

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
(РУТ (МИИТ))**

Одобрено кафедрой
«ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

Протокол № 8 от 17 04 2018 г.

Автор: Новиков Е.А., Сальников И.А., Чехов А.П.

**ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ С МЕТОДИЧЕСКИМИ
УКАЗАНИЯМИ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Электрические машины

Уровень ВО: *Специалитет*

Форма обучения: *Заочная*

Курс: *5*

Специальность/Направление: *23.05.03 Подвижной состав железных дорог
(ПСС)*

Специализация/Профиль/Магистерская программа: *Все специализации*

СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. Рассчитать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором согласно заданию, приведенному в табл. 1.
2. Выполнить чертеж спроектированного асинхронного электродвигателя на бумаге формата A1.

Расчетно-пояснительная записка курсового проекта должна содержать подробный ход расчета, обоснования выбранных значений параметров (не следует переписывать текст методических указаний и копировать графики).

Графическая часть проекта должна содержать две проекции: главный вид с разрезом наполовину и вид слева с четвертью разреза. На чертеже должны быть указаны габаритные, установочные и присоединительные размеры. Для обозначения присоединительных размеров на чертеже должно быть приведено сечение выходного конца вала со шпонкой.

Чертежи должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ 2.107.68 (основные требования к рабочим чертежам), ГОСТ 2.109.68 (правила выполнения чертежей деталей, сборочных, общих видов, габаритные и монтажные), ГОСТ 2.415.68 (правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками), ГОСТ 2.416.68 (условные изображения сердечников магнитопровода).

Результаты расчета округлять до двух значащих цифр.

Числовые значения величин, необходимых для проектирования асинхронного электродвигателя, приведены в табл. 1 и выбираются по последним цифрам шифра.

Проектирование новой машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров и при разработке конструкции отдельных узлов. В курсовом проекте за базовую модель асинхронного электродвигателя общепромышленного назначения принят электродвигатель серии 4А.

Перед началом расчета следует детально изучить конструкцию базового двигателя, критически оценить принятые в нем соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные.

Таблица 1

Наименование величины	Ед. изм.	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номинальная мощность, P_2	кВт	последняя цифра шифра									
		2,2	5,5	7,5	11	18,5	22	30	37	45	55
Синхронная частота вращения, n_1	об/мин	предпоследняя цифра шифра									
		1000	1500	3000	750	600	1000	1500	750	600	1000
Номинальное напряжение, U_{1f}	В	220/380					380/660				
Частота питающей сети, f	Гц	50									
Конструкт. испол.	—	IP44									
Режим работы	—	S1									

1. Конструкция асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Отрезок серии двигателей с короткозамкнутым ротором закрытого обдуваемого исполнения с высотой оси вращения от 160 до 250 мм. охватывает диапазон мощностей от 11 до 90 кВт. На рис. 2 показана конструкция одной из таких машин. Станина 13 и подшипниковые щиты 3 и 9 отлиты из чугуна. Наружный вентилятор 10 крепится на выступающем конце вала 2, противоположном выводному. Вентилятор закрыт кожухом 12 из листовой стали. Наружный воздух засасывается вентилятором через жалюзи кожуха и прогоняется вдоль ребер станины.

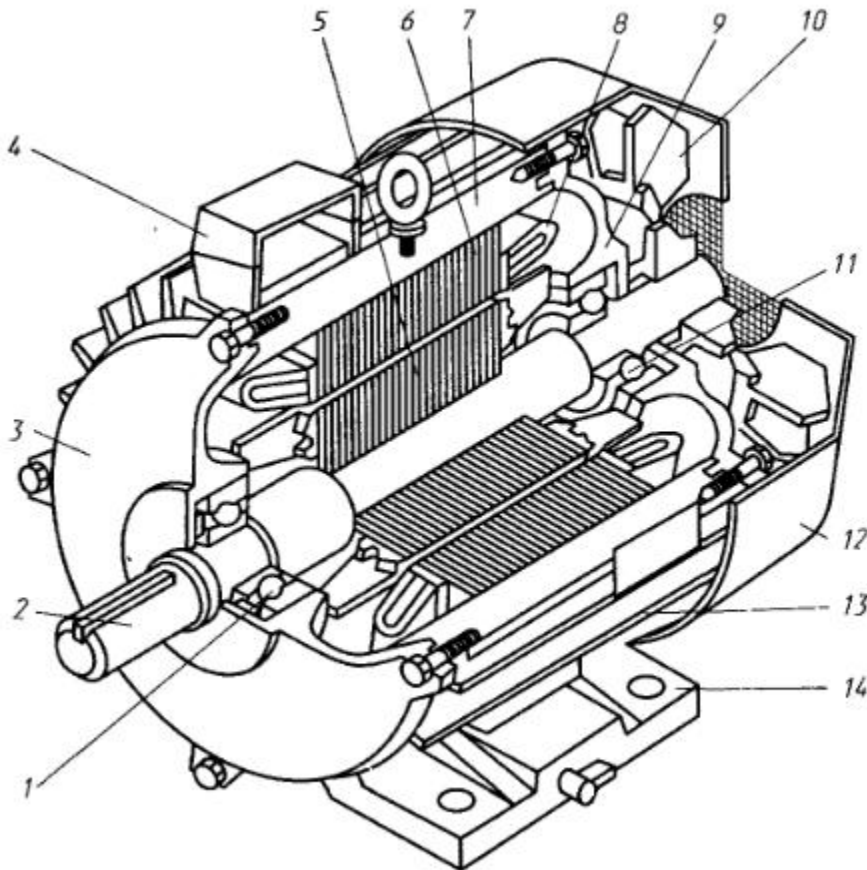


Рис. 2. Конструкция асинхронного двигателя серии 4А

На станине укреплена коробка выводов 4. Сердечник статора 6 выполнен из листов электротехнической стали 2013 и после опрессовки скреплен скобами. Сердечник закреплен в станине стопорными винтами, предохраняющими его от проворачивания при резких изменениях нагрузки. Пазы сердечника – полузакрытые, обмотка 8 – всыпная из круглого обмоточного провода марки ПЭТ-155 или ПЭТ-155М, применяемого при машинной намотке. Сердечник ротора 5 выполняется из той же стали, что и сердечник статора, опрессовывается и в спрессованном состоянии заливается алюминием. Одновременно с заливкой пазов отливаются замыкающие кольца и вентиляционные лопасти. На замыкающих кольцах с обоих торцов ротора при балансировке крепятся балансированные грузы. Пазы роторов двигателей отрезка серии с высотой оси вращения 160 – 250 мм – закрытые грушевидные, а в двухполюсных двигателях с $h = 250$ мм – закрытые лопаточные.

Сердечник ротора в машинах с высотой оси вращения $h \leq 250$ мм крепится на валу горячей посадкой. При больших h для крепления применяют шпонки.

Подшипниковые щиты крепятся к станине с помощью болтов. В центре щитов имеются отверстия, расточенные под посадку наружных обойм подшипников 1, 11. Точность положения оси ротора относительно внутренней поверхности станины обеспечивается обработкой поверхностей посадки подшипниковых щитов на станину и наружных обойм подшипников при одной установке щитов на обрабатывающем станке. Каждый из подшипников закрыт с обеих сторон подшипниковыми крышками, препятствующими вытеканию смазки при работе машины. Поверхности подшипниковых крышек, прилегающих к валу, имеют лабиринтные уплотнения.

В двигателях небольшой мощности устанавливаются два шариковых подшипника. При большей мощности со стороны выводного конца вала устанавливают роликовый подшипник, а с противоположной стороны – шариковый.

Станина крепится к фундаменту с помощью лап 14, имеющих отверстия под крепежные болты. Лапы отливаются за одно целое со станиной. Сверху, станина имеет прилив с резьбовым отверстием, в которое ввинчивается рым-болт для подъема двигателя при монтаже.

Рекомендации по разработке конструкции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Чертеж общего вида должен быть выполнен в двух проекциях: вид спереди и вид слева. Вид спереди должен иметь половинный разрез, а вид слева – одну четверть.

На чертеже должны быть проставлены габаритные, установочные и присоединительные размеры.

Все элементы конструкции, которые были рассчитаны и имеют числовое значение должны быть изображены на чертеже и соответствовать расчетным значениям в соответствии с выбранным масштабом (например: внутренний и внешний диаметры статора, осевая длина статора и ротора, диаметры вала под пакетом ротора, вылет лобовых частей обмотки статора, размеры пазов, и т.д.).

Масштаб изображения общего вида должен соответствовать требованиям ЕСКД.

На общем виде должны найти отражение следующие элементы конструкции:

1. Способ закрепления пакета статора в корпус машины.
2. Способ крепления пакета ротора на валу машины.
3. Прорисован узел, отвечающий за соединение подшипникового щита и корпуса.
4. Продумана и изображена конструкция подшипникового узла. При этом сам подшипник может быть изображен условно.

5. Так как расчет коротко замыкающих колец не проводился, то размеры кольца изображаются произвольно. Также произвольно допускается изображение крыльчатого вентилятора, совмещенного с обмоткой ротора.

6. Конструкция машины должна предусматривать элементы, обеспечивающие возможность подъема и монтажа электродвигателя.

7. Размеры ребер охлаждения и их количество, а также размеры наружного вентилятора и диффузора, определяются по результатам теплового расчета электродвигателя. Т.к. объем курсового проекта не предусматривает проведение этих расчетов, то размеры этих элементов на чертеже общего вида могут быть приведены произвольно.

8. На чертеже, отдельно, приводится сечение выходного конца вала электродвигателя со шпонкой. На этом сечении должны быть указаны размеры шпонки в соответствии со стандартными значениями.

Для примера на рис. П1 приведен общий вид конструкции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Рекомендуемая литература

1. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2009.
2. Орлов В.В., Шумейко В.В., Седов В.И. Электрические машины. Ч.2. Машины переменного тока. Конспект лекций. – М.: РОАТ, 2010. – 73 с.
3. Шумейко В.В., Орлов В.В., Седов В.И. Электрические машины и электропривод. Учебное пособие. Ч.П. Машины переменного тока. – М.: РОАТ, 2009. – 71 с.
4. Вольдек А.И. «Электрические машины» – Л.: Энергия, 1988 г.
5. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. «Проектирование электрических машин» учебник для вузов – М.: Высшая школа, 1984 г.
6. «Проектирование электрических машин» под ред. Копылова И.П. – справочник по электрическим машинам: в 2 т / под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова – М.: Энергоатомиздат, 1989 г. Т.1, 1988 Т.2
7. Кацман М.М. «Расчет и конструирование электрических машин» Учебное пособие М.: Энергоатомиздат, 1984 г. – 360 с.
8. Справочник по электрическим машинам: в 2 т / под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова – М.: Энергоатомиздат, 1989 г. Т.1, 1988 Т.2

3. Расчет асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

В качестве примера приводится расчет асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором со следующими параметрами:

- активная мощность двигателя $P_2=15$ кВт;
- номинальная частота вращения $n_1=1500$ об/мин ;
- напряжение питания $U_{1n}=220/380$ В;
- частота питающей сети: $f=50$, Гц.

Определяется число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = 2. \quad (1)$$

2. Предварительно выбираем высоту оси вращения по графикам представленным на рис. 3

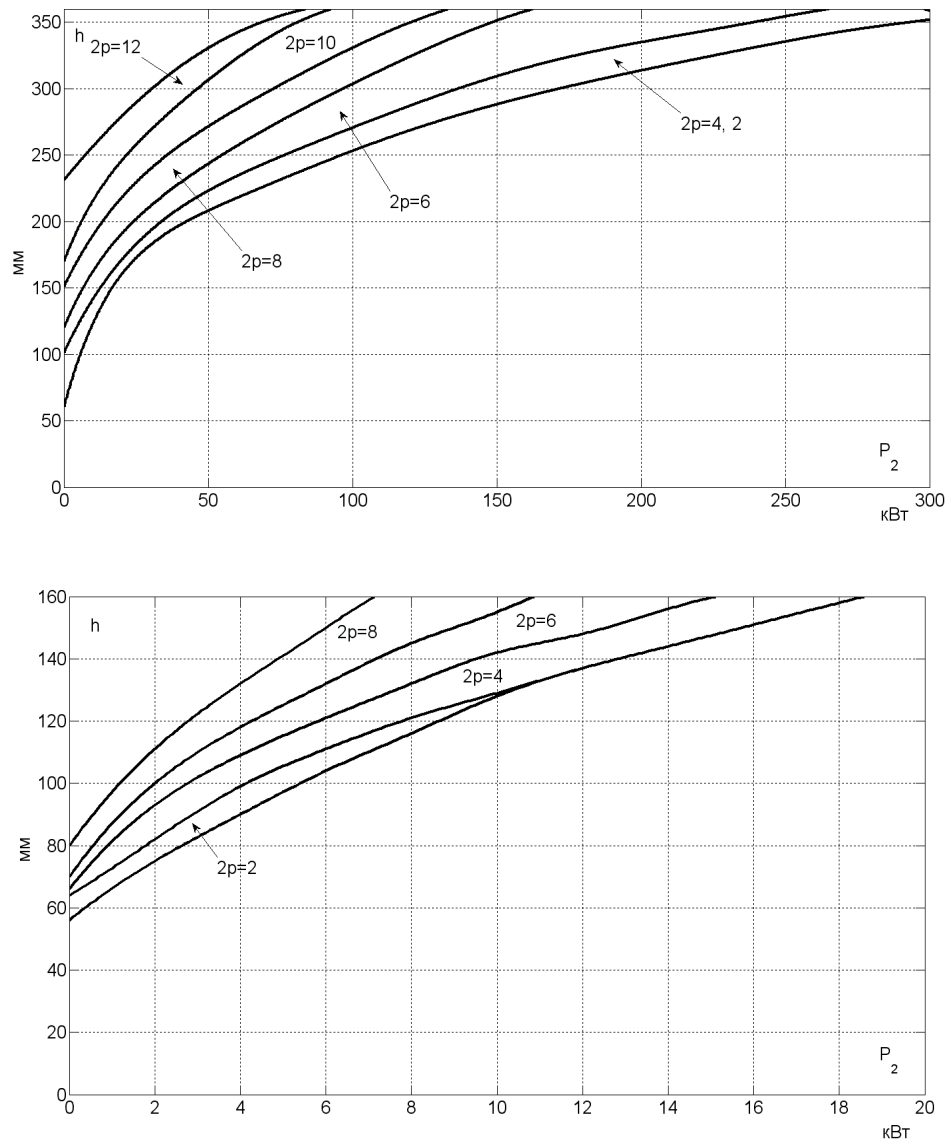


Рис. 3. Высота вращения h двигателей серии 4А различной мощности и частоты вращения со степенью защиты IP44

Принимаем ближайшее стандартизированное значение высоты вращения h и наружные диаметры статоров D_a согласно ГОСТ 13267-73 из таблицы 2.

Таблица 2.

h , мм	56	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315	355
D_a , м	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,53	0,59	0,66

Принимаем:

$h = 160$; согласно рис. 3., табл. 2

$D_a = 0.272$; согласно табл. 1

3. Определяем внутренний диаметр статора:

$$D = K_D \cdot D_a = 0.185 \text{ м} \quad (2)$$

где K_D – конструктивный коэффициент, определяемый в зависимости от количества пар полюсов по таблице 3

Таблица 3

$2p$	2	4	6	8 – 12
K_D	0,52 – 0,57	0,64 – 0,68	0,7 – 0,72	0,74 – 0,77

Принимаем $K_D = 0.68$; табл. 3

4. Определяем полюсное деление τ

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 0.145 \text{ м.} \quad (3)$$

5. Определяем расчетную мощность

$$P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 18.670 \text{ кВт} \quad (4)$$

где k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое может быть приближенно определено по рис. 4.;

η – КПД, предварительно определяемый согласно рис. 5 в относительных единицах (а не процентах).

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности, предварительно определяемый по рис. 5.

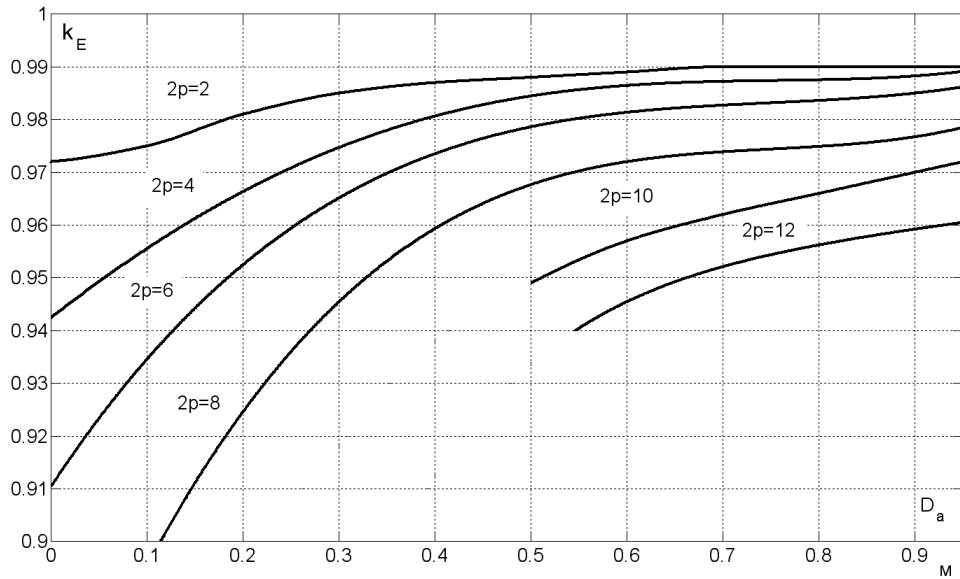
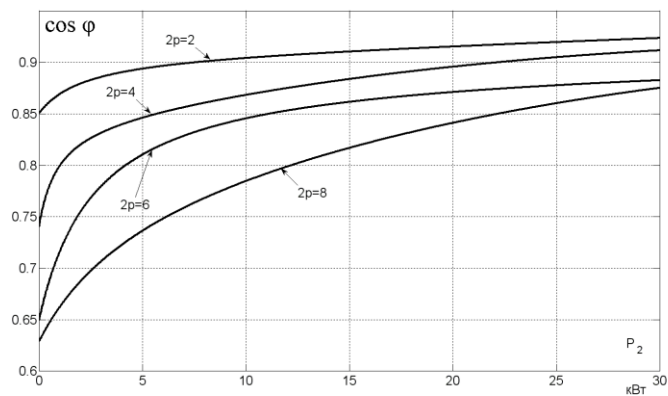
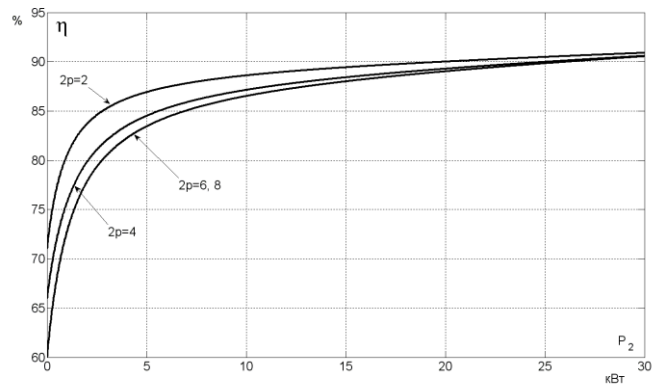
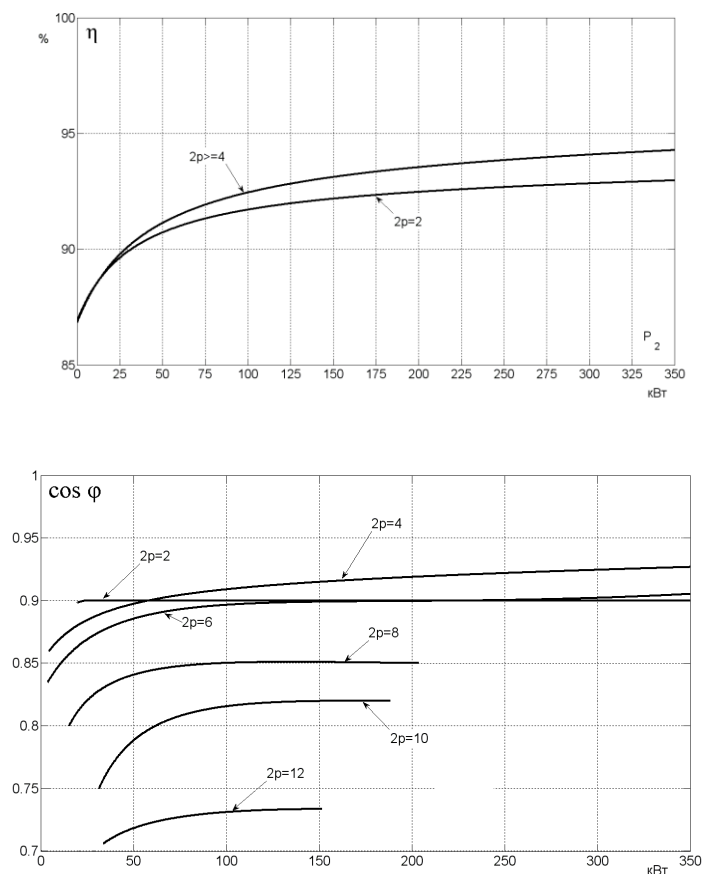


Рис. 4. Значение коэффициента k_E



а)



б)

Рис. 5. Примерные значения КПД и $\cos \phi$ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44
а – двигателей мощностью до 30 кВт; б – двигателей мощностью до 400 кВт

6. Определяем электромагнитные нагрузки (предварительно)

По рисунку 6, в зависимости от высоты оси вращения h определяем электромагнитные нагрузки:

A [А/м] и B_δ [Тл]

7 Предварительное значение обмоточного коэффициента $K_{об1}$ выбирается в зависимости от типа обмотки статора.

Для однослойных обмоток $K_{об1} = 0,95 \div 0,96$.

Для двухслойных при $2p = 2$ следует принять $K_{об1} = 0,9 \div 0,91$ и при больший полюсности $K_{об1} = 0,91 \div 0,92$.

В данном примере расчета принимаем однослойную обмотку с $K_{об1} = 0,95$.

8. Расчетная длина воздушного зазора:

$$l_\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{об1} \cdot A \cdot B_\delta} = 0.131 \text{ м.} \quad (5)$$

где $k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11$ - коэффициента формы поля под полюсом электродвигателя;

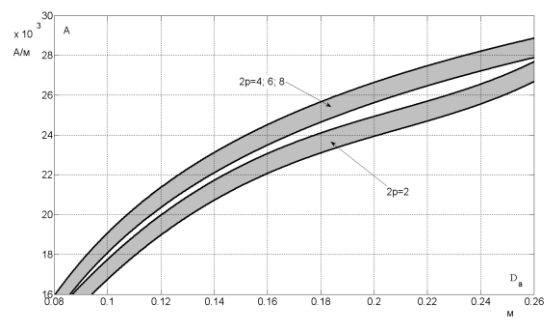
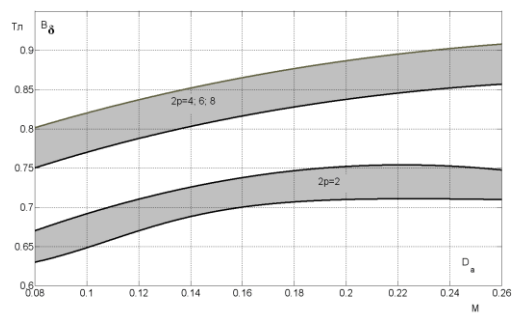
$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = 157 \text{ рад/сек - синхронная угловая скорость вала двигателя [обм./мин.]}$$

9 Критерием правильности выбора главных размеров D и l_δ служит отношение $\lambda = \frac{l_\delta}{\tau}$, которое должно находится в пределах, показанных на рис. 7. Если λ оказывается чрезмерно большим, то следует повторить расчет для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения h . Если λ – мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h .

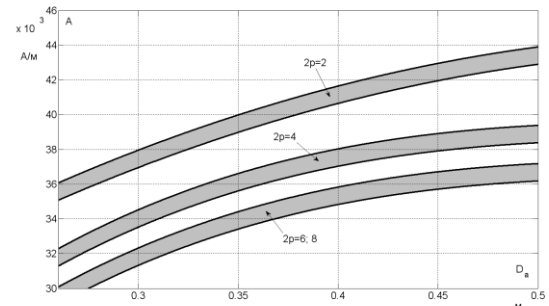
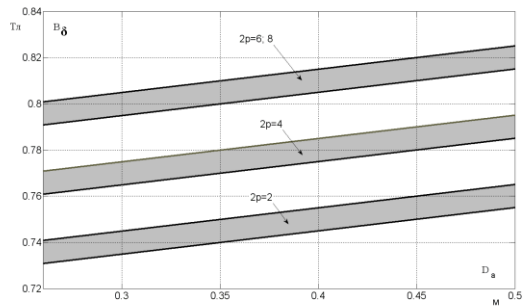
В нашем случае отношение $\lambda = 0,91$ и находится в рекомендованных пределах.

10. Определяем предельные (максимальное и минимальное) значения t_1 в зависимости от величины τ согласно рис. 8. На рис зона 1 соответствует двигателям у которых $h \leq 90 \text{ мм}$; зона2 – $90 \text{ мм} \leq h \leq 250 \text{ мм}$; зона3- $h > 280 \text{ мм}$.

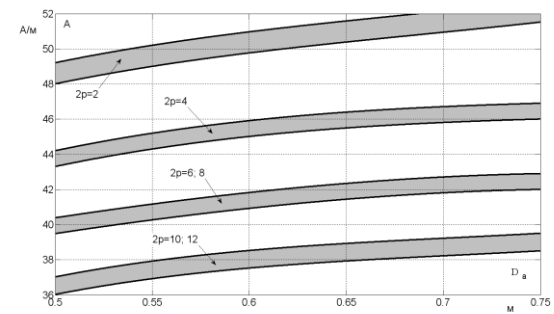
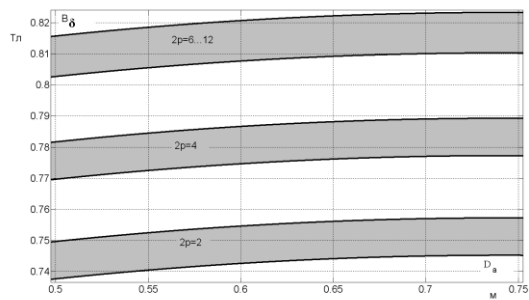
В нашем случае: $t_{1\max} = 14$; $t_{1\min} = 12$;



а) при высоте вращения $h \leq 132$ см



б) при $h = 160 \dots 250$ см



в) при $h \geq 280$ см с продуваемым ротором

Рис. 6. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

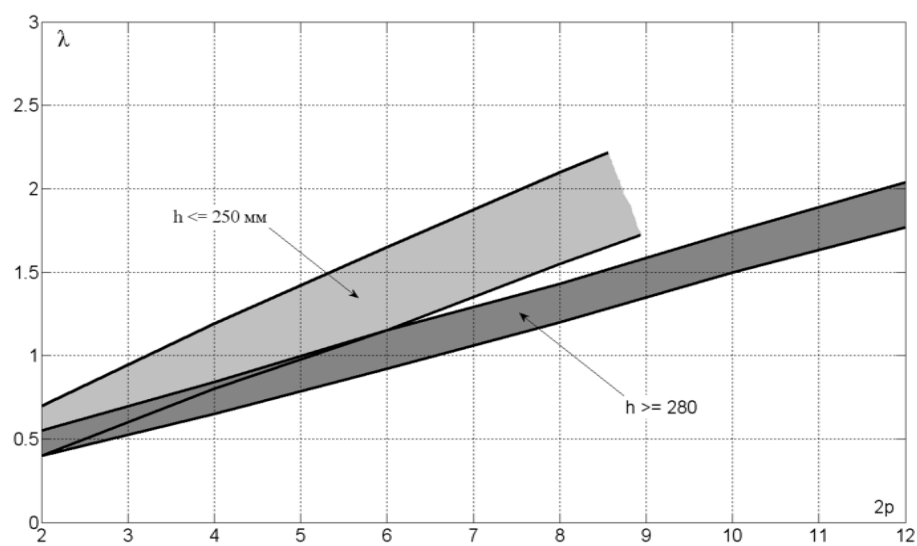


Рис. 7. Требуемые значения отношения $\lambda = l_{\delta} / \tau$ у двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

11. Рассчитываем число пазов статора

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} = 41. \quad (6)$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} = 48. \quad (7)$$

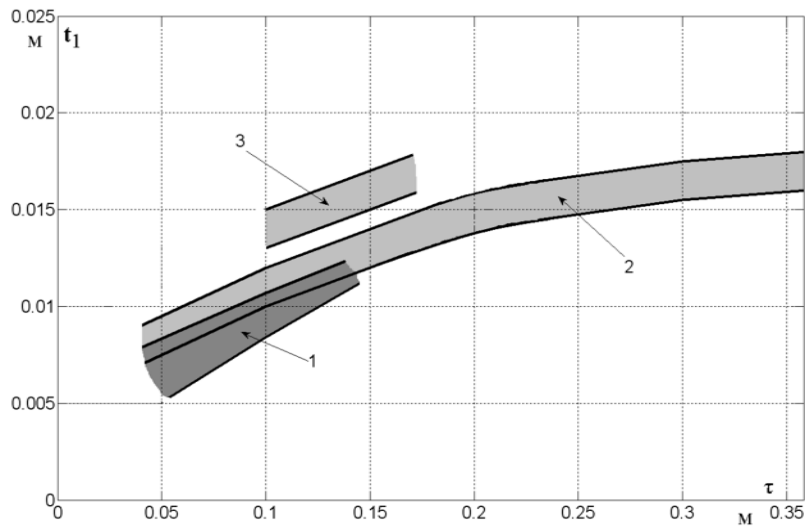


Рис. 8. Определение зубцового деления статора асинхронного двигателя со всыпной обмоткой

Принимаем максимальное число пазов Z_1 из полученного диапазона ($Z_{1\min} - Z_{1\max}$) делящееся без остатка на 3 (что обеспечивает симметричность обмоток). Принимаем $Z_1 = 48$

При этом, количество пазов на каждую фазу равно

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = 4, \quad (9)$$

где $m=3$ – число фаз двигателя.

Принимаем обмотку однослойной.

12. Окончательно находим зубцовое деление статора:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = 12.1 \times 10^{-3} \text{ м.} \quad (10)$$

13. Число эффективных проводников в пазу определяем по формуле

$$u_n' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1n} \cdot Z_1} = 14, \quad (11)$$

где I_{1n} - номинальный ток статора:

$$I_{1n} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = 29 \text{ А.} \quad (12)$$

14. Принимаем параллельное число витков обмотки статора $a=2$, тогда

$$u_n = a \cdot u_n' = 28. \quad (13)$$

15. Окончательное значение количества витков обмотки статора:

$$\omega_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 112 \quad (14)$$

Окончательное значение линейной нагрузки :

$$A = \frac{2 \cdot I_{1n} \cdot \omega_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = 33,5 \times 10^3 \text{ А/м.} \quad (15)$$

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1n}}{4 \cdot k_B \cdot \omega_1 \cdot k_{o61} \cdot f_1} = 9.005 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} . \quad (16)$$

Обмоточный коэффициент K_{o61} определяется по формуле $K_{o61} = K_p \cdot K_y$, где

K_y – коэффициент укорочения, учитывающий уменьшение ЭДС, вызванное укорочением шага обмотки;

K_p – коэффициент распределения, учитывающий уменьшение ЭДС распределенной по пазам обмотки по сравнению с сосредоточенной.

Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины и предполагаемую технологию укладки обмотки.

Машины мощностью до 15 кВт в большинстве случаев. В машинах большей мощности обмотки выполняются двухслойными.

Значение K_p находят по таблице 4 в зависимости от принятого q .

Таблица 4

q	2	3	4	5	6	∞
K_p	0,966	0,96	0,958	0,957	0,957	0,955

Коэффициент укорочения для однослойной обмотки $K_y = 1$.

Для двухслойной обмотки:

$$K_y = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \beta .$$

В большинстве асинхронных двигателей с двухслойной обмоткой $\beta \approx 0,8$.

Для нашего примера $K_{o61} = K_p = 0,958$.

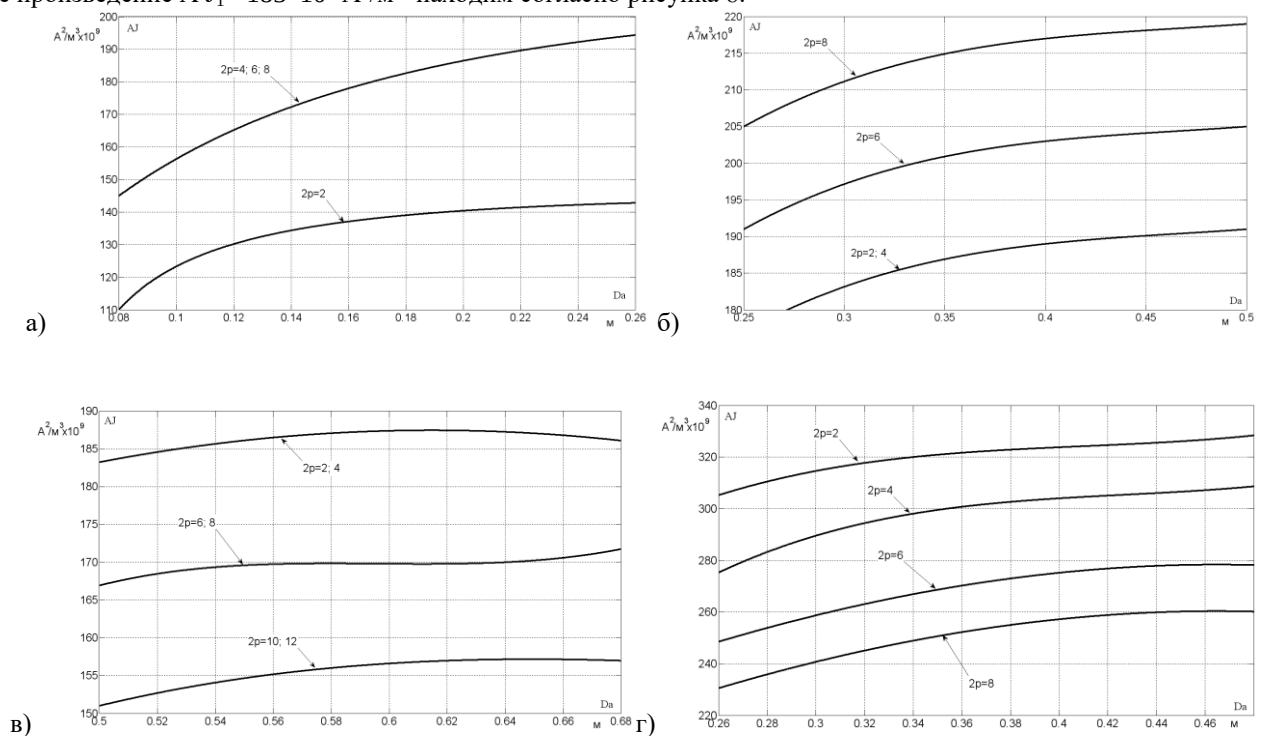
$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = 0.749 \text{ Тл} . \quad (17)$$

Проверяем, что значения A и B_δ находятся в допустимых пределах согласно рис. 6.

16. Предварительно определяем плотность тока в обмотке статора

$$J_1 = \frac{(A \cdot J_1)}{A} = 5.46 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 . \quad (18)$$

где произведение $A \cdot J_1 = 183 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3$ находим согласно рисунка 8.



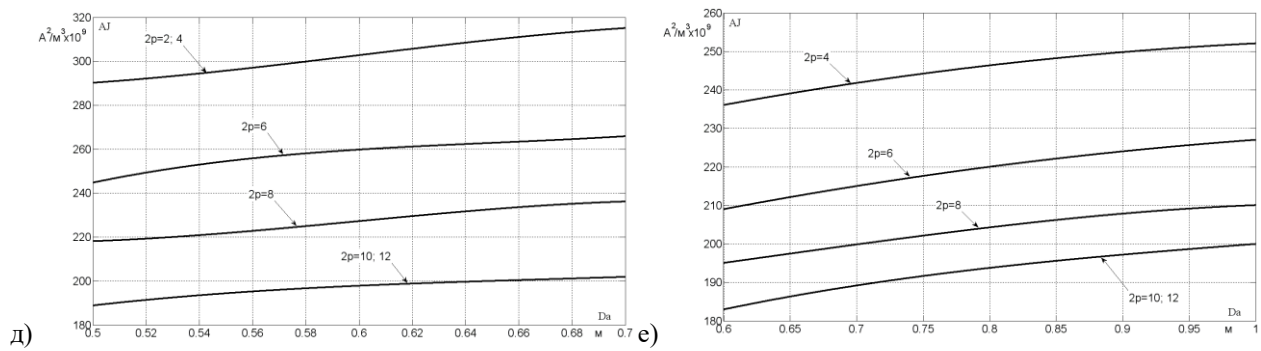


Рис. 8. Средние значения произведения ($A \cdot J_1$) асинхронных двигателей
а) со степенью защиты IP44, $h \leq 1332$ мм; б) со степенью защиты IP44, $h = 160 \dots 250$ мм; в) со степенью защиты IP44, $h = 280 \dots 355$ (при продувном роторе); г) со степенью защиты IP23, $h = 160 \dots 250$ мм; д) со степенью защиты IP23, $h = 280 \dots 355$ мм; е) со степенью защиты IP23, $h = 280 \dots 355$, $U = 6000$ В.

17. Предварительно определяем сечение эффективного проводника обмотки статора

$$q_{эф} = \frac{I_{1н}}{a \cdot J_1} = 2,66 \text{ мм}^2. \quad (19)$$

Число элементарных проводников в одном эффективном может находится в пределах $2 \div 6$. В обмотках, предназначенных для механизированной укладки число элементарных проводников стремятся снизить до $2 \div 3$. Для нашего случая принимаем $n_{эл} = 2$ и получаем сечение элементарного проводника:

$$q_{эл} = q_{эф} / n_{эл} = 1,227 \text{ мм}^2 \quad (20)$$

из таблицы 5 выбираем обмоточный провод ПЭТМ с характеристиками:

$d_{эл} = 1,25$ – номинальный диаметр неизолированного проводника, мм;

$q_{эл} = 1,227$ – площадь поперечного сечения неизолированного проводника, мм^2 ;

$d_{из} = 1,33$ – среднее значение изолированного провода, мм.

Пересчитываем реальное эффективное сечение:

$$q_{эф} = n_{эл} \cdot q_{эл}$$

18. Окончательно находим плотность тока в обмотке статора:

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} = 5,91 \text{ А/мм}^2 \quad (21)$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора. Выбираем сечение пазов статора согласно представленному на рис. 10, а.

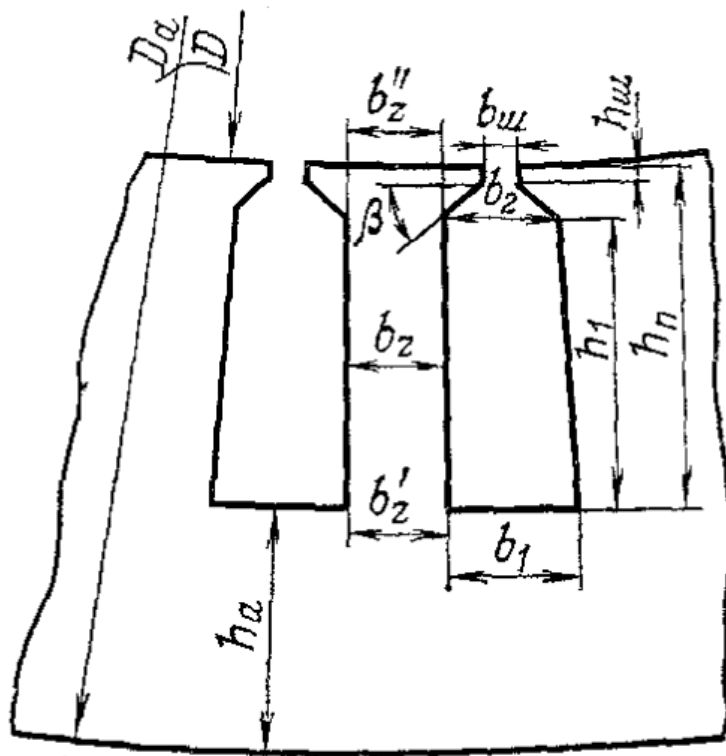


Рис. 10. Сечение паза статора асинхронной машины

19. Предварительно по таблице 6 принимаем значения магнитной индукции в ярме статора $B_n=1,6$ Тл, магнитной индукции в наиболее узком сечении зубца $B_{z1}=1,9$ Тл.

Определяем геометрические размеры сечения паза статора асинхронной машины:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = 4.9 \text{ мм} \quad (22)$$

где $k_c=0,97$ – конструктивный коэффициент; $l_{cr1} \approx l_{\delta}$ – длина стали сердечника статора.

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = 22.3 \text{ мм.} \quad (23)$$

Таблица 5.

Диаметр и площадь поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

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	0,1	0,00502	0,53	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,1	0,122	0,00785	0,6	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	0,67	0,73	0,353
0,132	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,8	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,2	0,0227	0,9	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
0,19	0,22	0,0284	1	1,08	0,785
0,2	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
0,212	0,242	0,0353	1,12	1,2	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
0,236	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
0,265	0,3	0,0552	1,4	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,5	1,585	1,767
0,3	0,335	0,0707	1,6	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,7	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,8	1,895	2,54
0,355	0,395	0,099	1,9	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2	2,095	3,14
0,4	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,465	0,1419	2,24	2,34	3,94

0,45	0,49	0,159	2,36	2,46	4,36
0,475	0,515	0,1772	2,5	2,6	4,91
0,5	0,545	0,1963			

Таблица 6

Допустимые значения индукции на различных участках магнитной цепи, Тл

Участки магнитной цепи	Обозначение	IP44				
	2p	2	4	6	8	10, 12
Ярмо статора	B _n	1,4 – 1,6			1,15 – 1,35	1,1 – 1,2
Зубцы статора при постоянном сечении (всыпная обмотка)	B _{z1}	1,7 – 1,9				1,6 – 1,8
Зубцы статора в наиболее узком сечении: - при полузакрытых пазах - при открытых пазах	B _{z1max} B _{z1max}	1,75 – 1,95 1,6 – 1,8				
Ярмо ротора: - короткозамкнутого - фазного - в двигателях с U=6000 В	B _j B _j B _j	≤1,45 - -	≤1,25 ≤1,25 ≤1,55	≤1,15 ≤1,05 ≤1,3	≤0,85 ≤0,75 ≤0,1	
Зубцы ротора при постоянном сечении (грушевидные пазы)	B _{z2}	1,75 – 1,85				
Зубцы ротора в наиболее узком сечении: - короткозамкнутого - фазного	B _{z2max} B _{z2max}	- -	1,5 – 1,7 1,85 – 2,05	1,45 – 1,6 1,75 – 1,9		

20. Высоту шлица паза $h_{ш}$ выполняют обычно в пределах $0,5 \div 1$ мм. Ширину шлица принимают равной:

$$b_{ш} = d_{из} + (1,5 - 2) \text{ мм, где}$$

$d_{из}$ – диаметр обмоточного провода в изоляции.

Для расчета принимаем: $b_{ш}=3,7$ мм; $h_{ш}=1$ мм.

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = 21,2 \text{ мм} \quad (24)$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_n)}{Z_1} - b_{z1} = 10 \text{ мм.} \quad (25)$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_{ш} - b_{ш}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} = 7,6 \text{ мм.} \quad (26)$$

$$h_1 = h_n - \left(h_{ш} + \frac{b_2 - b_{ш}}{2} \right) = 18,3 \text{ мм.} \quad (27)$$

21. Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу

$$S_{из} = b_{из} (2 \cdot h_n + b_1 + b_2), \quad (28)$$

где $b_{из}$ – односторонняя толщина пазовой изоляции. Ее величина определяется классом применяемой изоляции и величиной рабочего напряжения. $b_{из}$ изменяется в пределах $0,3 \div 0,7$ мм.

В расчете принимаем $b_{из}=0,44$ мм.

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников

$$S_n = \frac{b_1 + b_2}{2} h_1 - S_{из} = 138,15 \text{ мм.} \quad (29)$$

22. Контролем правильности размещения обмотки в пазу является коэффициент заполнения паза K_3 . Он должен находится в пределах $K_3 = 0,7 \div 0,79$. Изменить величину K_3 можно, изменив размеры паза или значение принятой допустимой индукции.

Определяем коэффициент заполнения паза

$$k_3 = \frac{d_{u3}^2 \cdot u_n \cdot n_{эл}}{S_n} = 0.717 \quad (30)$$

Полученное значение K_3 лежит в допустимых пределах.

По результатам расчета пазов статора на рисунке 10 представлено поперечное сечение паза статора.

25. Расчет ротора. Принимаем рабочий воздушный зазор (по рис. 11) равным $\delta=0,5$ мм.

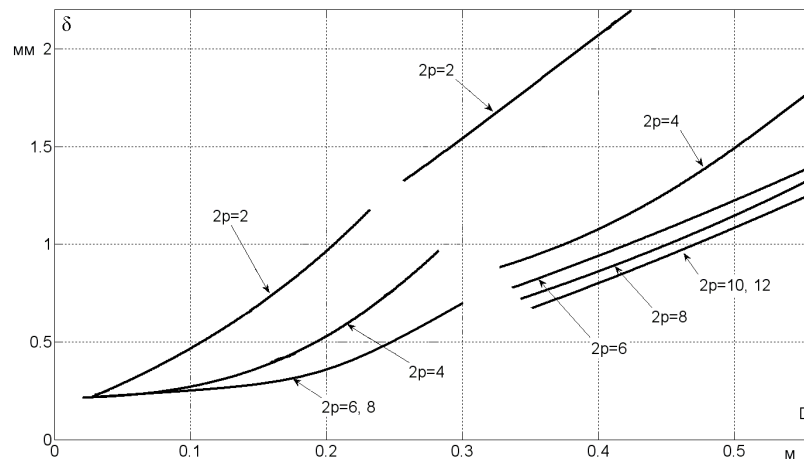


Рис. 11 К выбору воздушного зазора в асинхронных двигателях

26. Определяем число пазов ротора (согласно табл. 1 (Приложение) $Z_2=38$.

27. Определяем внешний диаметр

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0.184 \text{ м.} \quad (31)$$

28. Длина активной части ротора

$$l_2 = l_{cm1} = 0.13 \text{ м.} \quad (32)$$

29. Зубцовое деление

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = 15.2 \text{ мм.} \quad (33)$$

30. Внутренний диаметр ротора приравняем внутреннему диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал

$$D_j = D_g = K_B \cdot D_a = 60 \text{ мм.} \quad (34)$$

где коэффициент K_B принимается равным $k_B=0.23$

31. Ток в стержне ротора

$$I_2 = k_i \cdot I_{1n} \cdot v_i = 442 \text{ А,} \quad (35)$$

где $k_i = 0.9$ – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на отношение I_2/I_1 . Определяется из рисунка 11 в зависимости от коэффициента мощности $\cos\varphi$;

v_i – коэффициент приведения токов, определяется согласно выражения:

$$v_i = \frac{2 \cdot m \cdot \omega_1 \cdot k_{\phi 1}}{Z_2} = 16.94 \quad (36)$$

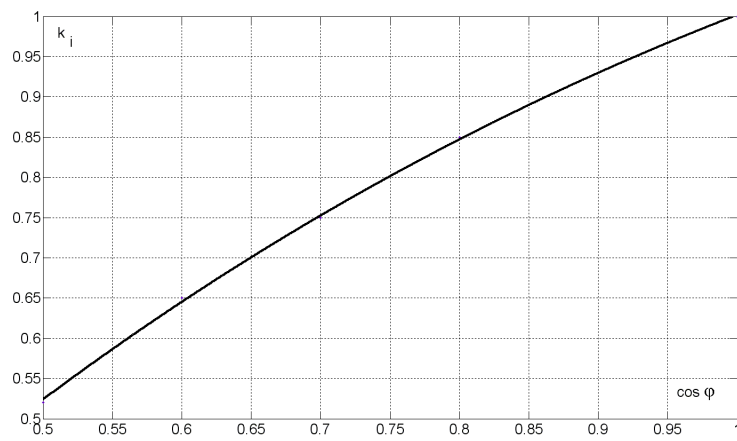


Рис. 11. Коэффициент k_i в зависимости от $\cos \varphi$

32. Площадь поперечного сечения стержня:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = 176.8 \text{ мм}^2 \quad (37)$$

где J_2 – плотность тока в стержне литой клетки, принимаем $J_2 = 2.5 \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2$.

33. Выбираем паз ротора согласно рис. 12.

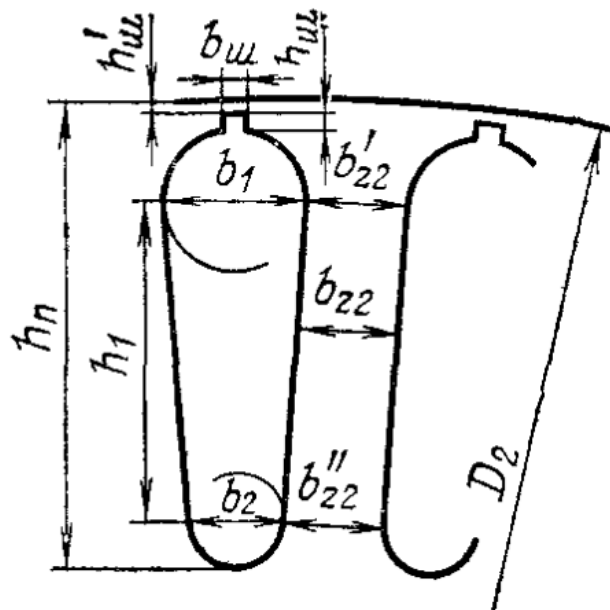


Рис. 12. Сечение паза ротора асинхронной машины

Принимаем следующие конструктивные размеры:

$b_{ш.р} = 1,5 \text{ мм}$;

$h_{ш.р} = 0,7 \text{ мм}$;

$h_{ш.р}' = 0,3 \text{ мм}$.

Допустимая ширина зубца:

$$b_{z2\text{доп}} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{B_{z2} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = 6.5 \text{ мм.} \quad (38)$$

где $B_{z2} = 1,8 \text{ Тл}$ – допустимая магнитная индукция в зубцовом слое ротора.

Высоту паза определяем по рис. 13 исходя из внутреннего диаметра ротора D

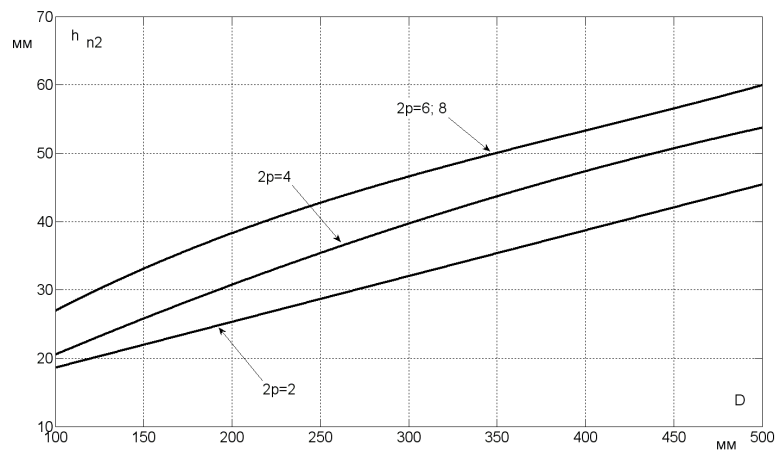


Рис. 13. Среднее значение h_n

Для нашего случая, принимаем $h_{np}=32$ мм;

$$b_{1p} = \frac{\pi(D_2 - h_{up} - 2 \cdot h'_{up}) - Z_2 \cdot b_{z2don}}{\pi + Z_2} = 7.9 \text{ мм.} \quad (39)$$

$$b_{2p} = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_n) - Z_2 \cdot b_{z2don}}{Z_2 - \pi} = 3.72 \text{ мм.} \quad (40)$$

$$h_{1p} = h_n - h_{up} - h'_{up} - \frac{b_{1p}}{2} - \frac{b_{2p}}{2} = 25.28 \text{ мм.} \quad (41)$$

Определяем сечение стержня окончательно:

$$q_c = (\pi/8) \cdot (b_{1p}^2 + b_{2p}^2) + 0.5 \cdot (b_{1p} + b_{2p}) \cdot h_{1p} = 173.2 \text{ мм}^2.$$

34. Определяем плотность тока в стержне окончательно:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = 2.55 \text{ А/м}^2. \quad (42)$$

35 Производим расчет намагничивающего тока. Определяем магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot B_\delta \cdot k_\delta \cdot \delta = 727.16 \text{ А,} \quad (43)$$

где:

$$k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = 1.22, \quad (44)$$

в свою очередь:

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_\theta}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_\theta}{\delta}} = 4.42 \quad (45)$$

36. Определяем магнитное напряжение зубцовых зон статора и ротора:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 102.02 \text{ А,} \quad (46)$$

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 97.33 \text{ А,} \quad (47)$$

где, согласно табл. П2 (Приложение) для стали 2013: $H_{z1}=2340$ А/м, $H_{z2}=1540$ А/м при соответствующих значениях магнитной индукции B_{z1} и B_{z2} .

$$h_{z1}=h_n; h_{z2}=h_{n2}-0,1.$$

37 Коэффициент насыщения зубцовой зоны :

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1,27. \quad (48)$$

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

Если $k_z > 1,5 \div 1,6$, имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны.

Если $k_z < 1,2$, – воздушный зазор взят слишком большой или зубцовая зона мало используется.

В этих случаях в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

Полученное нами значение k_z находится в рекомендованных пределах.

38 Магнитные напряжения ярм
статора:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 184.8 \text{ A}. \quad (49)$$

ротора:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 11.93 \text{ A}. \quad (50)$$

где согласно табл. ПЗ (Приложение)

$H_a=940 \text{ A/м}$; $H_j=168 \text{ A/м}$ определяются по соответствующей индукции B_a и B_j . Величина индукции в ярме ротора B_j определенной согласно выражению:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = 0.95 \text{ Тл}. \quad (51)$$

где расчетная высота ярма ротора определим согласно:

$$h_j = (D_2 - D_j)/2 - h_{п2} = 30 \text{ мм}. \quad (52)$$

Индукция в ярме статора определяется по формуле :

$$B_a = \Phi / 2h_a l_{ст1} k_c \quad (53)$$

Длина средней магнитной линии потока в ярме статора и ротора определяются выражениями:

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} = 0.1966 \text{ м}. \quad (54)$$

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_b + h_j)}{2 \cdot p} = 0.071 \text{ м}. \quad (55)$$

39. Магнитное напряжение на пару полюсов

$$F_\delta = F_\delta - F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 1123.2 \text{ A}. \quad (56)$$

40. Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_\mu = \frac{F_\mu}{F_\delta} = 1.56. \quad (57)$$

41. Намагничивающий ток

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_\mu}{0,9 \cdot m \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}} = 7.75 \text{ A}. \quad (58)$$

Относительное значение тока намагничивания определяется выражением:

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

Если $I_{\mu}^{*} < 0,2 \div 0,18$, то размеры машины выбраны завышенными. Такой двигатель может иметь высокий КПД и $\cos \varphi$, но большую массу и габариты.

Если $I_{\mu}^{*} > 0,3 \div 0,35$, – габариты машины занижены, либо неправильно выбраны размеры магнитопровода. Двигатель имеет низкий КПД и $\cos \varphi$.

В нашем случае $I_{\mu}^{*} = 0.27$ и находится в рекомендованных пределах.

42 Рассчитываем параметры рабочего режима. Определяем активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 0.402 \text{ Ом}, \quad (59)$$

где: $\rho_{115} = 0,024 \cdot 10^{-6}$ Ом·м – удельное сопротивление меди при расчетной температуре обмоток 115°C ; L_1 – длина проводников фазы обмотки вычисляемая по формуле

$$L_1 = l_{\text{ср1}} \cdot \omega_1 = 80.86 \text{ м}. \quad (60)$$

при средней длине витка обмотки

$$l_{\text{ср1}} = 2(l_{\text{см1}} + l_{\text{л1}}) = 0.722 \text{ м}, \quad (61)$$

$$l_{\text{л1}} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{км}} + 2 \cdot B = 0.231 \text{ м}. \quad (62)$$

где: $K_{\text{л}} = 1,3$ – конструктивный коэффициент; $B = 0,01$ м.

$$b_{\text{км}} = \frac{\pi(D + h_{\text{см1}})}{2 \cdot p} = 0.162 \text{ м}. \quad (63)$$

Длина вылета лобовой части катушки :

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{\text{км}} + B = 74.8 \text{ мм} \quad (64)$$

Относительное значение активного сопротивления фазы обмотки

$$r_1^{*} = r_1 \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0.402 \quad (65)$$

45. Активное сопротивление фазы обмотки ротора

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{\text{кл}}}{0,329^2} = 53.92 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (66)$$

где

$$r_c = \rho_{\text{ал115}} \frac{l_2}{q_c} = 36.61 \text{ Ом}, \quad (67)$$

где: $\rho_{\text{ал115}} = 0,048 \cdot 10^{-6}$ Ом·м – удельное сопротивление алюминия при расчетной температуре 115°C .

$$r_{\text{кл}} = \rho_{\text{ал115}} \frac{\pi \cdot D_{\text{кл}}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}}} = 0.937 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}. \quad (68)$$

где:

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = 618.9 \text{ мм}^2, \quad (69)$$

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{0,329} = 1343 \text{ А}, \quad (70)$$

$$J_{\text{кл}} = 0,85 \cdot J_2 = 2.17 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2, \quad (71)$$

$$D_{\text{кл}} = D_2 - b_{\text{кл}} = 0144 \text{ м}, \quad (72)$$

$$b_{\text{кл}} = 1,25 \cdot h_{\text{н2}} = 40 \text{ мм}. \quad (73)$$

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора

$$r_2' = r_2 \frac{4 \cdot m (\omega_1 \cdot k_{o\delta 1})^2}{Z_2} = 0196 \text{ Ом.} \quad (74)$$

Определяем относительное значение активного сопротивления обмотки ротора

$$r_2'^* = r_2' \cdot \frac{I_{1f}}{U_{1f}} = 0.0258 \quad (75)$$

46. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \frac{l_\delta'}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{i'} + \lambda_{e1} + \lambda_{a1}) = 0725 \text{ Ом,} \quad (76)$$

где: λ_n , λ_{n1} , λ_{n1} – коэффициенты проводимости соответственно пазового, лобового и дифференциального рассеяний обмотки статора, которые определяются по формулам :

$$\lambda_{i'} = \frac{h_1}{3 \cdot b_2} + \frac{1,5 \cdot (b_2 - b_\theta)}{b_2 + 2 \cdot b_\theta} + \frac{h_\theta}{b_\theta} = 1,48 ; \quad (77)$$

$$\lambda_{e1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_\delta} (l_\delta - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 1,45 , \quad (78)$$

где

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q} = 083. \quad (79)$$

$$\lambda_{a1} = \frac{t_1 \cdot 10^3}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} = 0,95 . \quad (80)$$

Относительное значение

$$x_1^* = x_1 \frac{I_{1f}}{U_{1f}} = 0.096 . \quad (81)$$

47. Индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{i2} + \lambda_{e2} + \lambda_{a2}) = 279,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом,} \quad (82)$$

где: λ_{n2} , λ_{n2} , λ_{n2} – коэффициенты проводимости соответственно пазового, лобового и дифференциального рассеяний обмотки ротора, которые определяются по формулам:

$$\lambda_{i2} = \frac{h_1'}{3 \cdot b} \left(1 - \frac{\pi \cdot b^2}{8 \cdot q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_\theta}{2 \cdot b} + \frac{h_\theta}{b_\theta} + 1,12 \frac{h_\theta' \cdot 10^6}{I_2} = 2,76 \quad (83)$$

здесь

$$h_1' = h_n - h_\theta' - h_\theta = 0,36 ; \quad (84)$$

$$\lambda_{e2} = \frac{2,3 \cdot D_{e\ddot{e}}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot 0,108} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{e\ddot{e}}}{2 \cdot q_{e\ddot{e}} \cdot 10^{-3} / 1,25 \cdot h_{n2} + 1,25 \cdot h_{n2}} = 061; \quad (85)$$

$$\lambda_{a2} = \frac{t_2 \cdot 10^3}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} = 2,08 \quad (86)$$

Приводим x_2 к числу витков статора

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m(\varpi_1 \cdot k_{i\dot{a}1})^2}{Z_2} = 1.02. \quad (87)$$

Относительные значения

$$x_2'^* = x_2' \frac{I_{1f}}{U_{1f}} = 0.134 \quad (88)$$

48. Производим Расчет рабочих характеристик. Для расчета характеристик используется Т-образная схема замещения, представленная на рис. 14.

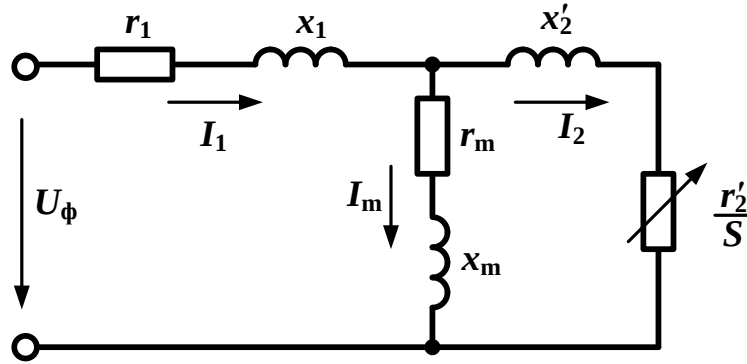


Рис. 14. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Величины r_1 , x_1 , r_2' , x_2' – были определены на предыдущих этапах расчета.

Параметры ветви намагничивания r_m и x_m могут быть, с известным приближением, определены по следующим формулам:

$$x_m \approx \frac{U_1 - I_\mu x_1}{I_\mu} = 27.66 \text{ Ом}, \quad (89)$$

где I_μ – намагничивающий ток, А;

U_1 – номинальное фазное напряжение, В;

x_1 – индуктивное сопротивление фазы обмотки статора, Ом.

$$r_m \approx \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m_1 I_\mu^2} (\text{Ом}) = 1.5 \text{ Ом} \quad (90)$$

где $P_{\text{ст.осн}}$ – основные потери в стали статора, Вт.

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (K_{\text{да}} B_a^2 m_a + K_{\text{дз}} B_{\text{зср}}^2 m_{z1}) = 270.8 \text{ Вт}$$

где β – показатель степени; $p_{1,0/50}$ – удельные потери, (Вт/кг).

Для стали марок 2013; 2011; 2211 можно принять:

$$\beta = 1.5; \quad \delta_{1,0/50} = 2.5 \div 2.6 \text{ (А/мм)};$$

$K_{\text{да}}$ и $K_{\text{дз}}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерность распределения потока по сечениям участков магнитопровода. Приближенно можно принять: $K_{\text{да}} = 1.6$; $K_{\text{дз}} = 1.8$.

B_a , $B_{\text{зср}}$ – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл.

– m_a , m_{z1} – масса стали ярма и зубцов статора, кг.

$$m_a = \pi(D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{\text{н\ddot{o}1}} \cdot K_c \cdot Y_c = 16.78 \text{ кг} \quad (91)$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot \hat{a}_{z1\text{н\ddot{o}}} \cdot Z_1 \cdot l_{\text{н\ddot{o}1}} \cdot K_c \cdot Y_c = 4.94 \text{ кг} \quad (92)$$

где h_a – высота ярма статора, м; $h_a = 0,5(D_a - D) - h_{n1} = 0,0217$ м; h_{z1} – расчетная высота зубца статора, м; e_{z1cp} – средняя ширина зубца статора, м; Y_c – удельная масса стали, в расчетах принимают $Y_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Относительные значения r_m и x_m определяются по формулам :

$$r_m^* = r_m (I_n / U_n) = 0,19 ; \quad x_m^* = x_m (I_n / U_n) = 3,6.$$

Расчет рабочих характеристик рекомендуется выполнить по формулам, приведенным в табл. 7 для пяти – шести значений скольжения S , при которых полезная мощность двигателя P_2 меняется от режима близкого к холостому ходу до мощности равной или несколько большей номинальной мощности.

Таблица 7

№ п/п	Расчетные формулы	Значение S				
		0,0014	0,007	0,014	0,02	0,028
1	$z_2^2 = (r_2'/S)^2 + x_2'^2$	339,6	13,6	3,4	1,68	0,86
2	$z_m^2 = r_m^2 + x_m^2$	12,99	12,99	12,99	12,99	12,99
3	$z_{22}^2 = [r_m + (r_2'/S)]^2 + (x_m + x_2')^2$	360	28,9	18	16	15,1
4	$r_{2m} = [r_m z_2'^2 + (r_2'/S) z_m^2] / z_{22}^2$	0,84	1,74	1,37	1,07	0,8
5	$x_{2m} = (x_m z_2'^2 + x_2' z_m^2) / z_{22}^2$	3,4	1,75	0,78	0,49	0,32
6	$z_{2m} = \sqrt{r_{2m}^2 + x_{2m}^2}$	3,5	2,48	1,57	1,17	0,94
7	$z_{дв} = \sqrt{(r_1 + r_{2m})^2 + (x_1 + x_{2m})^2}$	3,6	2,57	1,67	1,27	0,95
8	$I_1 = U_{фн} / (z_{дв} Z_B)$, А	6,05	11,3	17,3	22,8	30
9	$I_2' = I_1 z_{2m} / z_2'$, А	1,53	7,62	14,8	20,6	30
10	$\cos \varphi_1 = (r_1 + r_{2m}) / z_{дв}$	0,24	0,69	0,85	0,88	0,897
11	$P_1 = 3 U_{фн} I_1 \cos \varphi_1$, Вт	1275	5146	9705	13242	17760
12	$P_2 = 3 I_2'^2 r_2' Z_A (1 - S) 0,85 / S + 0,015 U_{1i} I_{1i} \cos \varphi_i$, Вт	832	4107	7693	10800	15628
13	$\eta = P_2 / P_1$	0,65	0,79	0,8	0,82	0,86

Определим значение скольжения близкое к номинальному скольжению

$$S_i' = 1,2 \tilde{n}_1^2 \eta_i \cos \varphi_{i1} (1 + 2r_1) \cdot r_2' = 0,028$$

где $c_1 = 1 + x_1 / x_i = 1,027$.

В клетки табл. 5 под надписью «Значение S » рассчитайте и запишите значение скольжений равных соответственно: $0,05 \cdot S_i'$; $0,25 \cdot S_i'$; $0,5 \cdot S_i'$; $0,75 \cdot S_i'$ и S_i' .

Для одного значения скольжения, а именно, для S_i' в работе необходимо привести расчет с формулами и подставленными в них числовыми значениями. Результаты расчета для этого и для остальных значений скольжения необходимо свести в табл. 7. Значения параметров схемы замещения в формулы табл. 7 подставлять в относительных единицах. Напряжение в расчете требуется фазное, и при соединении обмоток статора «звездой» оно определяется как

$$U_{\phi i} = U_{\phi i} / \sqrt{3}.$$

Базовое сопротивление служит для перевода сопротивлений из относительных единиц в именованные единицы

$$Z_A = U_{\phi i} / I_{1i}. \quad (93)$$

Коэффициент 0,85 в формуле для расчета P_2 в табл. 7 учитывает наличие в двигателе механических потерь мощности $\Delta P_{мех}$, которые приняты для всех вариантов задания равными 0,015 от $P_{2н}$.

По полученным данным необходимо построить в одних осях рабочие характеристики двигателя, а именно, зависимости I_1 , η , $\cos \varphi$, S в функции от P_2 .

По вертикальной оси должны быть размечены три шкалы: для тока, для скольжения и одна шкала для КПД и коэффициента мощности. Все вертикальные шкалы и ось абсцисс должны быть равномерно оцифрованы и должны начинаться с нуля.

Номинальный момент рассчитывается по формуле

$$\dot{I}_{2i} = 9,55 \dot{D}_{2i} / n_i (\dot{I} \cdot \dot{i}),$$

здесь $\dot{D}_{2i}$ – в Вт; n_i – в об/мин.

Производим расчет пусковых характеристик.

Механическая характеристика $M_2(s)$ и токовая характеристика $I_1(s)$ асинхронного двигателя должны быть рассчитаны и построены при изменении скольжения от 0 до 1. Причем момент на валу двигателя и ток статора рассчитываются в относительных и именованных единицах.

Для расчета моментов в относительных единицах рекомендуется следующая упрощенная формула:

$$M_2^* \approx \frac{(1 - s_i) \cdot r'_{2s}}{\eta_i \cdot \cos \varphi_{i1} \cdot s \cdot \left((r_1 + r'_{2s}/s)^2 + (x_{1s} + x'_{2s})^2 \right)}. \quad (94)$$

При выводе этой формулы, в связи с малым влиянием, для упрощения принято $\Delta P_{i\delta 0} = 0$, $\tilde{n}_1 = 1$. В этой формуле обозначено: s_i – номинальное скольжение, r_1 , x_{1s} – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах, r'_{2s} , x'_{2s} – приведенные активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в относительных единицах. Индекс обозначает, что значение сопротивления зависит от скольжения.

В начальный момент пуска при $s=1$ частота тока в роторе равна частоте тока в статоре. При этом в стержнях обмотки ротора в наибольшей степени проявляется эффект вытеснения тока в направлении поверхности ротора. Этот эффект приводит к увеличению активного и уменьшению индуктивного сопротивлений стержней. Кроме того, при пуске ток статора в 5 – 7 раз превышает номинальный ток, это приводит к насыщению отдельных участков магнитной цепи и к уменьшению индуктивных сопротивлений обмоток. Эти два эффекта приводят к увеличению момента на валу двигателя. По мере разгона частота тока в роторе и величина токов статора и ротора уменьшаются и, следовательно, уменьшается вытеснение тока в роторе и насыщение магнитной цепи. В рабочих режимах, включая номинальный режим, влиянием рассмотренных эффектов можно пренебречь.

Сопротивление r'_{21} и $x_{\delta 1}$ определены при $S = 1$ и их можно принять равными:

$$\begin{aligned} r'_{21} &= r_1 + r'_2; \\ x_{\delta 1} &= x_1 + x'_2. \end{aligned}$$

Момент на валу двигателя в $\dot{I} \cdot \dot{i}$ $\dot{I}_2 = \dot{I}_2^* \cdot \dot{I}_{2i}$. Для построения механической характеристики необходимо определить момент по формуле (94) при скольжении равных 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и, кроме того, в четырех характерных точках, а именно:

- 1) в номинальном режиме при $s = s_n$, $M_2 = M_{2n}$, или $M_2^* = 1$;
- 2) в точке максимального момента при $S = S_k$,
- 3)

$$s_k = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}; \quad (95)$$

- 4) в начальный момент пуска при $s = 1$, при этом $r'_{2s} = r'_{21}$

$$\begin{aligned} x_1 + x'_2 &= x_{k1}, \\ r_1 + r'_2 &= r'_{21}, \\ M_{2n}^* &\approx \frac{(1 - s_n) \cdot r'_{21}}{\eta_n \cdot \cos \varphi_{1n} \cdot \left((r_1 + r'_{21})^2 + x_{k1}^2 \right)}. \end{aligned} \quad (96)$$

- 5) при идеальном холостом ходе при $s = 0$, $M_2 = 0$

$$z_{дв} = \sqrt{(r_1 + r_{2м})^2 + (x_1 + x_{2м})^2}. \quad (97)$$

Ток I_1^* определяется как $I_1 = U_{\delta i} / (z_{\delta\delta} Z_A)$, где $z_{дв}$ – полное сопротивление двигателя, для скольжений $s \geq S_k$ можно принять

$$z_{дв} = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2s}}{s} \right)^2 + x_{ks}^2}, \quad (98)$$

Начальный пусковой ток в относительных единицах при $s = 1$ и номинальном напряжении

$$I_{\pi}^* = 1 / \sqrt{(r_1 + r_{21}')^2 + x_{k1}^2} . \quad (99)$$

Расчет сопротивлений асинхронного двигателя с учетом вытеснения тока и насыщения магнитной цепи является довольно сложной задачей. На основе проведенного анализа различных методик этих расчетов, в этом руководстве дается наиболее простой, однако, обеспечивающий достаточную точность метод:

$$\begin{aligned} r_{2s}' &= r_2' \cdot (b_r (k_r - 1) + 1), \\ x_{ks} &= k_{\text{нас}} (x_1 + 0,5(1 + k_x)x_2') \end{aligned} \quad (100)$$

где k_r, k_s – коэффициент увеличения активного сопротивления ротора и уменьшения индуктивного сопротивления, обусловленные вытеснением тока; $k_{\text{нас}}$ – коэффициент насыщения, характеризующий уменьшение индуктивного сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора; b_r – отношение активного сопротивления стержня ротора к активному сопротивлению фазы ротора при низкой частоте тока в роторе.

Для двигателей с числом пар полюсов $2p = 2$ можно принять $b_r = 0,45$, а при $2p > 2b_r = 0,7$.

Для определения коэффициента k_r достаточно использовать кривую зависимости от k_r приведенной высоты стержня ротора ξ (рис. 15). При значениях $\xi > 2,6$ можно принять $k_r = \xi$. Вначале определяется коэффициент k_{r1} , т.е. коэффициент k_r при $s = 1$.

$$k_{r1} \approx 1,13(r_{21}'/r_2') - 1,43 \text{ для АД с } 2p > 2 \quad (101)$$

или

$$k_{r1} \approx 2,22(r_{21}'/r_2') - 1,22 \text{ для АД с } 2p = 2. \quad (102)$$

Затем по кривой (рис. 15) определяется ξ_1 – значение приведенной высоты стержня при скольжении $s = 1$. Приведенная высота стержня при других значениях скольжения определяется из выражения $\xi = \xi_1 \cdot \sqrt{s}$ и, затем по графику (рис. 15), определяется k_r для данного скольжения.

Коэффициент k_x с достаточной точностью определяется по коэффициенту k_r :

$$\begin{aligned} k_x &= 1 \text{ при } k_r < 1,3; \\ k_x &= 1,27 - 0,27 k_r \text{ при } 1,3 \leq k_r \leq 2,3; \\ k_x &= 1,5/k_r \text{ при } k_r > 2,3. \end{aligned} \quad (103)$$

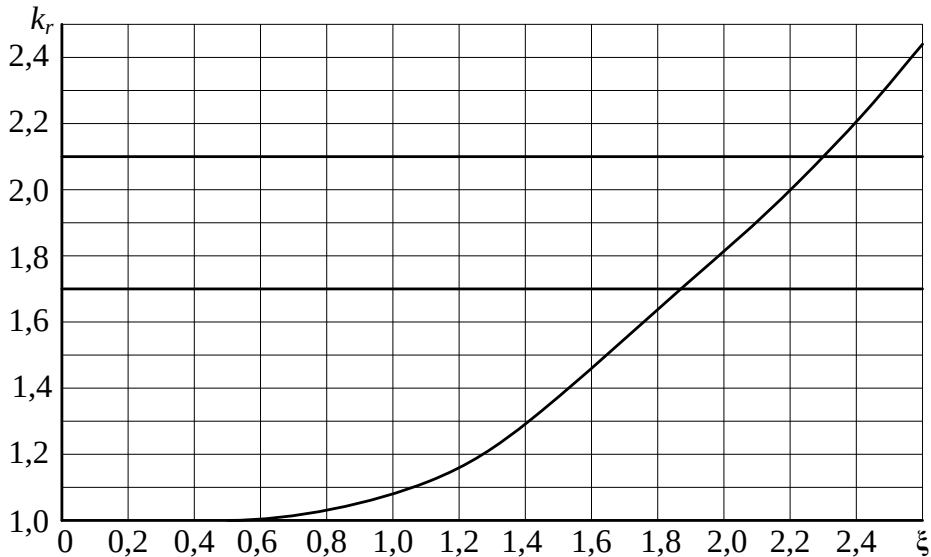


Рис. 15 Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления стержней ротора от приведенной высоты стержня

Для определения коэффициента насыщения $k_{\text{нас}}$ необходимо вначале определить $k_{\text{нас}1}$, т.е. значение при $s = 1$:

$$k_{\text{нас}1} \approx x_{k1} / (x_1 + 0,5(1 + k_{x1})x_2') \quad (104)$$

и затем в зависимости от $k_{\text{нас}1}$ и от скольжения по графику (рис. 5) определяется коэффициент насыщения. Причем, для скольжений $s > 0,4k_{\text{нас}} = k_{\text{нас}1}$.

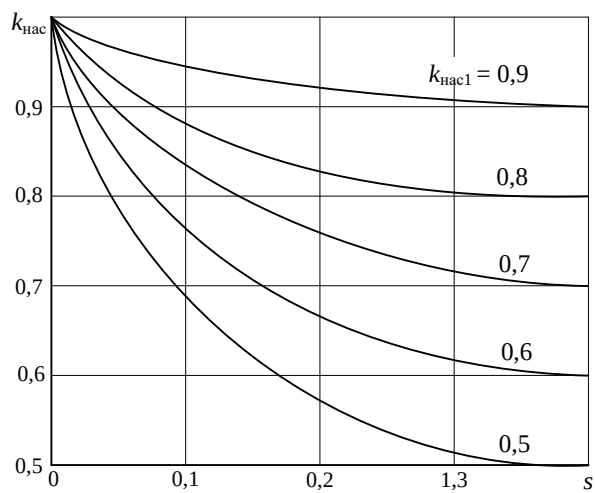


Рис. 16. Зависимость коэффициента насыщения от скольжения при разных $k_{\text{нас1}}$

Результаты расчета необходимо свести в табл. 8

Таблица 8

Величина	Скольжение s								
	0	0,015	0,063	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ξ	0	0.48	0.53	0.72	1.02	1.45	1.78	2.05	2.3
k_r	1	1	1	1.02	1.08	1.31	1.6	1.9	2.25
k_x	1	1	1	1	1	0.91	0.84	0.76	0.66
$k_{\text{нас}}$	1	0.98	0.97	0.93	0.91	0.9	0.9	0.9	0.9
r'_{2s}	0.0258	0.0258	0.0258	0.026	0.027	0.031	0.036	0.037	0.048
$r_{\text{дв}}$	0.24	0.97	0.48	0.29	0.19	0.13	0.11	0.105	0.1
$x_{\text{дв}}$	3.969	0.225	0.22	0.21	0.2	0.198	0.195	0.19	0.18
$z_{\text{дв}}$	1.19	0.995	0.53	0.36	0.28	0.24	0.22	0.21	0.2
M_2^*	0	1.14	1.92	2.5	2.2	1.6	1.3	1.1	1.05
I_1^*	0.8	1	1.9	2.8	3.57	4.2	4.55	4.76	5
$M_2, \text{Н} \cdot \text{м}$	0	116	196	255	224	163	132,6	112	107
$I_1, \text{А}$	24	30	57	84	107	126	137	143	150

По результатам расчета построить в одних осях зависимо $I_1^* = f(s)$ и $M^* = f(s)$. По вертикальной оси должны быть размечены две шкалы: для тока и для момента. Все вертикальные шкалы должны быть равномерны оцифрованы и должны начинаться с нуля.

2р	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		Пазы без скоса	Пазы со скосом
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	-
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	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
	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
6	36	26, 46, 48	28, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	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
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	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, 144, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139

Основная кривая намагничивания.

Сталь 2013

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

Таблица П.3

Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей

Сталь 2013

	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
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	1830	1900
1,8	2000	21600	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

Пояснения к выполнению чертежа общего вида
асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

