

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

17/10/3

Одобрено кафедрой
«Электротехника»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОПРИВОД

Задание на курсовую работу
с методическими указаниями
для студентов III курса
специальности

190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)

для студентов IV курса
специальностей

190301 ЛОКОМОТИВЫ (Т)

190302 ВАГОНЫ (В)

190303 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНЫХ
ДОРОГ (ЭПС)



Москва – 2007

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Задание на курсовую работу включает в себе три задачи по трем основным разделам дисциплины «Электрические машины и электропривод»: «Машины постоянного тока», «Трансформаторы», «Машины переменного тока». 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 курсовой 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. Курсовая 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, P_2 или I_2), 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 результат и размерность величины. Результаты расчетов округляются до трех значащих цифр.*

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Обязательная

1. Копылов И.П. Электрические машины. — М.: Высшая школа, 2002.
2. Орлов В.В., Шумейко В.В., Седов В.И. Электрические машины. Ч. I. Машины постоянного тока, трансформаторы. Конспект лекций. — М.: РГОТУПС, 2003. — 63 с.
3. Шумейко В.В., Орлов В.В., Седов В.И. Электрические машины и электропривод. Уч. пос. Ч. II. Машины переменного тока. — М.: РГОТУПС, 2004. — 71 с.
4. Серебряков А.С., Шумейко В.В. МАТКАД и решение задач электротехники: Уч. пос. для вузов ж.д. транспорта. — М.: Маршрут, 2005. — 240 с.

Дополнительная

5. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. В 2-х т. — М.: Высшая школа, 1987.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1988.

Задача 1

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В задаче требуется:

1. Произвести проверочный расчет магнитной цепи машины постоянного тока при холостом ходе, определить коэффициент насыщения магнитной цепи и, по результатам расчета, вычертить в масштабе эскиз магнитной цепи для одной пары полюсов.

При выполнении работы принять, что сердечник якоря и сердечники полюсов набраны из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, коэффициент заполнения сталью $k_{ст} = 0,98$, марка стали для якоря — 1211, марка стали для полюсов — 3411.

Станина машины постоянного тока, являющаяся также ярмом, по которому замыкается магнитный поток, выполняется из литой стали марки Ст3. Пазы якоря открытые с параллельными стенками.

Высоту спинки якоря, толщину станины (ярма), ширину сердечника главного полюса и ширину зубца у основания необходимо рассчитать исходя из того, что в номинальном режиме значения магнитной индукции [Т] на этих участках магнитной цепи должны находиться в следующих пределах: $B_a = 1,3 \div 1,5$; $B_n = 1,0 \div 1,2$; $B_m = 1,4 \div 1,6$; $B_{z1} = 1,9 \div 2,1$.

2. Выбрать число коллекторных пластин, определить число витков в секции обмотки якоря и рассчитать шаги обмотки по элементарным пазам.

Числовые значения исходных величин приведены в табл. 1.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 1

1. Эскиз магнитной системы машины постоянного тока для одной пары полюсов (рис. 1) следует начертить на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 или 1:2, указав размеры и границы участков магнитной цепи. Необходимые размеры будут определены после расчета магнитной цепи.

Расчет магнитной цепи заключается в определении МДС обмотки возбуждения приходящейся на один полюс $F_b = I_b w_b$ и необходимой для создания заданного магнитного потока (I_b — ток возбуждения, w_b — число витков на полюс). Расчет МДС производится на основе закона полного тока, который может быть записан в виде:

$$\oint (\vec{H} \cdot d\vec{l}) = \sum i_k, \quad (1)$$

где \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля;

$d\vec{l}$ — вектор элемента длины контура;

$\sum i_k$ — алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром.

При расчете магнитной цепи контур интегрирования выбирают совпадающим со средней магнитной линией. Магнитопровод разбивают на участки, напряженность магнитного поля на каждом из которых можно принять постоянной, а угол между векторами H и dl принять равным нулю.

Таблица 1

Исходные данные к задаче 1

Наименование величины	предпоследняя цифра шифра	Номер варианта									
		последняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Диаметр якоря D_a , мм	0, 2, 4, 6, 8	245	493	327	368	228	330	315	480	280	470
	1, 3, 5, 7, 9	261	450	294	380	220	320	340	493	210	420
Длина якоря l_a , мм	0, 1	245	460	240	370	290	330	320	345	260	360
	2, 3	240	330	230	360	320	340	310	340	250	370
	4, 5	235	320	280	330	310	385	280	290	245	340
	6, 7	230	240	245	360	300	335	276	330	240	350
	8, 9	245	250	255	280	315	350	270	300	245	345
Число пар полюсов p	0-9	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
Расчетный коэффициент полюсной дуги α_p	0, 2, 4, 6, 8	0,64	0,68	0,67	0,71	0,72	0,69	0,66	0,70	0,68	0,65
	1, 3, 5, 7, 9	0,68	0,72	0,65	0,70	0,69	0,65	0,68	0,72	0,70	0,67
Воздушный зазор δ , мм	0-9	2,5	4,7	3,0	3,5	2,2	3,3	3,0	4,5	2,7	4,2
Высота паза h_p , мм	0-9	32	51	40	47	34	41	39	49	32	48

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Высота главного полюса h_m , мм	0-9	65	110	73	92	71	82	70	108	65	90
Коэффициент магнитного рассеяния σ	0-9	1,17	1,25	1,1	1,21	1,23	1,22	1,09	1,27	1,24	1,15
Число пазов якоря Z	0, 1, 5, 8	30	58	39	51	23	44	40	74	25	66
	2, 3, 7	31	59	40	52	24	45	41	75	26	67
	4, 6, 9	32	61	41	53	25	46	42	76	27	68
Номинальное напряжение U_n , В	0, 2, 4, 6, 8	220	165	330	150	220	220	330	220	220	165
	1, 3, 5, 7, 9	330	220	440	220	330	330	440	440	330	330
Угловая скорость n_n , об/мин	0, 2, 4, 6, 8	1300	1150	1000	1100	1500	1200	1500	850	1200	750
	1, 3, 5, 7, 9	1300	600	1000	750	1500	1000	1500	600	1000	600

Примечание: Для вариантов, у которых предпоследняя цифра шифра четная обмотка якоря петлевая, машина работает в режиме двигателя, а для вариантов с нечетной предпоследней цифрой обмотка волновая, машина работает в режиме генератора.

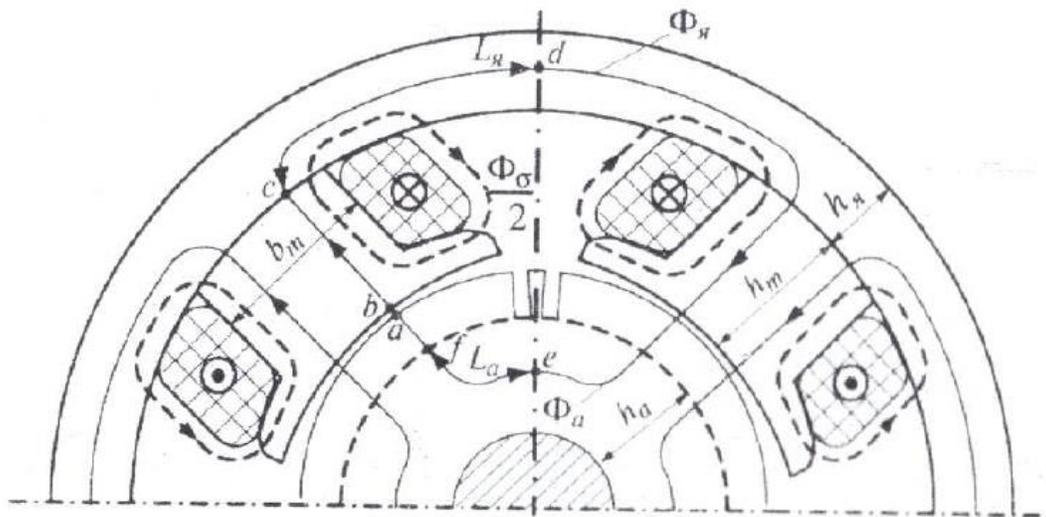


Рис. 1. Магнитная цепь машины постоянного тока

В результате интеграл в уравнении (1) можно заменить суммой, а в правой части уравнения будет МДС обмотки возбуждения приходящаяся на один полюс:

$$\sum_{k=1}^n H_k \cdot L_k = I_a \cdot w_a \quad (2)$$

Здесь H_k — напряженность магнитного поля на k -м участке магнитной цепи,

L_k — длина k -го участка магнитной цепи.

Магнитную цепь машины постоянного тока разбивают на 5 участков: воздушный зазор — участок ab (см. рис. 1); зубцовый слой якоря — af ; сердечник главного полюса — bc ; спинка якоря — fe и ярмо — cd . Так как магнитная цепь симметрична относительно оси, проходящей между двумя полюсами, то берется половина контура. Закон полного тока для данной магнитной цепи может быть записан в виде:

$$F_{\text{я}} = F_{\delta} + F_z + F_m + F_a + F_{\text{я}} \quad (3)$$

где F_{δ} , F_z , F_m , F_a , $F_{\text{я}}$ — магнитные напряжения соответственно в воздушном зазоре, зубцовом слое, сердечниках полюсов, спинке якоря, ярме и равные произведению напряженности магнитного поля на участке магнитной цепи на длину этого участка.

Расчет магнитной цепи начинают с выбора номинального значения магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ} по графику рис. 2.

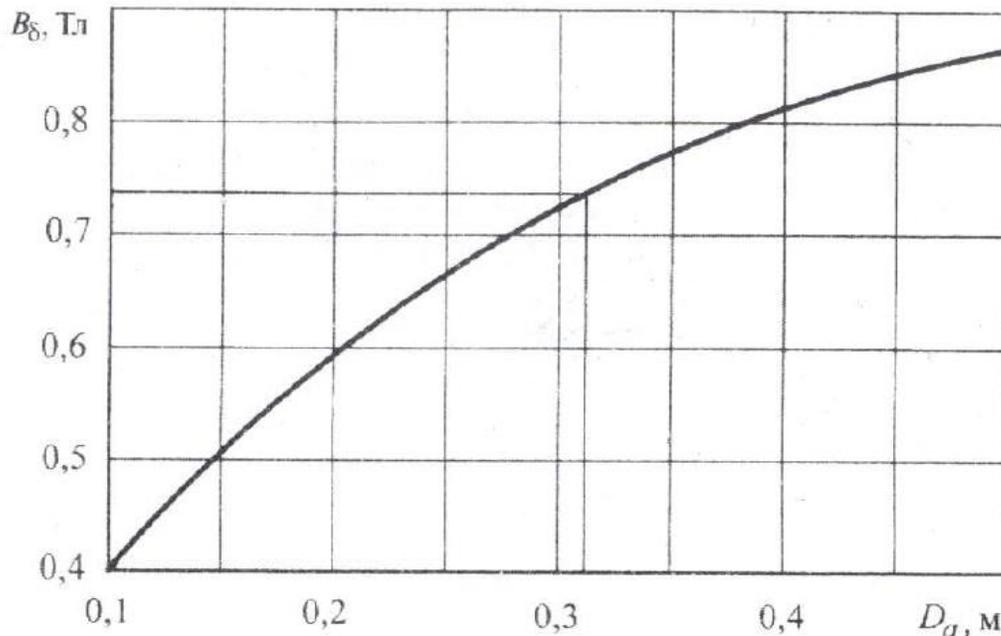


Рис. 2. Зависимость номинальной индукции в воздушном зазоре B_{δ} от заданного диаметра якоря D_a

Затем определяют значения магнитного потока на участках магнитной цепи:

$$\Phi_{\delta} = B_{\delta} S_{\delta}, \quad \Phi_a = \Phi_{\delta} / 2, \quad \Phi_m = \sigma \Phi_{\delta}, \quad \Phi_x = \Phi_m / 2,$$

где $S_{\delta} = l_{\delta} b_{\delta}$ — площадь воздушного зазора под полюсом в м^2 ,
 σ — коэффициент магнитного рассеяния.

Расчетную ширину b_{δ} и длину l_{δ} воздушного зазора определяют по формулам:

$$b_{\delta} = \alpha_{\delta} \tau,$$

где $\tau = \pi D_a / (2p)$, а

$$l_{\delta} = 0,5 (l_a + l_m),$$

где $l_m = l_a - 0,005$.

Все размеры при расчете должны быть выражены в метрах. Значения магнитной индукции на стальных участках магнитной цепи принимают такими, как указано в задании. Определяют размеры, необходимые для вычерчивания эскиза магнитной цепи, а именно, ширину полюса b_m , высоту спинки якоря h_a , высоту ярма h_y : $b_m = \Phi_m / (B_m l_{mp})$, $h_a = \Phi_a / (B_a l_{ap})$, $h_y = \Phi_y / (B_y l_y)$, где $l_{mp} = l_m k_{ст}$, $l_{ap} = l_a k_{ст}$, $l_y = l_m + 0,4 D_a$.

При расчете магнитного напряжения в зубцах якоря необходимо учитывать, что, так как пазы якоря выполняют с параллельными стенками, то зубцы имеют разную ширину в верхней части и у основания и, соответственно разные значения магнитной индукции. Поэтому рассчитывают магнитную индукцию и напряженность магнитного поля в трех сечениях зубца. Для этого вначале определяют магнитный поток в зубце:

$$\Phi_z = B_\delta l_z t_1,$$

где $l_z = l_a k_{ст}$ — длина зубцов;

$t_1 = \pi D_a / Z$ — зубцовое деление.

Затем задаются значением магнитной индукции в нижней части зубца B_{z3} в пределах 1,9–2,1 Тл и находят ширину этой части зубца: $b_{z3} = \Phi_z / (B_{z3} l_z)$. Находят ширину паза $b_n = t_3 - b_{z3}$, где $t_3 = \pi(D_a - 2h_z) / Z$, ширину зубца и индукцию в верхнем сечении $b_{z1} = t_1 - b_n$, $B_{z1} = B_{z3} b_{z3} / b_{z1}$. Индукция в средней части зубца будет $B_{z2} = (B_{z1} + B_{z3}) / 2$.

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре равна:

$$H_\delta = B_\delta / \mu_0,$$

где $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Определяют расчетную длину магнитной линии на каждом из участков:

$$L_\delta = \delta k_\delta,$$

где $k_\delta = (10\delta + t_1) / (10\delta + b_{z1})$ — коэффициент воздушного зазора,

$$L_z = h_z, \quad L_m = h_m, \quad L_a = \frac{\pi(D_a - h_a - 2h_z)}{4p} + 0,5h_a,$$

$$L_s = \frac{\pi(D_a + 2h_m + 2\delta + h_s)}{4p} + 0,5h_s.$$

Для получения МДС обмотки возбуждения в формулу (3) подставляют магнитные напряжения участков: $F_\delta = H_\delta L_\delta$, $F_z = H_z L_z$, $F_m = H_m L_m$, $F_a = H_a L_a$, $F_s = H_s L_s$. Расчетную напряженность магнитного поля в зубцах получают по формуле Симпсона: $H_{2p} = (H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3})/6$.

Для проверки степени насыщения магнитной системы машины вычисляют коэффициент насыщения: $k_{\text{нас}} = F_B / F_\delta$.

Полученное значение должно находиться в пределах 1,1–1,5.

2. Принципы образования, электрические схемы и расчет шагов якорных обмоток машин постоянного тока рассматриваются в [3, с. 208–215].

Расчет параметров обмотки якоря рекомендуется начать с выбора числа элементарных пазов в реальном пазу u_n и определения числа коллекторных пластин

$$K = u_n Z, \quad (4)$$

где Z — число пазов (зубцов) якоря.

Число коллекторных пластин выбирается из условия обеспечения нормальных потенциальных условий на коллекторе, чтобы среднее значение межламельного напряжения u_{kcp} при холостом ходе не превышало 18 — 22 В

$$K_{\text{min}} = 2pU_n / u_{kcp}, \quad (5)$$

где U_n — номинальное напряжение.

Приняв $u_{kcp} = 18$ В, получим из (5) минимальное число коллекторных пластин.

С другой стороны, максимальное число коллекторных пластин K_{\max} определяется диаметром коллектора и минимально допустимым значением коллекторного деления

$$t_{k \min} = b_{k \min} + \Delta_{k \text{ из}}, \quad (6)$$

где $b_{k \min}$ — минимальная ширина коллекторных пластин;
 $\Delta_{k \text{ из}}$ — толщина межламельной изоляции.

Приняв $D_k = 0,7D_a$, $t_{k \min} = 5$ мм ($b_{k \min} = 4$ мм, $\Delta_{k \text{ из}} = 1$ мм), найдем

$$K_{\max} = 0,7\pi D_a / t_{k \min}. \quad (7)$$

Таким образом, целые числа u_n и K должны удовлетворять условиям:

$$K = u_n Z \text{ и } K_{\min} \leq K \leq K_{\max}. \quad (8)$$

Определив по формулам (5) и (7) значения K_{\min} и K_{\max} выбирают числа u_n и K согласно условиям (8), где $u_n = 1, 2, 3, \dots$

Число элементарных пазов якоря Z_3 равно числу секций обмотки N_c и равно числу коллекторных пластин K .

Определив $N_c = K$, можно найти число витков в секции исходя из формулы для ЭДС якоря

$$E_a = c_e n \Phi_\delta, \quad (9)$$

где $c_e = pN/(60 a)$ — коэффициент, определяемый конструктивными параметрами машины;

N — число активных проводников якоря;

a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Число витков в секции $w_c = N/N_c$.

ЭДС якоря можно определить через номинальное напряжение

$$E_a = U_n(1 \pm R_a^*), \quad (10)$$

где R_a^* — сопротивление цепи якоря в относительных единицах, можно принять $R_a^* = 0,05$. В формуле (10) знак «плюс» — для режима генератора, знак «минус» — для двигателя.

Задача 2

ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В задаче требуется:

1. Начертить схему соединения обмоток трансформатора согласно заданию.
2. Начертить схему замещения трансформатора и определить параметры ее элементов.
3. Рассчитать и построить зависимость КПД трансформатора от относительной нагрузки η (I_2^*).
4. Определить изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке и построить внешнюю характеристику, т.е. зависимость вторичного напряжения от нагрузки $U_2^*(I_2^*)$.

Исходные данные для задачи 2 приведены в табл. 2.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ 2

Вопросы теории трансформаторов, необходимые для выполнения задачи 2, изложены в гл. 2 [2]. В табл. 3 приведены основные формулы, необходимые для расчета параметров схемы замещения.

Коэффициент полезного действия трансформатора рассчитывается по приближенной формуле

$$\eta = \frac{S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 \cdot I_2^*}{S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 \cdot I_2^* + P_0 + P_{\text{к}} \cdot I_2^{*2}}, \quad (11)$$

где $I_2^* = I_2/I_{2\text{н}}$ — вторичный ток в долях от номинального значения.

Расчет производится для $I_2^* = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$. По результатам этих расчетов строится зависимость η (I_2^*).

Изменением (потерей) напряжения трансформатора, при какой либо нагрузке I_2 , называется арифметическая разность вторичного фазного напряжения при холостом ходе U_{20} и фазного напряжения U_2 при заданной нагрузке при номинальном первичном напряжении $U_{1\text{ном}}$

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2. \quad (12)$$

Исходные данные к задаче 2

Наименование величин	Предпоследняя цифра шифра	Вариант									
		Последняя цифра шифра									0
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номинальная мощность $S_{ном}$, тыс. кВА	0-9	16,0	25,0	1,0	0,25	16,0	0,4	10,0	2,5	6,3	1,0
Номинальное высшее напряжение $U_{лин}$, кВ	0-9	38,75	110	6,0	10	121	35	121	110	35	10
Номинальное низшее напряжение $U_{зн}$, кВ	0, 2, 4, 6, 8	6,0	21,0	0,69	0,4	35,0	0,4	35,0	21,0	10,5	0,69
	1, 3 5, 7, 9	10,0	38,5	0,4	0,525	20,0	0,69	20,0	15,75	6,3	0,4
Напряжение короткого замыкания u_k , %	0, 2, 4, 6, 8	10	10,5	8	8	10,5	6,5	10,5	10,5	7,5	5,5
	1, 3 5, 7, 9	8	9	10	7	7,5	8,5	8	9	10	7
Ток холостого хода i_0 , %	0, 2, 4, 6, 8	10	10,5	8	8	10,5	6,5	10,5	10,5	7,5	5,5
	1, 3, 5, 7, 9	8	9	10	7	7,5	8,5	8	9	10	7

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Мощность короткого замыкания P_k , кВт	0, 2, 4, 6, 8	105	120	12,2	4,4	85	5,5	60	22	46,5	11,2
	1, 3 5, 7, 9	95	110	14	5	99	6,5	80	9	50	14
Мощность холостого хода P_0 , кВт	0, 2, 4, 6, 8	17,8	29	2,3	1,1	21	1,15	14	5	8	3
	1, 3 5, 7, 9	16	32	2,6	1,3	16	1,3	16	6	9,5	4
Коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$	0, 2, 4, 6, 8	0,9	0,8	0,7	0,95	0,85	0,88	0,72	0,9	0,75	0,82
	1, 3 5, 7, 9	0,83	0,8	0,7	0,95	0,85	0,88	0,72	0,9	0,75	0,82
Схема и группа соединения	0, 2, 4, 6, 8	$Y_n/\Delta-11$	$Y_n/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	$Y_n/\Delta-11$	$Y_n/\Delta-11$	$Y_n/Y-0$	$Y_n/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	$Y/\Delta-11$	Δ/Y_n-11
	1, 3 5, 7, 9	$Y_n/Y-0$	$Y_n/Y-0$	$Y_n/Y-0$	$Y/\Delta-11$	Y/Y_n-0	Δ/Y_n-11	$Y_n/Y-0$	$Y/Y-0$	$\Delta/Y-11$	$Y/\Delta-11$

Таблица 3

№ п/п	Наименование параметров и величин	Расчетные формулы
1	Номинальные значения линейных и фазных токов и напряжений	$I_{1\text{ли}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ли}}}; \quad I_{2\text{ли}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{ли}}},$ <p>для Y $I_{\phi} = I_{\text{л}}, \quad U_{\phi} = U_{\text{л}}/\sqrt{3},$ для Δ $I_{\phi} = I_{\text{л}}/\sqrt{3}, \quad U_{\phi} = U_{\text{л}}$</p>
2	Параметры холостого хода	$z_0^* = 1/I_{10}^*; \quad x_0^* = \sqrt{z_0^{*2} - r_0^{*2}};$ $I_{10}^* = i_0/100; \quad r_0^* = r_0^* Z_{\text{Б}};$ $x_0^* = x_0^* Z_{\text{Б}},$ <p>где $Z_{\text{Б}} = U_{1\text{фн}}/I_{1\text{фн}};$ $r_0^* = P_0/(S_{\text{ном}} I_{10}^{*2})$</p>
3	Параметры короткого замыкания	$r_{\text{к}}^* = P_{\text{к}}/S_{\text{ном}}; \quad U_{\text{к}}^* = z_{\text{к}}^* = u_{\text{к}\%}/100;$ $x_{\text{к}}^* = \sqrt{z_{\text{к}}^{*2} - r_{\text{к}}^{*2}};$ $x_{\text{к}} = x_{\text{к}}^* Z_{\text{Б}},$ $r_{\text{к}} = r_{\text{к}}^* Z_{\text{Б}}$
4	Параметры обмоток	$r_1^* = r_2^{*\prime} = 0,5r_{\text{к}}^*; \quad x_1^* = x_2^{*\prime} = 0,5x_{\text{к}}^*;$ $r_1 = r_2^{\prime} = 0,5r_{\text{к}}; \quad x_1 = x_2^{\prime} = 0,5x_{\text{к}}$
5	Параметры намагничивающей ветви	$r_{\text{м}} = r_0 - r_1; \quad x_{\text{м}} = x_0 - x_1$

Изменение напряжения обычно выражается в долях от номинального вторичного фазного напряжения

$$\Delta U_2^* = \Delta U_2 / U_{20} \quad (13)$$

С достаточной точностью изменение напряжения может быть определено по упрощенной схеме замещения, из которой можно получить

$$\Delta U_2^* = I_2^* (r_{\text{к}}^* \cos \varphi_2 + x_{\text{к}}^* \sin \varphi_2), \quad (14)$$

а вторичное напряжение в относительных единицах рассчитывается по формуле

$$U_2^* = 1 - \Delta U_2^* \quad (15)$$

Зависимость $U_2^*(I_2^*)$ рассчитывается для $I_2^* = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$.

Задача 3

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1. Рассчитать и построить рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя (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 двигателя x_1, x_2', r_2' при изменении скольжения от 0 до 1,0.

Исходные данные к задаче приведены в табл. 4. В первой колонке указаны номера вариантов задания, которые определяются по двум последним цифрам шифра. Там также приведены: $P_{2н}$ — номинальная мощность на валу; n_1 — синхронная частота вращения (частота вращения магнитного поля); $\eta_{н}$ — коэффициент полезного действия в номинальном режиме; $\cos\varphi_{1н}$ — номинальный коэффициент мощности.

Сопротивления обмоток и намагничивающего контура даны в относительных единицах. Обмотка статора соединена в «звезду». Номинальное линейное напряжение у двигателей нечетных вариантов $U_{лн} = 380$ В, а для четных вариантов $U_{лн} = 660$ В.

Исходные данные к задаче 3

Вариант (две последние цифры учебного шифра)	$P_{2н}$, 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_{x1}
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

Продолжение табл. 4

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_{x1}
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_w	x_w	r_2'	x_2'	$r_{2л}'$	$x_{кл}$
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

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАЧЕ 3

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

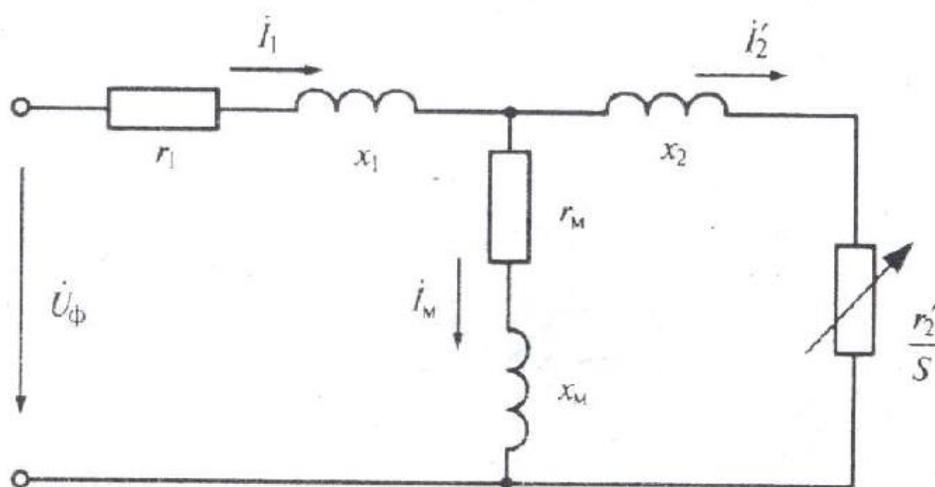


Рис. 3. Схема замещения асинхронного двигателя

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.

Таблица 5

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

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

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

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 $\Delta P_{\text{доб.н}} = 0,005 P_{\text{лн}}$, учтены соответствующим увеличением активного сопротивления обмотки статора.

2. По полученным данным необходимо построить в одних осях рабочие характеристики двигателя, а именно, зависимости I_1 , σ , $\cos \varphi_1$, 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 $I_{\text{лн}}$, $\sigma_{\text{н}}$, $\cos \varphi_{\text{лн}}$, $s_{\text{н}}$, 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 $\sigma_{\text{н}}$, $\cos \varphi_{\text{лн}}$ с заданными в табл. 4.

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:

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

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 $x_{\text{кст}}$.

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 $s = 0$ $M_2 = 0$

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

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

$$z_{дв} = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2s}}{s}\right)^2 + x_{кs}^2}, \quad (21)$$

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:

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

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

где k_r, k_x — коэффициенты увеличения активного сопротивления ротора и уменьшения индуктивного сопротивления, обусловленные вытеснением тока;

$k_{нас}$ — 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 :

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

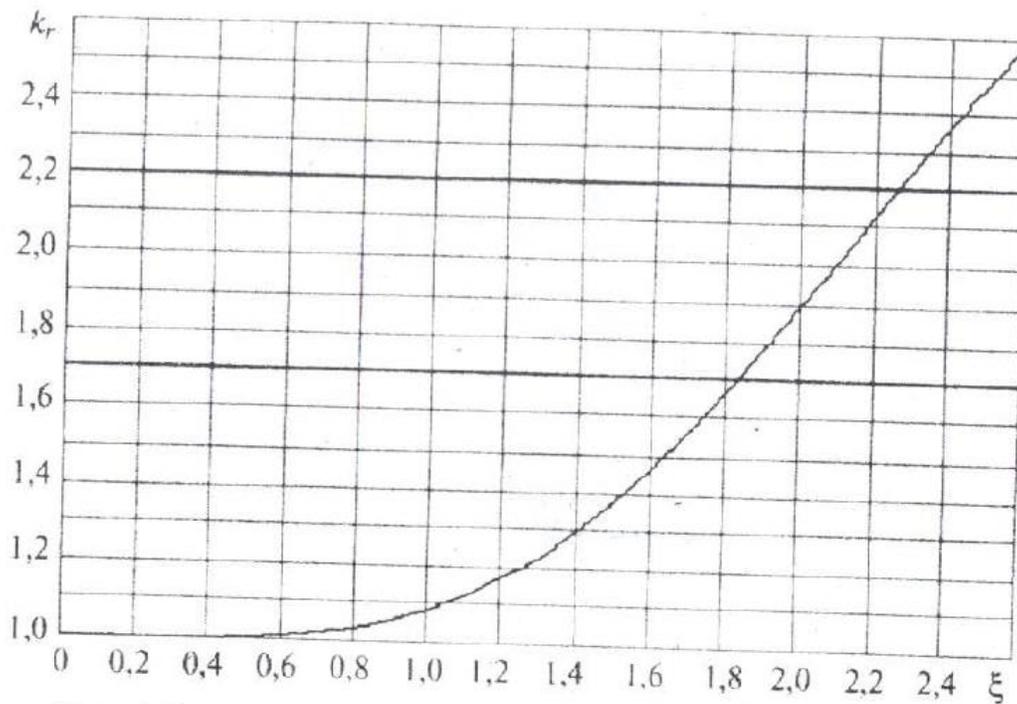


Рис. 4. Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления стержней ротора k_r от приведенной высоты стержня ξ

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

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

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 $P_{2н} = 160$ кВт, $U_{2н} = 660$ В; $n_1 = 1500$ об/мин; $\eta_n = 0,935$; $\cos\phi_{1н} = 0,91$ и сопротивлениями, отн. ед., $r_1 = 0,02$; $x_1 = 0,105$; $r_m = 0,452$; $x_m = 4,6$; $r'_2 = 0,015$; $x_2 = 0,143$; $r'_{21} = 0,027$; $x'_{x1} = 0,146$. Для этого двигателя из расчета рабочих характери-

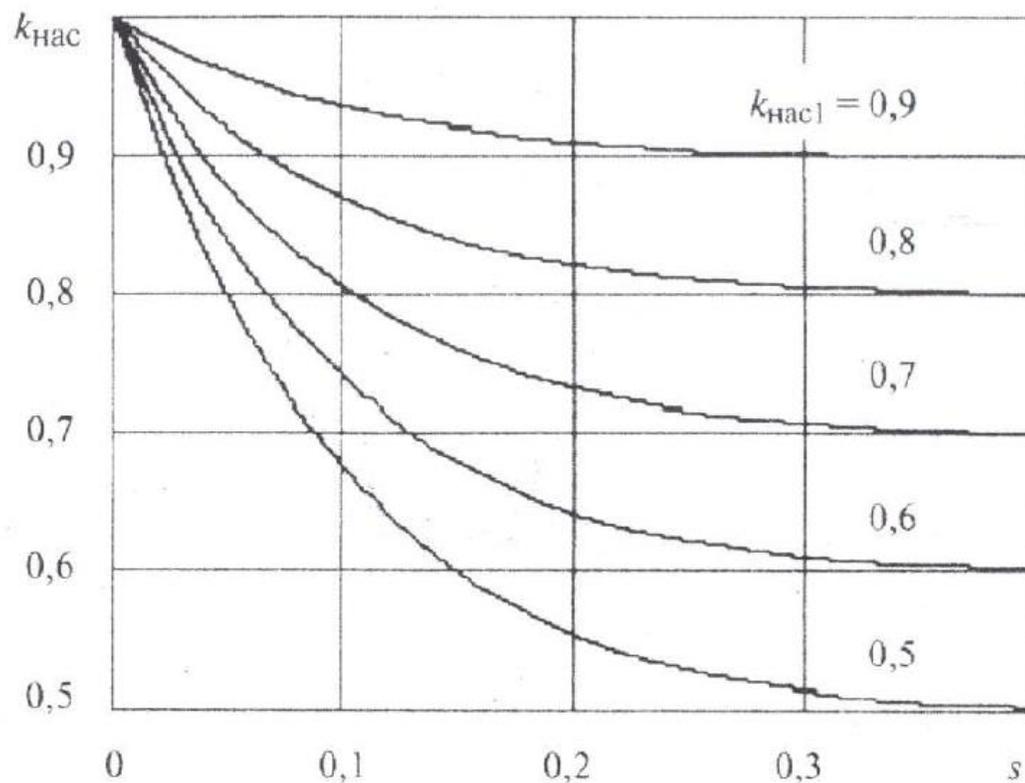


Рис. 5. Зависимость коэффициента насыщения от скольжения при разных $k_{нас1}$

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:

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

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

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
$k_{нас}$	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
$r_{дв}$	0,472	0,909	0,258	0,17	0,1	0,065	0,055	0,05	0,047
$x_{дв}$	4,705	0,41	0,206	0,191	0,169	0,158	0,154	0,15	0,146
$z_{дв}$	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 , Нм	0	1034	2533	2740	2492	1840	1561	1437	1385
I_1 , 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 $s = 0,1$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица

Кривые намагничивания электротехнической стали

Сталь 1211 (для якоря)		Сталь 3411 (для полюсов)		Сталь Ст.3 (для ярма)	
В, Т	Н, А/м	В, Т	Н, А/м	В, Т	Н, А/м
0,4	140	1,0	160	0,1	80
0,5	171	1,05	180	0,2	160
0,6	211	1,1	210	0,3	240
0,7	261	1,15	240	0,4	320
0,8	318	1,2	280	0,5	400
0,9	397	1,25	320	0,6	490
1,0	502	1,3	370	0,7	580
1,1	647	1,35	420	0,8	680
1,2	843	1,4	500	0,9	780
1,3	1140	1,45	630	1,0	920
1,4	1580	1,5	800	1,1	1100
1,5	2500	1,55	980	1,2	1300
1,6	4370	1,6	1200	1,3	1600
1,7	7780	1,65	1520	1,4	2100
1,8	12800	1,7	2000	1,5	2900
1,9	19700	1,75	2680	1,6	4100
2,0	31000	1,8	3500	1,7	5720
2,1	66500	1,85	4980	1,8	7760
2,2	144000	1,9	10000	1,9	10230
2,3	224000	2,0	40000	2,0	13110