблице 14 Приложение 5.

По таблице 14 $H_{z2} = 1570$ А/м.

$$F_{z2} = 2 \cdot 0,029 \cdot 1570 = 91,1 \text{ А.}$$

Индукция в зубце:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_{c2}}, \quad (71)$$

$$B_{z2} = \frac{0,749 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}{6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,81 \text{ Тл.}$$

38. Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}}, \quad (72)$$

$$k_z = 1 + \frac{87,8 + 91,1}{726,5} = 1,25$$

39. Магнитные напряжения ярма статора:

$$F_a = L_a \cdot H_a, \quad (73)$$

где L_a – длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м;

H_a – напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма, принятой при проектировании стали, А/м.

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p}, \quad (74)$$

где h_a – высота ярма статора, м.

$$h_a = \frac{D_2 - D}{2} - h_{n1}, \quad (75)$$

$$h_a = \frac{0,272 - 0,185}{2} - 21,2 \cdot 10^{-3} = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$L_a = \frac{3,14(0,272 - 0,0223)}{2 \cdot 2} = 0,196 \text{ м.}$$

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c}, \quad (76)$$

$$B_a = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ Тл.}$$

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов в статоре $h'_a = h_a = 22,3 \cdot 10^{-3}$ м, для $B_a = 1,6$ Тл по таблице 13 Приложение 5 находим $H_a = 750$ А/м.

$$F_a = 0,196 \cdot 750 = 147 \text{ А.}$$

40. Магнитное напряжение ярма ротора:

$$F_j = L_j \cdot H_j, \quad (77)$$

где L_j – длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора, м;

H_j – напряженность поля в ярме при индукции B_j по кривой намагничивания для ярма принятой при проектировании стали, А/м.

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p}, \quad (78)$$

где h_j – расчетная высота ярма ротора, м.

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2}, \quad (79)$$

$$h_j = \frac{0,184 - 0,06}{2} - 29,4 \cdot 10^{-3} = 32,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$L_j = \frac{3,14(60 - 32,6) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = 72,7 \cdot 10^{-3} \text{ А/м.}$$

$$B_j = \frac{\Phi}{2h'_j l_{cm2} k_{c2}}, \quad (80)$$

Для четырехполюсных машин при $0,75 \cdot (0,5 \cdot D_2 - h_{n2}) < D_j$

$$h'_j = \frac{2 + p}{3,2p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_{k2} \cdot m_{k2}, \quad (81)$$

где d_{k2} и m_{k2} – диаметр и число рядов аксиальных вентиляционных каналов в роторе; при отсутствии каналов $m_{k2} = 0$.

$$h'_j = \frac{2 + 2}{3,2 \cdot 2} \cdot (0,5 \cdot 0,184 - 29,5 \cdot 10^{-3}) = 39,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$B_j = \frac{9,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 39,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97} = 0,91 \text{ Тл.}$$

Для $B_j = 0,91$ Тл по таблице 13 Приложение 5 находим $H_j = 155$ А/м.

$$F_j = 72,7 \cdot 10^{-3} \cdot 155 = 11,3 \text{ А.}$$

41. Магнитное напряжение на пару полюсов:

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j, \quad (82)$$

$$F_u = 726,5 + 87,8 + 91,1 + 147 + 11,3 = 1063,7 \text{ А.}$$

42. Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_\mu = \frac{F_u}{F_\delta}, \quad (83)$$

$$k_\mu = \frac{1063,7}{726,5} = 1,46$$

43. Намагничивающий ток:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_u}{0,9m_l \cdot w_l \cdot k_{обл}}, \quad (84)$$

$$I_\mu = \frac{3 \cdot 1063,7}{0,9 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0,958} = 7,91 \text{ А.}$$

Относительное значение:

$$I_\mu^* = \frac{I_\mu}{I_{IH}}, \quad (85)$$

$$I_\mu^* = \frac{7,91}{29,3} = 0,27$$

$$0,2 < I_\mu^* < 0,3$$

Параметры рабочего режима

44. Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_l = K_R \cdot \rho_v \cdot \frac{L_l}{q_{эф} a_l}, \quad (86)$$

где L_l – общая длина эффективных проводников фазы обмотки, м;

$q_{эф}$ – площадь поперечного сечения эффективного проводника, м²;

ρ_v – удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, Ом·м;

K_R – коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока, $K_R=1$.

В данном расчете $a_l=3$.

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура $\nu_{расч}=115^{\circ}\text{C}$; для медных проводников $\rho_{115}=10^{-6}/41$ Ом·м. (таблица 20 Приложение 5)

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_I = l_{срI} \cdot w_I, \quad (87)$$

где $l_{срI}$ - средняя длина витка обмотки, м;

w_I - число витков фазы.

$$l_{срI} = 2(l_{nI} + l_{лI}), \quad (88)$$

где l_{nI} - длина пазовой части, м.

Длина пазовой части l_{nI} равна конструктивной длине сердечников машины.

$$l_{nI} = l_I = 0,14 \text{ м.}$$

$$l_{лI} = K_{л} \cdot b_{км} + 2B, \quad (89)$$

где $K_{л}$ – коэффициент значение которого берут из таблицы 9 Приложение 5, $K_{л}=1,3$;

$b_{км}$ – средняя ширина катушки, м, определяемая по дуге окружности, проходящей по серединам высоты пазов.

Для всыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, берут $B=0,01$ м.

$$b_{км} = \frac{\pi(D + h_{nI})}{2p} \cdot \beta, \quad (90)$$

где β – укорочение шага обмотки статора.

Для диаметральных двухслойных обмоток, выполненных без укорочения шага, и для однослойных обмоток, включая обмотки из концентрических катушек, имеющих разную ширину, принимают $\beta=1$.

$$b_{км} = \frac{3,14(0,185 + 0,0212)}{2 \cdot 2} \cdot 1 = 0,162 \text{ м.}$$

$$l_{лI} = 1,3 \cdot 0,162 + 2 \cdot 0,01 = 0,231 \text{ м.}$$

$$l_{срI} = 2(0,14 + 0,231) = 0,742 \text{ м.}$$

$$L_I = 0,742 \cdot 104 = 77,17 \text{ м.}$$

$$r_1 = \frac{10^{-6} \cdot 77,17}{41 \cdot 5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,355 \text{ Ом.}$$

Длина вылета лобовой части катушки:

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{\text{кст}} + B, \quad (91)$$

где $K_{\text{л}}$ – коэффициент значение которого берут из таблицы 9 Приложение 5, $K_{\text{л}}=0,4$.

$$l_{\text{выл}} = 0,4 \cdot 0,162 + 0,01 = 0,0748 \text{ м.}$$

Относительное значение r_1 :

$$r_1^* = r_1 \cdot \frac{I_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}}, \quad (92)$$

$$r_1^* = 0,355 \cdot \frac{29,3}{220} = 0,047$$

45. Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{\text{кл}}}{\Delta^2} \cdot k_r, \quad (93)$$

Сопротивление стержня:

$$r_c = \rho_c \cdot \frac{l_2}{q_c}, \quad (94)$$

где q_c – сечение стержня, м²;

k_r – коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока; при расчете рабочих режимов в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального для всех роторов принимают $k_r=1$.

ρ_c – соответствующее удельное сопротивление материала стержня замыкающих колец при расчетной температуре 115°C, Ом·м. Данные по удельному сопротивлению приведены в таблице 20 Приложение 5.

Для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_c = \rho_{\text{кл}} = \rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{ м.}$

$$r_c = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,14}{167 \cdot 10^{-6}} = 40,89 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Сопротивление участка замыкающего кольца:

$$r_{кл} = \rho_{кл} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}}, \quad (95)$$

где $D_{кл.ср}$ – средний диаметр замыкающих колец, м;

$q_{кл}$ – площадь поперечного сечения замыкающего кольца, м²;

$\rho_{кл}$ – соответствующее удельное сопротивление материала стержня замыкающих колец при расчетной температуре 115°C, Ом·м. Данные по удельному сопротивлению приведены в таблице 20 Приложение 5.

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл}, \quad (96)$$

$$D_{кл.ср} = 0,184 - 0,037 = 0,147 \text{ м.}$$

$$r_{кл} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,148}{38 \cdot 595 \cdot 10^{-6}} = 10^{-6} \text{ Ом.}$$

$$r_2 = 40,89 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,329^2} = 59,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора:

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2}, \quad (97)$$

$$r'_2 = 59,37 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3(104 \cdot 0,958)^2}{38} = 0,186 \text{ Ом.}$$

Относительное значение:

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{ном}}{U_{ном}}, \quad (98)$$

$$r'_{2*} = 0,186 \cdot \frac{29,3}{220} = 0,0248$$

46. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

Рисунок 11е Приложение 5 и рисунок 1. Для однослойной обмотки $l'_\delta = l_\delta = 0,14 \text{ м.}$

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{nl} + \lambda_{ll} + \lambda_{\partial l}), \quad (99)$$

где λ_{nl} – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния;

λ_{ll} – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния;

$\lambda_{\partial 1}$ – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеивания.

$$\lambda_{n1} = \frac{h_2}{3b_1} \cdot k_{\beta} + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \cdot k'_{\beta} \right) \quad (100)$$

$$h_2 = h_{n.k} - 2b_{u3}, \quad (101)$$

$$h_2 = 18,3 - 2 \cdot 0,4 = 17,5 \text{ мм.}$$

$$h_k = 0,5(b_1 - b_{uu}), \quad (102)$$

$$h_k = 0,5(7,6 - 3,7) = 1,95 \text{ мм.}$$

Т.к. проводники закреплены пазовой крышкой, то $h_1=0$, $k_{\beta}=1$, $k'_{\beta} = 1$.
Для двухслойной обмотки с укороченным шагом $k_{\beta} = 0,25(1 + 3k'_{\beta})$;

$$k'_{\beta} = 0,25(1 + 3\beta)$$

$$\lambda_{n1} = \frac{17,3}{3 \cdot 7,6} + \left(\frac{3 \cdot 1,95}{7,6 + 2 \cdot 3,7} + \frac{1}{3,7} \right) \cdot 1 = 1,42$$

$$\lambda_{n1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}} \cdot (l_{n1} - 0,64\beta \cdot \tau), \quad (103)$$

где q – число пазов на полюс и фазу;

l_n – длина лобовой части витка обмотки;

β – укорочение шага обмотки статора.

$$\lambda_{n1} = 0,34 \cdot \frac{4}{0,14} \cdot (0,231 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,145) = 1,34$$

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{t_{z1}}{12\delta k_{\delta}} \cdot \xi, \quad (104)$$

где ξ – коэффициент зависящий от числа q , укорочения шага обмотки, размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора.

$$\xi = 2k'_{ck}k_{\beta} - k_{o\partial 1}^2 \left(\frac{t_{z1}}{t_{z2}} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ck}^2), \quad (105)$$

где для $\beta_{ck} = 0$ и $\frac{t_{z1}}{t_{z2}} = \frac{15,2}{12,1} = 1,26$ по рисунку 12д Приложение 5, $k'_{ck} = 1,25$.

$$\xi = 2 \cdot 1,25 - 0,958^2 \left(\frac{15,2}{12,1} \right)^2 = 1,05$$

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{12,1}{12 \cdot 0,5 \cdot 1,22} \cdot 1,05 = 1,74$$

$$X_I = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{104}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,14}{2 \cdot 4} (1,42 + 1,34 + 1,74) = 0,673 \text{ Ом.}$$

Относительное значение:

$$x_I^* = X_I \cdot \frac{I_{I_{ном}}}{U_{I_{ном}}}, \quad (106)$$

$$x_I^* = 0,673 \cdot \frac{29,3}{220} = 0,09$$

47. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 \cdot f_I \cdot l'_\delta \cdot (\lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{\partial 2} + \lambda_{ск}), \quad (107)$$

где λ_{n2} – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния;

$\lambda_{л2}$ – коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния;

$\lambda_{\partial 2}$ – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеивания;

$\lambda_{ск}$ – коэффициент проводимости скоса.

$$\lambda_{n2} = \left[\frac{h_0}{3b_I} \cdot \left(1 - \frac{\pi b_I^2}{8q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{uu}}{2b_I} \right] \cdot k_{\partial} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} + 1,12 \cdot \frac{h'_{uu} \cdot 10^6}{I_2}, \quad (108)$$

По рисунку 13а,ж Приложение 5 и рисунок 1 (для двигателей с $h < 160$ мм, $h'_{uu} = 0$) $q_c = 167 \text{ мм}^2$; $b_I = 7,9 \text{ мм}$; $b_{uu} = 1,5 \text{ мм}$; $h_{uu} = 0,7 \text{ мм}$; $h'_{uu} = 0,3 \text{ мм}$.

$$h_0 = h_I + 0,4b_2, \quad (109)$$

$$h_0 = 22,4 + 0,4 \cdot 4,2 = 24,08 \text{ мм.}$$

$$\lambda_{n2} = \left[\frac{24,08}{3 \cdot 7,9} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot 7,9^2}{8 \cdot 167} \right) + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,9} \right] \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \cdot \frac{0,03 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{417} = 2,58$$

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_{к.ср}}{Z_2 l'_\delta \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7D_{к.ср}}{a_{кл} + 2b_{кл}}, \quad (110)$$

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot 0,147}{38 \cdot 0,14 \cdot 0,329^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,147}{0,016 + 2 \cdot 0,037} = 0,587$$

$$\lambda_{\partial 2} = \frac{t_{Z2}}{12\delta k_\delta} \cdot \zeta, \quad (111)$$

Так как при закрытых пазах $\Delta_Z \approx 0$.

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta Z}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} = 1,005$$

$$x_2 = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,14(2,58 + 0,59 + 2,09) = 291 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Приводим к числу витков статора:

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2}, \quad (112)$$

$$x'_2 = 291 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(104 \cdot 0,958)^2}{38 \cdot 1^2} = 0,912 \text{ Ом.}$$

Относительное значение:

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{ном}}{U_{ном}}, \quad (113)$$

$$x'_{2*} = 0,912 \cdot \frac{29,3}{220} = 0,121$$

Расчет потерь

48. Основные потери в стали:

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}), \quad (114)$$

где $p_{1,0/5,0}$ – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц, кВт/кг;

β – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания; для большинства электротехнических сталей $\beta=1,3 \dots 1,5$;

$k_{\partial a}, k_{\partial z}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали, неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью меньше 250 кВт приближенно можно принять $k_{\partial a}=1,6$ и $k_{\partial z}=1,8$; для машин большей мощности $k_{\partial a}=1,4$ и $k_{\partial z}=1,7$.

B_a – индукция в ярме, Тл;

B_{z1cp} – средняя индукция в зубцах статора, Тл;

m_a – масса стали ярма, кг;

m_{z1} – масса зубцов статора, кг.

По таблице 10 Приложение 5 удельные потери для стали 2013 будут равны

$$p_{1,0/5,0} = 2,5 \text{ Вт/кг.}$$

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_{c1} \cdot \gamma_c \quad (115)$$

$$m_a = 3,14 \cdot (0,272 - 0,0223) \cdot 0,0223 \cdot 0,14 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 18,53 \text{ кг.}$$

$$m_{Z1} = h_{Z1} \cdot b_{Z1cp} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot k_{c1} \cdot \gamma_c \quad (116)$$

$$m_{Z1} = 21,3 \cdot 10^{-3} \cdot 4,9 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 0,14 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 5,28 \text{ кг.}$$

$$P_{см.осн} = 2,5 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,6^2 \cdot 18,53 + 1,8 \cdot 1,92^2 \cdot 5,28) = 276,4 \text{ Вт.}$$

49. Поверхностные потери в роторе:

$$P_{нов2} = p_{нов2} \cdot (t_{z2} - b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_{cm2}, \quad (117)$$

где $p_{нов2}$ – удельные поверхностные потери, Вт/м².

$$p_{нов2} = 0,5k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02}t_1 \cdot 10^3)^2, \quad (118)$$

где k_{02} – коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери. Двигатели мощностью до 160 кВт, сердечники статоров которых шихтуют на цилиндрические оправки, то $k_{02}=1,4...1,8$, при шлифованных поверхностях (наружная поверхность роторов машин средней и большой мощности и внутренняя поверхность статора двигателей $P_2 > 160$ кВт), то $k_{02}=1,7...2,0$; Принимаем $k_{02}=1,5$.

B_{02} – амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре, Тл.

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta}, \quad (119)$$

где β_{02} – коэффициент отношения ширины шлица пазов статора к воздушному зазору. Для отношения $b_w/\delta=3,7/0,5=7,4$ по рисунку 14 Приложение 5 находим $\beta_{02} = 0,37$.

$$B_{02} = 0,37 \cdot 1,22 \cdot 0,749 = 0,338 \text{ Тл.}$$

$$p_{нов2} = 0,5 \cdot 1,5 \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} (0,338 \cdot 12,1)^2 = 242,4 \text{ Вт/м}^2.$$

$$P_{нов2} = 242,4(15,2 - 1,5)38 \cdot 0,14 \cdot 10^{-3} = 17,7 \text{ Вт.}$$

50. Пульсационные потери в зубцах ротора:

$$P_{\text{нул}2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{нул}2} \right)^2 m_{Z2}, \quad (120)$$

где $B_{\text{нул}2}$ – амплитуда пульсации индукции в среднем сечении зубцов для зубцов ротора, Тл;

m_{Z2} – масса стали зубцов ротора, кг.

$$B_{\text{нул}2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{Z2}} B_{Z2cp}, \quad (121)$$

где $B_{Z2cp}=1,81$ Тл из расчета п.37; $\gamma_1=4,42$ из расчета п. 35.

$$B_{\text{нул}2} = \frac{4,42 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3}} 1,81 = 0,132 \text{ Тл.}$$

$$m_{Z2} = Z_2 \cdot h_{Z2} \cdot b_{Z2cp} \cdot l_{cm2} \cdot k_{c2} \cdot \gamma_c \quad (122)$$

$$m_{Z2} = 38 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 7,59 \text{ кг.}$$

$$P_{\text{нул}2} = 0,11 \left(\frac{48 \cdot 1500}{1000} 0,132 \right)^2 \cdot 7,59 = 75,4 \text{ Вт.}$$

51. Сумма добавочных потерь в стали:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{нов}1} + P_{\text{нул}1} + P_{\text{нов}2} + P_{\text{нул}2}, \quad (123)$$

где $P_{\text{нул}1}$ – пульсационные потери в зубцах статора, Вт;

$P_{\text{нул}2}$ – пульсационные потери в зубцах ротора, Вт;

$P_{\text{нов}1}$ – полные поверхностные потери статора, Вт;

$P_{\text{нов}2}$ – полные поверхностные потери ротора, Вт;

Обычно $P_{\text{нов}1}$ и $P_{\text{нул}1}$ приближенно равны нулю, следовательно:

$$P_{\text{ст.доб}} = 17,7 + 75,4 = 93,1 \text{ Вт.}$$

52. Полные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}}, \quad (124)$$

$$P_{\text{ст}} = 276,4 + 93,1 = 369,5 \text{ Вт.}$$

53. Механические потери:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 \quad (125)$$

где K_T – коэффициент трения.

Для двигателей с внешним обдувом ($0,1 \leq D_a \leq 0,5$) $K_T=1$ для двигателей с $2p=2$, а при $2p \geq 4$ $K_T=1,3 \cdot (1-D_a)$:

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - 0,272) = 0,95$$

$$P_{\text{мех}} = 0,95 \cdot \left(\frac{1500}{10}\right)^2 \cdot 0,272^4 = 117 \text{ Вт.}$$

54. Холостой ход двигателя:

$$I_{x.x} = \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{x.x.p}^2} \quad (126)$$

где $I_{x.x.a}$ – активная составляющая тока холостого хода, А;

$I_{x.x.p}$ – реактивная составляющая тока холостого хода, А. Реактивная составляющая тока $I_{x.x.p} \approx I_\mu$

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{элх.х}}}{m \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (127)$$

где $P_{\text{элх.х}}$ – электрические потери в статоре при холостом ходе, Вт.

$$P_{\text{элх.х}} \approx 3I_\mu^2 \cdot r_1, \quad (128)$$

$$P_{\text{элх.х}} \approx 7,9^2 \cdot 0,355 = 66,6 \text{ Вт.}$$

$$I_{x.x.a} = \frac{369,5 + 117 + 66,6}{3 \cdot 220} = 0,84 \text{ А.}$$

$$I_{x.x} = \sqrt{0,84^2 + 7,91^2} = 7,95 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\begin{aligned} \cos\varphi_{x.x} &= \frac{I_{x.x.a}}{I_{x.x}}, \\ \cos\varphi_{x.x} &= \frac{0,84}{7,95} = 0,11 \end{aligned} \quad (129)$$

Расчет рабочих характеристик

55. Параметры:

Сопротивления r_{12} и x_{12} с достаточной для обычных расчетов точностью определяют по следующим формулам:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m \cdot I_\mu^2}, \quad (130)$$

$$r_{12} = \frac{276,4}{3 \cdot 7,9^2} = 1,47 \text{ Ом.}$$

$$x_{12} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_\mu} - x_1, \quad (131)$$

$$x_{12} = \frac{220}{7,9} - 0,673 = 27,14 \text{ Ом.}$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2 – 3 кВт, как правило, $|\gamma| \leq 1^\circ$, поэтому реактивной составляющей можно пренебречь, тогда:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}}, \quad (132)$$

$$c_1 = 1 + \frac{0,673}{27,14} = 1,025$$

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}, \quad (133)$$

$$\gamma = \arctg \frac{0,335 \cdot 27,14 - 1,47 \cdot 0,673}{1,47 \cdot (0,355 + 1,47) + 27,14 \cdot (0,0673 + 27,14)} = \arctg 0,01 \text{ рад} = |34'| \leq 1^\circ$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3I_\mu^2}{3U_1}, \quad (134)$$

$$I_{0a} = \frac{276,4 + 3 \cdot 7,9^2 \cdot 0,673}{3 \cdot 220} = 0,52 \text{ А.}$$

$$a' = c_1^2 = 1,025^2 = 1,051; \quad b' = 0;$$

$$a = c_1 r_1 = 1,025 \cdot 0,355 = 0,364 \text{ Ом.}$$

$$b = c_1 (x_1 + c_1 x_2') = 1,025(0,673 + 1,025 \cdot 0,912) = 1,648 \text{ Ом.}$$

Потери, не меняющиеся при изменении скольжения:

$$P_{ст} + P_{мех} = 369,5 + 117 = 487 \text{ Вт.} \approx 0,49 \text{ кВт.}$$

56. Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений

$s=0,05; 0,01; 0,015; 0,020; 0,025; 0,03$, принимая предварительно $s_{ном} = r_2' \approx 0,025$.

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

После построения рабочих характеристик рисунок 2 уточняем значение номинального скольжения $s_H = 0,024$.

Номинальные данные спроектированного двигателя:

$$P_{2ном} = 15 \text{ кВт, } U_{1ном} = 220/380 \text{ В, } I_{1ном} = 28,4 \text{ А, } \cos\varphi_{ном} = 0,894, \eta_{ном} = 0,892.$$

Таблица 1 - Рабочие характеристики асинхронного двигателя

| № | Расчетная формула | Размерно | Скольжение S |
|---|-------------------|----------|--------------|
|---|-------------------|----------|--------------|

| | | СТЬ | 0,005 | 0,01 | 0,015 | 0,02 | 0,025 | 0,03 | $S_{\text{НОМ}} = 0,024$ |
|----|---|-----|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| 1 | $a' \cdot r_2'/s$ | Ом | 39,1 | 19,55 | 13,03 | 9,77 | 7,82 | 6,52 | 8,15 |
| 2 | $R = a + a' \cdot r_2'/s$ | Ом | 39,46 | 19,91 | 13,39 | 10,13 | 8,81 | 6,88 | 8,51 |
| 3 | $X = b + b' \cdot r_2'/s$ | Ом | 1,65 | 1,65 | 1,65 | 1,65 | 1,65 | 1,65 | 1,65 |
| 4 | $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ | Ом | 39,49 | 19,98 | 13,49 | 10,26 | 8,34 | 7,08 | 8,67 |
| 5 | $I_2'' = U_1/Z$ | А | 5,57 | 11,011 | 16,31 | 21,44 | 26,38 | 31,07 | 25,37 |
| 6 | $\cos\varphi_2' = R/Z$ | - | 0,999 | 0,996 | 0,993 | 0,987 | 0,981 | 0,972 | 0,982 |
| 7 | $\sin\varphi_2' = X/Z$ | - | 0,042 | 0,083 | 0,112 | 0,161 | 0,198 | 0,233 | 0,19 |
| 8 | $I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos\varphi_2'$ | А | 6,08 | 11,49 | 16,72 | 21,68 | 26,4 | 30,72 | 25,43 |
| 9 | $I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin\varphi_2'$ | А | 8,14 | 8,82 | 9,9 | 11,36 | 13,13 | 15,15 | 12,73 |
| 10 | $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$ | А | 10,16 | 14,48 | 19,43 | 24,28 | 29,48 | 34,25 | 28,44 |
| 11 | $I_2' = c_1 I_2''$ | А | 5,71 | 11,29 | 16,72 | 21,98 | 27,04 | 31,85 | 26 |
| 12 | $P_1 = 3U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$ | кВт | 4,01 | 7,58 | 11,03 | 14,31 | 17,42 | 20,28 | 16,78 |
| 13 | $P_{\varphi 1} = 3I_1'^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$ | кВт | 0,11 | 0,223 | 0,402 | 0,638 | 0,926 | 1,25 | 0,861 |
| 14 | $P_{\varphi 2} = 3I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$ | кВт | 0,018 | 0,071 | 0,156 | 0,27 | 0,408 | 0,566 | 0,377 |
| 15 | $P_{\text{дооб}} = 0,005 \cdot P_1$ | кВт | 0,034 | 0,048 | 0,064 | 0,081 | 0,097 | 0,113 | 0,084 |
| 16 | $\sum P = P_{cm} + P_{mex} + P_{\varphi 2} + P_{\varphi 1} \cdot P_{\varphi, \text{ш}} + P_{\text{дооб}}$ | кВт | 0,652 | 0,832 | 1,112 | 1,479 | 1,921 | 2,418 | 1,812 |
| 17 | $P_2 = P_1 - \sum P$ | кВт | 3,36 | 6,75 | 9,92 | 12,83 | 15,5 | 17,86 | 14,97 |
| 18 | $\eta = 1 - \sum P/P_1$ | - | 0,838 | 0,891 | 0,899 | 0,897 | 0,89 | 0,881 | 0,892 |
| 19 | $\cos\varphi = I_{1a}/I_1$ | - | 0,598 | 0,794 | 0,861 | 0,886 | 0,896 | 0,897 | 0,894 |

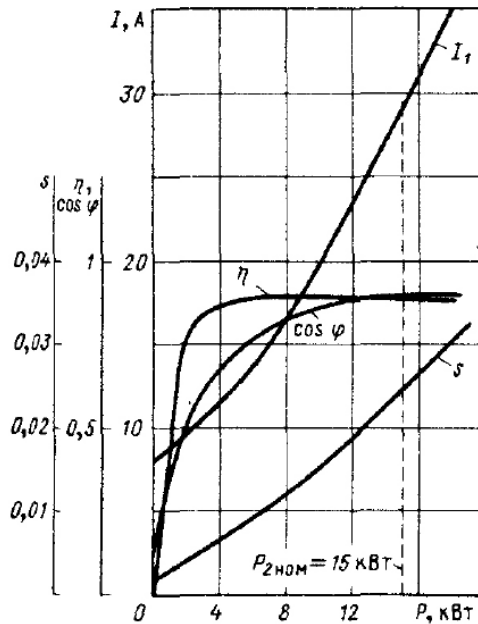


Рис.2. Рабочие характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_{2ном}=15$ кВт, $2p=4$, $U_{ном}=220/380$ В, $I_{1ном}=28,4$ А, $\cos\varphi_{ном}=0,894$; $\eta_{ном}=0,892$, $s_{ном}=0,024$)

Расчет пусковых характеристик

Расчет токов с учетом влияния измерения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учета влияния насыщения от полей рассеяния).

Подробный расчет приведен для скольжения $S=1$. Данные для расчета других точек приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока

| №п/п | Расчетная формула | Размерность | Скольжение s | | | | | |
|------|---|-------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| | | | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | $S_{кр} = 0,14$ |
| 1 | $\xi = 63,61 h_c \sqrt{S}$ | - | 1,81 | 1,63 | 1,28 | 0,81 | 0,57 | - |
| 2 | $\varphi(\xi)$ | - | 0,66 | 0,45 | 0,19 | 0,04 | 0,01 | - |
| 3 | $h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}$ | мм | 17,2 | 19,7 | 23,9 | 28,5 | 28,5 | 28,5 |
| 4 | $k_r = q_c / q_r$ | - | 1,46 | 1,3 | 1,12 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | $K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1)$ | - | 1,32 | 1,21 | 1,08 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | $r'_{2\xi} = K_R r'_2$ | Ом | 0,246 | 0,225 | 0,2 | 0,186 | 0,186 | 0,186 |
| 7 | $k_\varphi = \varphi'(\xi)$ | - | 0,81 | 0,86 | 0,93 | 0,97 | 0,99 | 0,98 |
| 8 | $\lambda'_{n2\xi} = \lambda'_n - \Delta\lambda_{n2\xi}$ | - | 2,33 | 2,4 | 2,49 | 2,54 | 2,57 | 2,55 |
| 9 | $K_x = \frac{\sum \lambda'_{2\xi}}{\sum \lambda_2}$ | - | 0,95 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1 | 1 |
| 10 | $x'_{2\xi} = K_x x'_2$ | Ом | 0,866 | 0,885 | 0,894 | 0,903 | 0,912 | 0,908 |
| 11 | $R_n = r_1 + c_{1n} \frac{r'_{2\xi}}{s}$ | Ом | 0,605 | 0,641 | 0,762 | 1,3 | 2,25 | 1,7 |
| 12 | $X_n = x_1 + c_{1n} x'_{2\xi}$ | Ом | 1,55 | 1,57 | 1,58 | 1,59 | 1,6 | 1,6 |

| | | | | | | | | |
|----|---|---|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 13 | $x_2' \xi = x_2' K_x$ | A | 132,2 | 129,7 | 125,4 | 107,1 | 79,7 | 94,2 |
| 14 | $I_{1n} = I_{2n} \frac{\sqrt{R_n^2 + (x_n + x_{12n}^2)}}{c_{1n} x_{12n}}$ | A | 135,1 | 132,6 | 128,2 | 109,2 | 81,7 | 96,8 |

57. Активное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта

вытеснения тока: ($g_{расч} = 115^\circ\text{C}$; $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\frac{b_c}{b_n} = 1$; $f_1 = 50 \text{ Гц}$)

По рисунку 1а $h_c = h_n - (h_{uu} + h'_{uu}) = 29,5 - (0,7 + 0,3) = 28,5 \text{ мм}$.

$$\xi = 2\pi \cdot h_c \cdot \sqrt{\frac{b_c \cdot f_2}{b_n \cdot \rho_{115}}} = 63,61 \cdot h_c \cdot \sqrt{S}, \quad (135)$$

$$\xi = 63,61 \cdot 0,0285 \cdot \sqrt{1} = 1,81$$

По рисунку 15 Приложение 5 для $\xi = 1,81$ находим $\varphi = 0,66$.

Глубина проникновения тока:

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi}, \quad (136)$$

$$h_r = \frac{0,0285}{1 + 0,66} = 0,0172 \text{ м} = 17,2 \text{ мм}.$$

так как $(0,5 \cdot 7,9) < 17,2 < (22,4 + 0,5 \cdot 7,9)$ рисунок 1.

Площадь сечения, ограниченная высотой h_r :

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right), \quad (137)$$

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right), \quad (138)$$

$$b_r = 7,9 - \frac{7,9 - 4,2}{22,4} \cdot \left(17,2 - \frac{7,9}{2} \right) = 5,71 \text{ мм}.$$

$$q_r = \frac{7,9 + 5,71}{2} \cdot \left(17,2 - \frac{7,9}{2} \right) = 114,7 \text{ м}^2.$$

Коэффициент k_r определяют по отношению площадей всего сечения стержня и сечения ограниченного высотой h_r :

$$k_r = \frac{q_c}{q_r}, \quad (139)$$

$$k_r = 167/114,7 = 1,46$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1), \quad (140)$$

$$K_R = 1 + \frac{40,89 \cdot 10^{-6}}{59,37 \cdot 10^{-6}} (1,46 - 1) = 1,32$$

Приведенное активное сопротивление ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока:

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2, \quad (141)$$

$$r'_{2\xi} = 1,32 \cdot 0,186 = 0,246 \text{ Ом.}$$

58. Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока по рисунку 16 Приложение 5 для $\xi = 1,81$, $\varphi' = k_\partial = 0,81$:

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2}}, \quad (142)$$

где $\lambda_{n2\xi}$ – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеивания с учетом эффекта вытеснения тока.

$$\lambda_{n2\xi} = \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2\xi}, \quad (143)$$

$$\lambda'_{n2\xi} = 2,58 - 0,25 = 2,33$$

$$\Delta\lambda_{n2\xi} = \lambda'_{n2} \cdot (1 - k_\partial) = \left[\frac{h_0}{3b_l} \cdot \left(1 - \frac{\pi b_l^2}{8q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{ul}}{2b_l} \right] \cdot (1 - k_\partial), \quad (144)$$

$$\Delta\lambda_{n2\xi} = \left[\frac{24,08}{3 \cdot 7,9} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot 7,9^2}{8 \cdot 167} \right) + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,9} \right] \cdot (1 - 0,81) = 0,25$$

$$K_x = \frac{2,33 + 0,59 + 2,09}{2,58 + 0,59 + 2,09} = 0,95$$

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x, \quad (145)$$

$$x'_{2\xi} = 0,0912 \cdot 0,95 = 0,866 \text{ м.}$$

59. Пусковые параметры:

$$x_{12n} = k_\mu \cdot x_{12}, \quad (146)$$

$$x_{12n} = 0,912 \cdot 0,95 = 0,866 \text{ Ом.}$$

$$c_{1n} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}}, \quad (147)$$

$$c_{1n} = 1 + \frac{0,673}{39,62} = 1,017$$

60. Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока для $s=1$:

$$R_n = r_1 + c_{1n} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}, \quad (148)$$

$$R_n = 0,355 + 1,017 \frac{0,246}{1} = 0,605 \text{ Ом.}$$

$$X_n = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi}, \quad (149)$$

$$X_n = 0,673 + 1,017 \cdot 0,866 = 1,55 \text{ Ом.}$$

Ток в обмотке ротора:

$$I'_{2n} = \frac{U_1}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}}, \quad (150)$$

$$I'_{2n} = \frac{220}{\sqrt{0,605^2 + 1,55^2}} = 132,2 \text{ А.}$$

$$I_{1n} = I'_{2n} \cdot \frac{\sqrt{R_n^2 + (x_n + x_{12n}^2)}}{c_{1n} \cdot x_{12n}}, \quad (151)$$

$$I_{1n} = 132,2 \cdot \frac{\sqrt{0,605^2 + (1,55 + 39,62^2)}}{1,017 \cdot 39,62} = 135,1 \text{ А.}$$

Расчет пусковых характеристик с учетом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

Расчет проводим для точек характеристик, соответствующих $s=1$; 0,8; 0,5; 0,2 0,1, при этом используем значения токов и сопротивлений для тех же скольжений с учетом влияния вытеснения тока (таблица 2). Подробный расчет приведен для скольжения $s=1$. Данные для расчета других точек приведены в таблице 3.

Таблица №3 - Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

| № п/п | Расчетная формула | Раз мер нос ть | Скольжение s | | | | | |
|----------|--|-------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| | | | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | $S_{кр} = 0,14$ |
| 1 | $k_{нас}$ | - | 1,35 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 1,05 | 1,08 |
| 2 | $F_{н.ср} = 0,7 \cdot \frac{k_{нас} I_{1н1}}{a} (k'_\beta + k_{y1} \cdot k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2})$ | А | 3668 | 3467 | 3094 | 2422 | 1725 | 2102 |
| 3 | $B_{ф\delta} = \frac{F_{н.ср} 10^{-6}}{1,6\delta C_N}$ | Тл | 4,69 | 4,43 | 3,95 | 3,1 | 2,21 | 2,69 |
| 4 | $k_\delta = f(B_{ф\delta})$ | - | 0,5 | 0,53 | 0,61 | 0,72 | 0,84 | 0,79 |
| 5 | $c_1 = (t_{z1} - b_{u1})(1 - \kappa_\delta)$ | мм | 4,2 | 3,95 | 3,28 | 2,35 | 1,34 | 1,76 |
| 6 | $\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас}$ | - | 1,17 | 1,18 | 1,2 | 1,25 | 1,31 | 1,28 |
| 7 | $\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \kappa_\delta$ | - | 0,87 | 0,92 | 1,06 | 1,25 | 1,46 | 1,37 |
| 8 | $x_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1}$ | Ом | 0,505 | 0,514 | 0,538 | 0,574 | 0,615 | 0,597 |
| 9 | $c_{1н.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12н}}$ | - | 1,013 | 1,013 | 1,014 | 1,014 | 1,016 | 1,015 |
| 10 | $c_2 = (t_{z2} - b_{u2})(1 - \kappa_\delta)$ | мм | 6,85 | 6,44 | 5,34 | 3,84 | 2,19 | 2,88 |
| 11 | $\lambda_{n2нас} = \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2нас}$ | - | 1,78 | 1,86 | 1,96 | 2,06 | 2,17 | 2,11 |
| 12 | $\lambda_{д2нас} = \kappa_\delta \lambda_{д2}$ | - | 1,05 | 1,11 | 1,27 | 1,5 | 1,76 | 1,65 |
| 13 | $x'_{2нас} = x_2 \frac{\sum \lambda_{2нас}}{\sum \lambda_2}$ | Ом | 0,593 | 0,617 | 0,662 | 0,72 | 0,787 | 0,754 |
| 14 | $R_{н.нас} = r_1 + c_{1н.нас} \frac{r'_{2\xi}}{s}$ | Ом | 0,6 | 0,64 | 0,76 | 1,3 | 2,24 | 1,7 |
| 15 | $X_{н.нас} = x_{1нас} + c_{1н.нас} x'_{2нас}$ | Ом | 1,11 | 1,14 | 1,21 | 1,3 | 1,41 | 1,36 |
| 16 | $I'_{2нас} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{н.нас}^2 + X_{н.нас}^2}}$ | А | 174,4 | 168,3 | 153,9 | 119,7 | 83,1 | 101,1 |
| 17 | $I_{1нас} = I'_{2нас} \frac{\sqrt{R_{н.нас}^2 + (X_{н.нас} + x_1)^2}}{c_{1н.нас} \cdot x_{12н}}$ | А | 177 | 170,9 | 156,4 | 122 | 84,6 | 103,1 |
| 18 | $k'_{нас} = \frac{I_{1нас}}{I_{1н}}$ (сравнить с принятым в п. 1 $k_{нас}$) | - | 1,31 | 1,29 | 1,22 | 1,11 | 1,04 | 1,07 |
| 19 | $I_{1*} = I_{1нас} / I_{1ном}$ | - | 6,2 | 6 | 5,5 | 4,3 | 3 | 3,6 |
| 20 | $M* = \left(\frac{I'_{2нас}}{I_{2ном}}\right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_{ном}}{s}$ | - | 1,43 | 1,52 | 1,82 | 2,54 | 2,45 | 2,59 |

61. Индуктивное сопротивление обмотки. Принимаем $k_{нас} = 1,35$:

$$F_{н.ср} = 0,7 \cdot \frac{k_{нас} I_{1н1}}{a} \cdot \left(k'_\beta + k_{y1} \cdot k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right), \quad (152)$$

$$F_{n.cp} = 0,7 \cdot \frac{135,1 \cdot 1,35 \cdot 13}{1} \cdot \left(1 + 1 \cdot 0,958 \cdot \frac{48}{38}\right) = 3668 \text{ А.}$$

Фиктивная индукция потока рассеивания в воздушном зазоре:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.cp} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N}, \quad (153)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}, \quad (154)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,5}{12,1 + 15,2}} = 0,978$$

$$B_{\phi\delta} = \frac{3668 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,978} = 4,69 \text{ Тл.}$$

По рисунку 17 Приложение 5 для $B_{\phi\delta} = 4,69$ Тл находим $k_\delta = 0,5$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$c_1 = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_\delta), \quad (155)$$

$$c_1 = (12,1 - 3,7) \cdot (1 - 0,5) = 4,2 \text{ мм.}$$

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_{u1} + 0,58h_k}{b_{u1}} \cdot \frac{c_{\phi 1}}{c_{\phi 1} + 1,5b_{u1}}, \quad (156)$$

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{1 + 0,58 \cdot 1,95}{3,7} \cdot \frac{4,2}{4,2 + 1,5 \cdot 3,7} = 0,25$$

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас}, \quad (157)$$

$$\lambda_{n1нас} = 1,42 - 0,25 = 1,17$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$\lambda_{\partial 1нас} = \lambda_{\partial 1} \cdot k_\delta, \quad (158)$$

$$\lambda_{\partial 1нас} = 1,74 \cdot 0,5 = 0,87$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщенности:

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1}, \quad (159)$$

$$x_{1нас} = 0,973 \cdot \frac{1,17 + 1,34 + 0,87}{1,42 + 1,34 + 1,74} = 0,505 \text{ Ом.}$$

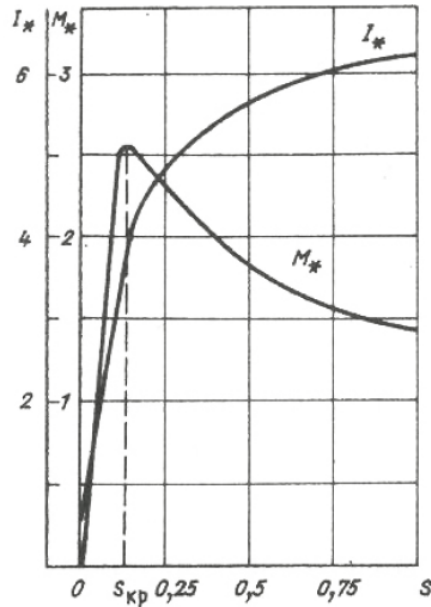


Рис. 3. Пусковые характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_{2ном}=15$ кВт, $2p=4$, $U_{ном}=220/380$ В; $M_n=1,43$, $I_n=6,2$, $M_{max}=2,59$)

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока:

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{c_{\varepsilon 2} + b_{u2}}, \quad (160)$$

где $c_{\varepsilon 2}$ – дополнительное раскрытие для ротора.

$$c_{\varepsilon 2} = (t_1 - b_{u2}) \cdot (1 - \kappa_{\delta}), \quad (161)$$

(для закрытых пазов ротора $h_{u2} = h'_{u1} + h_{u1} = 0,3 + 0,7 = 1$ мм.)

$$c_{\varepsilon 2} = (15,2 - 1,5) \cdot (1 - 0,5) = 6,85 \text{ мм.}$$

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{1}{1,5} \cdot \frac{6,85}{6,85 + 1,5} = 0,55$$

$$\lambda_{n2\zeta нас} = \lambda_{n\zeta 2} - \Delta\lambda_{n2нас}, \quad (162)$$

$$\lambda_{n2\zeta нас} = 2,33 - 0,55 = 1,78$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения:

$$\lambda_{\partial 2нас} = \lambda_{\partial 2} \cdot \kappa_{\delta}, \quad (163)$$

$$\lambda_{\partial 2нас} = 2,09 \cdot 0,5 = 1,05$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения:

$$x'_{2\xi_{нас}} = x'_2 \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xi_{нас}}}{\sum \lambda_2}, \quad (164)$$

$$x'_{2\xi_{нас}} = 0,912 \frac{1,78 + 1,05 + 0,59}{2,58 + 2,09 + 0,59} = 0,593 \text{ Ом.}$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток в пусковом режиме:

$$c_{1n.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}}, \quad (165)$$

$$c_{1n.нас} = 1 + \frac{0,505}{39,62} = 1,013$$

62. Расчет токов и моментов:

$$R_{n.нас} = r_1 + c_{1n.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}, \quad (166)$$

$$R_{n.нас} = 0,355 + 1,013 \cdot \frac{0,246}{1} = 0,604 \text{ Ом.}$$

$$X_{n.нас} = x_{1нас} + c_{1n.нас} \cdot x'_{2\xi_{нас}}, \quad (167)$$

$$X_{n.нас} = 0,505 + 1,013 \cdot 0,593 = 1,11 \text{ Ом.}$$

$$I'_{2нас} = \frac{U_{Iном}}{\sqrt{R_{n.нас}^2 + X_{n.нас}^2}}, \quad (168)$$

$$I'_{2нас} = \frac{220}{\sqrt{0,604^2 + 11,1^2}} = 174,1 \text{ А.}$$

$$I_{1нас} = I'_{2нас} \frac{\sqrt{R_{n.нас}^2 + (x_{n.нас} + x_{12n})^2}}{c_{1n.нас} \cdot x_{12n}}, \quad (169)$$

$$I_{1нас} = 174,1 \cdot \frac{\sqrt{0,604^2 + (11,1 + 39,62)^2}}{1,013 \cdot 39,62} = 176,7 \text{ А.}$$

Краткость пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения:

$$I_n^* = \frac{I_{1нас}}{I_{Iном}}, \quad (170)$$

$$I_n^* = \frac{176,7}{28,4} = 6,2$$

Кратность пускового момента с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения:

$$M_n^* = \left(\frac{I'_{2n.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_{ном}}{s}, \quad (171)$$

$$M_n^* = \left(\frac{174,1}{26} \right)^2 \cdot 1,32 \cdot \frac{0,024}{1} = 1,43$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения:

$$k'_{нас} = \frac{I'_{1n.нас}}{I_{1n}}, \quad (172)$$

$$k'_{нас} = \frac{177}{135,1} = 1,31$$

отличается от принятого $k'_{нас} = 1,35$ менее чем на 3%.

Для расчета других точек характеристики задаем $k'_{нас}$,

уменьшенным в зависимости от тока I_1 (таблица 2)

$$s=0,8 \quad k'_{нас} = 1,3;$$

$$s=0,5 \quad k'_{нас} = 1,2;$$

$$s=0,2 \quad k'_{нас} = 1,1;$$

$$s=0,1 \quad k'_{нас} = 1,05;$$

Данные расчета сведены в таблицу 3, а пусковые характеристики представлены на рисунке 3

63. Критическое скольжение определяем после расчета всех точек пусковых характеристик (таблица 3) по средним значениям сопротивления $x_{1нас}$ и $x_{2\xiнас}$, соответствующим скольжениям $s=0,2...0,1$:

$$S_{кр} = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1нас}}{c_{1n.нас}} + x'_{2\xiнас}}, \quad (173)$$

$$S_{кр} = \frac{0,186}{\frac{0,59}{1,015} + 0,713} = 0,147$$

После чего рассчитываем кратность максимального момента:

$$M_n^* = 2,59 \text{ (таблица 3)}$$

Тепловой расчет

64. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta\vartheta_{нов1} = K \cdot \frac{P'_{\varepsilon.n1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1}, \quad (174)$$

где K – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки; $K=0,2$ таблица 11 Приложение 5.

α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности; $\alpha_1 = 108 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ рисунок 20б Приложение 5.

$$P'_{\varepsilon.n1} = k_p \cdot P_{\varepsilon1} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}}, \quad (175)$$

где из таблицы 1 для $s=s_{ном}$ находим $P_{\varepsilon1} = 861 \text{ Вт}$; $k_p = 1,07$.

$$P'_{\varepsilon.n1} = 1,07 \cdot 861 \cdot \frac{2 \cdot 0,14}{0,742} = 348 \text{ Вт}.$$

$$\Delta\vartheta_{нов1} = 0,2 \frac{348 + 276}{\pi \cdot 0,815 \cdot 0,14 \cdot 108} = 44,62 \text{ °С}.$$

65. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta\vartheta_{из.п1} = \frac{P'_{\varepsilon.n1}}{Z_1 \cdot \Pi_{n1} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{из.n1}}{\lambda_{\varepsilonкв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\varepsilonкв}} \right), \quad (176)$$

где Π_{n1} – расчетный периметр поперечного сечения паза статора.

$$\Pi_{n1} = 2h_{нк} + b_1 + b_2, \quad (177)$$

$$\Pi_{n1} = 2 \cdot 18,3 + 10 + 7,6 = 54,2 \text{ мм} = 0,054 \text{ м}.$$

Для изоляции класса нагревостойкости F $\lambda_{\varepsilonкв} = 0,16 \text{ Вт}/\text{м}^2$, по рисунку 18 Приложение 5 для $d/d_{из}=1,5/1,585=0,95$ находим $\lambda'_{\varepsilonкв} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$.

$$\Delta\vartheta_{из.п1} = \frac{348}{48 \cdot 0,054 \cdot 0,14} \cdot \left(\frac{0,4}{0,16} + \frac{7,6 + 10}{16 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 3,15 \text{ °С}.$$

66. Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta\vartheta_{из.л1} = \frac{P'_{\varepsilon.л1}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{л1} \cdot l_{л1}} \cdot \left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{\varepsilonкв}} + \frac{h_{н1}}{12 \cdot \lambda'_{\varepsilonкв}} \right), \quad (178)$$

где $\Pi_{л1}$ – периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки, $\Pi_{л1} \approx \Pi_{n1}$;

$b_{из.л1}$ – односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки, при отсутствии изоляции в лобовых частях $b_{из.л1max} = 0,05 \text{ мм}$;

$\lambda'_{\text{эКВ}}$ – для всыпной обмотки определяется по рисунку 18 Приложение 5, для катушек из прямоугольного провода принимают $h_{n1}/(12 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}})=0$.

$$P'_{\text{э.л1}} = k_p \cdot P_{\text{э1}} \cdot \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}}, \quad (179)$$

$$P'_{\text{э.л1}} = 1,07 \cdot 861 \cdot \frac{2 \cdot 0,231}{0,742} = 574 \text{ Вт.}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{из.л1}} = \frac{574}{2 \cdot 48 \cdot 0,054 \cdot 0,23} \cdot \left(\frac{0,05}{0,16} + \frac{18,3}{12 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 0,67 \text{ }^\circ\text{C}.$$

67. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta\vartheta_{\text{нов.л.1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{э.л1}}}{2\pi \cdot D \cdot l_{\text{выл1}} \cdot \alpha_1}, \quad (180)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{нов.л.1}} = \frac{0,2 \cdot 574}{2\pi \cdot 0,185 \cdot 74,8 \cdot 10^{-3} \cdot 108} = 12,23 \text{ }^\circ\text{C}.$$

68. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха двигателя:

$$\Delta\vartheta'_1 = \frac{(\Delta\vartheta_{\text{нов1}} + \Delta\vartheta_{\text{из.н1}}) \cdot 2l_1 + (\Delta\vartheta_{\text{изл1}} + \Delta\vartheta_{\text{нов.л1}}) \cdot 2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}}, \quad (181)$$

$$\Delta\vartheta'_1 = \frac{(14,2 + 3,15) \cdot 2 \cdot 0,14 + (0,67 + 12,23) \cdot 2 \cdot 0,23}{0,742} = 11,06 \text{ }^\circ\text{C}.$$

69. Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды:

$$\Delta\vartheta_B = \frac{\sum P'_B}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_B}, \quad (182)$$

где $\sum P'_B$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт;

α_B – коэффициент подогрева воздуха, Вт/(м²·°C);

$S_{\text{кор}}$ – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м².

$$\sum P'_B = \sum P - (1 - K) \cdot (P'_{\text{э.н1}} + P_{\text{ст.мех}}) - 0,9P_{\text{мех}}, \quad (183)$$

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}), \quad (184)$$

$\sum P = 1812$ из таблицы 1 для $s=s_{\text{ном}}$.

$$\sum P'_B = 1897 - (1 - 0,2)(348 + 276) - 0,9 \cdot 117 = 1293 \text{ Вт.}$$

$$s_{кор} = (\pi D_a + 8P_p) \cdot (l_1 + 2l_{выл1}), \quad (185)$$

где по рисунку 19 Приложение 5 $P_p=0,32$ м для $h=160$ мм;

по рисунку 20б Приложение 5 $\alpha_B = 20$ Вт/(м²·°С) для $D_a=0,272$ м.

$$s_{кор} = (\pi \cdot 0,272 + 8 \cdot 0,32)(0,14 + 2 \cdot 0,0748) = 0,99 \text{ м}^2.$$

$$\Delta\vartheta_B = \frac{1293}{0,99 \cdot 20} = 65,3 \text{ °С}.$$

70. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta\vartheta_I = \Delta\vartheta'_I + \Delta\vartheta_B, \quad (186)$$

$$\Delta\vartheta_I = 14,2 + 65,3 = 79,5 \text{ °С}.$$

71. Проверка условий охлаждения двигателя.

Требуемый для охлаждения расход воздуха:

$$Q_B = \frac{k_m \sum P'_e}{1100 \cdot \Delta\vartheta'_e}, \quad (187)$$

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

$$k_m = m \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_a}, \quad (188)$$

$$k_m = 2,5 \sqrt{\frac{1500}{100} \cdot 0,272} = 5,05$$

$$Q_B = \frac{5,05 \cdot 1293}{1100 \cdot 65,3} = 0,09 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расчет воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором:

$$\theta'_B = 0,6 D_a^3 \cdot \frac{n}{100}, \quad (189)$$

$$\theta'_B = 0,6 \cdot 0,272^3 \cdot \frac{1500}{100} = 0,18 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах. Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

Вывод: спроектированный двигатель отвечает поставленным в техническом задании требованиям.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Задание

на проект асинхронного двигателя

Ротор _____.

Мощность $P =$ _____ кВт

Напряжение $U =$ _____ В

Число полюсов $2p =$ _____

Частота $f = 50$ Гц

Исполнение по способу защиты от воздействия окружающей

Среды _____ IP

Конструктивное исполнение _____ IM 1001 _____

Дополнительные

требования _____

Выдано

Студенту _____

Гр. _____

«__» _____ 20__ г.

Руководитель _____

Объем и график выполнения основных разделов курсового проекта

| № п/ п | Наименование разделов проекта | Объем раздела в % |
|--------------|--|----------------------|
| 1 | Выбор главных размеров | 5 |
| 2 | Электромагнитный расчет | 35 |
| 3 | Разработка конструкции (выполнение чертежей общих видов в тонких линиях) | 30 |
| 4 | Механические расчеты | 5 |
| 5 | Вентиляционный расчет | 8 |
| 6 | Тепловой расчет | 7 |
| 8 | Завершение чертежей и оформление пояснительной записки | 10 |
| | | 100 |

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Курская государственная сельскохозяйственная
академия имени профессора И.И.Иванова»

Факультет инженерный
Кафедра «Информатики и электроэнергетики»

Курсовой проект

по дисциплине «Электрические машины»
на тему: «Расчет обмоток асинхронного двигателя»

Студент группы

Руководитель проекта

КУРСК – 20_

Сводные данные расчёта асинхронного двигателя

| | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| $P_{2H} =$ кВт; | $U_H =$ В; | $n_c =$ об/мин; | $I_{1H} =$ А; |
| $\cos \varphi_H =$ | $\eta_H =$; | $s_H =$; | $I_{x.x.} =$ А; |
| $M_{max}/M_H =$; | $I_{x.x.}/I_H =$; | $I_{II}/I_H =$; | $M_{II}/M_H =$; |
| $\cos \varphi_{x.x.} =$; | $D =$ м; | $l_\delta =$ м; | $l_l =$ м; |
| $l_2 =$ м; | $D_a =$ м; | $\tau =$ м; | $\delta =$ м; |
| $\lambda = l_\delta / \tau$ | $k_\delta =$; | $Z_1 =$; | $Z_2 =$; |
| $j_1 =$ А/мм ² ; | $j_2 =$ А/мм ² ; | $B_\delta =$ Тл; | $B_a =$ Тл; |
| $B_{z1min} =$ Тл; | $B_{z1max} =$ Тл; | $B_{z2max} =$ Тл; | $B_{z2min} =$ Тл; |
| $B_j =$ Тл; | | | |

| Данные обмоток | | Статора | Ротора |
|--|-----------|---------|--------|
| Число пазов на полюс и фазу | q | | |
| Число витков в фазе | W | | |
| Укорочение шага | β | | |
| Сечение обмоточного провода, мм ² | $q_{эл}$ | | |
| Число элементарных проводников | $n_{эл}$ | | |
| Число эффективных проводников в пазу | u_{II} | | |
| Число параллельных ветвей обмотки | a | | |
| Сечение эффективного проводника, мм ² | $q_{эф}$ | | |
| Коэффициент заполнения паза (для всыпных обмоток) | k_3 | | |
| Средняя длина витка, м | l_{cp} | | |
| Длина вылета лобовых частей, м | $l_{выл}$ | | |

Параметры схемы замещения

| Наименования | При номинальном режиме ($s=s_H$) | | При пуске ($s=1$) |
|--------------|------------------------------------|------|---------------------|
| | Ом | о.е. | Ом |
| r_1 | | | |
| x_1 | | | |
| r_2 | | | |
| x_2 | | | |
| x_{12} | | | |
| r_{12} | | | |

Потери при номинальной нагрузке

| Виды потерь | кВт | % к сумме потерь |
|--|-----|------------------|
| 1. Электрические потери | | |
| Электрические потери | | |
| В том числе: в обмотке статора | | |
| В обмотке ротора | | |
| 2. Потери стали | | |
| В том числе: | | |
| основные в статоре | | |
| дополнительные (поверхностные и пульсационные) | | |
| 3. Потери механические | | |
| 4. Потери добавочные | | |
| Сумма потерь | | 100 |

Среднее превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды

Обмотки статора: $\Delta\theta_1 = \dots\dots\dots$ °С;

Обмотки ротора (для двигателей с фазными роторами):

$\Delta\theta_2 = \dots\dots\dots$ °С;

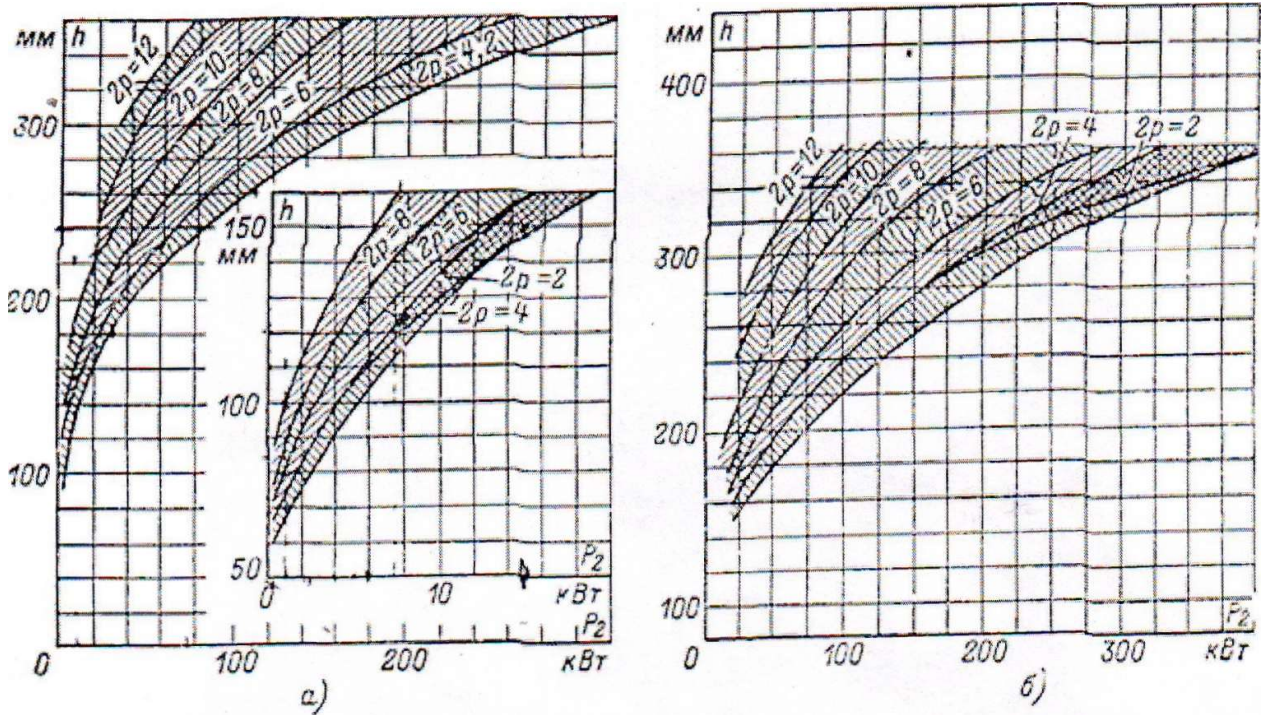


Рис.П5.1. Высота оси вращения h двигателей различных мощностей и частоты вращения: а - со степенью защиты IP44; б - со степенью защиты IP23

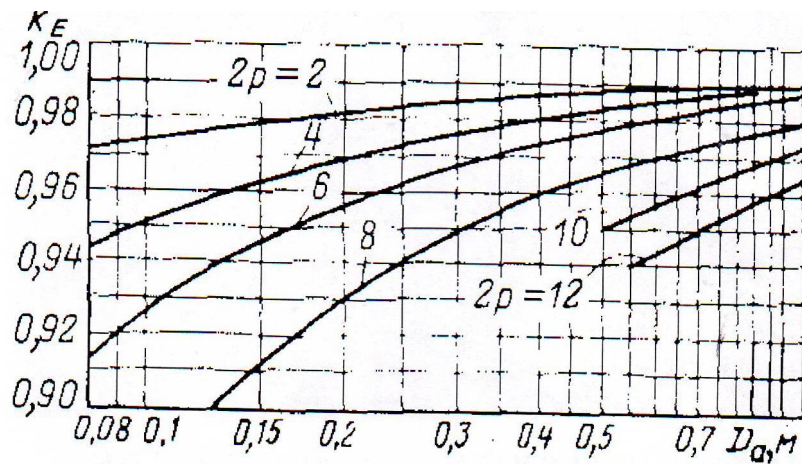


Рис.П5.2. Значение коэффициента k_E

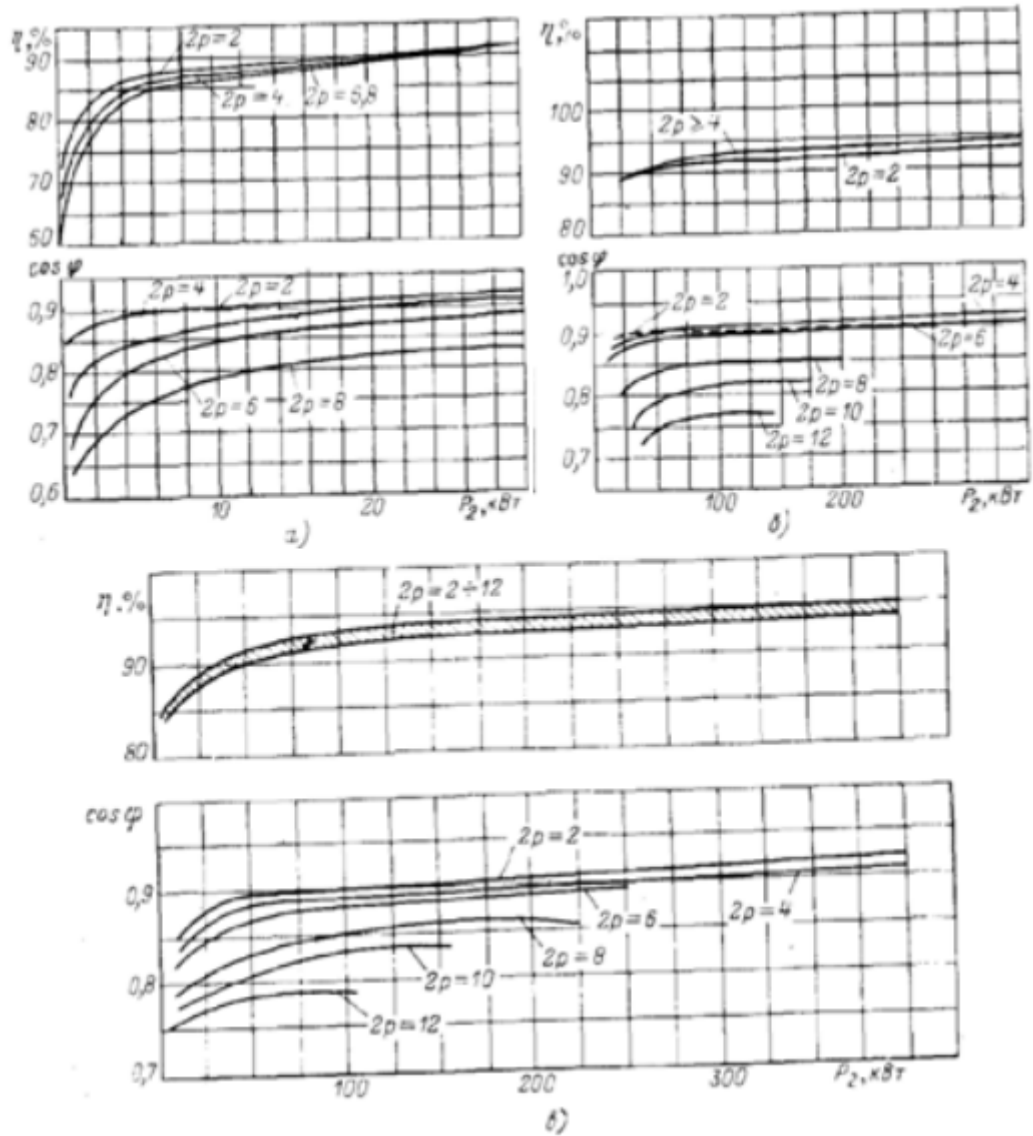


Рис. П5.3. Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ асинхронных двигателей: а - со степенью защиты IP44 и мощностью до 30 кВт; б - со степенью защиты IP44 и мощностью до 400 кВт; в - со степенью защиты IP23

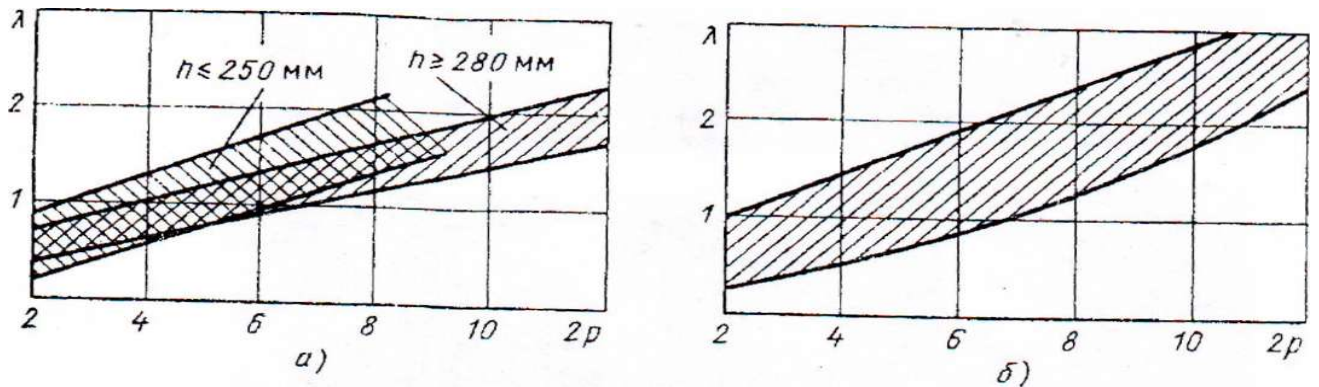


Рис. П5.4. Отношение $\lambda=l/\tau$ у двигателей исполнения по степени защиты а - IP44; б - IP23

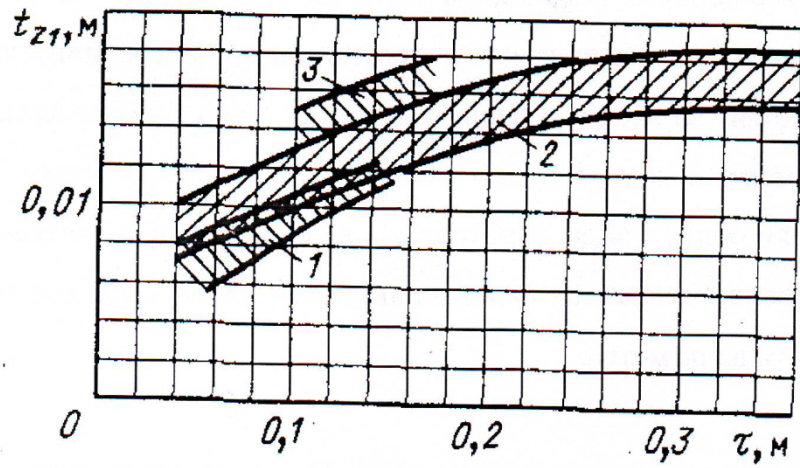
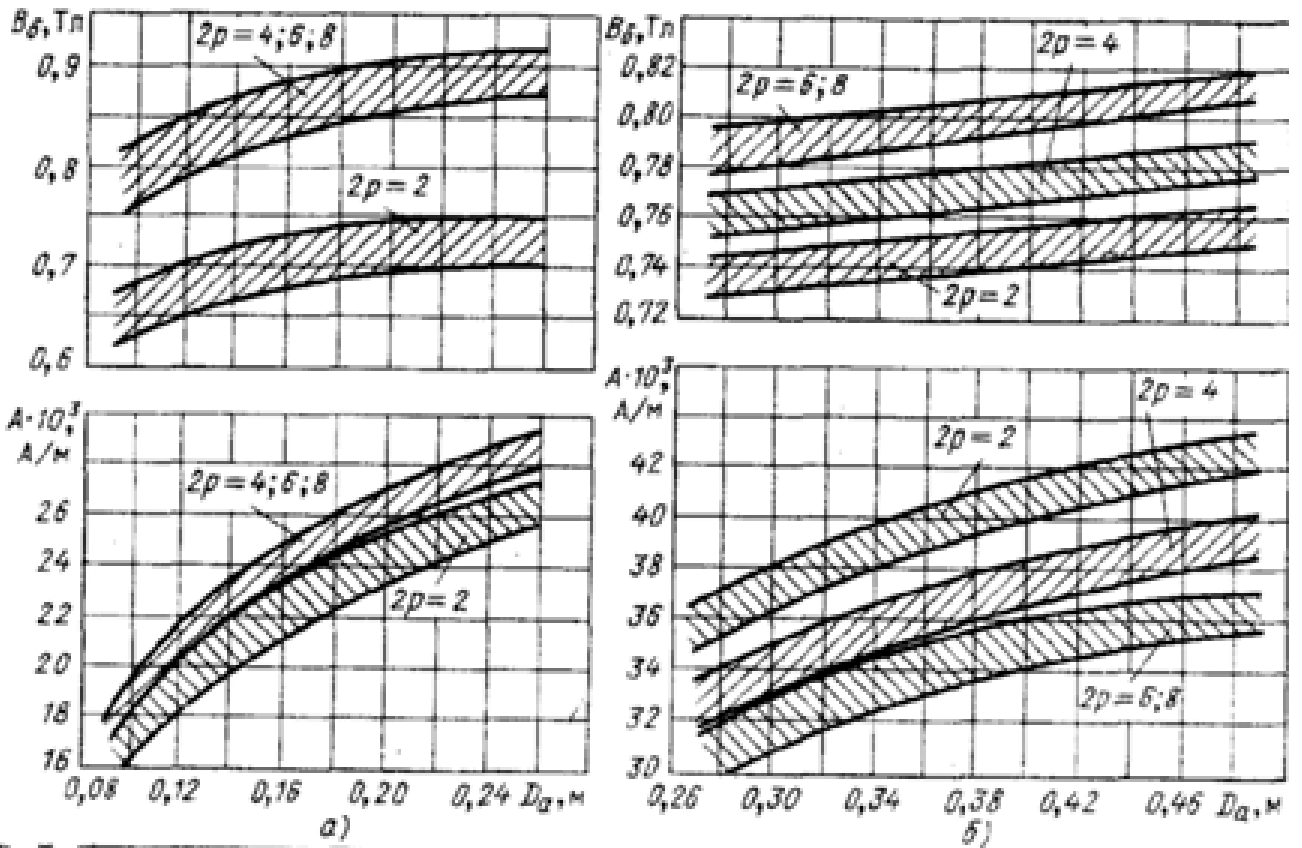


Рис П5.5. Зубцовые деления статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода с высотами оси вращения:
 1 – $h \leq 90$ мм; 2 – $90 < h \leq 250$ мм; 3 – $h \geq 280$ мм



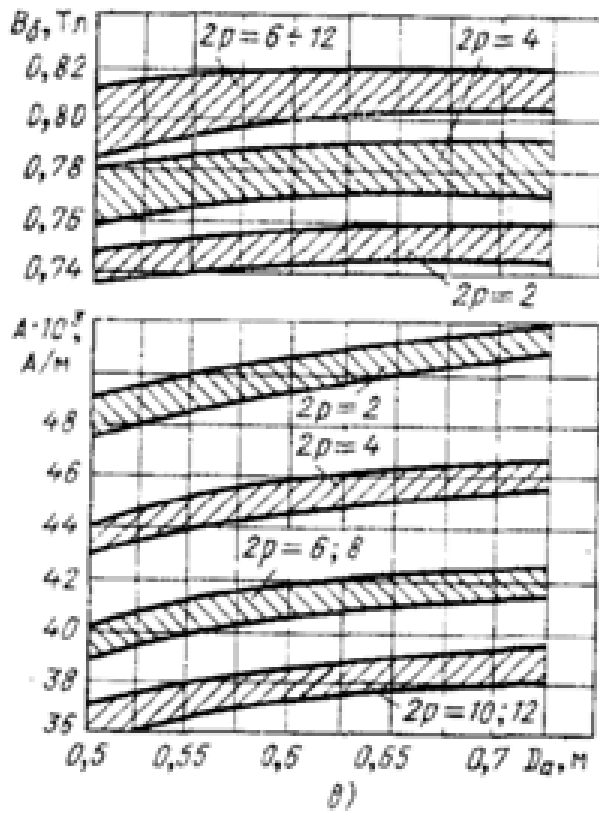
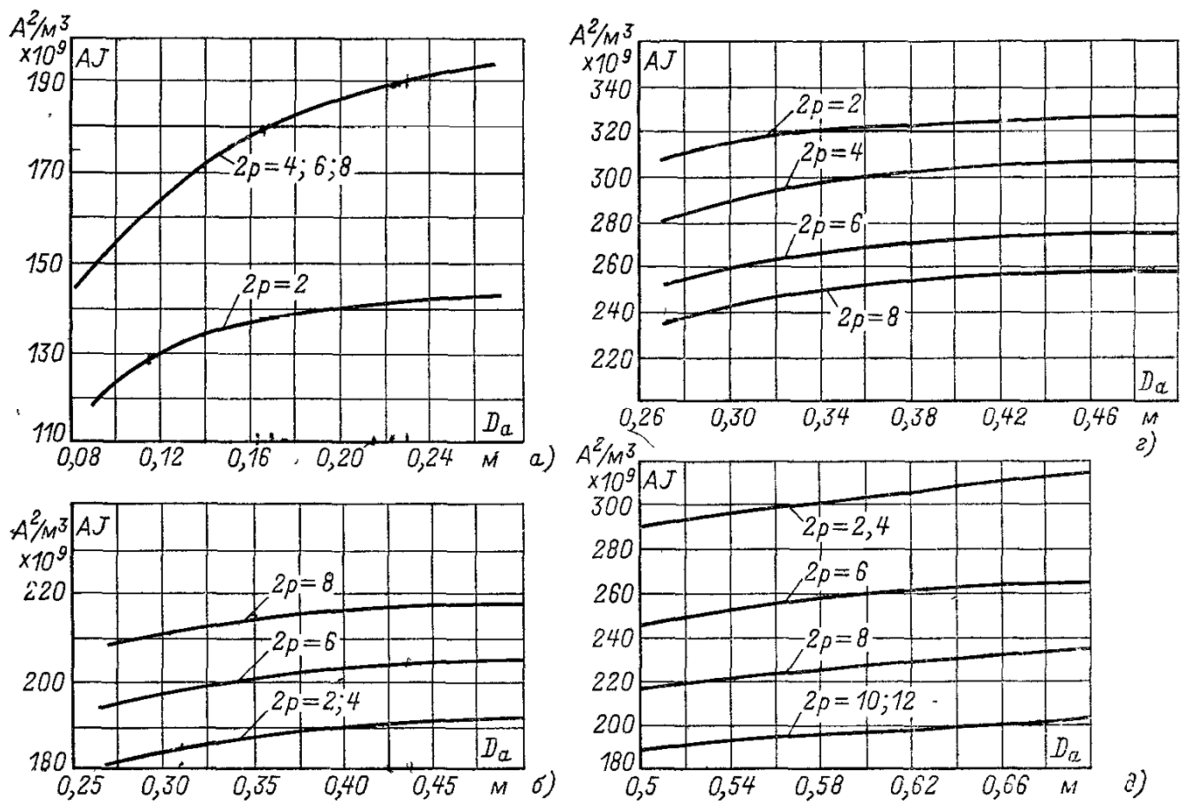


Рис. П5.6. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 при высоте оси вращения: а - $h \leq 132$ мм; б - $h = 150 \div 250$ мм в - $h \geq 280$ мм (с продуваемым ротором)



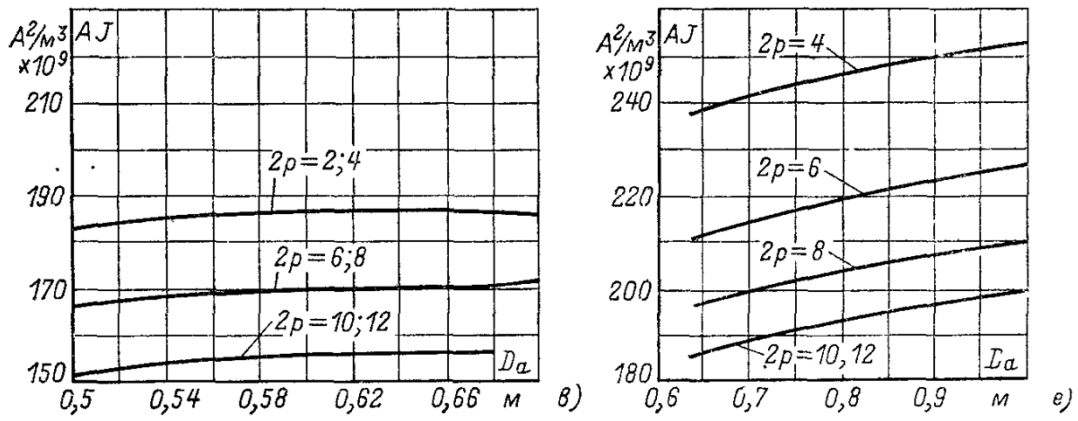


Рис. П5.7. Среднее значение произведения AJ асинхронных машин со степенью защиты: *a* – IP44, $h \leq 132$ мм; *б* – IP44, $h = 160 \div 250$ мм; *в* – IP44, $h = 280 \div 355$ мм; (при продуваемом роторе); *г* – IP23, $h = 160 \div 250$ мм; *д* – IP23, $h = 280 \div 355$ мм; *е* – IP23, при $U_{\text{ном}} = 6000$ В.

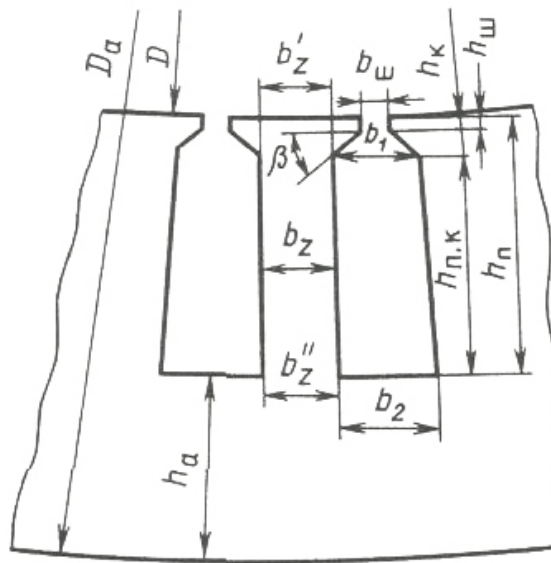


Рис. П5.8. К расчету размеров зубцовой зоны статоров с обмоткой из круглого провода.

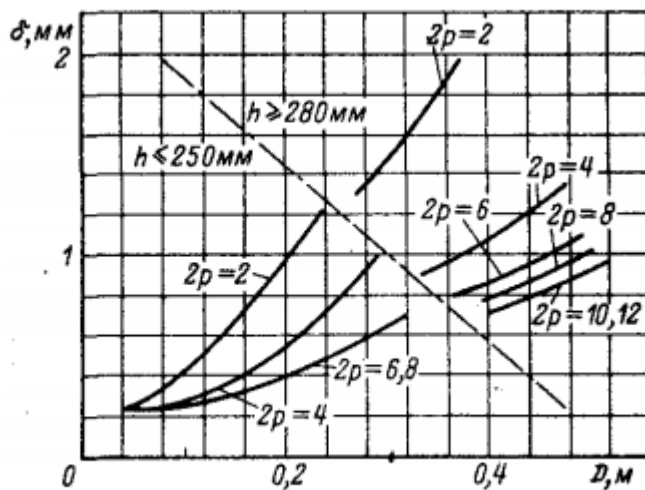


Рис. П5.9. К выбору воздушного зазора асинхронных двигателей

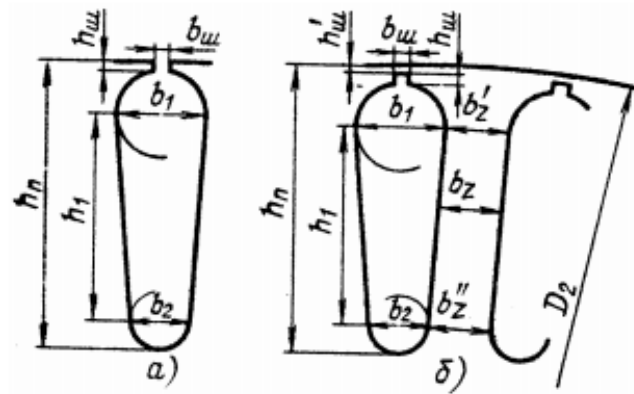


Рис. П5.10. Трапецеидальные пазы короткозамкнутого ротора:
а – полузакрытые; б – закрытые

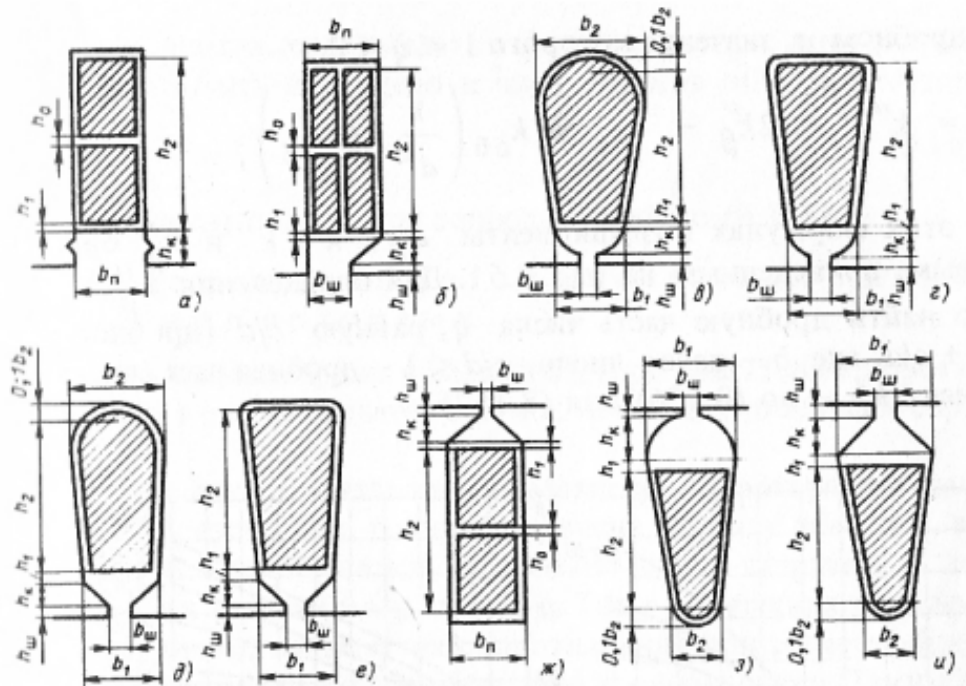


Рис П5.11. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток: а-е – обмотки статора; ж-и – обмотки фазного ротора

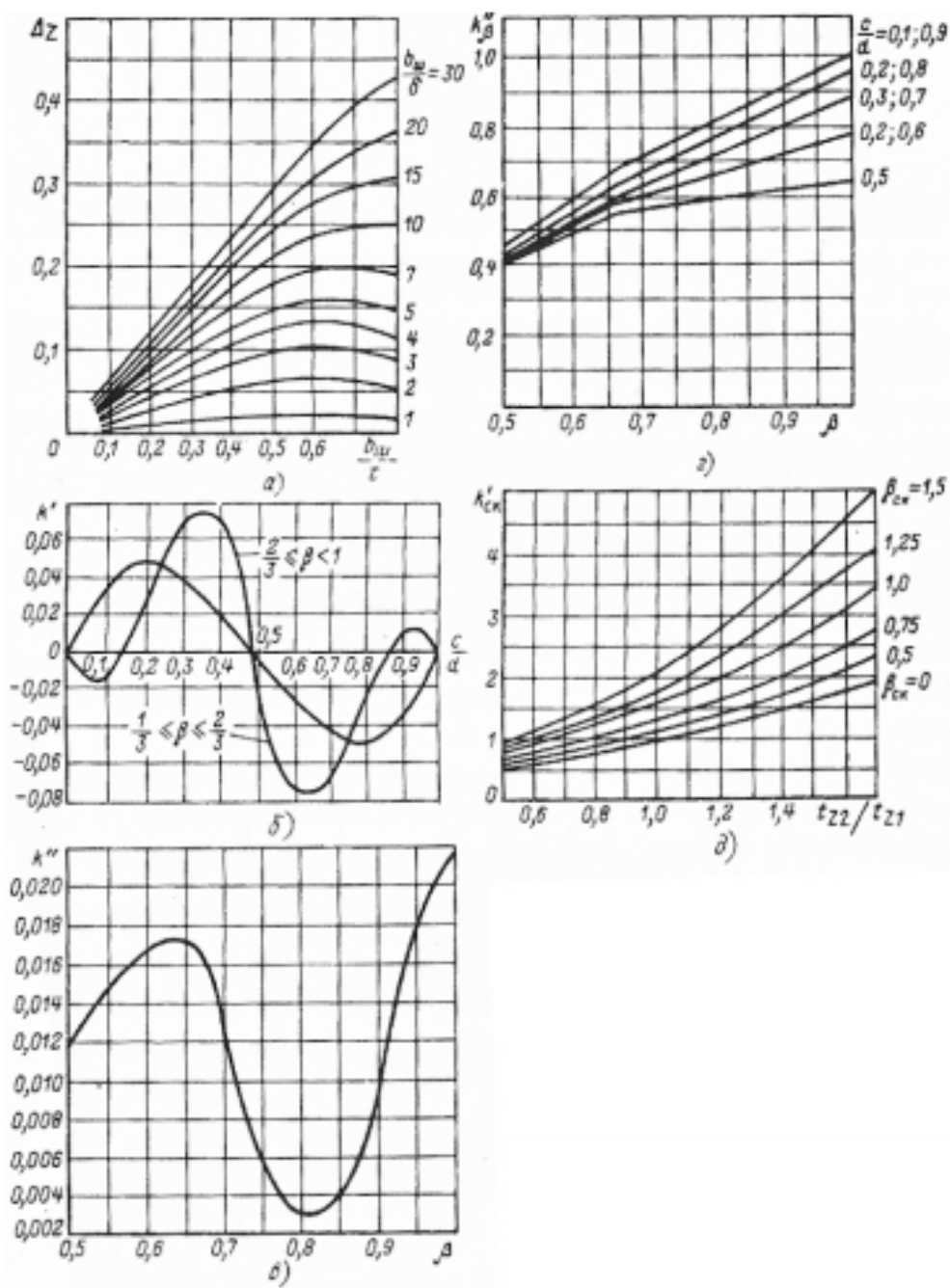


Рис. П5.12. Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния.

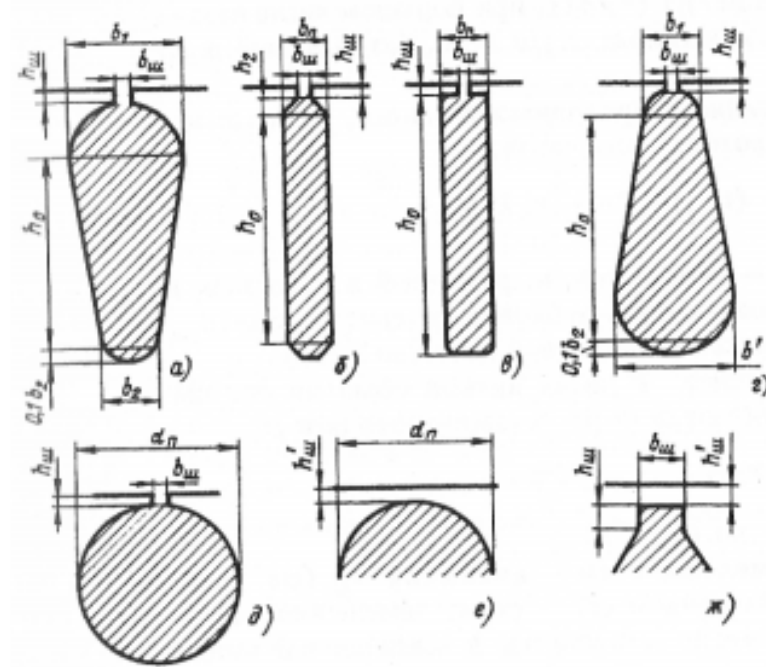


Рис. П5.13. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов:
 а-д - полуоткрытые пазы; е, ж - закрытые пазы

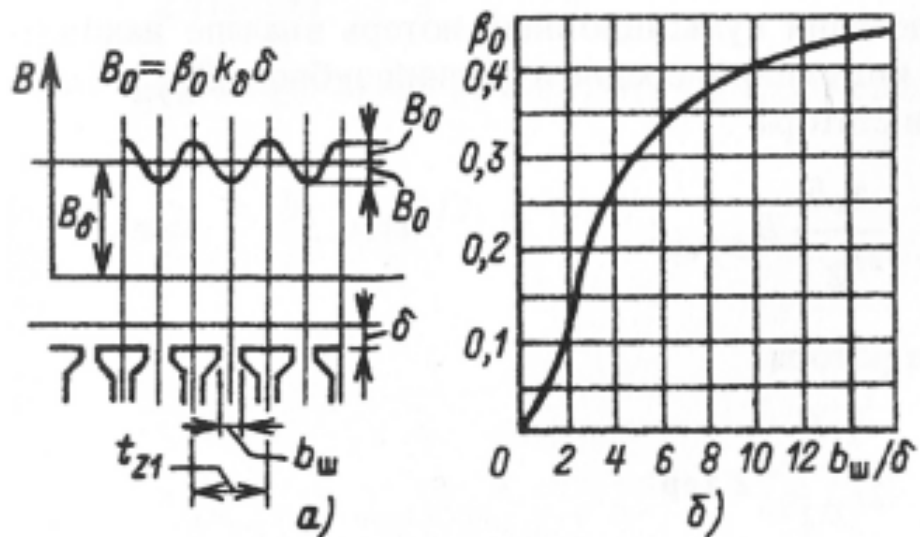


Рис. П5.14. К расчету поверхностных потерь в асинхронных машинах

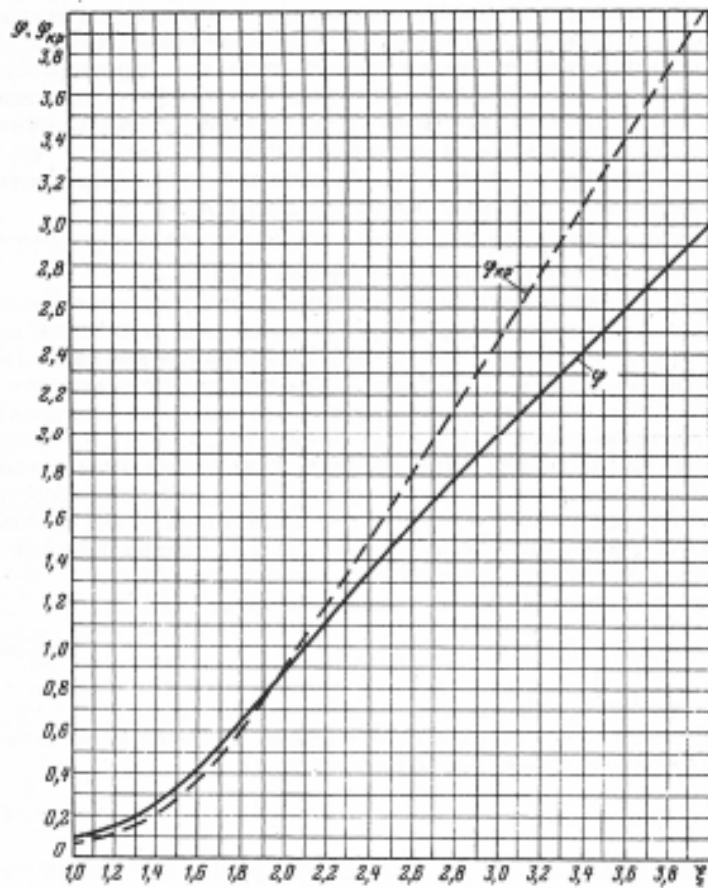


Рис. П5.15. Кривые φ и $\varphi_{кр}$ в функции «приведенной высоты» ($\varphi \sim \xi - 1$ при $\xi > 4$ и $\varphi = 0,089\xi^4$ при $\xi < 1$)

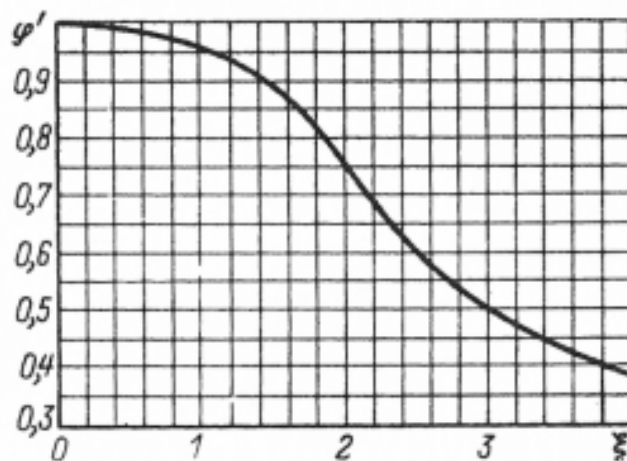


Рис. П5.16. Зависимость φ' от «приведенной высоты» $\xi > 4$ $\varphi' = 3/2\xi$

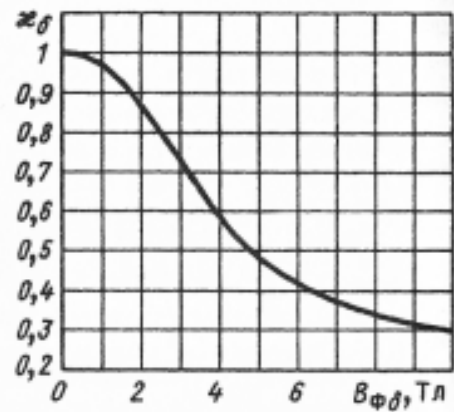


Рис. П5.17. Функция χ_{δ} в зависимости от фиктивной индукции $B_{\delta\phi}$

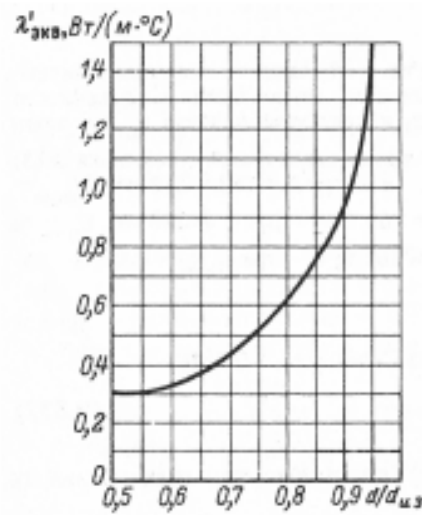


Рис. П5.18. Средние значения коэффициентов теплопроводности внутренней изоляции в катушках обмотки из круглого эмалированного провода.

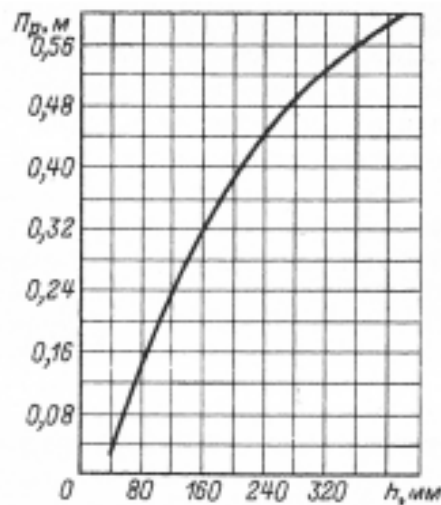


Рис. П5.19. Средние значения периметра поперечного сечения ребер корпуса асинхронных двигателей

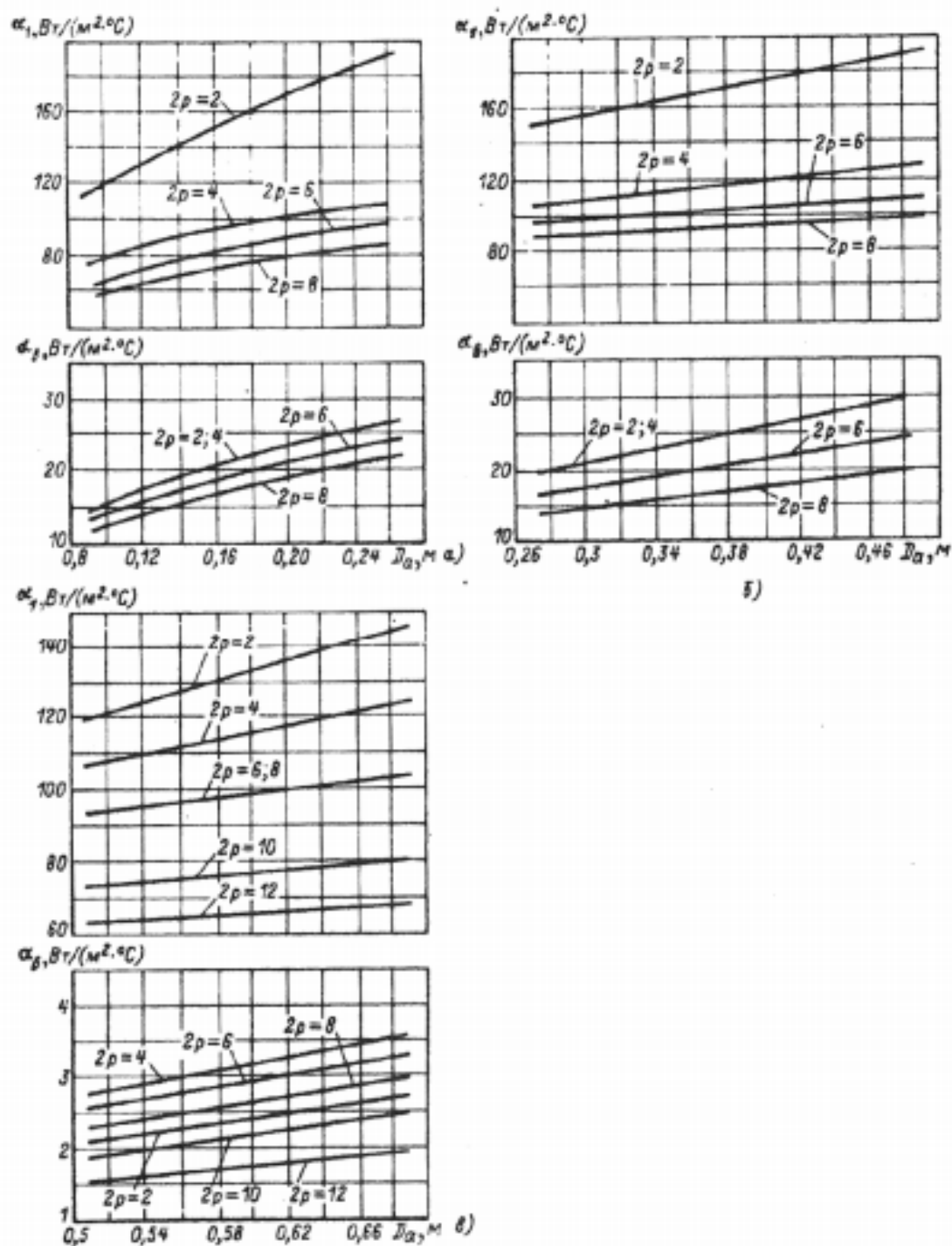


Рис. П5.20. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности a_1 и подогрева воздуха a_B для асинхронных двигателей исполнения 1P44: а – при $h < 160$ мм; б – при $h = 160 \div 250$ мм; а – при $h \geq 280$ мм (для двигателей с продуваемым ротором)

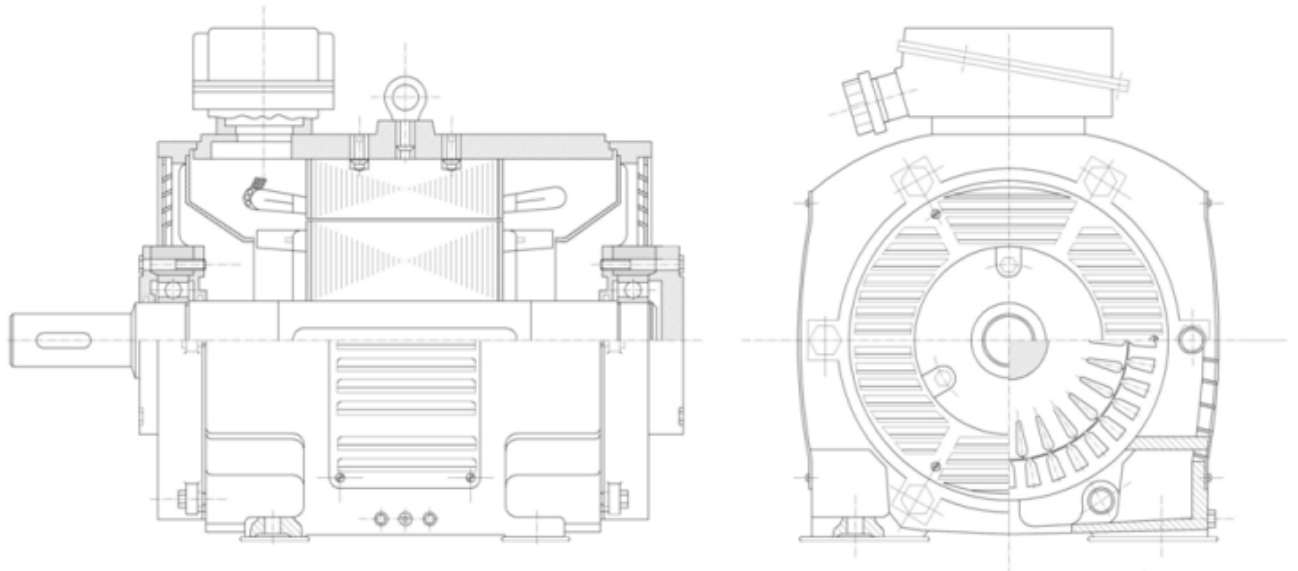


Рис. П5.21. Двигатель асинхронный по способу защиты на воздействие окружающей среды IP23

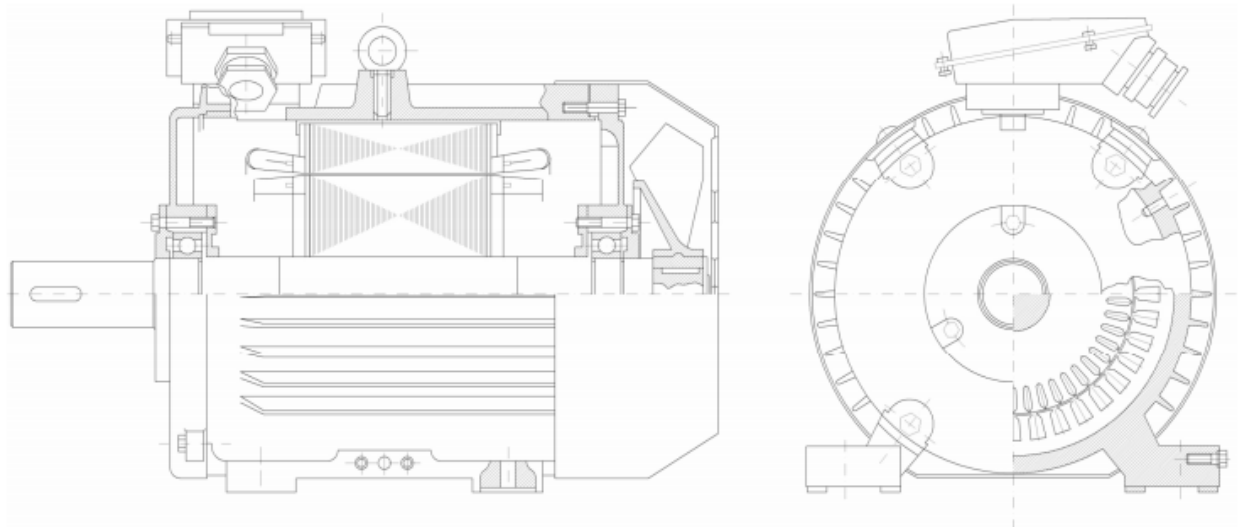


Рис. П5.22. Двигатель асинхронный по способу защиты на воздействие окружающей среды IP44

| | | | | | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| h , мм | 56 | 63 | 71 | 80 | 90 | |
| D_a , мм | 0,08-0,096 | 0,1-1,08 | 0,116-0,122 | 0,131-0,139 | 0,149-0,157 | |
| h , мм | 100 | 112 | 132 | 160 | 180 | |
| D_a , мм | 0,168-0,175 | 0,191-0,197 | 0,225-0,233 | 0,272-0,285 | 0,313-0,322 | |
| h , мм | 200 | 225 | 250 | 280 | 315 | 355 |
| D_a , мм | 0,349-0,359 | 0,392-0,406 | 0,437-0,452 | 0,52-0,53 | 0,59 | 0,66 |

Таблица П5.1. Внешние диаметры статоров асинхронных двигателей различных высот оси вращения.

| | | | | | |
|-------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| $2p$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10-12 |
| K_D | 0,52-0,6 | 0,62-0,68 | 0,7-0,72 | 0,72-0,75 | 0,75-0,77 |

Таблица П5.2. Отношение $K_D=D/D_a$ в асинхронных двигателях в зависимости от числа полюсов.

| Номинальный диаметр неизолированного провода, мм | Среднее значение диаметра изолированного провода, мм | Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ² | Номинальный диаметр неизолированного провода, мм | Среднее значение диаметра изолированного провода, мм | Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ² |
|--|--|---|--|--|---|
| 0,08 | 0,10 | 0,00502 | 0,60 | 0,655 | 0,283 |
| 0,09 | 0,11 | 0,00636 | 0,63 | 0,69 | 0,312 |
| 0,10 | 0,122 | 0,00785 | (0,67) | 0,73 | 0,353 |
| 0,112 | 0,134 | 0,00985 | 0,71 | 0,77 | 0,396 |
| 0,125 | 0,147 | 0,01227 | 0,75 | 0,815 | 0,442 |
| (0,132) | 0,154 | 0,01368 | 0,80 | 0,865 | 0,503 |
| 0,14 | 0,162 | 0,01539 | 0,85 | 0,915 | 0,567 |
| 0,15 | 0,18 | 0,01767 | 0,90 | 0,965 | 0,636 |
| 0,16 | 0,19 | 0,0201 | 0,95 | 1,015 | 0,709 |
| 0,17 | 0,20 | 0,0227 | 1,00 | 1,08 | 0,785 |
| 0,18 | 0,21 | 0,0255 | 1,06 | 1,14 | 0,883 |
| (0,19) | 0,22 | 0,0284 | 1,12 | 1,20 | 0,985 |
| 0,20 | 0,23 | 0,0314 | 1,18 | 1,26 | 1,094 |
| (0,212) | 0,242 | 0,0353 | 1,25 | 1,33 | 1,227 |
| 0,224 | 0,259 | 0,0394 | 1,32 | 1,405 | 1,368 |
| (0,236) | 0,271 | 0,0437 | 1,40 | 1,485 | 1,539 |
| 0,25 | 0,285 | 0,0491 | 1,50 | 1,585 | 1,767 |
| (0,265) | 0,300 | 0,0552 | 1,60 | 1,685 | 2,011 |
| 0,28 | 0,315 | 0,0616 | 1,70 | 1,785 | 2,27 |
| (0,30) | 0,335 | 0,0707 | 1,80 | 1,895 | 2,54 |
| 0,315 | 0,350 | 0,0779 | 1,90 | 1,995 | 2,83 |
| 0,335 | 0,370 | 0,0881 | 2,00 | 2,095 | 3,14 |
| 0,355 | 0,395 | 0,099 | 2,12 | 2,22 | 3,53 |
| 0,375 | 0,415 | 0,1104 | 2,24 | 2,34 | 3,94 |
| 0,40 | 0,44 | 0,1257 | 2,36 | 2,46 | 4,36 |
| 0,425 | 0,465 | 0,1419 | 2,50 | 2,60 | 4,91 |
| 0,45 | 0,49 | 0,1590 | | | |
| (0,475) | 0,515 | 0,1772 | | | |
| 0,50 | 0,545 | 0,1963 | | | |
| (0,53) | 0,585 | 0,221 | | | |
| 0,56 | 0,615 | 0,246 | | | |

Примечания 1. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщины.

Табл. П5.3. Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155.

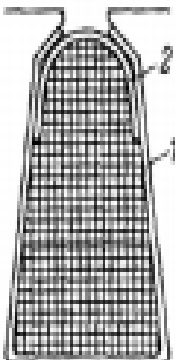
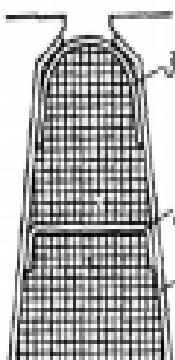
| Участок магнитной цепи | Обозначение | Исполнение IP44 при числе полюсов 2p | | | | | Исполнение IP23 при числе полюсов 2p | | | | | |
|--|-------------|--------------------------------------|------------|-------------|------------|---------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------------|----|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 и 12 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| Ярмо статора | B_a | | 1,4 – 1,6 | 1,15 – 1,35 | 1,1 – 1,2 | | | 1,45 – 1,6 | 1,2 – 1,4 | 1,1 – 1,3 | | |
| Зубцы статора при постоянном сечении (обмотка из круглого провода) | B_{Z1} | | | 1,6 – 1,9 | 1,6 – 1,8 | | 1,8 – 2,05 | | 1,7 – 1,95 | | 1,6 – 1,9 | |
| Зубцы статора в наиболее узком сечении: | | | | | | | | | | | | |
| при полуоткрытых пазах | B_{Z1max} | | | 1,75 – 1,95 | | | 1,9 – 2,1 | | | | 1,8 – 2 | |
| при открытых пазах | B_{Z1max} | | | 1,6 – 1,9 | | | | | 1,7 – 2 | | | |
| Ярмо ротора: | | | | | | | | | | | | |
| короткозамкнутого | B_j | $\leq 1,45$ | $\leq 1,4$ | $\leq 1,2$ | ≤ 1 | | $\leq 1,55$ | $\leq 1,5$ | $\leq 1,3$ | | $\leq 1,1$ | |
| фазного | B_j | | $\leq 1,3$ | $\leq 1,15$ | $\leq 0,9$ | | | $\leq 1,4$ | $\leq 1,2$ | | ≤ 1 | |
| Зубцы ротора при постоянном сечении (трапецидальные пазы) | B_{Z2} | | | 1,7 – 1,95 | | | | | 1,75 – 2 | | | |
| Зубцы ротора в наиболее узком сечении: | | | | | | | | | | | | |
| короткозамкнутого | B_{Z2max} | 1,5 – 1,7 | | 1,6 – 1,9 | | | 1,75 – 2 | | | | 1,7 – 1,95 | |
| фазного | B_{Z2max} | 1,75 – 2,15 | | 1,7 – 1,95 | | | 1,9 – 2,2 | | | | 1,85 – 2,1 | |

Примечание. Индукции на участках магнитной цепи в большинстве асинхронных двигателей не отличаются от указанных в таблице более чем на $\pm 5\%$.

Табл. П5.4. Допустимые значения индукции на участках магнитной цепи асинхронных двигателей, Тл.

| Высота оси вращения | Статор | | Короткозамкнутый ротор | | Фазный ротор | |
|---------------------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|
| | Способ изолирования листов | k_c | Способ изолирования листов | k_c | Способ изолирования листов | k_c |
| 50 – 250 | Оксидирование | 0,97 | Оксидирование | 0,97 | — | — |
| 280 – 355 | Лакировка | 0,95 | " | 0,97 | Лакировка | 0,95 |

Табл. П5.5. Способы изолирования листов электротехнической стали и коэффициенты заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора асинхронных двигателей с номинальным напряжением до 660 В.

| Рисунок | Тип обмотки | Высота оси вращения, мм | Позиция | Наименование материала изоляции (пленкостеклопласт) | | | Толщина материала, мм | Число слоев | Одно-сторонняя толщина, мм | |
|---|--------------|-------------------------|---------|---|-------------|------|-----------------------|-------------|----------------------------|-----|
| | | | | Класс нагревостойкости | | | | | | |
| | | | | В | Г | Н | | | | |
|  | Одно-слойная | 50-80 | 1 | Изо-флекс | Имидо-флекс | 0,2 | 1 | 0,2 | | |
| | | | 2 | " | " | 0,3 | | 0,3 | | |
| | | 90-132 | 1 | " | " | 0,25 | 1 | 0,25 | | |
| | | | 2 | " | " | 0,35 | | 0,35 | | |
| | | | 160 | 1 | " | " | | 0,4 | 1 | 0,4 |
| | | | | 2 | " | " | | 0,5 | | 0,5 |
|  | Двух-слойная | 180-250 | 1 | " | " | 0,4 | 1 | 0,4 | | |
| | | | 2 | " | " | 0,4 | | 0,4 | | |
| | | | 3 | " | " | 0,5 | | 0,5 | | |
| | | 180-250 | 1 | " | " | 0,4 | | 1 | 0,4 | |
| | | | 2 | " | " | 0,5 | | | 0,5 | |

Примечание. Междофазовые прокладки в лобовых частях обмотки выполняются из материала, указанного для пос. 1 рисунков.

Табл. П5.6. Изоляция обмоток статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм на напряжение до 660 В.

| 2р | Число пазов статора | Число пазов ротора | |
|----|---------------------|---|--|
| | | без скоса пазов | со скосом пазов |
| 2 | 12 | 9*, 15* | — |
| | 18 | 11*, 12*, 15*, 21*, 22 | 14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35 |
| | 24 | 15*, (16)*, 17*, 19, 32 | 18, 20, 26, 31, 33, 34, 35 |
| | 30 | 22, 38 | (18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40 |
| | 36 | 26, 28, 44, 46 | 25, 27, 29, 43, 45, 47 |
| | 42 | 32, 33, 34, 50, 52 | — |
| 4 | 48 | 38, 40, 56, 58 | 37, 39, 41, 55, 57, 59 |
| | 12 | 9* | 15* |
| | 18 | 10*, 14* | 18*, 22* |
| | 24 | 15*, 16*, 17, (32) | 16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36 |
| | 36 | 26, 44, 46 | (24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48 |
| | 42 | (34), (50), 52, 54 | (33), 34, (38), (51), 53 |
| 6 | 48 | 34, 38, 56, 58, 62, 64 | (36), (38), (39), 40, (44), 57, 59 |
| | 60 | 50, 52, 68, 70, 74 | 48, 49, 51, 56, 64, 69, 71 |
| | 72 | 62, 64, 80, 82, 86 | 61, 63, 68, 76, 81, 83 |
| | 36 | 26, 46, (48) | 28*, 33, 47, 49, 50 |
| | 54 | 44, 50, 64, 66, 68 | 42, 43, 51, 65, 67 |
| | 72 | 56, 58, 62, 82, 84, 86, 88 | 57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90 |
| 8 | 90 | 74, 76, 78, 80, 100, 102, 104 | 75, 77, 79, 101, 103, 105 |
| | 48, | (34), 36, 44, 62, 64 | 35, 44, 61, 63, 65 |
| | 72 | 56, 58, 86, 88, 90 | 56, 57, 59, 85, 87, 89 |
| | 84 | 66, (68), 70, 98, 100, 102, 104 | (68), (69), (71), (97), (99), (101) |
| | 96 | 78, 82, 110, 112, 114 | 79, 80, 81, 83, 109, 111, 113 |
| | 60 | 44, 46, 74, 76 | 57, 69, 77, 78, 79 |
| 10 | 90 | 68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114 | 70, 71, 73, 87, 93, 107, 109 |
| | 120 | 86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 146 | 99, 101, 103, 117, 123, 137, 139 |
| | 72 | 56, 64, 80, 88 | 69, 75, 80, 89, 91, 92 |
| | 90 | 68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110 | (71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109) |
| | 108 | 86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132 | 84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127 |
| | 144 | 124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172 | 125, 127, 141, 147, 161, 163 |

Примечания: 1. В скобках указаны числа пазов, при которых возможно повышение вибрации двигателей.

2. Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые, в основном, в машинах малой мощности.

Таблица П5.7. Рекомендуемые числа пазов роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

| | | | | | | | |
|----------|-------|--------|---------|------|---------|------|------|
| h , мм | 50—63 | 71—250 | 280—355 | | 400—500 | | |
| $2p$ | 2—6 | 2—8 | 2 | 4—12 | 4 | 6 | 8—12 |
| k_B | 0,19 | 0,23 | 0,22 | 0,23 | 0,20 | 0,23 | 0,25 |

Таблица П5.8. Коэффициенты k_B для расчета диаметра вала асинхронных двигателей.

| Число полюсов $2p$ | Катушки статора | | | |
|--------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| | Лобовые части не изолированы | | Лобовые части изолированы | |
| | K_L | $K_{\text{выл}}$ | K_L | $K_{\text{выл}}$ |
| 2 | 1,2 | 0,26 | 1,45 | 0,44 |
| 4 | 1,3 | 0,4 | 1,55 | 0,5 |
| 6 | 1,4 | 0,5 | 1,75 | 0,62 |
| ≥ 8 | 1,5 | 0,5 | 1,9 | 0,72 |

Таблица П5.9. Коэффициенты K_s , $K_{\text{маг}}$.

| Марка стали | Удельные потери, Вт/кг | Марка стали | Удельные потери, Вт/кг |
|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| 2013 | 2,5 | 2312 | 1,75 |
| 2212 | 2,2 | 2412 | 1,3 |
| 2214 | 2 | | |

Таблица П5.10. Удельные потери в стали, Вт/кг, толщиной 0,5 мм, при индукции $B=1$ Тл., и частоте перемагничивания $f = 50$ Гц.

| Исполнение двигателя по способу защиты | Число полюсов двигателя $2p$ | | | | | |
|--|------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| IP44 | 0,22 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,17 | 0,16 |
| IP23 | 0,84 | 0,80 | 0,78 | 0,76 | 0,74 | 0,72 |

Таблица П5.11. Средние значения коэффициента K .

Основная кривая намагничивания

Сталь 2013

| B, Тл | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | H, А/м | | | | | | | | | |
| 0,4 | 56 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 60 | 61 | 61 | 62 |
| 0,5 | 63 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 67 | 68 | 68 | 69 |
| 0,6 | 70 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 74 | 75 | 76 | 77 |
| 0,7 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 |
| 0,8 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 |
| 0,9 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 |
| 1,0 | 110 | 111 | 113 | 114 | 115 | 117 | 118 | 120 | 121 | 123 |
| 1,1 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 132 | 133 | 134 | 136 | 138 |
| 1,2 | 141 | 146 | 152 | 158 | 164 | 170 | 176 | 182 | 188 | 194 |
| 1,3 | 201 | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 |
| 1,4 | 300 | 320 | 350 | 380 | 410 | 430 | 460 | 500 | 540 | 580 |
| 1,5 | 620 | 670 | 780 | 890 | 1000 | 1130 | 1240 | 1350 | 1460 | 1580 |
| 1,6 | 1700 | 1860 | 2020 | 2180 | 2340 | 2500 | 2700 | 2800 | 3000 | 3200 |
| 1,7 | 3400 | 3700 | 4000 | 4300 | 4700 | 5000 | 5400 | 5800 | 6200 | 6600 |
| 1,8 | 7000 | 7500 | 8000 | 8500 | 9200 | 10 000 | 10 600 | 11 200 | 11 800 | 12 400 |
| 1,9 | 13 000 | 13 600 | 14 200 | 14 800 | 15 600 | 16 500 | 17 300 | 18 100 | 18 900 | 19 800 |
| 2,0 | 20 700 | 22 600 | 24 400 | 26 300 | 28 100 | 30 000 | 36 000 | 42 000 | 48 000 | 54 000 |
| 2,1 | 60 000 | 67 000 | 74 000 | 81 000 | 88 000 | 95 000 | 102 000 | 109 000 | 116 000 | 123 000 |
| 2,2 | 130 000 | 138 000 | 146 000 | 154 000 | 162 000 | 170 000 | 178 000 | 186 000 | 194 000 | 202 000 |
| 2,3 | 210 000 | 218 000 | 226 000 | 234 000 | 242 000 | 250 000 | 258 000 | 266 000 | 274 000 | 282 000 |
| 2,4 | 290 000 | 298 000 | 306 000 | 314 000 | 322 000 | 330 000 | 338 000 | 346 000 | 354 000 | 362 000 |

Таблица П5.12.

Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей

Сталь 2013

| B, Тл | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | H, А/м | | | | | | | | | |
| 0,4 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 |
| 0,5 | 64 | 65 | 66 | 67 | 69 | 71 | 72 | 74 | 76 | 78 |
| 0,6 | 80 | 81 | 83 | 85 | 87 | 89 | 91 | 93 | 95 | 97 |
| 0,7 | 100 | 102 | 104 | 106 | 108 | 111 | 113 | 115 | 118 | 121 |
| 0,8 | 124 | 126 | 129 | 132 | 135 | 138 | 140 | 143 | 146 | 149 |
| 0,9 | 152 | 155 | 158 | 161 | 164 | 168 | 171 | 174 | 177 | 181 |
| 1,0 | 185 | 188 | 191 | 195 | 199 | 203 | 206 | 209 | 213 | 217 |
| 1,1 | 221 | 225 | 229 | 233 | 237 | 241 | 245 | 249 | 253 | 257 |
| 1,2 | 262 | 267 | 272 | 277 | 283 | 289 | 295 | 301 | 307 | 313 |
| 1,3 | 320 | 327 | 334 | 341 | 349 | 357 | 365 | 373 | 382 | 391 |
| 1,4 | 400 | 410 | 420 | 430 | 440 | 450 | 464 | 478 | 492 | 506 |
| 1,5 | 520 | 542 | 564 | 586 | 608 | 630 | 654 | 678 | 702 | 726 |
| 1,6 | 750 | 788 | 826 | 864 | 902 | 940 | 982 | 1020 | 1070 | 1110 |
| 1,7 | 1150 | 1220 | 1290 | 1360 | 1430 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 |
| 1,8 | 2000 | 2160 | 2320 | 2490 | 2650 | 2810 | 2960 | 3110 | 3270 | 3420 |
| 1,9 | 3570 | 3800 | 4030 | 4260 | 4490 | 4720 | 4930 | 5140 | 5350 | 5560 |
| 2,0 | 5770 | 6000 | 6300 | 6600 | 7000 | 7400 | 7900 | 8400 | 9000 | 9700 |

Таблица П5.13.

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2013

| В, Тл | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | H, А/м | | | | | | | | | |
| 0,4 | 124 | 127 | 130 | 133 | 136 | 138 | 141 | 144 | 147 | 150 |
| 0,5 | 154 | 157 | 160 | 164 | 167 | 171 | 174 | 177 | 180 | 184 |
| 0,6 | 188 | 191 | 194 | 198 | 201 | 205 | 208 | 212 | 216 | 220 |
| 0,7 | 223 | 226 | 229 | 233 | 236 | 240 | 243 | 247 | 250 | 253 |
| 0,8 | 256 | 259 | 262 | 265 | 268 | 271 | 274 | 277 | 280 | 283 |
| 0,9 | 286 | 290 | 293 | 297 | 301 | 304 | 308 | 312 | 316 | 320 |
| 1,0 | 324 | 329 | 333 | 338 | 342 | 346 | 350 | 355 | 360 | 365 |
| 1,1 | 370 | 375 | 380 | 385 | 391 | 396 | 401 | 406 | 411 | 417 |
| 1,2 | 424 | 430 | 436 | 442 | 448 | 455 | 461 | 467 | 473 | 479 |
| 1,3 | 486 | 495 | 504 | 514 | 524 | 533 | 543 | 554 | 564 | 575 |
| 1,4 | 586 | 598 | 610 | 622 | 634 | 646 | 658 | 670 | 683 | 696 |
| 1,5 | 709 | 722 | 735 | 749 | 763 | 777 | 791 | 805 | 820 | 835 |
| 1,6 | 850 | 878 | 906 | 934 | 962 | 990 | 1020 | 1050 | 1080 | 1110 |
| 1,7 | 1150 | 1180 | 1220 | 1250 | 1290 | 1330 | 1360 | 1400 | 1440 | 1480 |
| 1,8 | 1520 | 1570 | 1620 | 1670 | 1720 | 1770 | 1830 | 1890 | 1950 | 2010 |
| 1,9 | 2070 | 2160 | 2250 | 2340 | 2430 | 2520 | 2640 | 2760 | 2890 | 3020 |
| 2,0 | 3150 | 3320 | 3500 | 3680 | 3860 | 4040 | 4260 | 4480 | 4700 | 4920 |
| 2,1 | 5140 | 6440 | 5740 | 6050 | 6360 | 6670 | 7120 | 7570 | 8020 | 8470 |
| 2,2 | 8920 | 9430 | 9940 | 10 460 | 10 980 | 11 500 | 12 000 | 12 600 | 13 200 | 13 800 |
| 2,3 | 14 400 | 15 100 | 15 800 | 16 500 | 17 200 | 18 000 | 18 800 | 19 600 | 20 500 | 21 400 |

Таблица П5.14.

Основная кривая намагничивания

Сталь 2211 и 2312

| В, Тл | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | H, А/м | | | | | | | | | |
| 0,4 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 73 | 74 | 75 | 75 |
| 0,5 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 |
| 0,6 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 |
| 0,7 | 96 | 99 | 103 | 108 | 113 | 118 | 122 | 126 | 131 | 135 |
| 0,8 | 140 | 145 | 150 | 155 | 160 | 165 | 170 | 175 | 180 | 185 |
| 0,9 | 190 | 196 | 200 | 205 | 210 | 215 | 220 | 225 | 230 | 235 |
| 1,0 | 240 | 246 | 252 | 258 | 264 | 270 | 276 | 282 | 288 | 294 |
| 1,1 | 300 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 360 | 370 | 380 | 390 |
| 1,2 | 400 | 410 | 420 | 430 | 440 | 460 | 470 | 480 | 500 | 520 |
| 1,3 | 550 | 580 | 610 | 650 | 690 | 730 | 780 | 830 | 880 | 940 |
| 1,4 | 1000 | 1060 | 1120 | 1180 | 1240 | 1300 | 1360 | 1420 | 1480 | 1540 |
| 1,5 | 1600 | 1750 | 1900 | 2050 | 2200 | 2350 | 2500 | 2700 | 2900 | 3100 |
| 1,6 | 3400 | 3600 | 3800 | 4100 | 4400 | 4700 | 5300 | 5900 | 6500 | 7100 |
| 1,7 | 7700 | 8200 | 8900 | 9400 | 10 000 | 10 600 | 11 100 | 11 700 | 12 200 | 12 800 |
| 1,8 | 13 400 | 14 000 | 14 600 | 15 200 | 15 800 | 16 400 | 17 000 | 17 600 | 18 200 | 18 800 |
| 1,9 | 19 400 | 20 000 | 21 800 | 23 700 | 25 700 | 27 800 | 30 000 | 32 200 | 34 400 | 36 600 |
| 2,0 | 38 800 | 41 000 | 43 200 | 45 400 | 47 600 | 49 800 | 52 000 | 54 500 | 57 500 | 60 500 |
| 2,1 | 65 500 | 72 500 | 80 000 | 88 000 | 96 000 | 104 000 | 112 000 | 120 000 | 128 000 | 136 000 |
| 2,2 | 144 000 | 152 000 | 160 000 | 168 000 | 176 000 | 184 000 | 192 000 | 200 000 | 208 000 | 216 000 |
| 2,3 | 224 000 | 232 000 | 240 000 | 248 000 | 256 000 | 264 000 | 272 000 | 280 000 | 288 000 | 296 000 |
| 2,4 | 304 000 | 312 000 | 320 000 | 328 000 | 336 000 | 344 000 | 352 000 | 360 000 | 368 000 | 376 000 |

Таблица П5.15.

Кривая намагничивания для яра асинхронных двигателей

Сталь 2211 и 2312

| В, Тл | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | H, А/м | | | | | | | | | |
| 0,4 | 89 | 91 | 93 | 94 | 96 | 98 | 100 | 102 | 104 | 106 |
| 0,5 | 108 | 110 | 113 | 115 | 118 | 120 | 122 | 124 | 126 | 128 |
| 0,6 | 131 | 134 | 136 | 139 | 141 | 144 | 147 | 150 | 153 | 156 |
| 0,7 | 159 | 162 | 166 | 169 | 172 | 176 | 180 | 183 | 186 | 190 |
| 0,8 | 194 | 198 | 201 | 204 | 208 | 212 | 216 | 220 | 223 | 227 |
| 0,9 | 231 | 235 | 239 | 243 | 248 | 252 | 255 | 260 | 265 | 269 |
| 1,0 | 274 | 279 | 284 | 289 | 295 | 300 | 305 | 311 | 318 | 323 |
| 1,1 | 332 | 338 | 344 | 351 | 357 | 367 | 374 | 382 | 390 | 398 |
| 1,2 | 410 | 418 | 426 | 435 | 444 | 455 | 466 | 475 | 487 | 498 |
| 1,3 | 509 | 521 | 533 | 546 | 558 | 572 | 585 | 600 | 618 | 635 |
| 1,4 | 656 | 675 | 695 | 717 | 740 | 763 | 789 | 815 | 843 | 870 |
| 1,5 | 905 | 934 | 965 | 1000 | 1040 | 1090 | 1130 | 1190 | 1240 | 1290 |
| 1,6 | 1370 | 1440 | 1520 | 1590 | 1660 | 1720 | 1820 | 1910 | 2010 | 2100 |
| 1,7 | 2180 | 2310 | 2410 | 2550 | 2610 | 2720 | 2840 | 2980 | 3130 | 3290 |
| 1,8 | 3460 | 3630 | 3800 | 3970 | 4140 | 4301 | 4490 | 4670 | 4850 | 5040 |
| 1,9 | 5220 | 5600 | 6000 | 6400 | 6900 | 7400 | 7900 | 8500 | 9100 | 9700 |
| 2,0 | 10 400 | 11 100 | 11 800 | 12 500 | 13 300 | 14 100 | 14 900 | 15 800 | 16 700 | 17 600 |

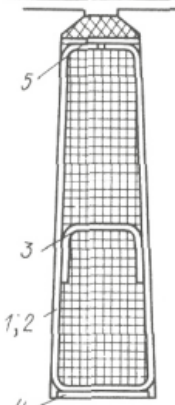
Таблица П5.16.

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2211 и 2312

| В, Тл | 0 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | H, А/м | | | | | | | | | |
| 0,4 | 140 | 143 | 146 | 149 | 152 | 155 | 158 | 161 | 164 | 171 |
| 0,5 | 174 | 177 | 180 | 184 | 186 | 190 | 192 | 196 | 198 | 202 |
| 0,6 | 204 | 209 | 213 | 216 | 221 | 224 | 229 | 233 | 237 | 241 |
| 0,7 | 245 | 249 | 253 | 257 | 262 | 267 | 272 | 277 | 282 | 287 |
| 0,8 | 292 | 297 | 302 | 306 | 311 | 316 | 322 | 326 | 331 | 337 |
| 0,9 | 342 | 347 | 353 | 360 | 366 | 372 | 379 | 384 | 390 | 396 |
| 1,0 | 403 | 409 | 417 | 425 | 433 | 440 | 450 | 460 | 470 | 477 |
| 1,1 | 488 | 497 | 509 | 517 | 527 | 537 | 547 | 559 | 570 | 582 |
| 1,2 | 593 | 602 | 613 | 626 | 638 | 651 | 663 | 677 | 695 | 710 |
| 1,3 | 724 | 738 | 755 | 770 | 790 | 804 | 820 | 840 | 857 | 879 |
| 1,4 | 897 | 917 | 936 | 955 | 977 | 1000 | 1020 | 1040 | 1060 | 1090 |
| 1,5 | 1120 | 1150 | 1170 | 1210 | 1240 | 1270 | 1310 | 1330 | 1370 | 1410 |
| 1,6 | 1450 | 1490 | 1530 | 1560 | 1610 | 1650 | 1690 | 1750 | 1790 | 1840 |
| 1,7 | 1900 | 1940 | 2000 | 2070 | 2140 | 2220 | 2300 | 2380 | 2500 | 2600 |
| 1,8 | 2700 | 2800 | 2920 | 3050 | 3220 | 3330 | 3490 | 3610 | 3710 | 4000 |
| 1,9 | 4160 | 4350 | 4600 | 4800 | 5030 | 5330 | 5430 | 5790 | 6130 | 6420 |
| 2,0 | 6750 | 7170 | 7400 | 7790 | 8150 | 8520 | 9000 | 9400 | 9750 | 10 200 |
| 2,1 | 10 600 | 11 000 | 11 500 | 12 100 | 12 600 | 13 000 | 13 500 | 14 100 | 14 700 | 15 400 |
| 2,2 | 15 900 | 16 500 | 17 300 | 17 800 | 18 500 | 19 100 | 19 600 | 20 300 | 21 100 | 22 000 |
| 2,3 | 23 100 | 24 300 | 25 500 | 26 800 | 28 100 | 29 500 | 30 900 | 32 400 | 33 900 | 36 400 |

Таблица П5.17.

| Рисунок | Позиция | Материал | | | | | | Односторонняя толщина изоляции, мм | | | |
|---|---------|--------------------------------|---|---|-------------|------|------|------------------------------------|------------------------|------|------|
| | | Наименование, марка | | | Толщина, мм | | | Число слоев | Класс нагревостойкости | | |
| | | Класс нагревостойкости | | | | | | | В | F | H |
| | | В | F | H | В | F | H | | | | |
|  | 1* | Пленкосинтокартон | | | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 1 | 0,25 | 0,28 | 0,28 |
| | 2** | Электронит | | | 0,3 | 0,3 | 0,28 | 1 | 0,3 | 0,3 | 0,28 |
| | — | Общая толщина пазовой изоляции | | | 0,55 | 0,58 | 0,56 | — | 0,55 | 0,58 | 0,56 |
| | 3 | Лакотканесплюдопласт | | | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 1 | 0,55 | 0,55 | 0,55 |
| | 4 | Пленкосинтокартон | | | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 1 | 0,25 | 0,28 | 0,28 |
| | 5 | Пленкосинтокартон | | | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 1 | 0,25 | 0,28 | 0,28 |

* К обмотке.

** К стенке паза.

Примечание. Междуфазовые прокладки в лобовых частях выполняют из лакотканесплюдопласта.

Таблица П5.18. Изоляция обмоток из круглого провода статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \geq 280$ мм на напряжение до 660 В.

| Номер гармоники | Число пазов на полюс и фазу q | | | | | |
|-----------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | ∞ |
| 1 | 0,966 | 0,96 | 0,958 | 0,957 | 0,957 | 0,955 |
| 5 | 0,259 | 0,217 | 0,205 | 0,2 | 0,197 | 0,191 |
| 7 | -0,259 | -0,177 | -0,158 | -0,149 | -0,145 | -0,136 |
| 11 | -0,966 | -0,177 | -0,126 | -0,11 | -0,102 | -0,087 |
| 13 | -0,966 | 0,217 | 0,126 | 0,102 | 0,092 | 0,073 |
| 17 | -0,259 | 0,96 | 0,158 | 0,102 | 0,084 | 0,056 |
| 19 | 0,259 | 0,96 | -0,205 | -0,11 | -0,084 | -0,05 |
| 23 | 0,966 | 0,217 | -0,958 | -0,149 | -0,092 | -0,041 |
| 25 | 0,966 | -0,177 | -0,958 | 0,2 | 0,102 | 0,038 |
| 29 | 0,259 | -0,177 | -0,205 | 0,957 | 0,145 | 0,033 |
| 31 | -0,259 | 0,217 | 0,158 | 0,957 | -0,197 | -0,051 |
| 35 | -0,966 | 0,96 | 0,126 | 0,2 | -0,957 | -0,027 |
| 37 | -0,966 | 0,96 | -0,126 | -0,149 | -0,957 | 0,026 |
| 41 | -0,259 | 0,217 | -0,158 | -0,11 | -0,157 | 0,022 |
| 43 | 0,259 | -0,177 | 0,205 | 0,102 | 0,145 | 0,042 |
| 47 | 0,966 | -0,177 | 0,958 | 0,102 | 0,102 | -0,020 |

Таблица П5.19. Коэффициент распределения k_p трехфазных обмоток с фазной зоной 60° .

| Тип обмотки | Материал | Удельное сопротивление, Ом·м, при температуре, °С | | |
|--|------------------|---|------------------------|------------------------|
| | | 20 | 75 | 115 |
| Обмотки из медных обмоточных проводов или неизолированной медной проволоки или шины Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей | Медь | $\frac{1}{57} 10^{-6}$ | $\frac{1}{47} 10^{-6}$ | $\frac{1}{41} 10^{-6}$ |
| | Алюминиевые шины | $\frac{1}{35} 10^{-6}$ | $\frac{1}{28} 10^{-6}$ | $\frac{1}{26} 10^{-6}$ |
| | Алюминий литой | $\frac{1}{30} 10^{-6}$ | $\frac{1}{24} 10^{-6}$ | $\frac{1}{22} 10^{-6}$ |

Примечание. Удельное сопротивление алюминия после заливки в пазы ротора несколько повышается в связи с образованием некоторого количества раковин (воздушных включений) и с изменением структуры охлаждения в узких пазах или участках паза. Поэтому в расчетах принимаются удельные сопротивления литой алюминиевой обмотки роторов асинхронных двигателей равными $10^{-6}/20,5$ Ом·м при температуре 115 °С.

Таблица П5.20. Удельные электрические сопротивления материала проводников обмоток

Укладка однослойных обмоток

При укладке в пазы статора однослойных обмоток сторона катушки полностью занимает площадь паза. Коэффициент заполнения площади паза, представляющий собой отношение суммарной площади поперечных сечений всех изолированных проводников в пазу к площади паза, у данных обмоток выше, чем у двухслойных, у которых в пазу лежат две, надежно изолированные одна от другой стороны различных катушек. Однослойная обмотка, уложенная в статор с Z пазами, будет иметь в каждой фазе p катушечных групп.

На рисунке 1 Приложение 6 показана развернутая схема простой concentрической обмотки ($Z=24$, $q=2$), когда одна катушка располагается внутри другой. $C1, C2, C3$ и $C4, C5, C6$ - начала и концы фазных обмоток. Хотя шаги (шаг - это расстояние между сторонами катушки, измеряемое числом пазовых делений) катушек катушечной группы различны, в электромагнитном отношении такая группа подобна катушечной группе из двух катушек с диаметральной шагом.

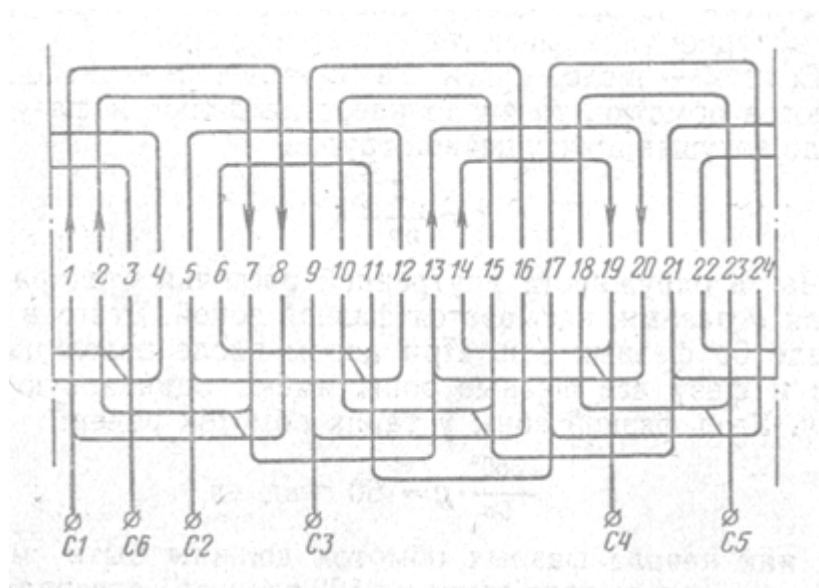


Рисунок 1 Приложение 6 – Простая concentрическая обмотка при $2p=4$;
 $Z=24$; $q=2$; $y=1-8$; $2-7$; ($y_{cp}=6$)

Диаметральный шаг любой обмотки определяется как отношение числа пазов на статоре к числу полюсов обмотки:

$$y_D = \frac{Z}{2p},$$

Концентрические однослойные обмотки просты в изготовлении и при ремонте; они являются самыми распространенными для двигателей небольшой мощности. Разветвленность лобовых частей и различие форм катушек являются определенными недостатками концентрических обмоток. Концентрические двухполюсные обмотки выполняются, как правило, в двигателях, у которых число пазов на статоре равно 24. Двухполюсные обмотки двигателей с другими числами пазов на статоре выполняются двухслойными, позволяющими сократить расход провода из-за значительного укорочения шага обмотки. Концентрические трехфазные двухполюсные обмотки могут быть выполнены как из $6p$ катушечных групп с q последовательно соединенными катушками в каждой группе, так и из $6p$ катушечных групп, но с двумя подгруппами в каждой группе и $q/2$ последовательно соединенными катушками в каждой подгруппе. Обмотка первого типа, как и подобные обмотки на другие числа полюсов, называемая простой концентрической обмоткой, показана на рисунке 2 Приложение 6. Обмотка второго типа, называемая концентрической обмоткой «вразвалку», приведена на рисунке 3 Приложение 6. В отличие от простых концентрических обмоток лобовые части подгрупп обмотки «вразвалку» как бы разваливаются на две стороны. В схеме фазной обмотки подгруппы соединены таким образом, чтобы в пазовой части направление токов в соседних катушках оставалось бы одним и тем же. Если сравнить обмотки, изображенные на рисунке 3 и на рисунке 2 Приложение 6, то можно увидеть, что средний шаг подгрупп обмотки «вразвалку» меньше среднего шага катушечной группы простой концентрической обмотки, содержащей q катушек. Отсюда можно сделать вывод, что у обмотки «вразвалку» меньшие размеры лобовых частей,

следовательно, и меньший расход меди. В электромагнитном же отношении эти обмотки равноценны, так как

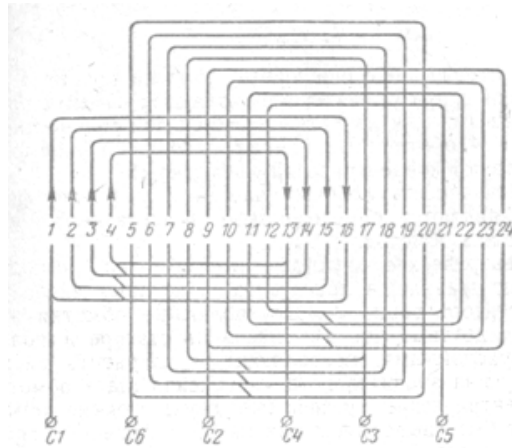


Рисунок 2 Приложение 6 – Простая концентрическая обмотка при $2p=2$;
 $Z=24$; $q=4$; $y=1-16$; $2-15$; $3-14$; $4-13$ ($y_{cp}=12$)

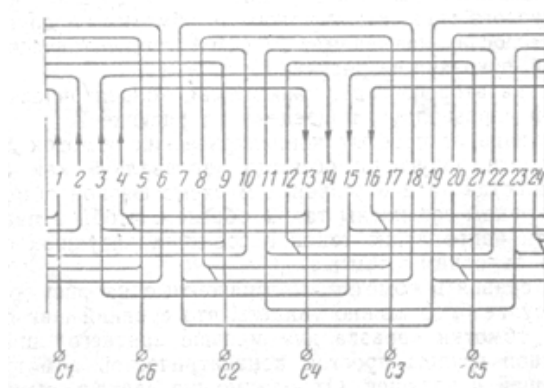


Рисунок 3 Приложение 6 – Концентрическая обмотка «вразвалку» при $2p=2$;
 $Z=24$; $q=4$; $y=3-14$; $4-13$; ($y_{cp}=10$)

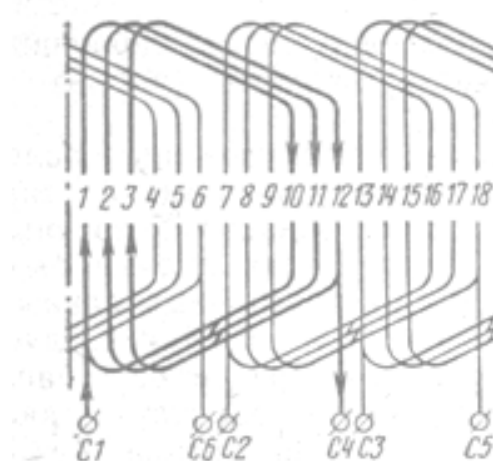


Рисунок 4 Приложение 6 – Простая шаблонная обмотка при $2p=2$; $Z=18$; $q=3$;
 $y=9$; (1-10)

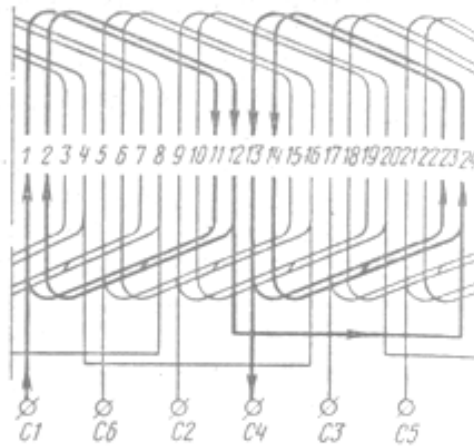


Рисунок 5 Приложение 6 – Шаблонная обмотка «вразвалку» при $2p=2$; $Z=24$; $q=4$; $y=10$; (1-11)

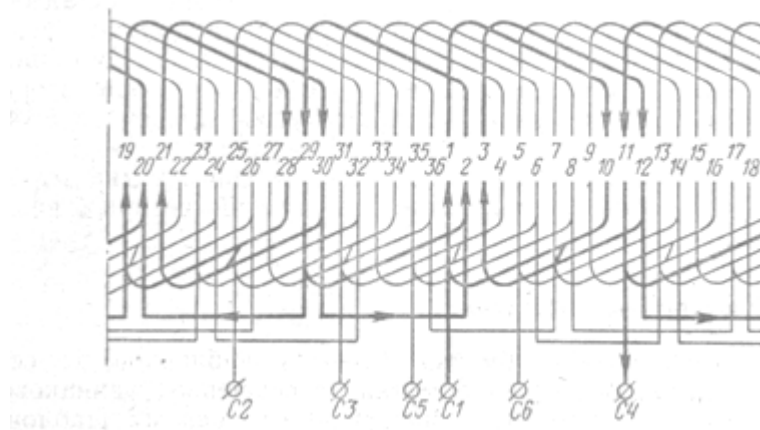


Рисунок 6 Приложение 6 – Цепная обмотка при $2p=4$; $Z=36$; $q=3$; $y=9$; (1-10) создают совершенно одинаковые по форме и величине намагничивающие силы. Для экономии обмоточного провода двухполюсные двигатели с числом пазов на статоре, равным 24, выполняются с концентрической однослойной обмоткой «вразвалку».

На практике при ремонте часто вместо концентрических обмоток укладывают шаблонные однослойные обмотки, в которых катушки имеют одинаковую ширину и форму.

Шаблонные обмотки подразделяются на шаблонные простые рисунок 4 Приложение 5, шаблонные «вразвалку» рисунок 5 Приложение 6 и цепные рисунок 6 Приложение 6. У цепных обмоток лобовые части уложены более компактно. Цепные обмотки можно выполнять с диаметральным и укороченным шагом, однако, измеренный количеством пазовых делений, он

всегда должен быть числом нечетным. При ремонте чаще используют цепную четырехполюсную обмотку с диаметральной шагом при числе пазов на статоре $Z=36$ рисунок 6 Приложение 6. В этом случае на шаблоны наматывают шесть катушечных групп с числом катушек, равным двум, и шесть катушечных групп с числом катушек, равным одному. Большие и малые катушечные группы укладывают поочередно, при этом катушки укладывают через паз. Например, первая катушечная группа, состоящая из двух катушек, уложена в 1, 10 и 3, 12-е пазы, вторая катушечная группа из одной катушки уложена в 5,14-е пазы и т. д. В каждую фазу входят две большие и две малые катушечные группы, схема соединений которых видна из рисунка.

Учебно-методическое и информационное обеспечение

Основные учебники и учебные пособия:

а) основная литература

1. Ванурин В.Н. Электрические машины [Электронный ресурс]: учебник / В.Н. Ванурин. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 304 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/72974>

2. Епифанов А.П. Электрические машины [Электронный ресурс]: учебник / А.П. Епифанов, Г.А. Епифанов. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 300 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/95139>.

б) дополнительная литература

1. Серебровский В.В. Электрические машины (виртуальный практикум): учеб. пособие / В. В. Серебровский, С. А. Филист, О. В. Шаталова. - Курск: Изд-во Курской ГСХА, 2012. - 83 с.: ил.

2. Копылов И.П. Электрические машины. В 2-х т. Т.1: учебник / И.П. Копылов. - Москва: Юрайт, 2015. - 267 с.

3. Копылов И.П. Электрические машины. В 2-х т. Т. 2: учебник / И.П. Копылов. - Москва: Юрайт, 2015. - 407 с.

4. Ковалев В. З. Электрические машины : учебное пособие / В. З. Ковалев, А. Г. Щербаков. - Ханты-Мансийск : ЮГУ, 2018. - 286 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/148998>. - Режим доступа: ЭБС "Лань"; по подписке. - Текст: электронный.

5. Электрические машины. Асинхронные машины : учебное пособие / сост. И. Ю. Лошкарев, Ю. В. Иванкина. - Саратов : Саратовский ГАУ, 2018. - 123 с. - URL: <https://e.lanbook.com/book/137487>. - Режим доступа: ЭБС "Лань"; по подписке. - ISBN 978-5-907035-53-9В. - Текст: электронный.

в) Интернет-ресурсы:

1. Учебные курсы Курской ГСХА [Электронный ресурс].- Режим доступа: www.moodle.kgsha.u,

2. Бесплатная техническая библиотека [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.diagram.com.ua/library/energ-avtomatika/>,

3. Книги для проектировщиков систем автоматизации [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.proektant.org/index.php?topic=1327.0>

4. Электронно-библиотечная система IPRbooks
<http://www.iprbookshop.ru/32005.html>

5. Электронно-библиотечная система <https://e.lanbook.com/>

г) Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. Электронно-библиотечная система IPRbooks
<http://www.iprbookshop.ru/32005.html>

2. Электронно-библиотечная система <https://e.lanbook.com/>