

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Самарский государственный университет путей сообщения» в г. Саратове

Перспективные энергетические установки подвижного состава

Методические указания и задания к выполнению контрольной работы
для студентов 5 курса специальностей 23.05.03 ПСЖД

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Задание на контрольную работу по дисциплине «Перспективные энергетические установки подвижного состава» включает в себе две задачи по разделам дисциплины: «Расчет асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором », «Расчет характеристик трехфазных асинхронных электродвигателей».

При изучении указанных разделов студенты- заочники работают над учебным материалом в основном самостоятельно. При самостоятельном изучении разделов студентам-заочникам рекомендуется составлять конспект. Следует хорошо разобраться в выводах формул и понять физическую сущность процессов и явлений, происходящих в электрических машинах при их работе. К выполнению заданий контрольной работы следует приступать только после изучения соответствующих разделов курса по рекомендуемым учебникам. При работе над заданиями необходимо критически относиться к результатам расчетов, оценивать их с точки зрения реальности числовых значений величин. Это позволит значительно уменьшить число ошибок и выработать навыки самоконтроля. Номер варианта каждой задачи выбирается по таблицам по двум последним цифрам учебного шифра студента. Контрольная работа выполняется в виде расчетной записки на листах бумаги формата А4, брошюруется и снабжается титульным листом. Расчетная записка пишется шариковой ручкой или печатается с помощью компьютера. Листы, рисунки и таблицы должны быть пронумерованы. Эскизы, графики и диаграммы выполняются на миллиметровой бумаге также формата А4 с применением стандартных масштабов. При этом на графиках по оси абсцисс должна откладываться только одна какая-нибудь величина (например, или), а по оси ординат можно откладывать несколько величин. Все вертикальные шкалы и ось абсцисс должны быть равномерно оцифрованы и должны начинаться с нуля. При изложении расчета нужно привести формулу с буквенными обозначениями величин, затем подставить численные значения величин и лишь после этого привести числовой результата и размерность величины. Результаты расчетов округляются до трех значащих цифр.

Задача 1

Расчет асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

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, $U_{1н}$	В	220/380					380/660				
Частота питающей сети, f	Гц	50									
Конструкт. испол.	–	IP44									
Режим работы	–	S1									

Определить:

1. Число пар полюсов, высоту оси вращения, внутренний диаметр статора, расчетную мощность и электромагнитные нагрузки, расчетную длину воздушного зазора.
2. Произвести расчет статора: рассчитать число пазов статора, число витков обмотки статора, плотность тока в обмотке статора, плотность тока в обмотке статора.
3. Произвести расчет ротора: рассчитать число пазов ротора, внешний диаметр и длину активной части ротора, внутренний диаметр ротора, ток в стержне ротора, площадь поперечного сечения стержня и плотность тока в стержне.

Методические указания к решению задачи:

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.

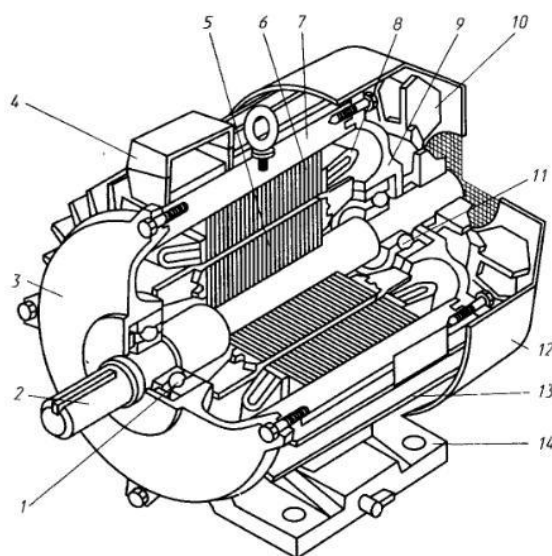


Рис. 2. Конструкция асинхронного двигателя серии 4А

На станине укреплен корпус 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 – насыпная из круглого обмоточного провода марки ПЭТ-155 или ПЭТ155М, 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 крепится на валу горячей посадкой. При больших h для крепления применяют шпонки. мм 0 25h

Подшипниковые щиты крепятся к станине с помощью болтов. В центре щитов имеются отверстия, расточенные под посадку наружных обоев подшипников 1, 11. Точность положения оси ротора относительно внутренней поверхности станины обеспечивается обработкой поверхностей посадки подшипниковых щитов на станину и наружных обоев 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.

В качестве примера приводится расчет асинхронного электродвигателя с к.з. 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:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = 2.$$

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

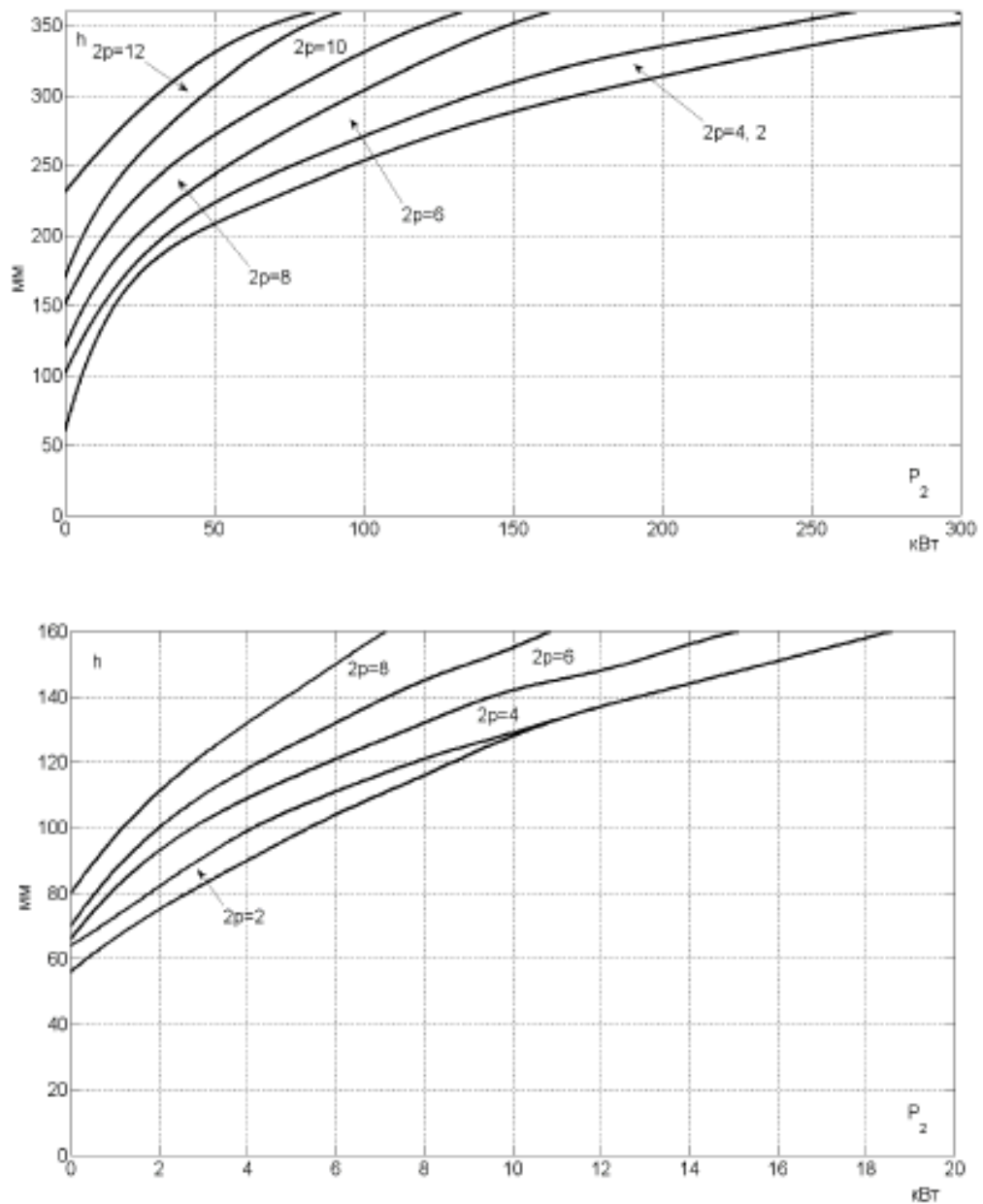


Рис. 3. Высота вращения h двигателей серии 4А различной мощности и частоты вращения со степенью защиты IP44

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.

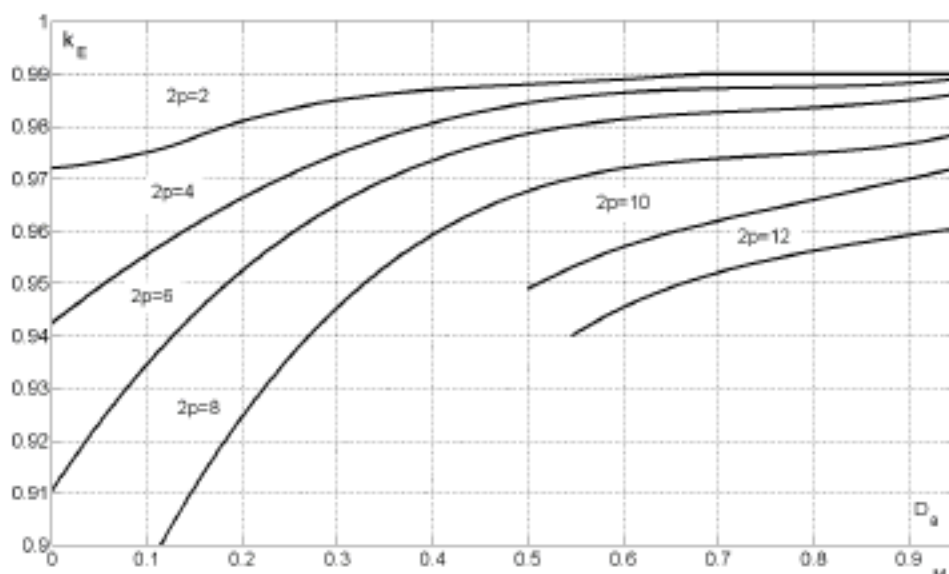
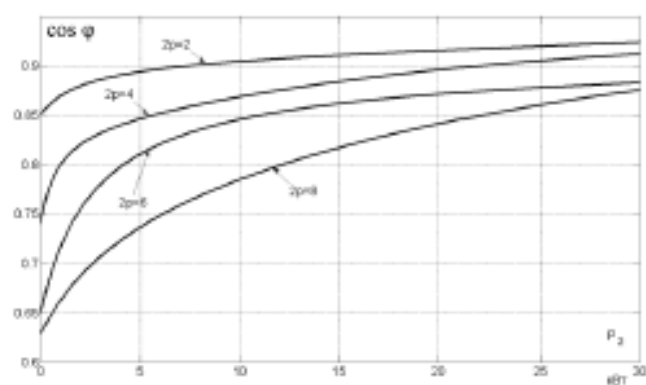
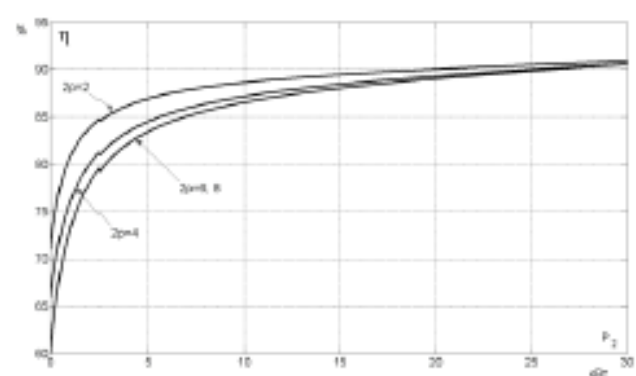
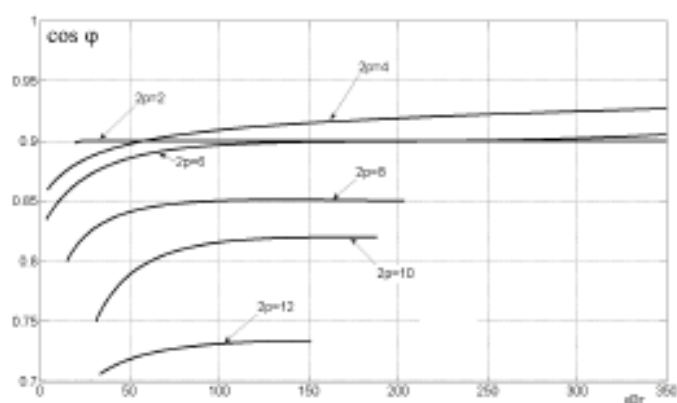
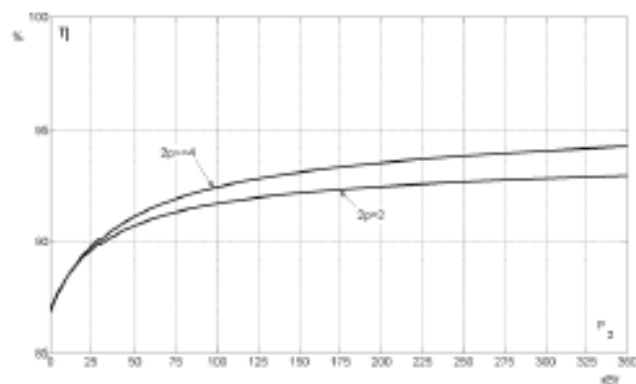


Рис. 4. Значение коэффициента k_E



а)



б)

Рис. 5. Примерные значения КПД и $\cos \varphi$ 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_8 [Тл]

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

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

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

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

8. Расчетная длина воздушного зазора:

$$l_g = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{\text{об1}} \cdot A \cdot B_8} = 0,131 \text{ м.} \quad (5)$$

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

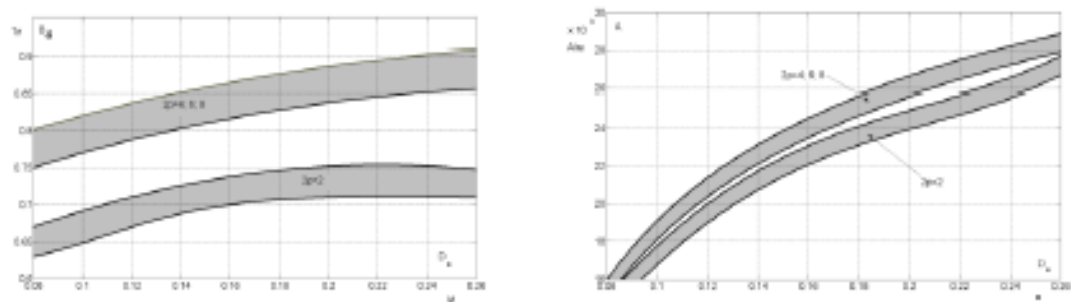
$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = 157 \text{ рад/сек - синхронная угловая скорость вала двигателя [обм./мин.]}$$

9. Критерием правильности выбора главных размеров D и l_g служит отношение $\lambda = \frac{l_g}{\tau}$, которое должно находиться 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 .

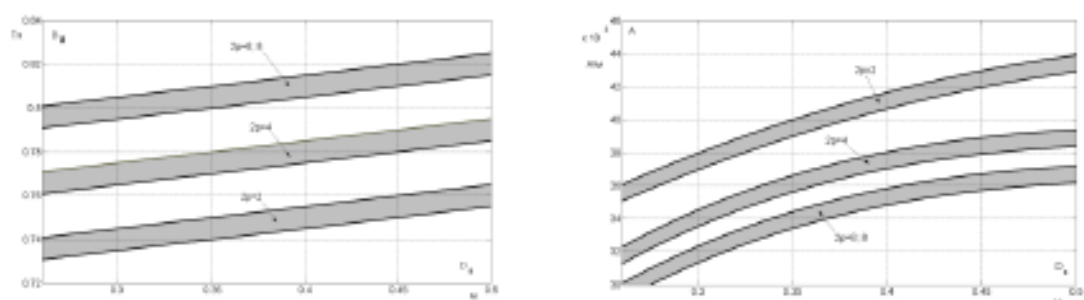
В нашем случае отношение $\lambda = 0,91$ и находится в рекомендованных пределах.

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- $h > 280\text{мм}$.

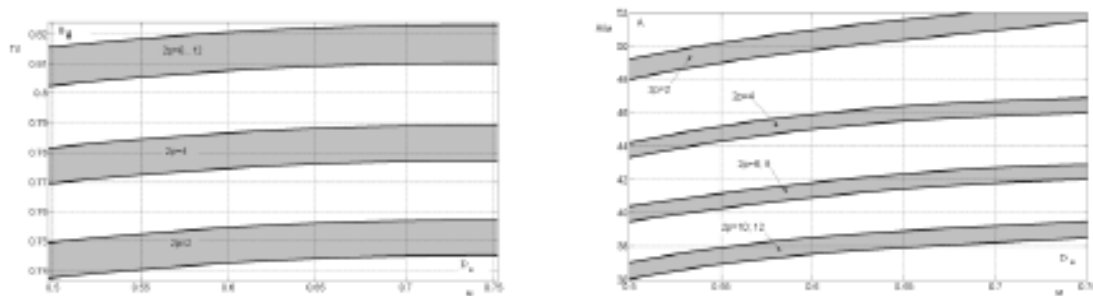
В нашем случае: $t_{1\text{max}}=14$; $t_{1\text{min}}=12$;



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

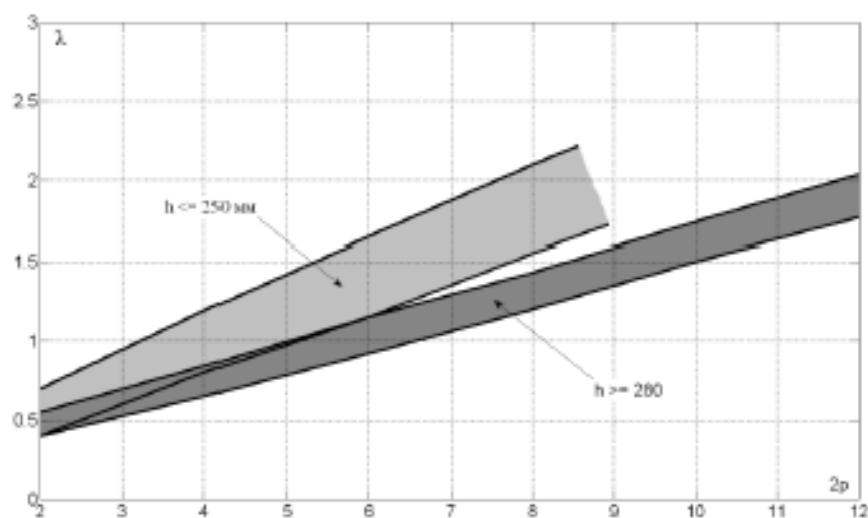


Рис. 7. Требуемые значения отношения $\lambda = l_g / \tau$ у двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

11. Рассчитываем число пазов статора

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

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

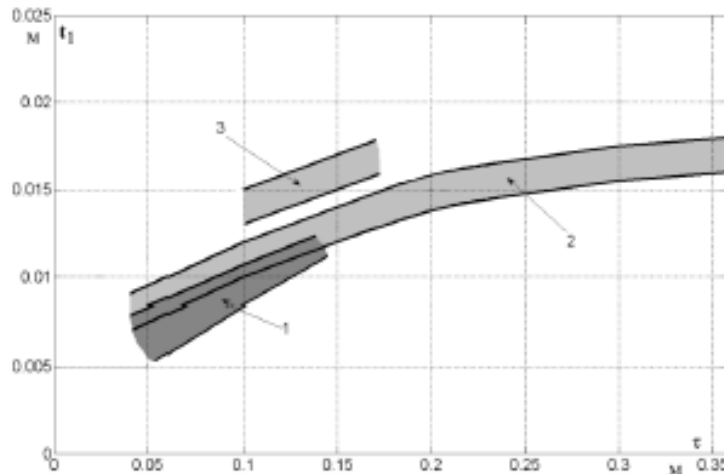


Рис. 8. Определение зубцового деления статора асинхронного двигателя со вьспной обмоткой

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 :

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

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1n}}{4 \cdot k_B \cdot \omega_1 \cdot k_{\text{от1}} \cdot f_1} = 9,005 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.} \quad (16)$$

Обмоточный коэффициент $K_{\text{от1}}$ определяется по формуле $K_{\text{от1}} = K_p \cdot K_y$, 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 $K_{\text{от1}} = K_p = 0,958$.

$$B_\delta = \frac{P \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = 0,749 \text{ Тл.} \quad (17)$$

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.

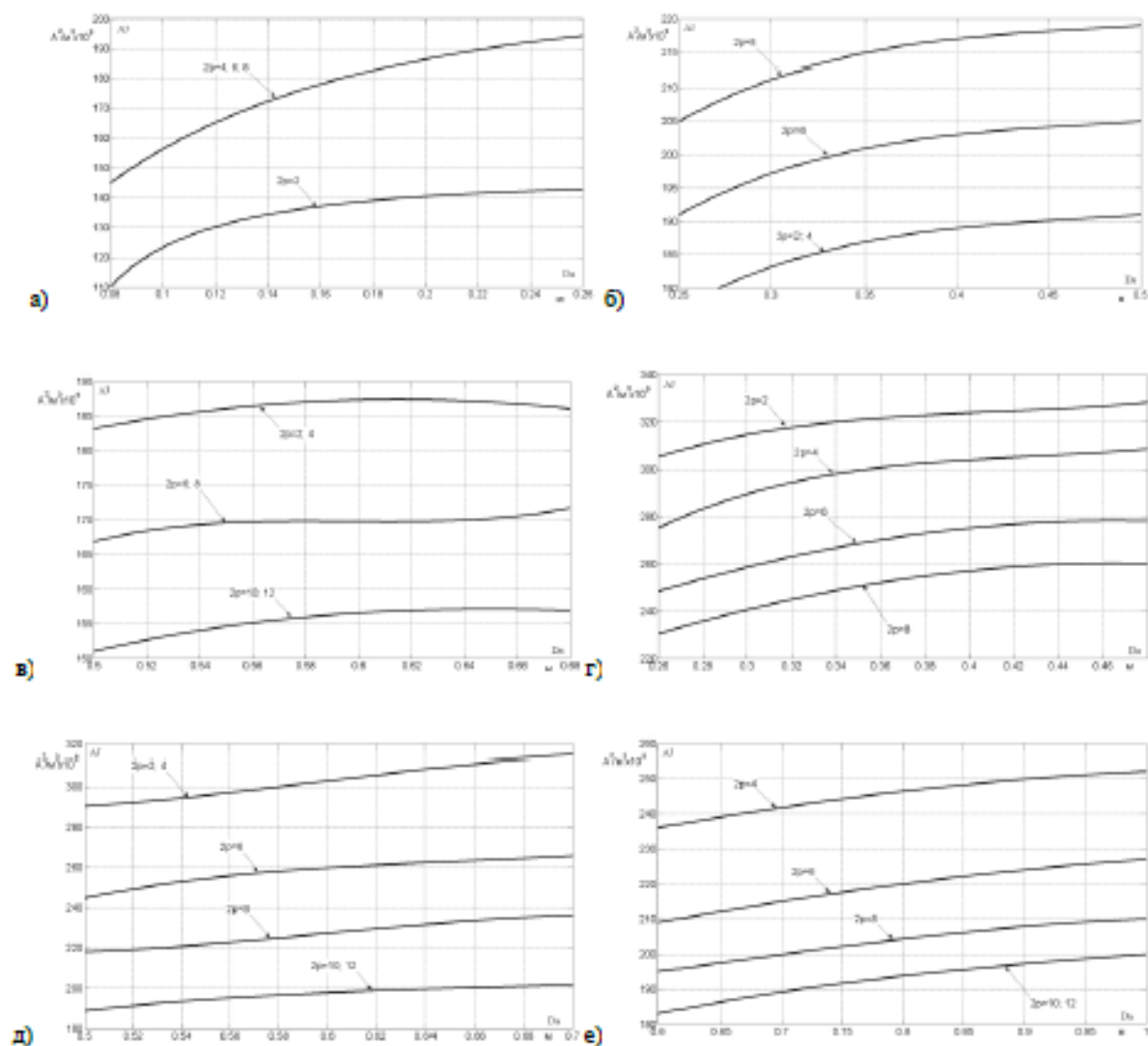


Рис. 8. Средние значения произведения $(A \cdot J_1)$ асинхронных двигателей
 а) со степенью защиты IP44, $h < 1332$ мм; б) со степенью защиты IP44, $h = 160 \dots 250$ мм; в) со степенью защиты IP44, $h = 280 \dots 355$ (при продувном роторе); г) со степенью защиты IP23, $h = 160 \dots 250$ мм; д) со 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 $2 + 6$. В обмотках, предназначенных для механизированной укладки число элементарных проводников стремятся снизить до $2 + 3$.

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:

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

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

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

Пересчитываем реальное эффективное сечение:

$$q_{эф} = n_{st} \cdot q_{st}$$

18. Окончательно находим плотность тока в обмотке статора:

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{st} \cdot n_{st}} = 5.91 \text{ А/мм}^2 \quad (21)$$

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

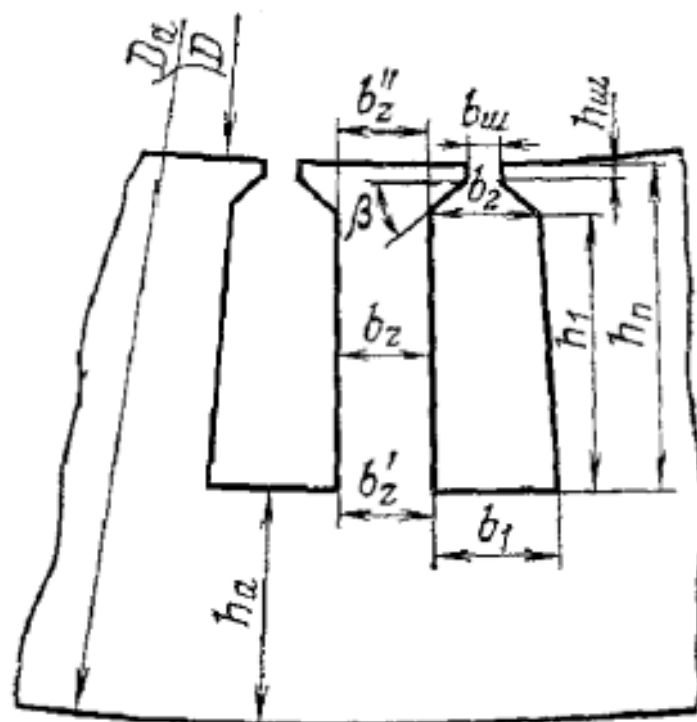


Рис. 10. Сечение паза статора асинхронной машины

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

Определяем геометрические размеры сечения паза статора асинхронной машины:

$$b_{z1} = \frac{B_{z2} \cdot t_1 \cdot l_{ст}}{B_{z1} \cdot l_{ст} \cdot k_c} = 4.9 \text{ мм} \quad (22)$$

где $k_c=0,97$ – конструктивный коэффициент; $l_{ст} \approx l_3$ – длина стали сердечника статора.

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_n \cdot l_{ст} \cdot k_c} = 22.3 \text{ мм} \quad (23)$$

Таблица 5.
Диаметр и площадь поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр эмалированного провода, мм	Среднее значение диаметра эмалированного провода, мм	Площадь поперечного сечения эмалированного провода, мм ²	Номинальный диаметр эмалированного провода, мм	Среднее значение диаметра эмалированного провода, мм	Площадь поперечного сечения эмалированного 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	0,983
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				
		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_r B_r B_r	≤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_m выполняют обычно в пределах $0,5 \div 1$ мм. Ширину шлица принимают равной:

$$b_m = d_m + (1,5 - 2) \text{ мм, где}$$

d_m – диаметр обмоточного провода в изоляции.

Для расчета принимаем: $b_m = 3,7$ мм; $h_m = 1$ мм.

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

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

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

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

21. Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу

$$S_m = b_m \cdot (h_n + b_1 + b_2) \quad (28)$$

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

В расчете принимаем $b_m = 0,44$ мм.

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников

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

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

Определим коэффициент заполнения паза

$$k_s = \frac{d_m^2 \cdot u_n \cdot n_m}{S_n} = 0,717 \quad (30)$$

Полученное значение K_s 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.

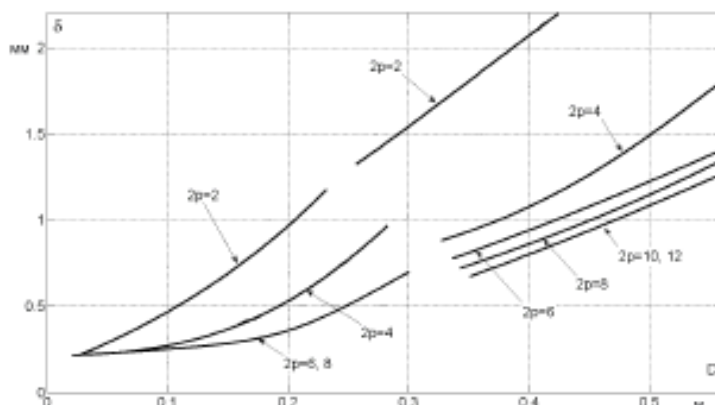


Рис. 11 К выбору воздушного зазора в асинхронных двигателях

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

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

29. зубцовое деление

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

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

$$D_f = D_s = K_B \cdot D_s = 60 \text{ мм.} \quad (34)$$

где коэффициент K_B принимается равным $k_B=0.23$

31. Ток в стержне ротора

$$I_2 = k_i \cdot I_{\text{н}} \cdot \nu_i = 442 \text{ А,} \quad (35)$$

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 $\cos \varphi$;

ν_i – коэффициент приведения токов, определяется согласно выражения:

$$\nu_i = \frac{2 \cdot m \cdot \omega_1 \cdot k_{\text{об1}}}{Z_2} = 16.94 \quad (36)$$

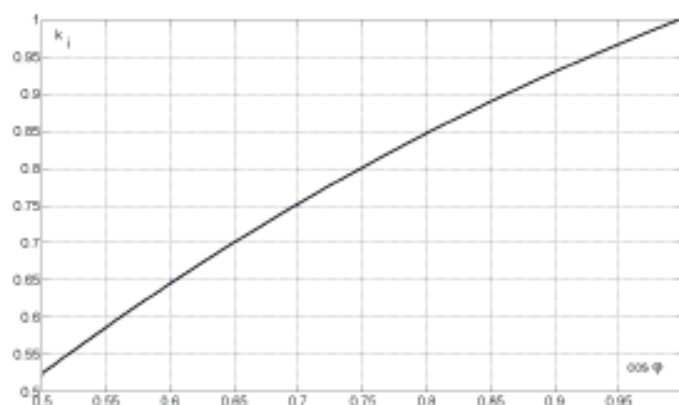


Рис. 11. Коэффициент k_i в зависимости от $\cos \varphi$

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.

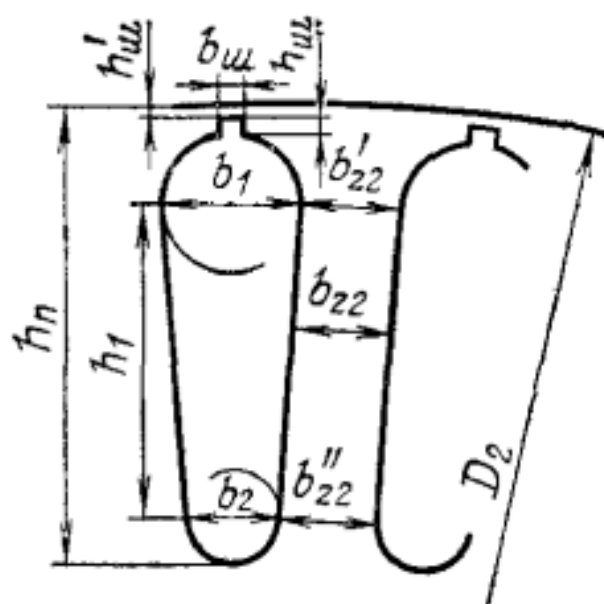


Рис. 12. Сечение паза ротора асинхронной машины

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:

$$b_{з2дон} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{22} \cdot l_{cm} \cdot k_c} = 6,5 \text{ мм}. \quad (38)$$

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

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

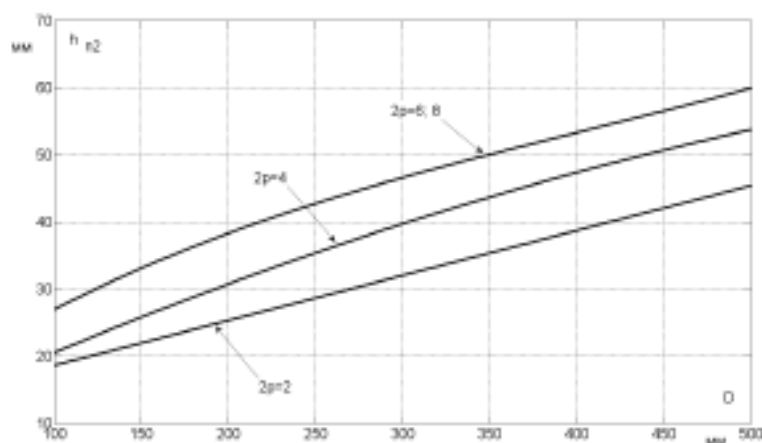


Рис. 13. Среднее значение h_n

Для нашего случая, принимаем $h_{ш,р} = 32 \text{ мм}$;

$$b_{ш,р} = \frac{\pi(D_2 - h_{ш,р} - 2 \cdot h_{ш,р}') - Z_2 \cdot b_{з2дон}}{\pi + Z_2} = 7,9 \text{ мм}. \quad (39)$$

$$b_{2p} = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_n) - Z_2 \cdot b_{12don}}{Z_2 - \pi} = 3.72 \text{ мм.} \quad (40)$$

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

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:

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

Задача 2

Расчет характеристик трехфазных асинхронных электродвигателей.

1. Рассчитать и построить рабочие характеристики трехфазного асинхронного электродвигателя (АД), т.е. зависимость скольжения s , тока статора I_1 , коэффициента полезного действия η и коэффициента мощности $\cos(\varphi_1)$ от полезной мощности P_2 .

2. Рассчитать и построить механическую характеристику двигателя $M_2(s)$ и токовую характеристику $I_1(s)$, с учетом изменения параметров асинхронного электродвигателя x_1, x_2, r_2' , при изменении скольжения от 0 до 1,0.

Исходные данные к задаче

Вариант (две последние цифры учебного шифра)	$P_{2н},$ кВт	$n_1,$ об/мин	η_n	$\cos\varphi_{1н}$	r_1	x_1	r_2	x_2	r_2'	x_2'	r_{21}'	x_{21}
01, 02	4	750	0.830	0.700	0.064	0.100	0.110	1.6	0.052	0.152	0.058	0.160
03, 04	5.5	1000	0.850	0.800	0.065	0.072	0.140	1.8	0.038	0.102	0.042	0.130
05, 06	7.5	1500	0.875	0.85	0.05	0.083	0.249	3	0.034	0.123	0.039	0.144
07, 08	11	3000	0.88	0.9	0.056	0.06	0.457	4.2	0.024	0.117	0.027	0.118
09, 10	15	750	0.870	0.820	0.061	0.130	0.144	2.4	0.027	0.154	0.049	0.199
11, 12	18.5	1000	0.880	0.870	0.054	0.110	0.218	2.9	0.024	0.121	0.043	0.168
13, 14	22	1500	0.9	0.9	0.043	0.078	0.364	4	0.022	0.115	0.033	0.146
15, 16	30	3000	0.905	0.9	0.038	0.072	0.349	3.8	0.018	0.106	0.023	0.126
17, 18	45	750	0.910	0.840	0.036	0.099	0.156	2.6	0.015	0.158	0.033	0.167
19, 20	55	1000	0.915	0.89	0.034	0.081	0.281	3.4	0.014	0.124	0.026	0.147
21, 22	75	1500	0.930	0.900	0.025	0.080	0.352	4.0	0.014	0.106	0.026	0.145
23, 24	90	3000	0.92	0.9	0.034	0.077	0.494	5.2	0.015	0.126	0.026	0.142
25, 26	110	750	0.930	0.850	0.022	0.100	0.144	2.4	0.018	0.111	0.028	0.157
27, 28	4	1000	0.82	0.81	0.078	0.07	0.108	2	0.06	0.103	0.068	0.133
29, 30	5.5	1500	0.855	0.850	0.063	0.078	0.260	2.5	0.039	0.123	0.045	0.140
31, 32	7.5	3000	0.875	0.88	0.049	0.084	0.47	3.7	0.027	0.138	0.031	0.145
33, 34	11	750	0.870	0.750	0.062	0.130	0.120	2.0	0.028	0.160	0.037	0.169
35, 36	15	1000	0.875	0.870	0.048	0.100	0.390	3.1	0.026	0.150	0.042	0.160

37, 38	18.5	1500	0.895	0.88	0.046	0.083	0.392	4.3	0.023	0.125	0.036	0.136
39, 40	22	3000	0.885	0.91	0.057	0.093	0.312	3.6	0.021	0.105	0.025	0.144
41, 42	30	750	0.905	0.81	0.03	0.114	0.14	2.3	0.023	0.154	0.04	0.176
43, 44	37	1000	0.910	0.890	0.041	0.100	0.278	3.7	0.018	0.123	0.033	0.152
45, 46	45	1500	0.92	0.9	0.03	0.081	0.438	4.6	0.018	0.135	0.033	0.156
47, 48	55	3000	0.91	0.92	0.038	0.091	0.668	5.6	0.019	0.116	0.028	0.139
49, 50	75	500	0.915	0.76	0.021	0.113	0.149	2.5	0.022	0.151	0.04	0.191
51, 52	90	750	0.930	0.850	0.022	0.110	0.156	2.6	0.018	0.120	0.033	0.166
53, 54	110	1000	0.930	0.900	0.025	0.100	0.292	3.9	0.017	0.114	0.040	0.162
55, 56	4	1500	0.84	0.84	0.069	0.077	0.148	2.4	0.052	0.131	0.059	0.143
57, 58	5.5	3000	0.875	0.910	0.048	0.054	0.400	3.1	0.035	0.107	0.037	0.130
59, 60	7.5	750	0.86	0.75	0.047	0.131	0.16	2	0.032	0.158	0.047	0.182
61, 62	11	1000	0.850	0.860	0.071	0.110	0.240	2.8	0.028	0.140	0.042	0.150
63, 64	15	1500	0.885	0.880	0.046	0.085	0.320	3.5	0.024	0.125	0.036	0.144
65, 66	18.5	3000	0.885	0.920	0.048	0.092	0.420	4.5	0.021	0.115	0.029	0.160
67, 68	22	750	0.885	0.84	0.041	0.134	0.282	3.1	0.031	0.16	0.051	0.197
69, 70	30	1000	0.905	0.9	0.034	0.116	0.347	3.7	0.021	0.122	0.038	0.153
71, 72	37	1500	0.910	0.900	0.038	0.085	0.352	3.8	0.017	0.135	0.034	0.154

Вариант	$P_{2н},$ кВт	$n_1,$ об/мин	η_n	$\cos\varphi_{1н}$	r_1	x_1	r_m	x_m	r_2'	x_2'	r_{21}'	x_{k1}
73, 74	45	3000	0.910	0.900	0.027	0.088	0.450	4.1	0.019	0.126	0.030	0.150
75, 76	55	600	0.92	0.79	0.021	0.095	0.148	2.5	0.021	0.128	0.036	0.177
77, 78	75	750	0.925	0.85	0.021	0.115	0.176	2.9	0.021	0.119	0.038	0.172
79, 80	90	1000	0.925	0.890	0.029	0.110	0.263	3.5	0.018	0.113	0.040	0.179
81, 82	110	1500	0.925	0.9	0.022	0.119	0.432	4.9	0.024	0.153	0.045	0.188
83, 84	4	3000	0.865	0.890	0.052	0.055	0.320	2.8	0.035	0.096	0.037	0.120
85, 86	5.5	750	0.830	0.740	0.066	0.110	0.108	1.8	0.055	0.170	0.055	0.160
87, 88	7.5	1000	0.855	0.810	0.058	0.070	0.168	2.0	0.038	0.103	0.042	0.131
89, 90	11	1500	0.875	0.87	0.047	0.083	0.349	3.2	0.03	0.124	0.037	0.144
91, 92	15	3000	0.880	0.910	0.051	0.092	0.420	4.0	0.021	0.115	0.028	0.160
93, 94	18.5	750	0.885	0.84	0.05	0.124	0.16	2.6	0.026	0.146	0.045	0.177
95, 96	30	1500	0.91	0.89	0.032	0.067	0.355	3.9	0.02	0.116	0.03	0.127
97, 98	22	1000	0.89	0.89	0.04	0.07	0.36	4.0	0.020	0.11	0.03	0.14
99, 00	45	600	0.915	0.78	0.023	0.114	0.128	2.2	0.021	0.145	0.041	0.19

Для расчета характеристик рекомендуется использовать Т-образную схему замещения асинхронной машины (см. рис. 3).

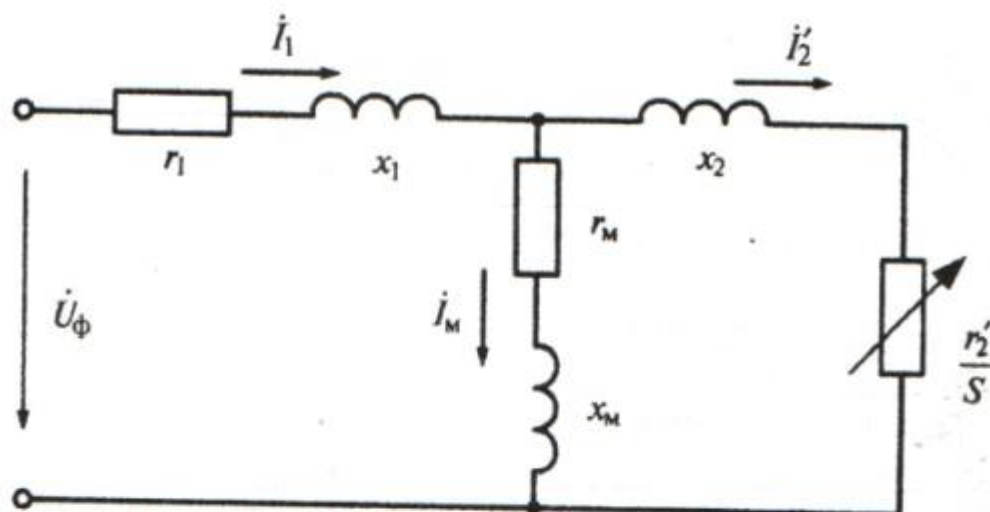


Рис. 3. Схема замещения асинхронного двигателя

1. Расчет рабочих характеристик рекомендуется выполнить по формулам, приведенным в табл. 5 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.

Определим значение скольжения близкое к номинальному скольжению

$$s'_n = 1,2c_1^2 \eta_n \cos \varphi_{1n} (1 + 2r_1)r'_2,$$

где $c_1 = 1 + x_1/x_m$.

В клетки табл. 5 под надписью «Значение S » рассчитайте и запишите значения скольжений равных соответственно: $0,05s'_n$; $0,25s'_n$; $0,50s'_n$; $0,75s'_n$ и s'_n .

Для одного значения скольжения, а именно, для s'_n 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. 5.

Значения параметров схемы замещения в формулы табл. 5 подставлять в относительных единицах, как они и приведены в задании. Напряжение в расчете требуется фазное, и при соединении обмоток статора «звездой» оно определяется как

$$U_{\text{фн}} = U_{\text{лн}} / \sqrt{3}.$$

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

$$Z_{\text{б}} = U_{\text{фн}} / I_{\text{лн}}, \quad \text{где } I_{\text{лн}} = I_{\text{н}} / (3 U_{\text{фн}} \cos \varphi_{\text{лн}}). \quad (16)$$

Коэффициент 0,99 в формуле для расчета P_2 в табл. 5 учитывает наличие в двигателе механических потерь мощности $\Delta P_{\text{мех}}$, которые приняты для всех вариантов задания равными 0,01 от $P_{2\text{н}}$. Добавочные потери мощности, которые принимаются пропорциональными квадрату тока статора и равными в номинальном режиме $\Delta P_{\text{доб.н}} = 0,005 P_{\text{н}}$, учтены соответствующим увеличением активного сопротивления обмотки статора.

2. По полученным данным необходимо построить в одних осях рабочие характеристики двигателя, а именно, зависимости I_1 , η , $\cos \varphi_1$, 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. На рабочих характеристиках необходимо провести вертикальную линию через значение $P_2 = P_{2\text{н}}$ и определить расчетные значения $I_{\text{лн}}$, $\eta_{\text{н}}$, $\cos \varphi_{\text{лн}}$, $s_{\text{н}}$, соответствующие номинальному режиму. Необходимо также рассчитать номинальную частоту вращения ротора двигателя $n_{\text{н}} = (1 - s_{\text{н}}) n_1$ и номинальный момент двигателя в Н м по формуле

$$M_{2\text{н}} = 9,55 P_{2\text{н}} / n_{\text{н}}.$$

Здесь $P_{2\text{н}}$ в Вт, а $n_{\text{н}}$ в об/мин.

Сравнить полученные значения $I_{\text{лн}}$, $\cos \varphi_{\text{лн}}$ с заданными в табл. 4.

Таблица 5

№ п/п	Расчетные формулы	Значение s			
1	$z_2^2 = (r_2'/s)^2 + x_2'^2$				
2	$z_w^2 = r_w^2 + x_w^2$				
3	$z_{22}^2 = [(r_w + (r_2'/s))]^2 + (x_w + x_2')^2$				
4	$r_{2w} = [r_w z_2'^2 + (r_2'/s) z_w^2] / z_{22}^2$				
5	$x_{2w} = (x_w z_2'^2 + x_2' z_w^2) / z_{22}^2$				
6	$z_{2w} = \sqrt{r_{2w}^2 + x_{2w}^2}$				
7	$z_{20} = \sqrt{(r_1 + r_{2w})^2 + (x_1 + x_{2w})^2}$				
8	$I_1 = U_{\text{фн}} / (z_{20} Z_B), \text{ A}$				
9	$I_2' = I_1 z_{2w} / z_2', \text{ A}$				
10	$\cos \varphi_1 = (r_1 + r_{2w}) / z_{20}$				
11	$P_1 = 3 U_{\text{фн}} I_1 \cos \varphi_1, \text{ Вт}$				
12	$P_2 = 3 I_2'^2 r_2' Z_B (1-s) 0,99/s, \text{ Вт}$				
13	$\eta = P_2 / P_1$				

Если значение мощности P_2 при скольжении s_n' меньше $P_{2н}$, то требуется выполнить расчет для шестого значения скольжения на (10–20)% больше скольжения s_n' .

3. 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, график строится в именованных единицах.

Для расчета момента в относительных единицах рекомендуется следующая упрощенная формула:

$$M_2^* \approx \frac{(1-s_n) \cdot r_{2s}'}{\eta_n \cdot \cos \varphi_{1n} \cdot s \cdot [(r_1 + r_{2s}'/s)^2 + (x_{1s} + x_{2s}')^2]} \quad (17)$$

При выводе этой формулы, в связи с малым влиянием, для упрощения принято $\Delta P_{\text{мех}} = 0$, $c_1 = 1$. В этой формуле обозначено: s_n — 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 s обозначает, что значение сопротивления зависит от скольжения. Сумму сопротивлений x_{1s} и x_{2s}' обозначим $x_{\text{ср}}$.

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. Параметры схемы замещения, приведенные в табл. 4, кроме r'_{21} и $x_{к1}$, соответствуют рабочим режимам. Сопротивления r'_{21} и $x_{к1}$ определены при $s = 1$, здесь $x_{к1}$ — индуктивное сопротивление короткого замыкания равно примерно сумме индуктивных сопротивлений обмотки статора и приведенной обмотки ротора.

Момент на валу двигателя в Н·м $M_2 = M_2^* \cdot M_{2н}$. Для построения механической характеристики необходимо определить момент по формуле (17) при скольжениях равных 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и, кроме того в четырех характерных точках, а именно:

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

$$s_k = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}; \quad (18)$$

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

$$x_{1s} + x'_{2s} = x_{к1},$$

$$M_{2н}^* = \frac{(1 - s_n) \cdot r'_{21}}{\eta_n \cdot \cos \varphi_{1н} \cdot [(r_1 + r'_{21})^2 + x_{к1}^2]}. \quad (19)$$

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

$$z_{нв} = \sqrt{(r_1 + r'_n)^2 + (x_1 + x'_n)^2}. \quad (20)$$

Ток I_1^* определяется как $I_1^* = 1/z_{нв}$, где $z_{нв}$ — полное сопротивление двигателя, для скольжений $s \geq s_k$ можно принять

$$z_{нв} = \sqrt{(r_1 + \frac{r'_{2s}}{s})^2 + x_{к1}^2}, \quad (21)$$

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

$$I_n^* = 1/\sqrt{(r_1 + r'_{21})^2 + x_{к1}^2}. \quad (22)$$

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:

$$r'_{2s} = r'_2 [b_r (k_r - 1) + 1], \quad (23)$$

$$x_{kr} = k_{\text{нас}} [x_1 + 0,5(1 + k_x)x'_2]. \quad (24)$$

где k_r, k_x — коэффициенты 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 $2p > 2$, $b_r = 0,7$.

Для определения коэффициента k_r достаточно использовать кривую зависимости k_r от приведенной высоты стержня ротора ξ (рис. 4). При значениях $\xi > 2,6$ можно принять $k_r = \xi$. Вначале определяется коэффициент k_{r1} , т.е. коэффициент k_r при $s = 1$

$$k_{r1} \approx 1,43(r'_{21}/r'_2) - 0,43 \text{ для АД с } 2p > 2, \text{ или} \quad (25)$$

$$k_{r1} \approx 2,22(r'_{21}/r'_2) - 1,22 \text{ для АД с } 2p = 2. \quad (26)$$

Затем по кривой (рис. 4) 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. 4) определяется k_r для данного скольжения.

Коэффициент k_x с достаточной точностью определяется по коэффициенту k_r :

$$k_x \approx 1 \text{ при } k_r < 1,3;$$

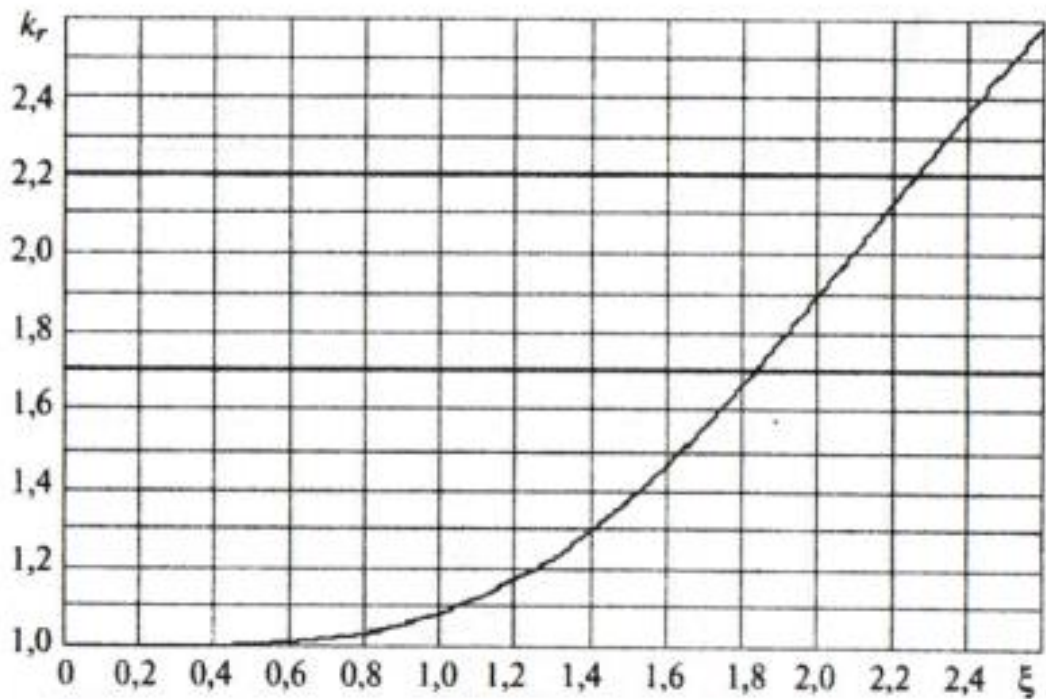


Рис. 4. Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления стержней ротора k_r от приведенной высоты стержня ξ

$$k_x \approx 1,27 - 0,27 k_r \text{ при } 1,3 \leq k_r \leq 2,3; \quad (27)$$

$$k_x \approx 1,5/k_r \text{ при } k_r > 2,3.$$

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

$$k_{\text{нас}1} \approx x_{k1} / [x_1 + 0,5(1 + k_{x1})x'_2] \quad (28)$$

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

Для примера, ниже приведен расчет механической и токовой характеристик АД с $P_{2\text{н}} = 160$ кВт, $U_{\text{лн}} = 660$ В; $n_1 = 1500$ об/мин; $\eta_{\text{лн}} = 0,935$; $\cos\varphi_{\text{лн}} = 0,91$ и сопротивлениями, отн. ед., $r_1 = 0,02$; $x_1 = 0,105$; $r_{\text{м}} = 0,452$; $x_{\text{м}} = 4,6$; $r'_2 = 0,015$; $x_2 = 0,143$; $r'_{21} = 0,027$; $x'_{x1} = 0,146$. Для этого двигателя из расчета рабочих характери-

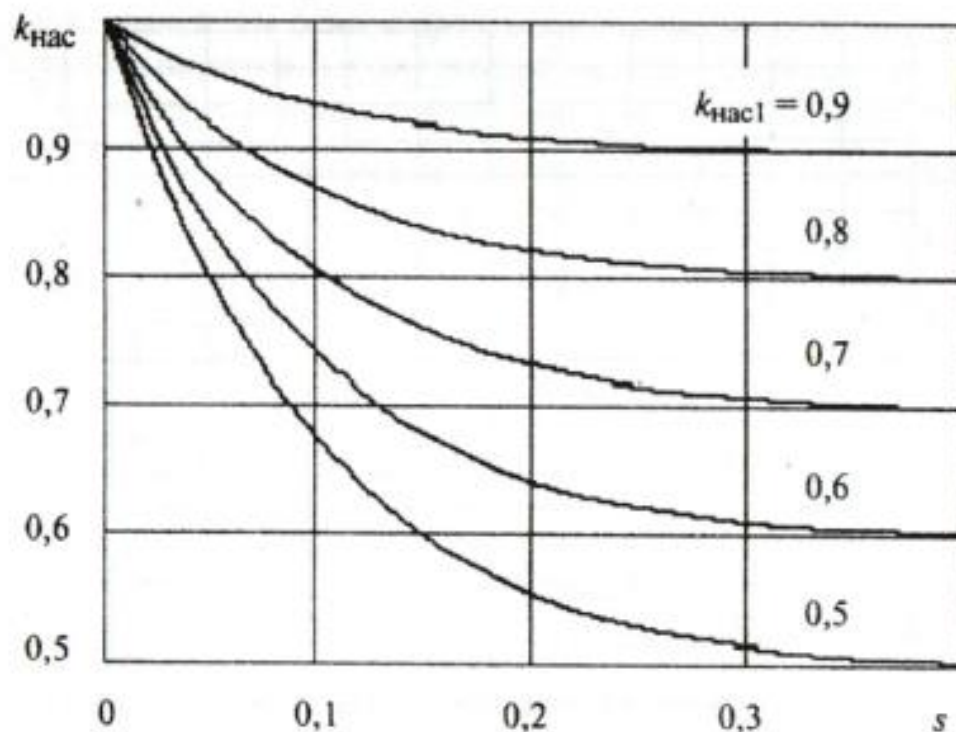


Рис. 5. Зависимость коэффициента насыщения от скольжения при разных $k_{нас1}$

стик получено $s_n = 0,015$. По (18) получено $s_k = 0,063$ при r'_2, x_1, x'_2 соответствующих скольжению s_n . По вышеприведенным формулам получено:

$$k_{r1} = 2,14 ; k_{x1} = 0,69 ; \xi_1 = 2,2 \text{ (рис. 4)} ; r'_{2S} = 0,015(0,3 + 0,7k_x) ; k_{нас1} = 0,647 ;$$

$$x_{kS} = k_{нас} (0,176 + 0,072 k_x),$$

где $k_{нас}$ определяется по рис. 5.

Результаты расчета представлены в табл. 6

Таблица 6

Величина	Скольжение s								
	0	0,015	0,063	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ξ	0	0,27	0,54	0,7	0,98	1,39	1,7	1,97	2,2
k_r	1	1	1	1,02	1,08	1,3	1,57	1,9	2,14
k_x	1	1	1	1	1	0,92	0,85	0,76	0,69
$k_{\text{нас}}$	1	0,95	0,83	0,77	0,68	0,65	0,65	0,65	0,65
r'_{2s}	0,015	0,015	0,015	0,015	0,016	0,018	0,021	0,024	0,027
r_{2s}	0,472	0,909	0,258	0,17	0,1	0,065	0,055	0,05	0,047
x_{2s}	4,705	0,41	0,206	0,191	0,169	0,158	0,154	0,15	0,146
z_{2s}	4,729	1,0	0,33	0,256	0,196	0,171	0,164	0,158	0,153
M_2^*	0	1,0	2,45	2,65	2,41	1,78	1,51	1,39	1,34
I_1^*	0,21	1,0	3,11	3,91	5,1	5,85	6,1	6,33	6,52
$M_2, \text{ Нм}$	0	1034	2533	2740	2492	1840	1561	1437	1385
$I_1, \text{ А}$	34,5	164,5	510,9	643,2	838,9	962,3	1003	1041	1072

Приведенные в табл. 6 результаты показывают, что формула (18) не дает точного значения критического скольжения, при котором должен наблюдаться максимальный момент. Расчеты с учетом вытеснения тока и насыщения магнитной цепи выявляют максимальный момент для этого двигателя при скольжении $s = 0,1$.

Рекомендуемая литература

1. Вольдек А.И. «Электропривод энергетических установок» – Л.: Энергия, 1988 г.
2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. «Проектирование энергетических установок подвижного состава» учебник для вузов – М.: Высшая школа, 1984 г.
3. «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
4. Кацман М.М. «Расчет и конструирование электрических машин» Учебное пособие М.: Энергоатомиздат, 1984 г. – 360 с.
5. 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